

Національна академія наук України  
Інститут електродинаміки

**ПРИТИСКАЧ ІВАН ВАСИЛЬОВИЧ**

УДК 621.314.222.600

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВИХ  
ТРАНСФОРМАТОРІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ  
НАПРУГОЮ 6–110 КВ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «КПІ», м. Київ.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
**Денисюк Сергій Петрович**, Інститут енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «КПІ», м. Київ, директор.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, с.н.с.  
**Тугай Юрій Іванович**, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ, завідувач відділу оптимізації систем електропостачання;

– кандидат технічних наук, доцент  
**Рубаненко Олександр Євгенович**, Вінницький національний технічний університет МОН України, м. Вінниця, доцент кафедри електричних станцій та систем.

Захист дисертації відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 р. об \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.187.03 в Інституті електродинаміки НАН України за адресою: 03680, Київ – 57, проспект Перемоги, 56, тел. 456-91-15.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України за вищевказаною адресою.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О. В. Бібік

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Силові трансформатори є одними з найбільш важливих та масових елементів електричних мереж. Аварійний вихід з ладу трансформаторів ставить під загрозу нормальне функціонування підстанцій, тим самим безпосередньо впливаючи на надійність електроенергосистем в цілому. Підтримка працездатності та підвищення довговічності силових трансформаторів є важливим завданням, ефективне вирішення якого залежить від якості технічного обслуговування в процесі експлуатації.

Прийнята в електропостачальних компаніях стратегія планово-попереджувальних ремонтів стає малоєфективною в сучасних умовах як з економічних причин (необґрунтовані витрати на обстеження устаткування, що не потребує термінового ремонту, та витрати через можливий недовідпуск електроенергії при виведенні трансформатора в плановий ремонт), так і через збільшення ймовірності відмови обладнання в міжремонтний період. Перехід до нової стратегії технічного обслуговування за фактичним станом вимагає розробки нових та удосконалення існуючих методів діагностування із застосуванням сучасних комп'ютерних технологій автоматичного збору, обробки та аналізу даних.

Впровадження систем діагностування силових трансформаторів особливо актуально для сучасної електроенергетики, яка характеризується значним старінням парку електрообладнання. Близько 40 – 50% трансформаторів в Україні та Росії, 50% – в Європі і понад 65% – в США відпрацювало свій встановлений термін служби.

Значний внесок у вирішення питань розробки науково-технічних основ діагностування технічного стану силових трансформаторів в електричних мережах внесли такі вітчизняні та закордонні вчені: Стогній Б.С., Алексєєв Б.А., Соколов В.В., Рассальський А.Н., Овсянніков А.Г., Дар'ян Л.А., Львов М.Ю., Костєрев М.В., Вдовіко В.П., Сопель М.Ф., Мордкович А.Г., Поляков М.А., Русов В.А., Туркот В.А., Живодерніков С.В., Цфасман Г.М., Boss P., Ecknauer E., Gysi R., Knab H.J., Leibfried Th., Marks J. та інші.

Активно розвиваються та впроваджуються системи діагностування силових трансформаторів, розроблені в Україні та країнах СНД, серед них: комплекс діагностування основної ізоляції трансформаторів на базі інформаційно-діагностичного комплексу «Регіна», системи SAFE-T, TDM, СУМ-ТО. Існує також ряд розробок США та країн Євросоюзу (системи TPAS, Siemens TMDS, ABB TEC, AREVA T&D MS 3000).

Зазначені вище системи діагностування в переважній більшості випадків встановлюються тільки на потужні нові трансформатори, які вводяться в експлуатацію, що пояснюється високою вартістю апаратного та програмного забезпечення. Виникає задача розробки та удосконалення моделей і методів діагностування для трансформаторів малої та середньої потужностей, а також трансформаторів зі значним терміном служби, коли використання існуючих методів (наприклад, вібраційний метод, визначення вмісту розчинених у маслі газів, виявлення часткових розрядів, аналіз перехідних функцій за допомогою імпульсної та частотної характеристик) економічно недоцільне. В результаті аналізу та

співставлення існуючих систем діагностування визначено, що алгоритми їх роботи не завжди дають змогу достовірно оцінювати технічний стан трансформаторів в умовах експлуатації електричних мереж, оскільки вони враховують тільки граничний контроль за вимірними діагностичними параметрами.

Визначені положення обумовлюють актуальність наукового завдання – розробки нових та удосконалення існуючих математичних моделей і методів визначення та аналізу діагностичних параметрів стану силових трансформаторів в електричних мережах напругою 6–110 кВ з метою підвищення їх довговічності та рівня технічного обслуговування в процесі експлуатації.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі електропостачання Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» у процесі виконання планів науково-дослідних робіт за темами: № 2668-п «Розвиток методологічних засад інтелектуалізації процесів генерації та розподілу електроенергії в інтегрованих мережах з активним споживачем» (№ ДР 0113U002489); № 2537-п «Технологія інтегрованих енергоефективних енергостанцій з комплексним застосуванням засобів розосередженої генерації та smart-технологій» (№ ДР 0112U002685); «Мультиагентні інтелектуальні енергетичні системи генерації, передачі та розподілу електроенергії з активним (кваліфікованим) споживачем» (№ ДР 0114U006363).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка та удосконалення математичних моделей і методів визначення та аналізу діагностичних параметрів стану силових трансформаторів для підвищення рівня технічного обслуговування та збільшення терміну експлуатації силових трансформаторів в електричних мережах напругою 6–110 кВ.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі задачі:

- дослідження, співставлення та аналіз існуючих математичних моделей, методів та систем діагностування силових трансформаторів;
- побудова функціональної структури системи діагностування силових трансформаторів електричних мереж напругою 6–110 кВ;
- розробка математичних моделей визначення діагностичних параметрів стану силових трансформаторів з врахуванням параметричної ідентифікації коефіцієнтів диференціальних рівнянь теплової моделі та моделі вологовмісту на основі даних, вимірних для нормального режиму мережі;
- розробка математичних моделей динамічного оцінювання значень діагностичних параметрів;
- аналіз результатів використання різних технічних критеріїв стохастичного оцінювання навантажувальної здатності силових масляних та сухих трансформаторів з використанням сучасних теплових моделей трансформаторів;
- розробка методу оцінювання навантажувальної здатності силових трансформаторів, який враховує особливості режимів роботи трансформаторів, що живлять споживачів з нерегулярним характером навантаження;
- розробка програмно-алгоритмічного забезпечення для оцінювання режимів роботи силових трансформаторів за технічними та економічними критеріями;

– експериментальна перевірка розроблених математичних моделей, методів та алгоритмів на основі даних, зареєстрованих системами моніторингу силових трансформаторів, що експлуатуються в енергосистемі.

*Об'єкт дослідження* – процес діагностування силових трансформаторів в електричних мережах напругою 6–110 кВ.

*Предмет дослідження* – математичні моделі та методи діагностування силових трансформаторів в електричних мережах напругою 6–110 кВ.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі використано наступні методи: математичного моделювання – під час побудови математичних моделей визначення діагностичних показників; динамічного оцінювання стану – для оцінювання значень температури масла, вмісту вологи в маслі та тангенса кута діелектричних втрат високовольтних вводів; кластерного аналізу – для визначення статистичних характеристик неперіодичного випадкового процесу навантаження; цифрової обробки сигналів – для обробки експериментальних даних, зареєстрованих інформаційно-діагностичним комплексом «Регіна»; розв'язання диференціальних рівнянь з використанням комп'ютерного моделювання – для імітаційного моделювання температур трансформатора з використанням динамічної теплової моделі. Для розробки алгоритмів і програм використано методи прикладного програмування та матричної алгебри, а також теорію статистичної обробки даних – під час стохастичного оцінювання навантажувальної здатності за технічними критеріями.

#### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. Вперше на основі фільтра Калмана розроблено математичні моделі динамічного оцінювання діагностичних параметрів трансформатора: температури масла, вмісту вологи в маслі та тангенса кута діелектричних втрат високовольтних вводів, використання яких дає змогу підвищити достовірність результатів діагностування та визначати коефіцієнти рівнянь теплової моделі трансформатора.

2. Удосконалено математичні моделі визначення діагностичних параметрів стану трансформатора завдяки уточненню коефіцієнтів диференціальних рівнянь теплової моделі та моделі вологовмісту на основі параметричної ідентифікації з використанням даних, виміряних за нормального режиму електричної мережі, що підвищує достовірність виявлення дефектів трансформатора.

3. Удосконалено метод визначення статистичних характеристик випадкового процесу навантаження за рахунок використання кластерного аналізу для ідентифікації режимів роботи споживачів електроенергії, що дає змогу підвищити достовірність результатів оцінювання навантажувальної здатності трансформаторів з неперіодичним навантаженням.

