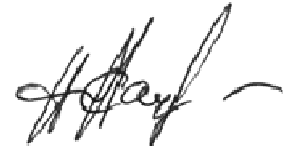


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

САХНО ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ



УДК 621.311

**СИСТЕМА БЕЗПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ПРОГНОЗУ
ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ
ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор
Рассальський Олександр Миколайович ;

доктор технічних наук, професор
Андрієнко Петро Дмитрович,
завідувач кафедри електричних апаратів
Запорізького національного технічного
університету

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Журахівський Анатолій Валентинович,
професор кафедри електричних систем і мереж
Національного університету
«Львівська політехніка»

кандидат технічних наук, доцент
Рудевіч Наталія Валентинівна,
доцент кафедри автоматизації енергосистем
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»

Захист відбудеться «26» жовтня 2012 р. о 14 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті «Львівська політехніка», 79013, м. Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 114 головного корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «21» жовтня 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради, к. т. н., доцент



Коруд В. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Серед обладнання високовольтних електричних мереж та систем вимірювальні трансформатори струму (ТС) на класи напруги 220 кВ і вище є одним з найбільш аварійно-небезпечних типів електроустаткування, незважаючи на існування комплексу діагностичних заходів для оцінки їх стану під час виробництва й експлуатації. Це свідчить про необхідність удосконалювання діючої системи експлуатаційної діагностики, яка не дозволяє своєчасно достовірно відбракувати дефектні апарати. Технічний стан, фактичне напруження парку устаткування та сучасні тенденції до модернізації та інтелектуалізації електроенергетики також ставлять ряд нових завдань для експлуатаційної діагностики: зниження експлуатаційних витрат з підвищенням технічної стійкості енергосистеми; оцінка поточного стану та прогноз залишкового ресурсу устаткування, для планування розподілу фінансових активів, в умовах критичного старіння парку устаткування; автоматизація діагностування для створення підстанцій (ПС) без постійного обслуговуючого персоналу та створення інтелектуальних електроенергетичних систем в Україні. У таких умовах удосконалювання системи діагностики неможливо здійснити без впровадження автоматизованого безперервного контролю за станом устаткування. Існуючі прилади й методи контролю, в умовах високовольтних підстанцій, мають ряд недоліків і не дозволяють реально підвищити ефективність діагностування ТС. Для удосконалення системи діагностування стану трансформаторів струму потрібне вирішення ряду наукових задач, що виражаються в необхідності створення системи безперервного контролю (СБК), придатної для використання в умовах високовольтних підстанцій, а також у необхідності дослідження взаємозв'язку залишкового ресурсу ТС із значеннями діагностичних параметрів, які характеризують стан головної ізоляції ТС. Визначені положення обумовлюють актуальність науково-практичного завдання — удосконалення системи діагностики стану високовольтних трансформаторів струму на основі розробки та впровадження системи автоматизованого безперервного контролю стану й прогнозу залишкового ресурсу ТС.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота відповідає науковим напрямам роботи кафедр «Електричні апарати» та «Електропостачання промислових підприємств» Запорізького національного технічного університету, співпадає з напрямом науково-виробничої діяльності підприємства ТОВ «Енергоавтоматизація» (м. Запоріжжя) і відповідає діючій державній науково-технічній програмі «Ресурс», затвердженій Постановою КМУ від 08.10.2004 №1334.

Мета й завдання роботи. Вдосконалення експлуатаційної діагностики ТС на класи напруги 110 кВ і вище на основі створення автоматизованої системи безперервного контролю поточного стану та прогнозу залишкового ресурсу

основної ізоляції ТС для підвищення стійкості електричних мереж та систем, забезпечення переходу до системи технічного обслуговування і ремонтів відповідно до реального технічного стану обладнання та створення підстанцій без постійного обслуговуючого персоналу й інтелектуальних електроенергетичних систем. Відповідно до вказаної мети, в дисертаційній роботі розв'язано такі задачі:

- огляд існуючих розробок та формулювання питань, які залишилися невирішеними, визначення пріоритетної для дослідження групи ТС на основі аналізу конструкцій і класів напруг експлуатованого в мережах України парку високовольтних трансформаторів струму;

