

## **ВІДГУК**

### **офіційного опонента на дисертаційну роботу**

Василевського Володимира Валентиновича

на тему: «Прогнозування строку служби силового трансформатора за допомогою комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції»,  
подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати

**Актуальність обраної теми.** З огляду на загальну тенденцію старіння трансформаторного парку України, важливими завданнями є підвищення надійності і збільшення ресурсу трансформаторного обладнання. Особливо це стосується силових трансформаторів напругою 500–750 кВ з маслобар'єрною ізоляцією, в якій застосовуються масивні деталі і вузли з клеєного електрокартону. Незважаючи на досить суттєві досягнення у даному напрямі, слід відмітити недосконалість існуючих діагностичних математичних моделей силових трансформаторів, переважно через неможливість врахування впливу реальних умов виробництва та експлуатації на формування ресурсу целюлозної ізоляції.

Вирішення зазначених питань дозволяє розробляти нові технології виробництва й експлуатації силових трансформаторів та ефективні системи неперервного контролю відповідного трансформаторного обладнання.

Таким чином, урахування технічного стану целюлозної ізоляції силових трансформаторів для прогнозування її залишкового ресурсу та техніко-економічного обґрунтування стратегії їх технічного обслуговування є актуальним науковим завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з тематикою ряду науково-дослідних робіт кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету за напрямком досліджень, у яких автор був співвиконавцем.

**Наукова новизна одержаних результатів** не викликає сумнівів і полягає у встановленні автором ряду нових та доповнених існуючих уявлень щодо

прогнозування строку служби силових трансформаторів та техніко-економічного обґрунтування стратегії їх технічного обслуговування шляхом розробки комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції.

При розв'язанні наукового завдання автором запропоновано й теоретично обґрунтовано комплексну модель технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора, яка враховує вплив основних етапів виробництва, технічного обслуговування та зміни експлуатаційних факторів на початкове значення та витрату ресурсу ізоляції; необхідність додаткового урахування при оцінці залишкового ресурсу целюлозної ізоляції силових трансформаторів поряд з результатами їх моніторингу, якості виготовлення основних вузлів, що обумовлює більш ефективну стратегію технічного обслуговування трансформаторів; удосконалено розрахункові методи визначення витрати ресурсу целюлозної ізоляції за рахунок коригування формули інтегралу старіння та визначення вологості целюлозної ізоляції силового трансформатора шляхом урахування її динаміки при зміні теплових режимів роботи.

**Практичне значення одержаних результатів.** Основними практичними результатами дисертаційної роботи є розробка комп'ютерної програми для прогнозування експлуатаційної надійності силових трансформаторів та вибору стратегії їх технічного обслуговування при врахуванні зміни ресурсу целюлозної ізоляції впродовж її життєвого циклу та розробка методики урахування впливу етапу виробництва силових трансформаторів на ресурс целюлозної ізоляції.

Результати досліджень впроваджено при модернізації системи неперервного контролю SAFE-T, виробництва ТОВ «Енергоавтоматизація», м. Запоріжжя, силового трансформатора ТРДНС-40000/35-УХЛ 1, встановленої на Аксуській ТЕС, Республіка Казахстан та у проектно-конструкторській діяльності ПАТ «ВІТ», м. Запоріжжя. Результати дисертаційної роботи також використовуються у навчальному процесі на кафедрі електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету. Впровадження підтверджені відповідними актами.

**Ступінь обґрунтованості основних положень, висновків та результатів роботи.** Ступінь обґрунтованості отриманих у дисертації наукових положень, висновків та рекомендацій є достатнім через коректне застосування

відомих методів досліджень, таких як методи математичного моделювання, теоретичних основ електротехніки, теорії надійності, алгебри нечітких чисел, вимірювань та експериментальних досліджень на фізичних моделях, та відповідних програмних засобів, таких як MS Office Excel та «Matlab/Simulink».