4. Набув подальшого розвитку метод стохастичного оцінювання навантажувальної здатності силових трансформаторів в частині забезпечення ефективного застосування технічних критеріїв за результатами імітаційного моделювання навантаження, чим забезпечується більш високий рівень достовірності результатів оцінювання допустимості певних режимів роботи трансформаторів.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в наступному:

- розроблено методику визначення індексу стану силового трансформатора, на підставі якого приймається рішення про проведення комплексу заходів з технічного обслуговування силового трансформатора;
- розроблено алгоритм використання статистичних характеристик неперіодичного випадкового процесу навантаження для оцінювання допустимості певних режимів роботи силових трансформаторів;
- розроблено комплекс програм щодо стохастичного оцінювання режимів роботи трансформатора за технічними та економічними критеріями на основі імітаційного моделювання, який використовується в процесі експлуатації електричних мереж напругою 6–110 кВ.

Результати роботи впроваджено на підприємствах ТОВ «Електросфера» і ТОВ «НДІ Перетворювач» у вигляді математичних моделей та алгоритмів, які використовуються для розробки програмного забезпечення систем діагностування силових трансформаторів, та в навчальному процесі на кафедрі електропостачання Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ» і кафедрі електропостачання промислових підприємств електротехнічного факультету Запорізького національного технічного університету та використовуються при виконанні студентами бакалаврських, магістерських та дипломних робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати та положення дисертаційної роботи автором отримані самостійно. У друкованих працях, які були опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать наступні результати: концепція побудови та алгоритми роботи системи on-line діагностування, яка передбачає оцінку стану силових трансформаторів [1, 2, 16]; розробка методики визначення індексу стану, що базується на системі оцінок значень діагностичних параметрів трансформатора [2]; математичні моделі визначення діагностичних параметрів стану трансформаторів, що передбачають параметричну ідентифікацію коефіцієнтів диференціальних рівнянь, на наборі даних, виміряних за нормального режиму електричної мережі [3, 11]; результати стохастичного оцінювання навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів на основі імітаційного моделювання параметрів режимів роботи [4, 10, 12, 13, 19]; метод визначення статистичних характеристик електричного навантаження як неперіодичного нестационарного випадкового процесу [5]; розробка та аналіз результатів роботи алгоритму стохастичного оцінювання навантажувальної здатності сухих трансформаторів за критеріями допустимого нагрівання та зносу ізоляції [6]; розробка алгоритму та програми, які дозволяють отримувати характеристики оптимальних за критерієм економічності параметрів розподілу електричних навантажень [7]; результати використання стохастичних моделей процесів у трансформаторі для оцінювання залишкового ресурсу та допустимості певних режимів навантаження [8, 14].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати наукових досліджень доповідалися на десяти міжнародних та всеукраїнських науково-практичних і науково-технічних конференціях, зокрема: «I Науково-практична конференція «Електричні мережі: сучасні проблеми моніторингу та керування 2012» (Жденієве, 2012 р.); «II Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування

електроустановками (ОКЕУ-2013)» (Вінниця, 2013 р.); «Міжнародна конференція «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ, 2011, 2012, 2013 рр.); «V Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості» (Воловець, 2014 р.); «Міжнародна науково-технічна, навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – (REMS'14)» (Київ, 2014 р.); «Аспірантські читання пам'яті Праховника А.В.» (Київ, 2012, 2013 рр.); «VII Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація транспорту» ТРАНСЕЛЕКТРО-2014» (Одеса, 2014 р.).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 20 наукових праць, у тому числі 10 статей у наукових фахових виданнях України, 2 статті у виданнях, що входять до наукометричних баз даних, 1 стаття у закордонному виданні, 2 авторських свідоцтва, 5 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи становить 193 сторінки, у тому числі 141 сторінка основного тексту, 58 рисунків, 28 таблиць, список використаних джерел із 135 найменувань та 4 додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, а також наведено відомості про апробацію отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз факторів, що впливають на стан силових трансформаторів та принципів їх діагностування. За результатами аналізу сформовано структуру задач, що ставляться перед системами діагностування, та вимоги до таких систем залежно від класу напруги та потужності трансформаторів, а також розглянуто шляхи розв'язання зазначених задач.

З метою підвищення надійності роботи та запобігання аварійному виходу з ладу потужних силових трансформаторів як в Україні, так і за кордоном інтенсивно розвиваються та впроваджуються методи безперервного діагностування. Аналіз наукових та нормативних джерел показав, що використання систем діагностування трансформаторів дає змогу практично повністю виключити міжремонтні перевірки такого електрообладнання.

Системи діагностування контролюють такі основні параметри трансформатора, як відносну швидкість старіння паперової ізоляції, ступінь деформації обмоток, стан трансформаторного масла, стан пристрою регулювання напруги під навантаженням, стан ізоляції високовольтних ввідів. Проте контроль вказаних вище параметрів часто ускладнений недоступністю активної частини і високими значеннями робочих напруг. Також у великій частині трансформаторів, які знаходяться в експлуатації, закінчився або добігає кінця їх плановий термін служби. Виявлення всього спектра можливих дефектів трансформаторного обладнання важко забезпечити як з технічних, так і з економічних причин.

Показано, що для діагностування технічного стану обладнання класу 110 кВ доцільним є застосування систем з обмеженим числом діагностичних параметрів.

Найбільш ефективним методом діагностування стану є безперервний контроль непрямих параметрів стану ізоляції, при цьому технічно й економічно доцільно у безперервному режимі проводити контроль таких параметрів, як струм  $i$ , напруга  $u$ , активна  $P$  та реактивна  $Q$  потужності; гази, розчинені в маслі, та вміст вологи в маслі; температура масла; зміна ємності  $C$  і тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  ввводів.

Для трансформаторів малої потужності та розподільних трансформаторів з напругою ВН 6–35 кВ встановлення спеціалізованих датчиків для визначення діагностичних параметрів часто взагалі не є доцільним. У цьому випадку актуально оцінювати погіршення стану трансформатора, зокрема його ізоляції, на основі аналізу режимів роботи за використання даних про навантаження, отриманих з існуючих систем вимірювань та автоматизації.

Встановлено, що режим навантаження трансформатора враховує вплив комплексу факторів на технічний стан ізоляції і, таким чином, може виступати в якості інформативного показника для діагностування. Технічні можливості систем діагностування, зокрема наявність в їх складі потужних обчислювальних пристроїв та доступність досить деталізованої інформації про навантаження, яку можна представити у вигляді випадкового процесу, дають змогу значно підвищити достовірність оцінювання режиму навантаження за допомогою використання більш точних стохастичних моделей навантажувальної здатності.

У **другому розділі** представлено розроблені структуру, математичні моделі та алгоритми роботи системи діагностування трансформаторів в робочих режимах.

Функціональну структуру системи діагностування трансформатора сформовано в ієрархічному вигляді з використанням чотирьох рівнів (рис. 1).