- формування та підтвердження гіпотези про зв'язок значень групи діагностичних параметрів з показниками надійності високовольтних ТС на підставі даних технічного діагностування;

- розробка та перевірка адекватності математичної моделі прогнозу залишкового ресурсу, що враховує поточний стан конкретного ТС;

- вдосконалення методики автоматизованого безперервного контролю стану ТС для використання в експлуатаційних умовах, розробка системи безперервного контролю і прогнозу залишкового ресурсу ТС, впровадження її в експлуатацію;

- дослідження паразитних впливів на результати контролю, визначення основних вимог до апаратної частини СБК, аналіз отриманих результатів, розробка практичних рекомендацій.

Об'єкт дослідження — експлуатація трансформаторів струму у високовольтних електричних мережах та системах.

Предмет дослідження — безперервне діагностування високовольтних трансформаторів струму та прогноз їх залишкового ресурсу.

Методи дослідження — вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань досягнуто на базі теоретичних основ електротехніки, теоретичних основ проектування апаратів високої напруги і методів: теорії ймовірності, теорії надійності, математичної статистики та комп'ютерного моделювання під час побудови моделі прогнозу; методів статистичної обробки результатів експериментів при оцінці результатів впровадження запропонованих методів і моделей; чисельних методів апроксимації та гармонійного аналізу при розробці алгоритму виділення сигналу.

Всі розрахунки в роботі виконані з використанням програмного продукту Statistica[®] for Windows v. 6.0 (StatSoft Inc. Ліцензія № AXXR71D833214). Автоматизовані розрахунки СБК виконуються оригінальним програмним забезпеченням, яке розроблено автором дисертації.

Наукова новизна й основні положення, які виносяться на захист.

1. Вперше запропонована та обґрунтована теорія діагностування основної конденсаторної ізоляції трансформаторів струму за комплексним значенням декількох діагностичних параметрів, а не за відхиленнями кожного параметра

окремо, що підвищує чутливість до виявлення дефектів в ізоляції на початковому етапі їх розвитку.

2. Удосконалено вираз для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи трансформаторів струму, який, на відміну від відомих, враховує поточний стан ізоляції конкретного апарату, що підвищує вірогідність прогнозу залишкового ресурсу та дає можливість планувати технічне обслуговування за станом трансформатора.

3. Вперше отримано математичну модель для визначення абсолютного значення тангенсу кута діелектричних втрат основної ізоляції трансформаторів струму та уводів шляхом використання перехресного алгоритму контролю та методу векторного порівняння струмів провідності ізоляції, що дозволяє безперервно діагностувати апарати у різних режимах роботи електричної мережі без використання виділених опорних сигналів та моста змінного струму.

4. Дістали подальший розвиток теорії мінімізації впливу високочастотних завад та паразитних струмів витоку на значення діагностичних параметрів, теорії базуються на математичних методах апроксимації сигналів та кореляції значень діагностичних параметрів із вологістю навколишнього середовища, що забезпечує достовірність та безперервність експлуатаційного контролю трансформаторів струму та уводів без використання додаткових апаратних рішень.

Практична цінність роботи для електроенергетичної галузі:

- розроблено математичну модель та рекомендації для діагностування стану високовольтних трансформаторів струму під робочою напругою, використання яких дозволяє виявляти дефекти в їх основній ізоляції на початковому етапі розвитку;

- представлені в роботі методики, алгоритми та вимоги використані під час створення автоматизованих СБК і переносних приладів, призначених для контролю стану трансформаторів струму, уводів та нелінійних обмежувачів перенапруг, прилади відрізняються спрощеною апаратною реалізацією, можливістю використання в умовах експлуатації та за несприятливих погодних умов;

- запропоновано удосконалення системи експлуатаційної діагностики трансформаторів струму для електричних мереж на класи напруги 110 кВ та вище, що забезпечує: зниження обсягу періодичних випробувань, підвищення безпеки персоналу, можливість планування технічного обслуговування обладнання на основі інформації про стан обладнання, можливість безпечного подовження ресурсу апаратів, а також можливість створення підстанцій без постійного обслуговуючого персоналу та інтелектуальних електроенергетичних систем;

