

## ВІДГУК

офіційного опонента ЛЕЖНЮКА Петра Дем'яновича на дисертаційну роботу Пономаренка Сергія Григоровича «Удосконалення методів діагностики стану трансформаторних масел в обладнанні 110 - 330 кВ з урахуванням впливу режимів та умов експлуатації», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка

### **Актуальність теми**

Забезпечення надійного та безперебійного постачання промислових і побутових споживачів електричною енергією є не просто актуальними, а життєво важливими завданнями, як в умовах воєнних дій, так і в умовах повоєнного відновлення України. Енергетична стабільність виступає не лише як технічне завдання, але й як стратегічна необхідність для забезпечення функціонування інших сфер життя. Трансформатори та автотрансформатори грають важливу роль у цьому контексті, допомагаючи підтримувати стабільність та безперебійність енергопостачання. Значною загрозою для електрообладнання є внутрішні короткі замикання, які є однією з основних причин їхнього пошкодження. КЗ може виникнути через ряд факторів, таких як вік та негативний вплив експлуатаційних умов.

Трансформаторне масло, єднаючи у собі ключові функції ізоляції та теплопровідності силових трансформаторів та автотрансформаторів, відіграє невід'ємну роль у їхній ефективній роботі. Проте, протягом тривалого експлуатаційного періоду, ізоляційні характеристики трансформаторного масла піддаються важливим змінам, що може призвести до серйозних проблем. Один із основних факторів, що впливають на якість ізоляційних властивостей масла, - це накопичення продуктів глибокого окислення протягом експлуатації трансформатора. Утворення органічних та водорозчинних кислот, а також вологи в маслі, не тільки погіршує електричну міцність ізоляційних проміжків, але й призводить до зниження механічної міцності основної ізоляції автотрансформаторів. Цей процес може спричинити скорочення залишкового ресурсу трансформатора та збільшити ризик аварійного пошкодження обладнання через внутрішні короткі замикання. Для збереження ефективності трансформаторного масла і подовження терміну його служби, важливо вживати заходи щодо моніторингу та обслуговування масла.

Існуюча система оцінки стану трансформаторного масла, що регламентується як міжнародними, так і національними стандартами, надає важливий інструмент для визначення придатності та відповідності масла вимогам для подальшої експлуатації. За допомогою цієї системи можна виявити трансформаторне масло, яке не лише

відповідає нормам, але і може забезпечити безперебійну роботу обладнання. Однак, не зважаючи на цільовий характер інструменту, існують деякі обмеження. Система не забезпечує вичерпну інформацію щодо реального технічного стану масла. Це ускладнює можливість точної оцінки масла в контексті їхнього фактичного залишкового ресурсу та потенційних ризиків. На сьогоднішній день важливо враховувати, що просте визначення придатності до експлуатації не завжди відображає повну картину технічного стану масла та його можливості подальшого безпечного функціонування.

У зв'язку з постійним розвитком систем електропостачання та важливості трансформаторів і автотрансформаторів напругою 110-330 кВ, виникає необхідність в удосконаленні методів діагностики стану трансформаторного масла. Здійснення ефективної діагностики стає актуальним і практично значущим завданням, оскільки це сприятиме підвищенню експлуатаційної надійності та тривалості служби обладнання електричних мереж. Вирішення поставленого завдання відкриває перспективи для покращення технічного стану трансформаторів і автотрансформаторів, що в свою чергу призведе до підвищення загальної надійності енергетичних систем. Ефективні методи діагностики стану трансформаторного масла не лише дозволяють вчасно виявляти потенційні проблеми, але й забезпечують можливість їх передбачення та усунення. Отже, вдосконалення методів діагностики масла у трансформаторах і автотрансформаторах є необхідним компонентом стратегії забезпечення стабільності та ефективності енергетичних систем на рівні напруги 110-330 кВ.

Метою дисертаційного дослідження Пономаренка С. Г. є удосконалення методів та критеріїв, що використовуються для оцінки стану трансформаторних масел, з урахуванням тривалості та режимів експлуатації трансформаторів напругою 110 кВ та автотрансформаторів напругою 330 кВ, що визначає його **актуальність**.

Тема пов'язана з виконанням науково-дослідних робіт на кафедрі «Передача електричної енергії» НТУ «ХП»: «Удосконалення методів діагностики стану маслонаповненого високовольтного обладнання електричних мереж» (№ ДР 0121U109404, 2021–2022 рр.), у якій здобувач був відповідальним виконавцем; «Забезпечення стійкого, надійного та ефективного енергопостачання районів міст постраждалих внаслідок бойових дій» (№ ДР 0123U100244, 2023–2025 рр.), де здобувач є виконавцем окремих розділів.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.**

Представлені у дисертаційній роботі Сергія Григоровича Пономаренка положення та висновки належно обґрунтовані як з точки зору науки, так і з технічного погляду. Обґрунтування наукових тверджень, висновків і рекомендацій, які отримані у ході дослідження, ґрунтується на застосуванні математичного

апарату теорії ймовірності та математичної статистики, дисперсійного, кореляційного і спектрального аналізу, а також методів математичного моделювання за допомогою ліцензійного програмного забезпечення.