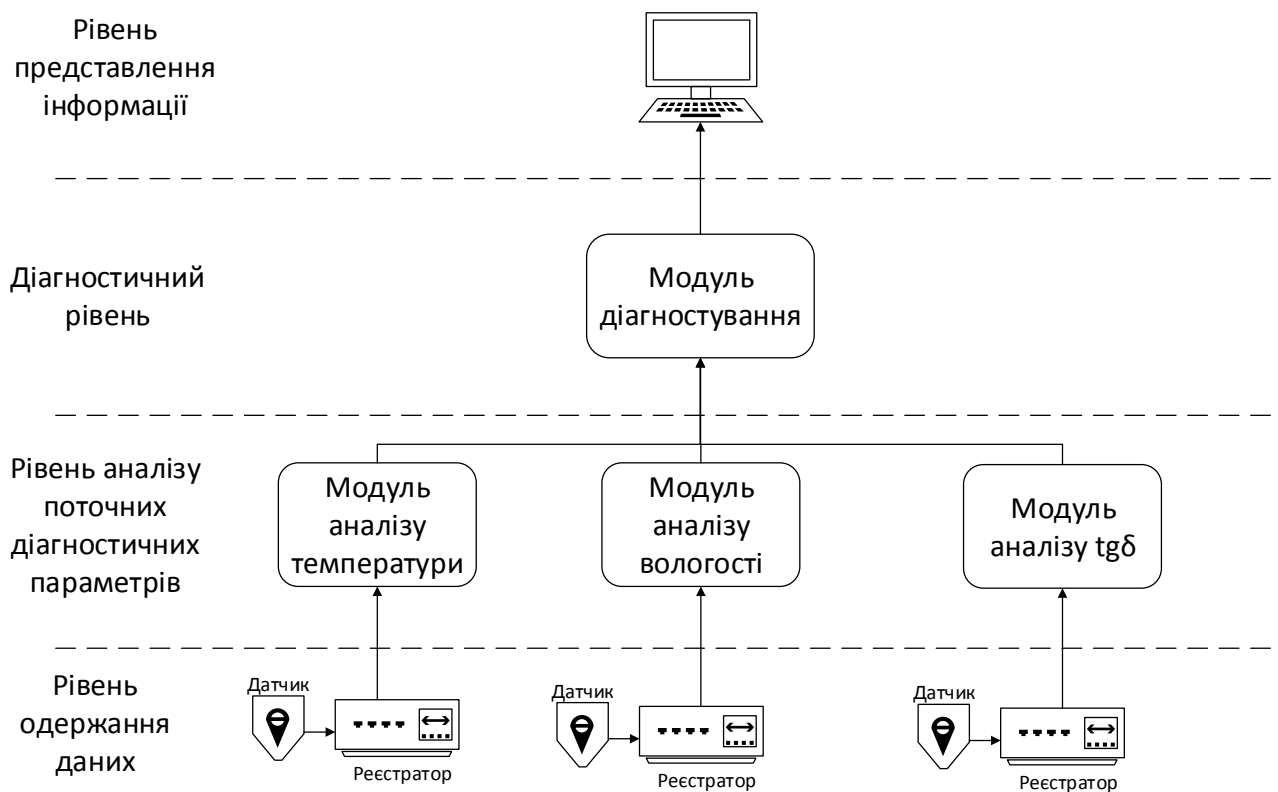


Рис. 1. Функціональна структура системи діагностування трансформатора



Нижнім рівнем є рівень одержання даних від датчиків та систем моніторингу. Зважаючи на невисоку економічно доцільну вартість системи діагностування для трансформаторів середньої потужності, датчики, за допомогою яких відбувається вимірювання діагностичних параметрів, часто мають невисоку точність. Тому для підвищення достовірності значень діагностичних параметрів використано метод динамічного оцінювання стану на базі фільтра Калмана.

Трансформатор розглянуто як стохастичну диференціальну систему. Складовими вектора стану трансформатора  $[\mathbf{x}]_k$  вибрано температуру масла, вміст вологи в маслі та тангенс діелектричних втрат високовольтних вводів. Для оцінювання кожного з показників вибрано фільтр Калмана, зважаючи на наявність простих математичних моделей діагностичних показників з лінійними диференціальними рівняннями. Використання фільтра Калмана дало змогу забезпечити незміщену оцінку стану з мінімальною дисперсією помилки цієї оцінки.

Вимірювання кожного показника агреговано шляхом використання математичної моделі процесу у вигляді рівнянь стану щодо вектора  $[\mathbf{x}]_k$  та моделі вимірювань, котра зв'язує вектор  $[\mathbf{x}]_k$  та вектор вимірювань  $[\mathbf{z}]_k$ :

$$[\mathbf{x}]_k = [F][\mathbf{x}]_{k-1} + [B][\mathbf{u}]_k + [\mathbf{w}]_k; \quad (1)$$

$$[\mathbf{z}]_k = [C][\mathbf{x}]_k + [\mathbf{v}]_k. \quad (2)$$

де  $[F]$  – матриця переходу;  $[C]$  – матриця вимірювань;  $[B]$  – матриця керування;  $[\mathbf{u}]_k$  – вектор керуючих впливів;  $[\mathbf{w}]_k = N(0, [W]_k)$  – вектор «білого» шуму з нульовим математичним очікуванням  $[\bar{\mathbf{w}}]_k = 0$  та коваріаційною матрицею  $[W]_k = \langle [\mathbf{w}]_k [\mathbf{w}]_k^T \rangle$ ;  $[\mathbf{v}]_k = (0, [V]_k)$  – вектор «білого» шуму вимірювань. Випадкові процеси  $[\mathbf{w}]_k$  та  $[\mathbf{v}]_k$  вважаються незалежними. Точність оцінки  $[\hat{\mathbf{x}}]_k$  процесу  $[\mathbf{x}]_k$  описується коваріаційною матрицею  $[P]_k = \langle [\mathbf{e}]_k [\mathbf{e}]_k^T \rangle$ , де  $[\mathbf{e}]_k = [\mathbf{x}]_k - [\hat{\mathbf{x}}]_k$  – вектор похибки.

Виходячи з диференціального рівняння для температури масла згідно з базовою тепловою моделлю, представленою в стандартах Міжнародної електротехнічної комісії, побудовано вектор стану  $[\mathbf{x}]_k$  та матрицю переходу  $[F]$ :

$$[\mathbf{x}]_k = \begin{bmatrix} \theta_o \\ \Delta\theta_{h1} \\ \Delta\theta_{h2} \end{bmatrix}; \quad [F] = \text{diag} \left\{ 1 - \frac{1}{k_{11}\tau_o}; 1 - \frac{1}{k_{22}\tau_w}; 1 - \frac{k_{22}}{\tau_o} \right\}. \quad (3)$$

де  $\theta_o$  – температура масла;  $\Delta\theta_{h1}$  та  $\Delta\theta_{h2}$  – складові перевищення температури найбільш нагрітої точки обмотки;  $\tau_o$ ,  $\tau_w$  – постійні часу нагрівання масла та обмотки;  $k_{11}$ ,  $k_{21}$ ,  $k_{22}$  – коефіцієнти, які характеризують трансформатор.

Алгоритм роботи фільтра Калмана включає такі етапи: передбачення з екстраполяцією вектора стану за оцінкою вектору стану з кроку  $(k-1)$  на крок  $k$ ; визначення коваріаційної матриці для екстрапольованого вектора стану; етап корекції, що полягає в обчисленні оптимальної за Калманом матриці коефіцієнтів підсилення та корекції отриманої раніше екстраполяції вектора стану; розрахунок коваріаційної матриці оцінки вектора стану системи.

Вектор стану та матрицю переходу для задачі оцінки вмісту вологи в маслі, враховуючи диференціальне рівняння процесу зміни вологовмісту, представлено як:

$$[\mathbf{x}]_k = \begin{bmatrix} M_m \\ \frac{dM_m}{dt} \\ M_{o-ss} \\ \frac{dM_{o-ss}}{dt} \end{bmatrix}; \quad [F]_k = \begin{bmatrix} 0 & -\tau_p & 1 & \Delta t^- \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & \tau_p & 0 & -\Delta t^- \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Дані вимірювань температури масла та характеристики рівноважного вологовмісту дають можливість розрахувати рівноважний вміст вологи в маслі за стаціонарного стану  $M_{o-ss}$ . Вектор  $[z]_k$  та матриця вимірювань  $[C]_k$  записані як:

$$[z]_k = \begin{bmatrix} M_m \\ M_{o-ss}(M_m, \theta_o) \end{bmatrix}; \quad [C]_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Для процесу зміни тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  відсутні єдині для всіх класів обладнання диференціальні рівняння. За результатами досліджень прийнято рішення використати фільтр Калмана, вважаючи всі зміни вектора стану складовими похибок процесу. Тоді вектор стану та матриця переходу мають такий вигляд:

$$[\mathbf{x}]_k = \begin{bmatrix} \text{tg}\delta_A \\ \text{tg}\delta_B \\ \text{tg}\delta_C \end{bmatrix}; \quad [F]_k = \text{diag}\{1 \quad 1 \quad 1\}. \quad (6)$$

Оптимальний рівень фільтрації для  $\text{tg}\delta$  досягається підбором значень матриці коефіцієнтів підсилення за Калманом  $[K]_k$ .

Показано, що диференціальні рівняння теплової моделі трансформатора містять коефіцієнти, які часто є невідомими або які важко отримати без виконання складних лабораторних досліджень та експериментів. Для базової теплової моделі трансформатора невідомими коефіцієнтами прийнято такі величини: постійна часу масла  $\tau_0$ ; перевищення температури масла за номінального навантаження  $\Delta\theta_{or}$ ; відношення втрат  $R$ ; показник степеня масла  $\eta$ . Вектор невідомих коефіцієнтів рівнянь математичної моделі  $[\lambda]$  записано у такому вигляді:

$$[\lambda] = [\tau_0 \quad \Delta\theta_{or} \quad R \quad \eta]^T. \quad (7)$$

Диференціальне рівняння зміни температури є нелінійним стосовно складників розширеного вектора стану  $[\mathbf{x}']_k$ , тому використання класичного фільтра Калмана неможливе. Для оцінювання стану запропоновано використовувати розширений фільтр Калмана (extended Kalman filter), що лінеаризується навколо оцінки поточного середнього значення та коваріації. Тоді матриці переходу  $[F]_{k-1}$  та вимірювань  $[C]_k$  визначаються як матриці Якобі:

$$[F]_{k-1} = \left. \frac{\partial f([\mathbf{x}']_{k-1}, k-1)}{\partial \mathbf{x}} \right|_{[\hat{\mathbf{x}}']_{k-1|k-1}}; \quad (8)$$

$$[C]_k = \left. \frac{\partial h([\mathbf{x}']_k, k)}{\partial \mathbf{x}} \right|_{[\hat{\mathbf{x}}']_{k|k-1}}. \quad (9)$$

Для побудови модулів рівня аналізу поточних діагностичних параметрів запропоновано загальну математичну модель, яка представлена в табл. 1.