- наведені в дисертації науково-обґрунтовані рішення використані під час розробки систем безперервного контролю стану трансформаторів струму *SAFE-STTM*, виробництва ТОВ «Енергоавтоматизація»; система встановлена на підстанції "Дніпро-Донбас 330 кВ" Запорізьких магістральних електричних

мереж, ДП НЕК "Укренерго"; проводяться подальші впровадження таких систем на підстанціях 330 - 750 кВ на території України та за кордоном.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, які є в дисертації, отримані здобувачем самостійно, здобувач брав участь у розробці апаратної частини СБК, у її впровадженні, налагодженні та аналізі результатів впровадження. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, безпосередньо дисертанту належить: [1] — аналіз існуючих схем і методів безперервного контролю стану основної ізоляції трансформаторів струму; [3] — систематизація вимог до схем підключення, алгоритм обробки сигналу струму провідності ізоляції й модель для його тестування, аналіз результатів; [4] — розроблено перелік діагностичних параметрів для вимірювальних ТС, уводів, обмежувачів перенапруг, кабелів, вимикачів, зазначено переваги комплексного підходу до діагностики обладнання електричних мереж; [6] — аналіз результатів впровадження системи безперервного контролю, оцінка ефективності впровадження, висновки; [7] — розробка схеми модернізації системи експлуатаційного контролю трансформаторів струму на класи напруги 110—750 кВ та її аналіз; [8] — систематизація основних принципів безперервного контролю й діагностичних параметрів паперово-масляної конденсаторної ізоляції; [9] — дослідження впливу експлуатаційних факторів на результати контролю характеристик основної ізоляції трансформаторів струму та розробка алгоритмів мінімізації; [10] — аналіз методів безперервного контролю вимірювальних ТС, уводів і обмежувачів перенапруг, аналіз результатів контролю характеристик часткових розрядів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень доповідалися здобувачем та обговорювалися на 10 конференціях, серед них: засідання електроенергетичної секції науково-технічної ради ДП НЕК «Укренерго» на тему «Вимірювальні оливнонаповнені трансформатори струму й напруги 110 — 750 кВ. Діагностика. Рекомендації щодо подовження ресурсу» (м. Вінниця, 2008 р.); XI Міжнародна науково-технічна конференція «Електромеханічні системи, методи моделювання й оптимізації» (м. Кременчук, 2009 р.); XII Міжнародна науково-технічна конференція «Трансформаторостроение—2009» (м. Запоріжжя, 2009 р.); семінар «Современные методы диагностики оборудования электрических сетей 220 — 750 кВ» (м. Москва, 2009 р.); Міжнародний симпозіум «Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія й практика (SIEMA'2009, SIEMA'2011)» (м. Харків, 2009 р., 2011 р.); VII Міжнародна науково-технічна конференція ТРАВЭК «Силовые трансформаторы и системы диагностики» (м. Москва, 2010 р.); науковий семінар кафедр електротехнічного факультету ЗНТУ (м. Запоріжжя, 2011 р.); засідання кафедри електричних апаратів НТУ «ХП» (м. Харків, 2011 р.); семінар «Оптимізація функціонування та розвитку електроенергетичних систем» у Національному університеті «Львівська політехніка» (м. Львів, 2011 р.).

Публікації. Матеріали дисертації відображені в 10 публікаціях, серед яких 7 статей у наукових фахових виданнях України.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел зі 121 найменування та 2 додатків. Загальний обсяг роботи 179 сторінок. Основний текст викладено на 133 сторінках друкованого тексту, містить 59 рисунків, 45 таблиць. Обсяг ілюстрацій, таблиць та додатків становить 52 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета та завдання дослідження, наведені відомості про наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів, дані щодо апробацій та публікацій результатів роботи.

У **першому розділі** розглянуті наукові та нормативні джерела у частині міжремонтних випробувань ТС 110 — 750 кВ. Аналіз вимог СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 «Норми випробування електрообладнання» показав, що впровадження СБК дозволяє практично повністю виключити міжремонтний контроль ТС цих класів напруги. Однак норми недостатньо регламентують вимоги та принципи організації безперервного контролю. Сформована в організаціях, що експлуатують високовольтне устаткування, система міжремонтного періодичного контролю зводиться до виміру тангенсу кута діелектричних втрат основної ізоляції ($\operatorname{tg}\delta_1$) та ємності основної ізоляції (C_1) і перевірки відхилень їхніх значень від граничних. Діюча система прогнозу залишкового ресурсу в енергосистемах відсутня.