Проведені дослідження з використанням математичного апарату та сучасних засобів комп'ютерного моделювання. Отримані результати були піддані перевірці шляхом практичних експериментів, що свідчить про належну обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, висловлених у дисертаційній роботі. **Достовірність** отриманих теоретичних досліджень підкріплюється конкретними результатами в діючому обладнанні, що підтверджують їхню практичну застосовність та вагомість у реальних умовах. Це дозволяє впевнено стверджувати, що розроблені методи та підходи можуть бути успішно використовуватися.

**До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:**

1. Вперше встановлено та науково обґрунтовано, що значення параметрів трансформаторного масла як придатних, так і не придатних до подальшої експлуатації, розподілені згідно з законом Вейбулу, при цьому встановлено значущий вплив режимів та умов експлуатації обладнання на значення цих параметрів. Обґрунтовано використання граничних значень показників трансформаторного масла, які визначаються мінімізацією функції середнього ризику для одномірних розподілів, з урахуванням режимів експлуатації трансформаторів та автотрансформаторів напругою 110-330 кВ;

2. Вперше запропоновано метод для корегування граничних значень показників трансформаторного масла за комплексом діагностичних ознак з урахуванням особливостей процесу старіння трансформаторного масла, а також режимів та умов експлуатації трансформаторів та автотрансформаторів 110 – 330 кВ, який відрізняється від існуючих тим, що граничні значення показників масла визначаються за рахунок мінімізації функції середнього ризику для багатомірних розподілів показників, що мають значущий стохастичний зв'язок;

3. Вперше розроблено модель множинної регресії для ранньої діагностики стану трансформаторного масла за комплексом діагностичних ознак з урахуванням умов та режимів експлуатації обладнання, що на відміну від існуючих дозволяє виявляти обладнання з прискореним старінням масла до моменту, коли значення показників ще знаходяться в області нормального стану;

4. Отримав подальший розвиток метод визначення характеру залежностей показників трансформаторного масла, який відрізняється урахуванням тривалості експлуатації, що дозволило встановити, що в автотрансформаторах 330 кВ значення показників у часі змінюються нелінійно, а характер залежностей окремих показників співпадає з кінетичними кривими окислювання.

**Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.**

Отримані та науково обґрунтовані варіативні граничні значення показників

масла, які змінюються в залежності від тривалості та режимів експлуатації трансформаторів, використовуються в якості додаткових критеріїв при оцінці стану трансформаторного масла в рамках проведення періодичних випробувань службою ізоляції та грозозахисту АТ «Харківобленерго». Розроблена методика для формування еталонних траєкторій показників ізоляції в умовах обмеженої апріорної інформації використовується в науковій діяльності кафедри передачі електроенергії НТУ «ХП» при дослідженні процесів старіння ізоляції високовольтного обладнання електричних мереж. Розроблені методи діагностики стану трансформаторного масла програмно реалізовані у вигляді окремих модулів інформаційно-аналітичної системи «СИРЕНА», яка на даний час розробляється на кафедрі «Передача електричної енергії» НТУ «ХП». Отримані в роботі результати використовуються у навчальному процесі на кафедрі «Передача електричної енергії» в дисциплінах «Техніка високих напруг», «Математичні основи технічної діагностики» та «Математичні задачі енергетики» за освітньо-науковими програмами «Електроенергетика» та «Комп'ютерні інформаційні технології цифрової трансформації енергетики» НТУ «Харківський політехнічний інститут».

#### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Основний зміст дисертаційної роботи відображено у 41 науковій публікації, з яких 7 статей у наукових фахових виданнях України, з них 1 стаття включена до наукометричної бази Scopus, 2 – в іноземних виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science, 32 – у матеріалах конференцій, з яких 8 проіндексовані у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science. Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

#### **Короткий аналіз змісту дисертації, відповідність його поставленим задачам, мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота Пономаренка Сергія Григоровича складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, 11 додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету і завдання дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами, наведено відомості про наукову новизну, практичне значення, апробацію результатів та публікації.

У **першому розділі** виконано аналіз експлуатаційної надійності силових трансформаторів і автотрансформаторів, що експлуатуються в електричних мережах України. Розглянуто основні причини ушкодження трансформаторів та

автотрансформаторів та проаналізовано вплив трансформаторного масла на надійність цього обладнання. Проаналізовано методи та критерії, що використовуються для оцінки технічного стану трансформаторного масла як в Україні так і за її межами у високовольтному обладнанні електричних мереж. Проаналізовано основні напрямки удосконалення методів оцінки технічного стану обладнання, що застосовуються закордонними дослідниками. За результатами аналізу сформовано основні напрямки досліджень.