Таблиця 1

### Опис математичної моделі визначення діагностичних параметрів

	Неперервна модель	Дискретна модель
<b>Модель базових значень</b>	$x_M(t) = f([\mathbf{u}(t)], [\lambda], t)$ $[\mathbf{u}(t)]$ – змінні моделі $[\lambda]$ – коефіцієнти моделі	$x_{i,M} = f([\mathbf{u}]_i, [\lambda])$ $[\mathbf{u}]_i$ – змінні моделі $[\lambda]$ – коефіцієнти моделі
<b>Відхилення вимірюваного значення</b>	$v(t) = \frac{x_P(t) - x_M(t)}{x_M(t)}$	$v_i = \frac{x_{i,P} - x_{i,M}}{x_{i,M}}$
<b>Індикатор середнього значення</b>	$v_\mu(t) = \frac{1}{T_{b,\mu}} \int_{t-T_{b,\mu}}^t v(t) dt$	$v_{i,\mu} = \frac{1}{N_{b,\mu}} \sum_{k=i-N_{b,\mu}}^i v_k$
<b>Функція розподілу</b>	$CDF(\psi, t) = p( v(\tau)  \leq \psi, \tau \in (t - T_{b,\alpha}, t))$	$CDF_i(\psi) = p( v_{i,k}  \leq \psi, k = (i - N_{b,\alpha}) \dots i)$
<b>Індикатор квантиля</b>	$v_\alpha(t) = \inf \{ \psi \in \mathbb{R} : CDF(\psi, t) \geq \alpha_v \}$	$v_{i,\alpha} = \inf \{ \psi \in \mathbb{R} : CDF_i(\psi) \geq \alpha_v \}$
<b>Індикатор лінійного тренду</b>	$v_\delta(t) = \frac{12}{T_{b,\delta}} \left( \frac{1}{2} \int_0^{T_{b,\delta}} v(t-\tau) d\tau - \frac{1}{T_{b,\delta}} \int_0^{T_{b,\delta}} \tau v(t-\tau) d\tau \right)$	$v_{i,\delta} = \frac{12}{N_{b,\delta}} \left( \frac{1}{2} \sum_{k=i-N_{b,\delta}}^i v_k - \frac{1}{N_{b,\delta}} \sum_{k=i-N_{b,\delta}}^i (i-k)v_k \right)$

Алгоритм роботи модулів передбачає постійне порівняння вимірних значень поточних значень з імітованими за допомогою математичних моделей.

Для формування базових значень вологовмісту масла використано математичну модель, що описує перехідний процес зміни вологості масла. Рівняння цього процесу залежить від типу циркуляції масла (примусова чи природна). Коли маслонасос ввімкнений, дискретна форма запису рівняння має такий вигляд:

$$M_m(t) = k_{1hf}M_m(t-1) + k_{2hf}M_m(t-2) + k_{3hf}M_{oil-ss}(t) + k_{4hf}M_{oil-ss}(t-1). \quad (10)$$

За природної циркуляції масла:

$$M_m(t) = k_{1hn}M_m(t-1) + k_{2hn}M_m(t-2) + k_{3hn}M_m(t-3) + k_{4hn}M_{oil-ss}(t) + k_{5hn}M_{oil-ss}(t-1). \quad (11)$$

У рівняннях (10) та (11) введено позначення:  $M_m(t)$  – вміст вологи в маслі у певний момент часу;  $M_{oil-ss}(t)$  – рівноважний вміст вологи в маслі за стаціонарного стану;  $k_{i,hf}$  та  $k_{j,hn}$  – коефіцієнти, що характеризують конкретний трансформатор.

В якості дійсного вологовмісту паперової ізоляції  $M_{oil-ss}(t)$  прийнято значення, для якого виконується критерій мінімуму середньоквадратичної похибки змодельованих значень від масиву виміряних значень:

$$M_{pap-ss.p} : p, \varepsilon_p = \min_{k=1,2,\dots,l} \varepsilon_k; \varepsilon_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_{m,i} - M_{oil-ss,i})^2}, \quad k = 1, 2, \dots, l. \quad (12)$$

Для визначення та уточнення коефіцієнтів рівнянь теплової моделі та моделі вологовмісту запропоновано застосувати метод параметричної ідентифікації з використанням даних, виміряних за нормального режиму роботи обладнання, коли відсутність дефектів підтверджена комплексним обстеженням. Задача параметричної ідентифікації моделей полягає у пошуку коефіцієнтів моделі  $[\lambda]_{opt}$ , які для типового режиму навантаження трансформатора забезпечує мінімум цільової функції:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\lambda \in \Omega} f([\lambda]) \\ f([\lambda]) = \sum_i w_i (x_{i,p} - x_{i,m}([\mathbf{u}]_i, [\lambda]))^2 \end{array} \right. \quad (13)$$

З метою спрощення процедури класифікації стану трансформатора запропоновано виконувати об'єднання оцінок первинних характеристик на основі

Таблиця 2

### Класифікація трансформаторів за індексом стану

Індекс стану $S_I$	Характеристика стану	Рекомендовані дії
[0; 0,1]	Хороший	Нормальна експлуатація
(0,1; 0,3]	Задовільний	Потрібен періодичний контроль з невеликою частотою
(0,3; 1]	Поганий	Потрібен періодичний або безперервний контроль
>1	Критичний	Трансформатор потребує комплексної діагностики

визначення інтегрального індексу стану  $S_I$ . Для індексу стану визначається дискретна оцінка, що відповідає заданим рівням  $S_{I,k}$ , отриманим на основі експертних оцінок. Наприклад, залежно від значення індексу стану трансформатора запропонована класифікація на декілька груп, як показано у табл. 2.

У **третьому розділі** представлено розроблені методи та алгоритми оцінювання навантажувальної здатності та режиму роботи трансформаторів.

Розв'язання задачі адекватної оцінки навантажувальної здатності силових трансформаторів виникає як складова побудови системи діагностування, оскільки для оцінки стану потрібно виконувати аналіз допустимості режимів роботи обладнання.

Оцінювання навантажувальної здатності за технічними критеріями здійснено на основі статистичної обробки змодельованої сукупності реалізацій температур найбільш нагрітої точки обмотки  $\theta_{wh}(t)$  та зносу ізоляції  $L_{n.v}$  за різних навантажень та параметрів теплової моделі трансформаторів.

На рис. 2 представлено розроблений алгоритм знаходження допустимих значень коефіцієнта варіації  $v[I]$  та математичного очікування  $\bar{I}$  випадкового процесу навантаження за умови забезпечення номінального терміну служби.

Найчастіше електричні навантаження змінюються з певним періодом, рівним добі, зміні, технологічному циклу тощо. У такому випадку можливо встановити