Близько 80% високовольтних ТС, що експлуатуються на території України, працюють у мережах 330 і 750 кВ. Близько 95% цих трансформаторів струму – це оливонаповнені ТС U-подібної або римоподібної конструкції з конденсаторною ізоляцією. Ці факти обумовили пріоритетну для дослідження групу ТС. Дані про напрацювання підтверджують, що близько 50% парку ТС відпрацювало свій номінальний ресурс, а в найближчі 5 років ця частка збільшиться ще на 15% (рис.1).

Дефекти й ушкодження накопичуються в ізоляції протягом усього строку експлуатації ТС, тому для оцінки їхніх впливів потрібні прямі виміри характеристик цих впливів або критерії, що дозволяють оцінити їх сумарний вплив за весь попередній період експлуатації. Створити систему діагностики, яка ґрунтується на прямих вимірах характеристик впливів, важко через відсутність методик їх оцінки, а також неможливість застосування такого підходу на працюючому вже устаткуванні. Тому найбільш ефективним методом діагностики є безперервний контроль непрямих параметрів стану ізоляції, при цьому технічно й економічно доцільно у безперервному режимі проводити контроль рівня діелектричних втрат і характеристик часткових розрядів в основній ізоляції ТС. Контроль характеристик часткових розрядів в

експлуатації — дуже важке завдання, а інтерпретація його результатів ніяк не регламентується стандартами. Таким чином, найбільш прийнятним методом оцінки поточного стану ТС, з погляду досвіду й ефективності застосування, вимог нормативних документів та економічної обґрунтованості стає метод контролю тангенсу кута діелект-ричних втрат в основній ізоляції ТС ($\text{tg}\delta_1$). Однак застосування лише цього параметру не завжди є ефективним, тому запропоновано використовувати додаткові діагностичні параметри: зміна і швидкість зміни тангенса кута діелектричних втрат, а також його температурний коефіцієнт.