У **другому розділі** розроблено методи для коригування граничних значень показників трансформаторного масла. Виконано дослідження законів розподілу показників трансформаторного масла для силових трансформаторів і автотрансформаторів напругою 110 кВ та 330 кВ. Встановлено, що як для придатних так й не придатних до подальшої експлуатації масла значення показників мають розподіл Вейбула. За результатами порівняльного аналізу ймовірностей вірних та хибних рішень, а також значень ризиків, що супроводжують використання граничних значень отриманих методом інтегральних функцій (виживання), методом мінімальної кількості хибних рішень, методом мінімального ризику та методом Неймана Пірсона встановлено, що найбільш оптимальним методом корегування є метод мінімального ризику. Визначені граничні значення показників масла для одномірних розподілів з урахуванням режимів та тривалості експлуатації. Розроблено функцію середнього ризику для двомірних та тривимірних розподілів, показників, що мають значущий стохастичний зв'язок. Мінімізація розроблених функцій методом Нелдера-Міда дозволило отримати граничні значення, використання яких призведе до зниження ризиків порівняно з ризиками, що супроводжують використання граничних значень регламентованих в діючому в Україні нормативному документі.

У **третьому розділі** розроблено метод для ранньої діагностики стану трансформаторного масла, що базується на використанні варіативних граничних значень показників. За результатами коваріаційного аналізу показників масла та тривалості експлуатації встановлено наявність значущої систематичної складової в часових залежностях показників. Для врахування відмінностей в інтенсивності старіння масла розроблено процедуру для формування еталонних масивів показників масла. Результати двофакторного дисперсійного аналізу показників масла з сформованих еталонних масивів свідчать щодо наявності значущого впливу режимів та тривалості експлуатації на значення показників масла. Для ранньої діагностики стану трансформаторного масла з урахуванням впливу режимів та тривалості експлуатації, а також нелінійного характеру зміни показників масла в часі розроблено метод варіативних граничних значень показників.

У **четвертому розділі** розроблено метод для ранньої діагностики стану трансформаторного масла за комплексом діагностичних ознак. Запропоновано

модель множинної регресії, в якій тривалість експлуатації є функцією значень показників трансформаторного масла. Розроблено процедуру навчання регресійної моделі для ранньої діагностики стану масла за комплексом діагностичних ознак. Сформовано вирішальне правило згідно з яким приймається рішення щодо стану трансформаторного масла. Для урахування впливу режимів експлуатації, а також сорту та якості трансформаторного масла на інтенсивність процесів старіння запропоновано використовувати групу моделей навчених за значеннями показників автотрансформаторів що експлуатуються в різних умовах.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані чітко та відповідають змісту дисертаційної роботи. Список використаних джерел із 128 найменувань досить повний і включає вітчизняні та зарубіжні публікації. Анотація відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває наукові результати та практичну цінність роботи.

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено. Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

#### **По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:**

1. На сьогоднішній день встановлено, що проблеми, пов'язані з технічними ушкодженнями автотрансформаторів та трансформаторів, в основному виникають внаслідок погіршення стану основної ізоляції. Більш того залишковий ресурс трансформаторів визначається ступенем полімеризації целюлози. В той же час здобувача основну увагу приділяє стану трансформаторних масел.

2. Наскільки точно результати експлуатаційних випробувань відтворюють процеси старіння масла? Чи не вплинули похибки які безумовно притаманні для експлуатаційних вимірів на загальні висновки роботи?

3. На скільки співпадає нелінійний характер зміни показників трансформаторного масла в часі із відомими виразами для теплового старіння ізоляції, що отримані на основі виразу Арреніуса?

4. Як використовувати, запропоновані автором моделі множинної регресії для автотрансформаторів та трансформаторів, в яких відбулася заміна або регенерація масла.

5. Доцільно було б оцінити чутливість математичних моделей процесів, які досліджуються. Тут, можливо, корисними були б результати розв'язування зворотної задачі чутливості. Вони б дозволили оцінити область допустимих значень параметрів.

6. Аналізуючи структуру та викладення матеріалу дисертаційної роботи, слід визнати наявність певних незначних недоліків у її оформленні. Зокрема, виникають певні друкарські, пунктуаційні та стилістичні помилки, які можуть впливати на

загальне сприйняття. Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

### ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Пономаренка Сергія Григорович «Удосконалення методів діагностики стану трансформаторних масел в обладнанні 110–330 кВ з урахуванням впливу режимів та умов експлуатації» за своїм змістом відповідає спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-практичну задачу, яка полягає в удосконаленні методів діагностики стану трансформаторних масел в обладнанні 110–330 кВ з урахуванням впливу режимів та умов експлуатації.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Пономаренко Сергій Григорович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Офіційний опонент:

професор кафедри електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету, д.т.н., професор

29.01.24 р.



Петро ЛЕЖНЮК

Вчений секретар



Лілія ВісетаК