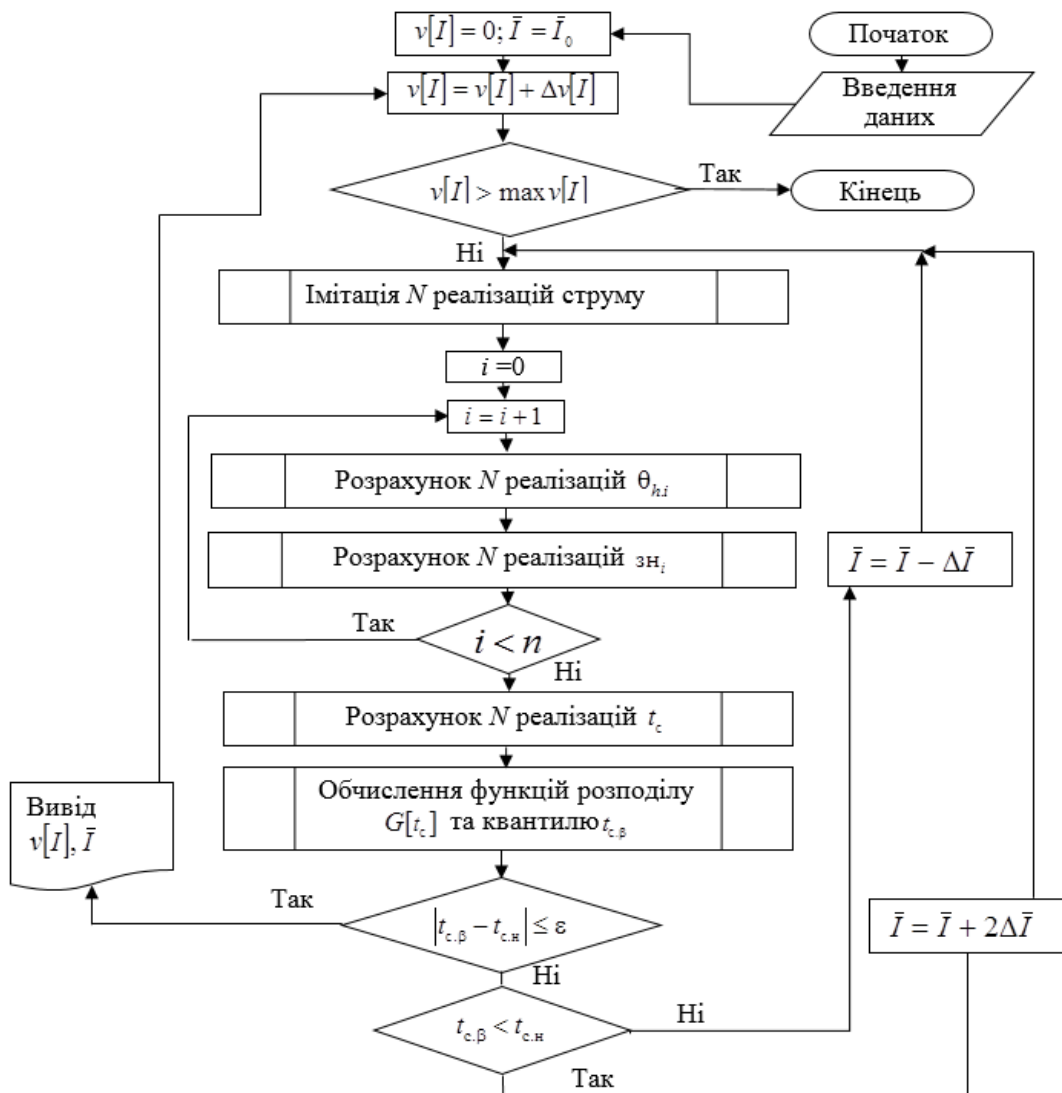


Рис. 2. Алгоритм визначення допустимих параметрів  $v[I]$ ,  $\bar{I}$  за умови забезпечення номінального терміну служби трансформатора

базову тривалість  $T_0$ , рівну цьому періоду, і розглядати масив даних як реалізації певного випадкового процесу. Проте існують споживачі з нерегулярним режимом роботи, характерним для несталого технологічного процесу. У такому випадку неможливо встановити базовий час  $T_0$ , а потрібно визначати характеристики випадкового процесу тільки за однією його реалізацією.

Для визначення наявності періодичних коливань у випадковому процесі навантаження запропоновано знаходити автокореляційну функцію, яка визначається як

$$A_H(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^N (H(t_i) - \bar{H})(H(t_i - \tau) - \bar{H})}{N - 1}, \quad (14)$$

де  $H(t_i)$  – навантаження у момент часу  $t_i$ ;  $\bar{H}$  – середнє значення навантаження;  $N$  – кількість інтервалів  $\delta t_i$ .

Для обробки даних у разі нерегулярного характеру навантаження розроблено метод, який включає такі етапи: знаходження інтервалів стаціонарності  $\Delta t_\mu$  процесу  $H(t)$ ; побудова функції розподілу та визначення закону розподілу на кожному з отриманих інтервалів стаціонарності; визначення оцінок математичного очікування  $\tilde{H}_\mu$ , середньоквадратичного відхилення  $\tilde{\sigma}_\mu[H]$ , коефіцієнта варіації  $\tilde{v}_\mu[H]$  та нормованої автокореляційної функції  $\tilde{\rho}_\mu(\tau)$ ; кластеризація інтервалів стаціонарності за значеннями параметрів розподілу у цих інтервалах, з використанням методу  $k$ -внутрішньогрупових середніх.

За допомогою кластеризації визначаються інтервали, що відповідають однаковим режимам роботи досліджуваного споживача. В якості ознак кластеризації вибрано математичне очікування  $\tilde{H}_\mu$  та коефіцієнт варіації  $\tilde{v}_\mu[H]$  на інтервалі стаціонарності. Ці величини нормуються і перетворюються у вектор ознак кластеризації  $[\mathbf{x}] = [\tilde{H}_\mu, \tilde{v}_\mu]$ . Близькість об'єктів у кластері визначається за Евклідовою метрикою:

$$d([\mathbf{x}]_i, [\mathbf{x}]_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{i,k} - x_{j,k})^2}, \quad (15)$$

де  $x_{i,k}$ ,  $x_{j,k}$  – компоненти вектора ознак;  $m = 2$  – розмірність вектора ознак.

Для аналізу результатів роботи запропонованого методу виконано обробку даних навантаження типової насосної станції. У результаті розподілу інтервалів стаціонарності отримано чотири кластери з параметрами, наведеними в табл. 3.

Розроблено алгоритм, який дає можливість використовувати одержані статистичні характеристики неперіодичного випадкового процесу навантаження для оцінювання допустимості певних режимів роботи силових трансформаторів за критеріями допустимої температури та зносу ізоляції.

Таблиця 3

## Параметри кластерів навантаження

№ кластеру	Сумарна тривалість, хв	Відносна тривалість	$\bar{I}$ , А	$\nu[I]$ , в.о.
1	870	0,020	143,207	0,042
2	25110	0,585	177,821	0,045
3	4680	0,109	221,883	0,037
4	12240	0,285	99,612	0,057
$\Sigma$	42900	1	159,611	0,048

Виконано розрахунки максимальних квантилів температур та відносного зносу ізоляції для розподільних трансформаторів різної потужності, які отримано імітаційним моделюванням за значень ймовірностей  $\alpha_{\theta} = 0,05$  та  $\beta = 0,05$ . Отримані резуль-

тати можуть використовуватися в системах діагностування розподільних трансформаторів малої та середньої потужностей рівня напруги 6, 10, 35 кВ.

У четвертому розділі проведено дослідження працездатності та ефективності застосування запропонованих математичних моделей, методів та алгоритмів.

Для практичної реалізації методів та алгоритмів оцінювання навантажувальної здатності силових трансформаторів розроблено програму, яка аналізує допустимість режимів роботи трансформаторів, використовуючи метод стохастичного оцінювання на основі даних про навантаження та температуру оточуючого середовища.

Для перевірки розроблених алгоритмів оцінювання навантажувальної здатності розглянуто три варіанти теплових моделей: «модель 1» – теплова модель з врахуванням сталої часу обмотки, рівної 10 хв; «модель 2» – теплова модель з врахуванням сталої часу обмотки та параметрів трансформаторів з базової моделі; «модель 3» – базова теплова модель без врахування сталої часу обмотки.

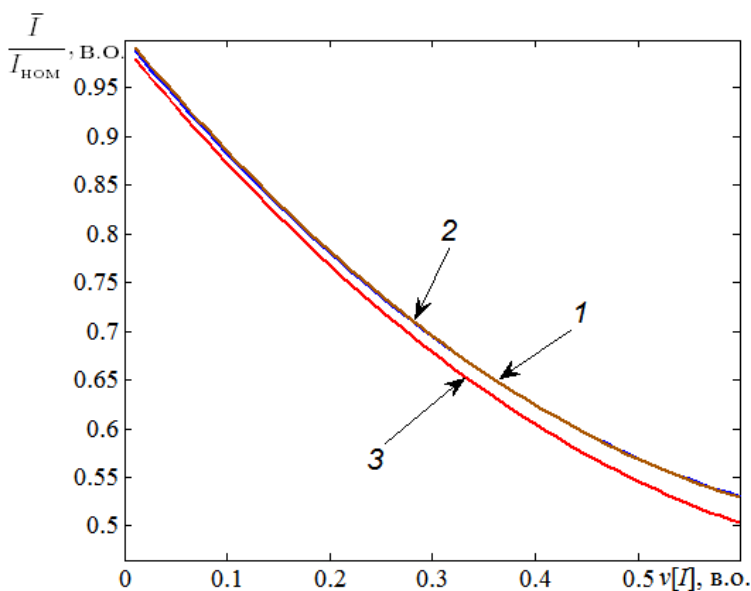


Рис. 3. Характеристики навантажувальної здатності трансформаторів

охолодження OF (примусова циркуляція масла) відмінності значень параметрів  $\bar{I}$ ,  $\nu[I]$  у разі застосування різних теплових моделей трансформаторів становлять не більше 6% і збільшуються із зростанням коефіцієнта варіації  $\nu[I]$ . Зважаючи на те,

На рис. 3 представлено характеристики навантажувальної здатності  $\bar{I} / I_{\text{ном}} = f(\nu[I])$ , одержані для розподільних трансформаторів з типом охолодження ONAN (природна циркуляція масла і повітря). Номери характеристик на рисунку відповідають вказаним номерам теплових моделей. Найбільші допустимі параметри  $\bar{I}$ ,  $\nu[I]$  навантажувального струму дає застосування моделі 2. Однак відмінності між значеннями цих параметрів з застосуванням всіх трьох моделей у всьому діапазоні зміни коефіцієнта варіації не перевищують 2%. Для трансформаторів з типом

що наведені відмінності не перевищують 10%, стверджується, що базова теплова модель трансформатора без врахування сталої часу його обмоток забезпечує достатню точність у розрахунках.