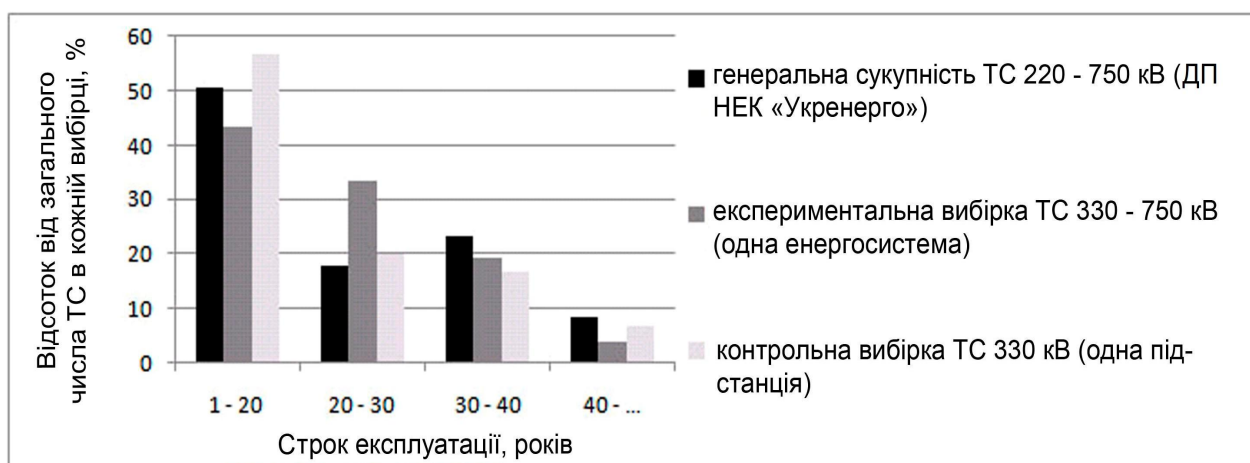


Рис.1. Розподіл напрацювання за вибірками

У розділі критично проаналізовані роботи провідних учених в галузі безперервної діагностики і прогнозу залишкового ресурсу високовольтного електроустаткування. Існуючі методи мають ряд недоліків: не дозволяють достовірно контролювати $\text{tg}\delta_1$ в умовах експлуатації або зовсім не контролюють його; вимагають наявності опорних сигналів від трансформаторів напруги (ТН); піддаються впливам експлуатаційних факторів і режимів роботи енергомережі; малоздатні для реалізації в системі автоматизованого контролю. Серед методів контролю $\text{tg}\delta_1$ найефективнішим є диференційний метод. Він використовується в енергосистемах під час періодичного контролю, а як вимірювальний елемент при цьому використовується міст змінного струму. Для безперервного контролю застосування моста ускладнює апаратну реалізацію системи контролю.

Найбільш прийнятною схемою підключення до ТС при безперервному контролі є схема з резистивним датчиком, яка застосовується під час періодичного контролю, однак для застосування її під час безперервного контролю потрібне її доопрацювання, відповідно до чинних Правил улаштування електроустановок (ПУЕ).

Більшість існуючих моделей прогнозу показників надійності та залишкового ресурсу (ЗР) високовольтного устаткування ґрунтується на

теоретичному законі розподілу відмов Вейбула, що не дозволяє враховувати поточний стан конкретної одиниці обладнання.

Автоматизований безперервний контроль стану високовольтних ТС є найбільш ефективним шляхом вдосконалення системи експлуатаційної діагностики і не суперечить чинним нормативним документам. Існуючі методи безперервної діагностики мають ряд недоліків, які виявляються у спотворенні результатів діагностування експлуатаційними впливами, а також у складності їх реалізації. Більшість існуючих моделей прогнозу показників надійності та залишкового ресурсу високовольтного обладнання не дозволяють враховувати поточний стан конкретної одиниці обладнання, що знижує вірогідність об'єктного прогнозу. Проведений у розділі аналіз дозволив визначити основні напрямки дослідження й завдання, вирішення яких представлено в подальших розділах.

У другому розділі запропоноване вдосконалення експлуатаційної діагностики ТС на основі впровадження СБК, що дозволяє практично повністю виключити міжремонтний контроль ТС на класи напруги 110 кВ і вище. Запропонована зміна не суперечить чинним нормам, істотно скорочує перелік необхідних періодичних випробувань, спрощує алгоритм контролю технічного стану ТС, знижує вплив людського фактора на результати діагностики, а також вводить новий елемент — прогнозування технічного стану. Прогнозування дозволяє ввести принципово новий елемент в систему технічного обслуговування ТС — планове технічне обслуговування і ремонт за технічним станом конкретного трансформатора.

У роботі було використано дві вибірки трансформаторів струму: експериментальна – всі ТС 330 — 750 кВ однієї енергосистеми, і контрольна — всі ТС 330 кВ однієї підстанції. Розподіл напрацювання в генеральній сукупності й у вибірках підтверджує їхню репрезентативність (рис. 1). Для зменшення розкиду даних під час розрахунку розподілів показників надійності, обумовленого конструктивними особливостями конкретної групи ТС, проводилася стратифікація вибірки. Всі ТС у вибірках були розподілені на 5 груп: з U-подібною первинною обмоткою й паперово-масляною конденсаторною ізоляцією (типу ТФУМ-330, ТФКН-330) герметичного («Г») і негерметичного («Н») виконання, з римоподібною вторинною обмоткою й паперово-масляною конденсаторною ізоляцією (ТФРМ-330, ТРН-330, ТФРМ-750, ТРН-750) виконання «Г» і «Н», з елегазовою ізоляцією (ТОГ-330, ТОГ-750).

Експериментальна вибірка включала, з урахуванням покаскадної діагностики ТС 750 кВ, 565 одиниць. У вибірці були присутні всі ТС, встановлені в енергосистемі, починаючи з 1963 року, при цьому результати діагностування в базу вводилися тільки з 1989 року. У базі були присутні дані про результати періодичного діагностування ТС, які були в експлуатації за станом на 2001 рік. База закінчується 2008-м роком. Таким чином, були відсутні відомості: про трансформатори, які були встановлені й відмовили до 2001 року; діагностична інформація про ТС до 1989 року; про всі ТС після 2008 р.