Достовірність сформульованих у дисертації висновків та наукових положень забезпечується коректністю прийнятих припущень і підтверджується збігом результатів відповідних теоретичних й експериментальних досліджень та впровадженням результатів роботи.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеності.** Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Основний зміст дисертації складають 130 сторінок друкованого тексту, що містять вступ, чотири розділи та висновки.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, висвітлено наукову новизну та положення, які виносяться здобувачем на захист, практичне значення отриманих результатів досліджень та їх зв'язок з науковими програмами, планами та темами, наведено інформацію щодо особистого внеску автора, апробації роботи, публікацій та впровадження результатів.

У першому розділі виконано аналіз методів визначення ресурсних характеристик целюлозної ізоляції силових маслonaповнених трансформаторів. Це дозволило обґрунтувати той факт, що при розрахунках скорочення строку служби целюлозної ізоляції не береться до уваги можлива наявність дефектів, внесених у трансформатор на стадії його виробництва, які можуть негативно вплинути на строк служби трансформатора. Крім цього, була доведена недостатня інформативність сучасних систем неперервного контролю силових трансформаторів провідних світових та українських виробників з точки зору оцінки витраченого та залишкового ресурсу целюлозної ізоляції. Проведений у розділі аналіз дозволив визначити мету, основні напрямки і завдання дослідження.

У другому розділі обґрунтовано комплекс моделей, що доволі адекватно описують процеси формування та витрати ресурсу силового трансформатора з урахуванням етапів його життєвого циклу. Вперше запропоновано застосування теоретико-множинних моделей баз знань у складі багаторівневої структури

системи управління життєвим циклом ізоляції обмоток силового трансформатора. Розроблено структуру комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора на етапі експлуатації, яка відрізняється від існуючих моделей урахуванням процесів міграції вологи у системі целюлозна ізоляція – трансформаторне масло, впливу технічного обслуговування на швидкість старіння целюлозної ізоляції та більш повним урахуванням зміни факторів експлуатації трансформатора протягом періоду прогнозу. Обґрунтовано ефективність застосування алгебри нечітких чисел при формуванні реального ресурсу під час виготовлення трансформатора.

У третьому розділі розкрито питання вибору параметрів та дослідження розробленої комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції, що включає термодинамічну модель, модель оцінки витрати ресурсу, модель вологообміну у системі целюлозна ізоляція – трансформаторне масло та модель факторів експлуатації. Доведено суттєвий вплив на отримувані результати використання додаткових даних для моделювання скорочення строку служби целюлозної ізоляції впродовж експлуатації. Дістав подальшого розвитку розрахунковий метод визначення скорочення строку служби ізоляції за рахунок корегування відомої формули інтегралу старіння шляхом більш точної інтерполяції вихідних даних, що використовуються для побудови залежності швидкості старіння від вмісту вологи в ізоляції. Запропоновано використання методу Монте – Карло для урахування стохастичного характеру зміни факторів експлуатації трансформатора.

У четвертому розділі викладено досвід доведення до практичної реалізації розробленої програми для автоматизованого розрахунку прогнозованого старіння ізоляції силових трансформаторів, наведені її технічні характеристики, описано особливості інтерфейсу та передбачуваний алгоритм роботи. Досліджено вплив технічного обслуговування целюлозної ізоляції, зокрема, сушіння активної частини силового трансформатора, на її ресурсні характеристики та виконано моделювання старіння ізоляції трансформатора для різних стратегій технічного обслуговування. Пояснені особливості та результати впровадження отриманих результатів у виробництво та навчальний процес.

Усі розділи супроводжуються ґрунтовними висновками, що узагальнюють

результати відповідних досліджень.

У висновках узагальнено основні отримані у роботі наукові та практичні результати. Висновки пов'язані із матеріалом роботи та висновками за окремими розділами.

Текст дисертації викладено ґрунтовно та послідовно. Стиль викладення доказовий. Оформлення тексту дисертації та автореферату відповідає діючим стандартам та чинним вимогам. Зміст автореферату повністю відповідає змісту дисертації.