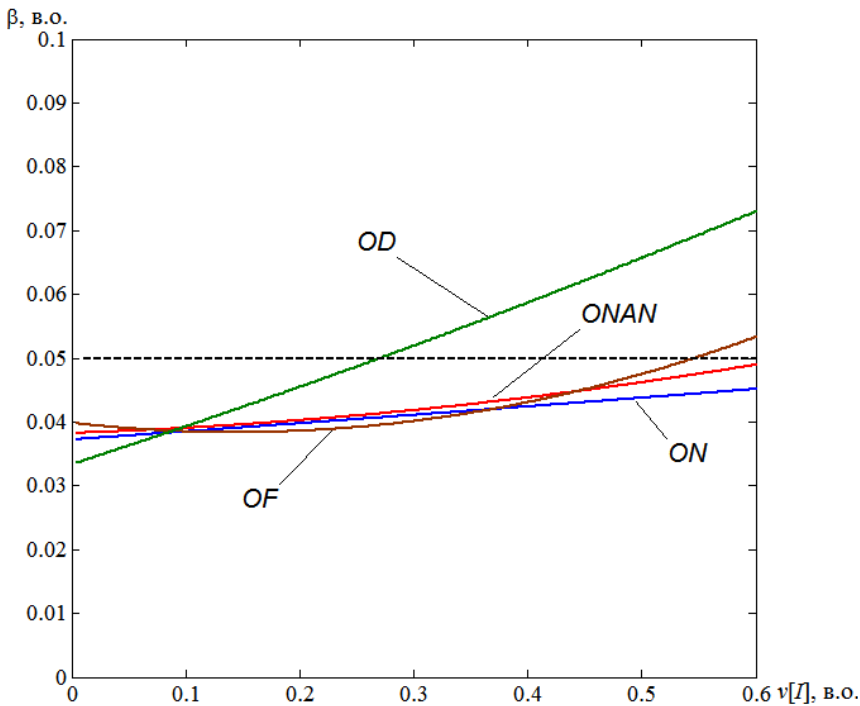


Рис. 4. Характеристики імовірності перевищення номінального зносу ізоляції

перевищує прийняте значення для  $\alpha_\theta$ . Інша картина спостерігається для типу охолодження OD. Значення  $\beta$  зростає зі збільшенням коефіцієнта варіації та за  $v[I] \geq 0,28$  перевищує значення 0,05.

Крім оцінки навантажувальної здатності масляних трансформаторів виконано аналіз навантажувальної здатності сухих трансформаторів. Розглянуто три критерії оцінювання: допустима температура найбільш нагрітої точки обмотки ( $|\Delta\theta_{wh,\alpha_\theta}(t) + \theta_a - \theta_c| \leq \varepsilon_\theta$ ); допустимий термічний знос ізоляції ( $|L_{n,\beta} - L_{n,\text{доп}}| \leq \varepsilon_L$ ); допустимий термічний знос ізоляції та абсолютно допустима межа температури найбільш нагрітої точки ( $|L_{n,\beta} - L_{n,\text{доп}}| \leq \varepsilon_L$  та  $\Delta\theta_{wh,\alpha_\theta}(t) + \theta_a \leq \theta_{cc}$ ).

Відмінності параметрів розподілу  $\bar{I}$ ,  $v[I]$  навантажувального струму (рис. 5) за використання критерію допустимої температури (характеристика 1) та критерію допустимого термічного зносу ізоляції (характеристика 2) за різних значень коефіцієнта варіації становлять 3–15 % та досягають свого максимуму за його значень, рівних 0,1–0,2. Врахування абсолютно допустимої межі температури найбільш нагрітої точки (характеристика 3) практично не змінює навантажувальної

На рис. 4 представлено характеристики значень  $\beta = f(v[I])$  для всіх типів трансформаторів у номінальному режимі систематичних перевантажень, які отримано за допомогою імітаційного моделювання за умов:  $\alpha_\theta = 0,05$ ,  $\theta_{o,\text{доп}} = \theta_a + \Delta\theta_{or}$  та  $\theta_{h,\text{доп}} = \theta_a + \Delta\theta_{hr}$ .

Як видно з рис. 4, для трансформаторів з типами охолодження ONAN, ON (примусова циркуляція повітря, природна – масла) та OF значення імовірності  $\beta$  для більшості значень коефіцієнта варіації становить 4–4,5 %, тобто ця імовірність не



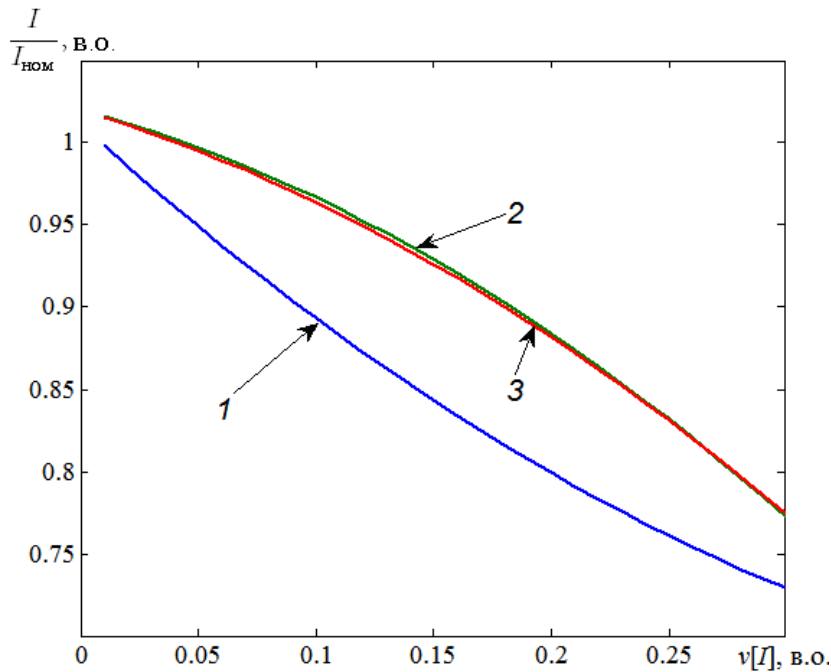


Рис. 5. Характеристики навантажувальної здатності для сухих трансформаторів з класом нагрівостійкості ізоляції F(155)

ниці за допомогою ІДК «Регіна» за період з 08.01.2014 р. по 28.01.2014 р. у вигляді масивів значень струмів і напруг, вологовмісту та температури масла в баці трансформатора, а також тангенса кута діелектричних втрат високовольтних вводів. Обсяг вибірки становив 2000 вимірів, час дискретизації – 15 хв.

Виконано розрахунок діагностичних параметрів для температури масла та вологовмісту масла, враховуючи природну його циркуляцію в баці трансформатора. Параметрична ідентифікація коефіцієнтів диференціальних рівнянь моделі виконана на вибірці, отриманій за три доби. На рис. 6 показано залежність індикатора квантиля температури масла від часу  $v_{\alpha,\theta}(t)$  за весь період спостережень.

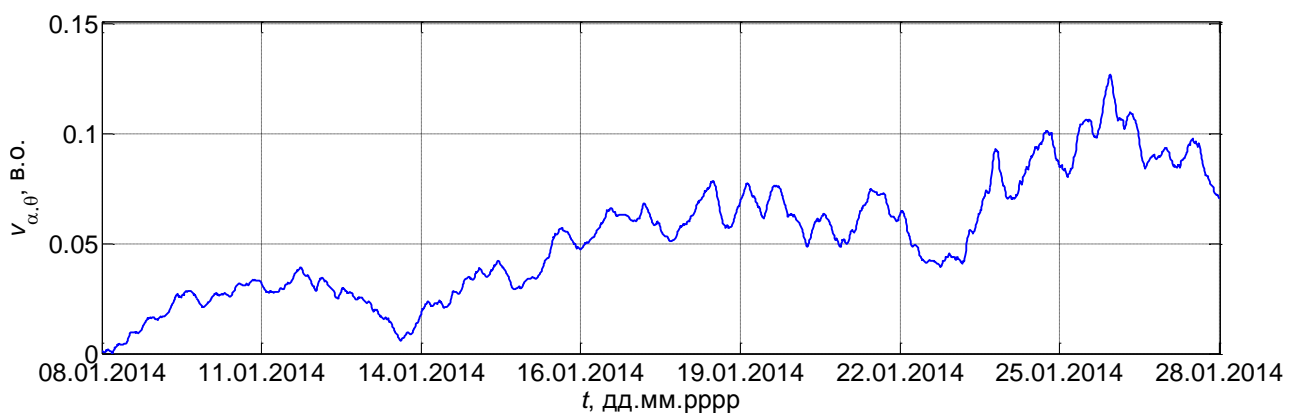


Рис. 6. Залежність індикатора квантиля температури масла  $v_{\alpha,\theta}$  від часу

здатності. Зроблено висновок, що використання критерію оцінювання за термічним зносом ізоляції дає суттєве збільшення навантажувальної здатності сухих трансформаторів.

