

## РЕЦЕНЗІЯ

Рецензента ПІРОТТІ Олексія Євгеновича

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

Проведений ретельний аналіз дисертації Сергія Григоровича Пономаренка «Удосконалення методів діагностики стану трансформаторних масел в обладнанні 110 - 330 кВ з урахуванням впливу режимів та умов експлуатації» в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» дозволяє зробити висновок щодо наукової ваги та значущості. Робота відзначається актуальністю, аргументованістю наукових положень та обґрунтованістю висновків і рекомендацій. Отримані результати свідчать про високий рівень досліджень, що підвищує достовірність та практичну значущість висновків. Дисертація також має наукову новизну, що додає нових знань у сфері діагностики трансформаторних масел.

Загальна оцінка роботи підтверджує важливість та актуальність проведених досліджень у контексті сучасних викликів електроенергетики.

### **1. Актуальність теми та зв'язок з науковими планами і програмами**

Забезпечення стійкого та безперебійного електропостачання є критично важливим завданням. Однією з основних причин відключень в енергопостачанні є зношеність обладнання електричних мереж. Трансформаторне масло відіграє ключову роль у високовольтних трансформаторах, забезпечуючи ізоляцію та теплові властивості. Проте, ізоляційні властивості масел погіршуються з часом, що може призводити до зниження електричної міцності та аварій.

Існуюча система оцінки стану трансформаторних масел дозволяє розпізнати їх придатність до подальшої експлуатації, але не враховує реальний технічний стан масла. Це ускладнює точну оцінку масел у контексті їхнього фактичного ресурсу та потенційних ризиків. Удосконалення методів діагностики трансформаторних масел у трансформаторах і автотрансформаторах напругою 110-330 кВ стає актуальним завданням, що може підвищити надійність обладнання та забезпечити стабільність енергетичних систем.

## **2. Наукова новизна одержаних результатів**

Наукова новизна одержаних результатів полягає у:

1. Вперше вдалося встановити та науково обґрунтувати, що значення параметрів трансформаторних масел, які можуть бути вважаються придатними або не придатними для подальшої експлуатації, розподілені відповідно до закону Вейбула. При цьому був виявлений значущий вплив режимів та умов експлуатації обладнання на значення цих параметрів, що підкреслює необхідність врахування їх при коригуванні граничних значень показників масел;

2. Вперше вдалося науково обґрунтувати використання межових значень показників трансформаторних масел. Ці значення визначаються шляхом мінімізації функції середнього ризику для одновимірних розподілів, при цьому враховуються режими експлуатації трансформаторів та автотрансформаторів з напругою 110-330 кВ;

3. Вперше представлений метод коригування максимальних значень показників трансформаторних масел на основі комплексу діагностичних характеристик, враховуючи особливості процесу старіння трансформаторних масел, а також режимів та умов експлуатації трансформаторів напругою 110 кВ та автотрансформаторів напругою 330 кВ. Цей метод відрізняється від існуючих тим, що максимальні значення показників масел визначаються

шляхом мінімізації функції середнього ризику для багатовимірних розподілів показників, які мають суттєвий стохастичний зв'язок;

4. Отримала подальший розвиток метод визначення характеристик залежностей показників трансформаторних масел, який відрізняється врахуванням тривалості експлуатації. Це дозволило встановити, що у автотрансформаторах напругою 330 кВ значення показників змінюються нелінійно з часом, а залежності окремих показників співпадають з кінетичними кривими окислювання;

5. Вперше розроблено модель множинної регресії для ранньої діагностики стану трансформаторних масел за комплексом діагностичних ознак з урахуванням умов та режимів експлуатації обладнання, що на відміну від існуючих, дозволяє виявляти обладнання з прискореним старінням масел, ще в той момент часу, коли значення показників знаходяться в області, що відповідають нормальному стану.

### **3. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання**

Практичне значення отриманих результатів для електроенергетики:

1) Отримані та обґрунтовані варіативні граничні значення показників масел для трансформаторів, що змінюються залежно від тривалості та режимів експлуатації, використовуються як додаткові критерії при оцінці стану трансформаторних масел в рамках періодичних випробувань службою ізоляції та грозозахисту АТ «Харківобленерго»;

2) Розроблена методика для формування еталонних траєкторій показників ізоляції в умовах обмеженої апіорної інформації, яка використовується в науковій діяльності кафедри передачі електроенергії НТУ «ХПІ» при дослідженні процесів старіння ізоляції високовольтного обладнання електричних мереж;

3) Розроблені методи діагностики стану трансформаторних масел, програмно реалізовані у вигляді окремих модулів інформаційно-аналітичної

системи «СИРЕНА», яка на даний час розробляється на кафедрі «Передача електричної енергії» НТУ «ХП»;

4) Результати дослідження використовуються у навчанні на кафедрі «Передача електричної енергії» в освітніх компонентах: «Техніка високих напруг», «Математичні основи технічної діагностики» та «Математичні задачі енергетики» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»..