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

Основний зміст дисертації достатньо повно відображений у 13 наукових публікаціях, з них: 8 статей у наукових фахових виданнях України (3 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science), 5 – у матеріалах конференцій. Результати роботи було викладено у доповідях та обговорено на 14 науково-технічних конференціях та семінарах в Україні та за кордоном, що включали секції за напрямом наукової спеціальності.

#### **Важливість одержаних у дисертаційній роботі результатів для науки.**

полягає у вдосконаленні та розробці нових методів та засобів оцінки і прогнозування ресурсних характеристик силових трансформаторів, що у перспективі, завдяки урахуванню процесу формування та витрат ресурсу целюлозної ізоляції, дозволяє отримати значний економічний ефект при переході до їх обслуговування за фактичним станом.

#### **Недоліки та зауваження по роботі.**

При ознайомленні з текстом дисертації виникло ряд запитань та зауважень, які потребують відповідних пояснень від її автора.

1. З роз'яснень до співвідношення (2.1) на стор. 39 не зрозуміло, що автор приймає за «реальний ресурс» трансформатора.

2. Не зрозуміло, яким чином визначаються складові рівнянь (2.14) та (2.15) на стор. 58 в умовах стохастичної зміни ресурсу трансформаторів.

3. У тексті дисертації не обґрунтовано можливість знаходження «оптимальних технологічних процесів» (останній абзац на стор. 60).

4. Не розкрито, як формуються тренди теплоємності та теплового опору для різних видів охолодження відповідно до п. 2 на стор. 67.

5. Як визначався необхідний вид апроксимуючої функції (стор. 88, перший абзац) та яку точність зможе забезпечити обрана логарифмічна залежність при короткостроковому прогнозуванні?

6. Зважаючи на відносну складність та неоднозначність отриманої автором комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора (розділ 3), у роботі слід було додатково довести адекватність її застосування.

7. У тексті дисертації часто відсутнє обґрунтування вибору використовуваних розрахунках співвідношень, що зокрема стосується співвідношень (3.2) та (3.3) на стор. 80, (3.22) на стор. 105 та інших.

8. Зроблений автором висновок щодо можливого корегування похибки (стор. 98, четвертий абзац) є незрозумілим та наразі неприйнятним.

9. Висновки по роботі є занадто узагальненими і не містять чисельної оцінки отриманих у ній результатів.

10. У тексті дисертації зустрічаються окремі невідповідності у поданні матеріалу та науково-технічній термінології, неточності, подвійні позначення. Зокрема: не розкрито позначення на рис. 1.3, стор. 29; використання терміну «стан здоров'я трансформатора» (стор. 36, перший абзац); індексом  $\mu$  позначено кількість варіантів технологічного процесу (стор. 62, останній абзац) та математичне очікування (стор. 69, співвідношення (2.22)); висновок 3 до розділу 4 (стор. 128) не розкритий у самому розділі та інші. Зазначене ускладнює ознайомлення з текстом роботи.

#### **Загальний висновок.**

Наведені зауваження і запитання щодо тексту дисертації та автореферату не знижують рівня роботи та не впливають на основні одержані наукові результати. Дисертаційна робота Василевського Володимира Валентиновича «Прогнозування строку служби силового трансформатора за допомогою комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції» є завершеною науково-дослідною роботою, яка вирішує важливе актуальне наукове завдання удосконалення математичних моделей для прогнозування строку служби целюлозної ізоляції силового трансформатора та техніко-економічного обґрунтування стратегії його технічного обслуговування.

За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових та практичних задач, новизною і ступенем обґрунтованості отриманих результатів та практичних висновків дисертаційна робота відповідає вимогам, які ставляться до кандидатських дисертацій, а за змістом поданого в ній матеріалу – паспорту спеціальності 05.09.01 – електричні машини й апарати.

Представлена дисертаційна робота відповідає вимогам п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 зі змінами від 19.08.2015 р. № 656 щодо кандидатських дисертацій, а її автор Василевський Володимир Валентинович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати.

Офіційний опонент,  
кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри електричних машин та апаратів  
Кременчуцького національного університету  
імені Михайла Остроградського

В. В. Прус