Проведено апробацію системи діагностування з метою оцінювання ефективності процедур зменшення впливу випадкових похибок та працездатності запропонованих математичних моделей, методів та алгоритмів діагностування.

Для досліджень використано експериментальні дані, зареєстровані на підстанції «Бобрик» Укрзалізниці

Таблиця 4  
Коефіцієнти рівняння математичної моделі вологовмісту

Коефіцієнт	$k_{1.hf}$	$k_{2.hf}$	$k_{3.hf}$	$k_{4.hf}$	$k_{5.hf}$
Значення	-0,229	-0,052	0,364	0,553	0,490

Таблиця 5  
Вагові коефіцієнти для розрахунку індексу стану

Коефіцієнт	$z_M$	$z_0$	$z_{tg\delta}$
Значення	0,3	0,4	0,3

Оптимізацію значень коефіцієнтів  $k_{i.hf}$  рівняння (11) виконано за критерієм (13). Отримані значення коефіцієнтів наведено в табл. 4. Розраховане значення вологовмісту в паперовій ізоляції становило 1,82 %.

Для розрахунку індексу стану використано значення вагових коефіцієнтів, які наведено в табл. 5.

Отримані значення індексу стану змінюються в діапазоні від 0,02 до 0,19. Приймаючи середнє значення 0,1 стан трансформатора відповідно до наведених в табл. 2 значень можна вважати задовільним.

Аналіз отриманих результатів підтверджує ефективність процедур зменшення впливу випадкових похибок та працездатність розроблених алгоритмів та вказує на можливість їх використання з даними, які отримані за допомогою датчиків, встановлених на трансформаторі.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання розробки нових та удосконалення існуючих моделей і методів визначення та аналізу діагностичних параметрів стану силових трансформаторів з метою підвищення їх довговічності та рівня технічного обслуговування в процесі експлуатації електричних мереж напругою 6–110 кВ. Отримано наступні основні наукові та практичні результати.

1. Розроблено функціональну структуру системи діагностування та моделі визначення діагностичних параметрів силових масляних трансформаторів, які передбачають параметричну ідентифікацію теплової моделі та моделі вологовмісту, на основі даних, виміряних за нормального режиму мережі, що підвищує чутливість виявлення дефектів трансформатора на початковому етапі їх розвитку та дає можливість планувати технічне обслуговування трансформаторних підстанцій електричних мереж.

2. Розроблено моделі динамічного оцінювання на основі фільтра Калмана таких діагностичних параметрів трансформатора, як температура масла, вміст вологи в маслі та тангенс кута діелектричних втрат високовольтних вводів, що дає змогу знизити вплив випадкових похибок вимірювання діагностичних параметрів.

3. Розроблена методика визначення індексу стану силового трансформатора, значення якого може розглядатися в якості симптомів можливого пошкодження та на підставі якого приймається рішення про відключення силового трансформатора та проведення його комплексного обстеження.

4. Удосконалено метод стохастичного оцінювання навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів за критеріями допустимої температури та зносу ізоляції за рахунок використання динамічної теплової моделі трансформатора та забезпечення ефективного застосування критеріїв оцінювання, що дає змогу на 9–20 % збільшити точність результатів розрахунків та в декілька раз зменшити обсяг необхідних обчислень.

5. Розроблено метод визначення статистичних характеристик неперіодичного випадкового процесу навантаження з використанням кластерного аналізу та показано його використання для оцінювання режимів роботи силових трансформаторів, котрі живлять споживачів з нерегулярним режимом роботи. Аналіз результатів обробки експериментальних даних, зареєстрованих протягом 30 днів системою АСКОЕ типової насосної станції, показав, що стандартний підхід, коли електричне навантаження вважають стаціонарним випадковим процесом, дає занижені на 15–20 %, у порівнянні з запропонованою методикою, максимальні значення квантилів температур та відносного зносу ізоляції.

6. Розроблено комплекс програм щодо стохастичного оцінювання режимів роботи трансформаторів за технічними та економічними критеріями на основі імітаційного моделювання, який може використовуватися в процесі експлуатації електричних мереж напругою 6–110 кВ.

7. Підтверджено працездатність розробленого комплексу моделей та алгоритмів роботи системи діагностування з використанням зареєстрованих інформаційно-діагностичним комплексом «Регіна» масивів значень п'яти діагностичних параметрів протягом 20 днів з часом дискретизації 15 хв, на підставі яких виконано визначення стану трансформатора. Середнє значення індексу стану (близько 0,1) свідчить про задовільний стан трансформатора, що підтверджено відсутністю будь-яких порушень у роботі обладнання.

8. Подальше використання результатів роботи пропонується здійснювати шляхом впровадження розроблених моделей, методів та алгоритмів, реалізованих у вигляді програмного забезпечення для побудови систем діагностування силових трансформаторів електричних мереж напругою 6–110 кВ електропостачальних компаній, промислових підприємств та тягових підстанцій залізниці.

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Денисюк С.П. Загальні підходи до побудови систем моніторингу силових трансформаторів з використанням стохастичних моделей / С.П. Денисюк, І.В. Притискач // Праці ІЕД НАНУ. – 2014. – Вип. 37. – С.62–68.

2. Денисюк С.П. Розробка системи онлайн моніторингу стану силових трансформаторів / С.П. Денисюк, М.Ф. Сопель, Ю.В. Пилипенко, І.В. Притискач // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2014. – № 24. – С.92–103.

3. Денисюк С.П. Оцінювання стану в системах моніторингу силових трансформаторів тягових підстанцій / С.П. Денисюк, І.В. Притискач // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 7. – С.13–20.

4. Денисенко М.А. Оцінювання навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів за критерієм термічного зносу їх ізоляції / М.А. Денисенко,

І.В. Притискач // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2013. – № 3. – С.78–84.

5. Денисенко М.А. Отримання статистичних характеристик електричного навантаження як неперіодичного випадкового процесу / М.А. Денисенко, І.В. Притискач // *Праці ІЕД НАНУ*. – 2013. – Вип. 36. – С.14–17.

6. Денисенко М.А. Стохастичне оцінювання навантажувальної здатності силових сухих трансформаторів в розподільчих мережах / М.А. Денисенко, І.В. Притискач // *Праці ІЕД НАНУ, спец. вип.* – 2012. – С.112–118.

7. Денисенко М.А. Вибір елементів електропостачальних систем за економічним критерієм / М.А. Денисенко, І.В. Притискач, О.П. Авраменко // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2012. – № 2. – С.19–31.

8. Базюк Т.М. Оптимізація режимів споживання активним споживачем електричної енергії з мережі електропостачання / Т.М. Базюк, І.В. Притискач // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2014. – № 1. – С.95–100.

9. Притискач І.В. Вибір силових масляних трансформаторів за випадкового неперіодичного характеру електричного навантаження // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – Збірник праць І аспірантських читань пам'яті Праховника А.В. – 2013. – С.31–35.

10. Денисенко М.А. Стохастичне оцінювання навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів з використанням уточненої термічної моделі / М.А. Денисенко, І.В. Притискач // *Енергетика і електрифікація*. – 2012. – №5. – С.48–53.

11. Denysiuk S. Development of the On-line Power Transformer State Monitoring System / S. Denysiuk, I. Prytyskach. // *International Journal of Computing and Technology*. – 2014. – Vol. 1, Issue 5. – P. 191–195.

12. Денисенко М.А. Стохастичне оцінювання навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів / М.А. Денисенко, І.В. Притискач // *Промелектро*. – 2011. – № 1. – С. 25–31.

13. Денисенко М.А. Стохастичне оцінювання термічного зносу ізоляції силових масляних трансформаторів / М.А. Денисенко, І.В. Притискач // *Промелектро*. – 2011. – № 4–5. – С. 30–35.

14. Денисюк С.П. Комп'ютерна програма «Оцінка режимів роботи трансформатора за технічними критеріями» / С.П. Денисюк, І.В. Притискач. – Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 56076. – [Дата реєстрації 15.08.2014].

15. Притискач І.В. Комп'ютерна програма «Оцінка економічної ефективності роботи силових трансформаторів на основі імітаційного моделювання питомих дисконтованих витрат» / І.В. Притискач. – Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 56077. – [Дата реєстрації 15.08.2014].