#### **4. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційне дослідження було проведено в рамках освітньо-наукової програми "Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка", яка впроваджена в Навчально-науковому інституті енергетики, електроніки та електромеханіки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" для 141 спеціальності. Дослідження ґрунтувалося на глибокому аналізі відомих методів, теорій і практичних аспектів, пов'язаних із зазначеною науковою програмою. В рамках ініціативної науково-дослідної роботи "Удосконалення методів діагностики стану маслонаповненого високовольтного обладнання електричних мереж" (№ ДР 0121U109404, 2021–2022 рр.), яка реалізувалася на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", було виконано дисертаційне дослідження. Здобувач виступав у ролі відповідального виконавця. Отримані основні наукові результати також використовуються під час виконання наукових досліджень у рамках державної науково-дослідної роботи, що фінансується з державного бюджету за планом Міністерства освіти і науки України на 2023–2025 роки за темою "Забезпечення стійкого, надійного та ефективного енергопостачання районів міст, постраждалих внаслідок бойових дій" (№ ДР 0123U100244).

## **5. Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані автором**

Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які здобувач опублікував, свідчить про значущий обсяг досліджень та активну наукову діяльність. Основний зміст дисертаційної роботи відображено у 41 науковій публікації, з яких 7 статей у наукових фахових виданнях України, серед яких 1 стаття включена до наукометричної бази Scopus; 2 – в іноземних виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та Web of Science; 32 – у матеріалах конференцій, з яких 8 проіндексовані у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science.

## **6. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації**

Наукова праця Пономаренка Сергія Григоровича є завершеною науковою роботою, містить анотацію – українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел і додатки.

У вступі виокремлено важливість тематики дисертації, чітко визначено ціль та завдання дослідження. Зазначено взаємозв'язок між даною роботою та актуальними науковими напрямками. Подано інформацію про наукову новизну, практичне застосування отриманих результатів, а також вказано на проведення експериментів та публікації.

У першому розділі здійснено аналіз експлуатаційної надійності високовольтних силових трансформаторів і автотрансформаторів, які функціонують у системах електропостачання в Україні. Розглянуті основні фактори, що призводять до пошкодження трансформаторів та автотрансформаторів, та проведений аналіз впливу трансформаторних масел на надійність цього обладнання. Розглянуті методи та критерії, які використовуються для оцінки технічного стану трансформаторних масел, як

в межах України, так і за її межами, в контексті високовольтного обладнання електричних мереж. Також проведено аналіз основних напрямків удосконалення методів оцінки технічного стану обладнання, які використовуються закордонними науковцями.

У другому розділі розглянуто методи коригування граничних значень показників трансформаторних масел для силових трансформаторів і автотрансформаторів напругою 110 кВ та 330 кВ. Виявлено, що значення показників масел, як придатних, так і не придатних до подальшої експлуатації, мають розподіл Вейбулу. Подальший аналіз показав, що щільності розподілу показників для масел з різним станом перетинаються, свідчаючи про те, що корегування граничних значень масел можливо лише за допомогою методів статистичних рішень. За результатами порівняльного аналізу ймовірностей вірних та хибних рішень, а також значень ризиків, встановлено, що найбільш оптимальним методом корегування є метод мінімального ризику. Визначені граничні значення показників масел для одномірних розподілів з урахуванням режимів та тривалості експлуатації. Встановлено, що використання цих значень дозволяє знизити можливі ризики на 1,05-4974419,5 разів порівняно з ризиками, пов'язаними з використанням граничних значень, що визначені в діючому в Україні нормативному документі. З метою урахування фізичних особливостей старіння масел пропонується корегувати граничні значення показників одночасно для декількох діагностичних ознак. Аналіз стохастичного зв'язку між показниками масел дозволяє розробити функцію середнього ризику для двомірних та тривимірних розподілів, показників з великим стохастичним зв'язком. Мінімізація розроблених функцій методом Нелдера-Міда дозволяє отримати граничні значення, використання яких призведе до зниження ризиків на 1,7-84,4 разів порівняно з ризиками, пов'язаними з використанням граничних значень, що визначені в діючому в Україні нормативному документі.

У третьому розділі розроблено метод для ранньої діагностики стану трансформаторних масел, що ґрунтується на використанні варіативних

граничних значень показників. Результати коваріаційного аналізу показників масел та тривалості експлуатації виявили наявність суттєвої систематичної складової у часових залежностях показників. Зазначено, що швидкість дрейфу одного й того ж показника в різних автотрансформаторах істотно відрізняється в залежності від режимів та умов експлуатації, а також якості масел. Для врахування відмінностей в інтенсивності старіння масел розроблено процедуру формування еталонних масивів показників масел за обмеженої апріорної інформації.