16. Денисюк С.П. Функціональна структура та алгоритми роботи системи моніторингу силових трансформаторів / С.П. Денисюк, І.В. Притискач, Ю.В. Пилипенко // *Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности: Материалы V Международной научно-практической конференции*. – Д.: ДНУЖТ, 2014. – С.57–58.

17. Притискач І.В. Використання комп'ютерного моделювання в задачах оцінки навантажувальної здатності силових трансформаторів / І.В. Притискач // Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками ОКЕУ 2013». – Вінниця, 2013. – С. 86.

18. Притискач І.В. Моніторинг силових розподільних трансформаторів в задачах енергоменеджменту / І.В. Притискач // Матеріали міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – (PEMS'14)». – К: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2014. – С.53.

19. Денисенко М.А. Оцінювання навантажувальної здатності силових трансформаторів з використанням різних термічних моделей / М.А. Денисенко, І.В. Притискач // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції Енергетика. Екологія. Людина., ІЕЕ. – К: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2012. – С. 267–274.

20. Притискач І.В. Оцінювання навантажувальної здатності силових трансформаторів з використанням стохастичних моделей вибору / І.В. Притискач // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції Енергетика. Екологія. Людина., ІЕЕ. – К: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2013. – С. 34–39.

## АНОТАЦІЇ

**Притискач І. В. Моделі та методи діагностування силових трансформаторів в електричних мережах напругою 6–110 кВ.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 2015.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання, що полягає в розробці нових та удосконаленні існуючих моделей і методів діагностування силових трансформаторів з метою підвищення їх довговічності та рівня технічного обслуговування в процесі експлуатації електричних мереж напругою 6–110 кВ.

Розроблено функціональну структуру системи діагностування та методіку визначення індексу стану силового трансформатора за рахунок об'єднання оцінок первинних діагностичних параметрів з метою спрощення ідентифікації стану за рівнями, отриманими на основі експертних оцінок.

На базі фільтра Калмана розроблено математичні моделі динамічного оцінювання діагностичних параметрів трансформатора, використання яких дає змогу підвищити достовірність результатів діагностування. Розроблено моделі визначення діагностичних параметрів трансформатора, які передбачають уточнення коефіцієнтів диференціальних рівнянь теплової моделі та моделі вологовмісту на основі параметричної ідентифікації з використанням даних, вимірених за нормального режиму електричної мережі.

Набув подальшого розвитку метод стохастичного оцінювання навантажувальної здатності силових трансформаторів, який забезпечує ефективне застосування технічних критеріїв за результатами імітаційного моделювання навантаження трансформаторів.

Описано результати експериментальної перевірки розроблених моделей, методів та алгоритмів, проведено аналіз результатів, сформульовано основні практичні рекомендації.

**Ключові слова:** силовий трансформатор, метод діагностування, навантажувальна здатність, теплова модель, стохастичне оцінювання.

**Прытыскач И. В. Модели и методы диагностирования силовых трансформаторов в электрических сетях напряжением 6–110 кВ. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Институт электродинамики НАН Украины, Киев, 2015.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи разработки новых и совершенствования существующих моделей и методов диагностирования силовых трансформаторов с целью повышения их долговечности и уровня технического обслуживания в процессе эксплуатации электрических сетей напряжением 6–110 кВ.

Внедрение системы диагностирования силовых трансформаторов, которая выполняет оценку их состояния, позволяет практически полностью исключить межремонтный контроль этого типа электрооборудования. Наиболее эффективным методом диагностики является постоянный контроль косвенных диагностических параметров изоляции. Для трансформаторов средней мощности технически и экономически целесообразно в непрерывном режиме контролировать температуру масла, его влагосодержание и тангенс угла диэлектрических потерь высоковольтных вводов. Оценивание ухудшения технического состояния изоляции, которое вызвано термическим старением, целесообразно выполнять на основе информации о нагрузке трансформатора. Технические возможности систем диагностирования, в частности наличие в их составе мощных вычислительных устройств, позволяют повысить достоверность оценки режима нагрузки с учетом метода стохастического оценивания, используя имитационное моделирование физических процессов в трансформаторе.

Для обеспечения возможности легко расширять и модифицировать алгоритмы работы системы диагностирования разработана функциональная структура системы, которую удобно представить в иерархическом виде с использованием четырех уровней: получения данных от датчиков и систем мониторинга показателей; анализа данных; диагностического уровня и уровня представления информации.

Для повышения адекватности определения диагностических параметров использован метод динамического оценивания состояния на базе фильтра Калмана. Учитывая высокий уровень электромагнитных помех напряжений на подстанции, невысокую точность датчиков, с помощью которых происходит измерение диагностических параметров для трансформаторов средней и малой мощности, разработаны соответствующие математические модели оценивания температуры масла, содержания влаги в масле и тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтных вводов, что позволяет снизить влияние случайных погрешностей измерения диагностических параметров.

Для повышения достоверности результатов процесса диагностирования силовых масляных трансформаторов разработаны математические модели определения диагностических параметров, предусматривающие параметрическую идентификацию тепловой модели и модели влагосодержания с использованием данных, измеренных для нормального режима сети.

Для оценивания текущего состояния трансформатора разработана методика определения индекса состояния, который зависит от всех диагностических параметров. Определение состояния трансформатора осуществляется по превышению пределов пороговых уровней индекса, соответствующих требованиям, которые учитывают вероятностный характер отклонений и степень ответственности силового трансформатора.

Оценка нагрузочной способности по техническим критериям осуществлена на основе статистической обработки результатов моделирования температур наиболее нагретой точки обмотки и износа изоляции при различных нагрузках и параметрах тепловой модели трансформаторов. Анализ результатов стохастического оценивания нагрузочной способности силовых трансформаторов позволил обеспечить эффективное применение технических критериев по результатам имитационного моделирования нагрузки, что способствовало достижению более высокого уровня достоверности результатов оценки допустимости определенных режимов работы трансформаторов.

Разработано программное обеспечение по оценке режимов работы трансформатора, которое позволяет с учетом исходных данных о характере электрической нагрузки, температуре окружающей среды и характеристиках трансформатора выполнять стохастическое оценивание трансформаторов с учетом технических и экономических критериев, что может использоваться в процессе эксплуатации электрических сетей напряжением 6-110 кВ.

Выполнена экспериментальная проверка разработанного комплекса моделей и алгоритмов работы системы диагностирования с использованием зарегистрированных информационно-диагностическим комплексом «Регина» массивов значений диагностических параметров в течение 20 суток. Полученное среднее значение индекса состояния свидетельствует об удовлетворительном состоянии трансформатора, что подтверждено отсутствием каких-либо нарушений в работе оборудования.

Полученные результаты по разработке систем диагностирования силовых трансформаторов внедрены на предприятиях ООО «Электросфера» и ООО «НИИ Преобразователь». Это подтверждается соответствующими актами внедрения. Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре электроснабжения Института энергосбережения и энергоменеджмента НТУУ «КПИ» и на кафедре электроснабжения промышленных предприятий электротехнического факультета Запорожского национального технического университета.

Дальнейшее использование результатов работы предлагается осуществлять путем внедрения разработанных моделей, методов и алгоритмов, реализованных в виде программного обеспечения для построения систем диагностирования силовых

трансформаторов электрических сетей напряжением 6–110 кВ электроснабжающих компаний, промышленных предприятий и тяговых подстанций железной дороги.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, метод диагностирования, нагрузочная способность, тепловая модель, стохастическое оценивание.

**I. Prytyskach. Models and methods of power transformers diagnosis in electric networks with voltage 6–110 kV. – Manuscript.**

Dissertation on the competition of graduate degree of candidate of technical sciences on the specialty 05.14.02 – electrical power plants, networks and systems. – Institute of Electrodynamics of National Ukrainian Academy of Sciences, Kyiv, 2015.

This dissertation deals with the actual scientific tasks of development new and improving existing models and methods of power transformers diagnosis to improve their durability and level of maintenance service during the operation of electric networks with voltage 6-110 kV.

Functional structure of the diagnosis system and determining method for the power transformer state index are presented by combining estimates of primary diagnostic parameters to facilitate identification of state levels derived from expert opinion.

Dynamic assessment models based on Kalman filter for transformer diagnostic parameters are developed. They allows to increase the credibility of diagnosis. Definition models for transformers diagnostic parameters that provide parametric identification of thermal and moisture content models on the data, measured for normal network state are presented. This increases the sensitivity to transformers defects at an early stage of development and makes it possible to plan maintenance of transformer substations of electrical networks.

Stochastic evaluation method for power transformers load capacity are developed, which ensures efficient use of technical criteria based on the results of transformers load simulation modeling. Results of experimental verification for the developed models, methods and algorithms are presented and basic practical advice are formulated.

**Keywords:** power transformer, diagnosis method, load capacity, thermal model, stochastic assessment.