Результати двофакторного дисперсійного аналізу показників масел із сформованих еталонних масивів свідчать про значущий вплив режимів та тривалості експлуатації на значення показників масел. В ході дисперсійного аналізу виявлено, що зміна значень показників в часі відбувається з різною швидкістю, підтверджуючи нелінійний характер залежностей. З метою ранньої діагностики стану трансформаторних масел, з урахуванням впливу режимів та тривалості експлуатації, а також нелінійного характеру зміни показників масел в часі, був розроблений метод варіативних граничних значень показників.

У четвертому відділі був розроблений метод для ранньої діагностики стану трансформаторних масел, використовуючи комплекс діагностичних ознак. Була представлена модель множинної регресії, в якій тривалість експлуатації є функцією значень показників трансформаторних масел. Також була розроблена процедура навчання регресійної моделі для ранньої діагностики стану трансформаторних масел, враховуючи комплекс діагностичних ознак. Сформовано вирішальне правило, за яким приймається рішення щодо стану трансформаторних масел. Для врахування впливу режимів експлуатації, а також сорту та якості трансформаторних масел на інтенсивність процесів старіння, було запропоновано використовувати групу моделей, навчених за значеннями показників автотрансформаторів, що експлуатуються в різних умовах. Було проведено навчання та доведено адекватність чотирьох моделей для автотрансформаторів напругою 330 кВ.

Список літератури широко охоплює предметне поле дослідження, повною мірою відображає опрацювання здобувача значної кількості джерел електротехнічного змісту. Здобувач, вміло використовує різноманітні джерела електротехнічного змісту, і надає своїй роботі основу, що дозволяє розширити знання та розуміння у цьому важливому науковому напрямку.

## **7. Достовірність отриманих результатів та висновків**

Достовірність отриманих результатів у дисертаційній роботі впливає із використання відповідної методології, яка віддзеркалює мету та завдання дослідження. Підтримку отриманим висновкам надає значний об'єм наукових публікацій у наукових виданнях, в тому числі тих, що включені до міжнародних баз даних, підкреслюючи важливість та наукову вагу результатів на глобальному рівні. Високий рівень наукового внеску визначається не лише об'ємом, але й активною взаємодією з науковою спільнотою, що додатково підсилює достовірність та актуальність отриманих висновків.

## **8. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях**

Дисертація була виконана з врахуванням усіх вимог академічної доброчесності, і отримані в ході дослідження результати виправдовують висновок про виняткову оригінальність даної роботи. У тексті представлені унікальні ідеї самого здобувача, і слід відзначити відсутність будь-яких проявів використання концепцій або думок інших науковців без належного посилання на їхні дослідження. Робота виокремлюється своєрідністю підходів та новаторським підходом до розв'язання наукових завдань, що робить її значущою у контексті вивчення даної теми.

## 9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Виділено наступні недоліки та зауваження до дисертаційної роботи:

1. З тексту дисертації не зрозуміло чи має вплив різниця в конструктивному виконанні автотрансформаторів на інтенсивність старіння ізоляції.

2. В підрозділі 3.5 здобувач доводить, що після індукційного періоду процесів старіння трансформаторного масла настає період самоприскорення, протягом якого відбувається погіршення показників масел внаслідок накопичення продуктів старіння. З тексту дисертації незрозуміло, яким чином можливо використати отриманий результат – для заміни існуючих норм діагностики чи для додаткового до них використання?

3. Яким чином враховується нелінійність часових залежностей показників масел при формуванні груп автотрансформаторів з однаковою швидкістю дрейфу показників?

4. Під час аналізу дисертації виявлено дрібні недоліки, такі як друкарські, пунктуаційні та стилістичні неточності.

Виявлені недоліки, хоч і присутні, але не є визначними у контексті загальної позитивної оцінки проведеного дослідження. Зазначена дисертація вирізняється актуальністю та високою науковою цінністю, а також має важливу практичну цінність. Ці аспекти є вагомими факторами, що підкреслюють важливість внеску здобувача в розвиток наукового напрямку та його потенційний вплив на практику.

## Висновки

Дисертаційна робота Пономаренка Сергія Григоровича є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обґрунтовані результати, має наукову новизну та дає перспективи подальших досліджень. Тема дослідження відповідає галузі знань 14 – «Електрична інженерія» та спеціальності 141 – «Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка». Отже, враховуючи актуальність теми, отримані результати та певну практичну значущість вважаю, що дисертаційна робота Пономаренка Сергія Григоровича «Удосконалення методів діагностики стану трансформаторних масел в обладнанні 110 - 330 кВ з урахуванням впливу режимів та умов експлуатації» відповідає вимогам 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради Закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р. № 44 та вимогам до оформлення дисертації МОН України від 12.01.2017 № 40, а сам здобувач, Пономаренко Сергій Григорович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 141 «Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка».

Рецензент, кандидат технічних наук,  
доцент, доцент кафедри передача  
електричної енергії Національного  
технічного університету «Харківський  
політехнічний інститут»

  
Олексій ПРОТТИ

Підпис *Юрій Олексій Протти*  
ЗАСВІДЧУЮ:  
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"  
2024 р.



ЗАЙЦЕВ Ю.І.