Такі дані називаються обмежені ліворуч і цензуровані праворуч. Групу ТС з повними спостереженнями становили трансформатори, експлуатація яких була закінчена в спостережуваний період через аварії, викликані самим трансформатором або через відбракування за результатами періодичного технічного діагностування. Група ТС із елегазовою ізоляцією мала статистично незначний досвід експлуатації, тому вона не брала участь у подальших розрахунках. Таким чином, модель обмежується тільки трансформаторами 330 та 750 кВ із паперево-масляною конденсаторною ізоляцією.

Погіршення технічного стану основної ізоляції ТС відбувається безупинно, під час роботи як в номінальних, так і в аварійних і недовантажених режимах, а також внаслідок імпульсних впливів. Початковий стан ТС не є ідеальним, навіть нові ТС можуть містити дефекти, які можуть підсилюватися внаслідок експлуатаційних впливів і часу. Таким чином, стан і залишковий ресурс кожного ТС в експлуатації різні. Найбільш прийнятним методом прогнозу показників надійності в такій ситуації є статистичне моделювання з урахуванням параметрів, що характеризують реальний поточний стан апарату.

За базовий метод розрахунку показників надійності ТС був обраний метод пропорційних інтенсивностей відмов Кокса. Метод припускає, що ймовірність безвідмовної роботи (ІБР) у будь-який момент часу розраховується зі значення, що залежить від часу (процесу старіння) і коефіцієнта (що залежить від параметрів впливу на ТС). У розділі було висунуто гіпотетичну залежність показників надійності ТС від діагностичних параметрів і напрацювань трансформаторів струму з паперево-масляною конденсаторною ізоляцією, на основі методу пропорційних інтенсивностей відмов Кокса:

$$S(t, (tg\delta_1, \Delta tg\delta_1, v_- tg\delta_1, \alpha)) = S_0(t)^{\exp(b_1 \cdot tg\delta_1 + b_2 \cdot \Delta tg\delta_1 + b_3 \cdot v_- tg\delta_1 + b_4 \cdot \alpha)}, \quad (1)$$

де $S(t, (tg\delta_1, \Delta tg\delta_1, v_- tg\delta_1, \alpha))$ — результуюча ймовірність безвідмовної роботи ТС, при заданих для відповідного спостереження значеннях діагностичних параметрів (коваріат);

t — час експлуатації (напрацювання);

$tg\delta_1$ — тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції;

$\Delta tg\delta_1$ — абсолютна зміна $tg\delta_1$ за весь період експлуатації;

$v_- tg\delta_1$ — швидкість зміни $tg\delta_1$ за останній місяць;

α — температурний коефіцієнт $tg\delta_1$;

$S_0(t)$ — базова функція ймовірності безвідмовної роботи (процес старіння);

b_1, b_2, b_3, b_4 — коефіцієнти моделі (кількісна оцінка зв'язку діагностичних критеріїв з імовірністю безвідмовної роботи ТС).

Запропоновано удосконалення методу контролю тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції трансформаторів струму, що дозволяє істотно спростити апаратну реалізацію системи контролю. Метод ґрунтується на синхронному запису струмів провідності ізоляції двох об'єктів контролю, з

використанням математичного обчислення кута між векторами цих струмів (рис. 2).

Застосування удосконаленого методу контролю тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції високовольтних електричних апаратів пов'язане з необхідністю виділення сигналу струму провідності на фоні експлуатаційних завад. Виконано порівняння методів обробки сигналу струму комплексної провідності ізоляції, теоретично обґрунтовано застосування апроксимації сигналу поліномами Чебишева, яке дає найкращі наближення до вихідної функції, завдяки тому, що ортогональні поліноми Чебишева дозволяють отримати апроксимацію, похибка якої в заданому діапазоні зміни аргументу розподілена більш рівномірно, що дозволяє отримати найменшу куту похибку апроксимованого сигналу порівняно з іншими методами. Розроблено модернізовану схему з метою підключення до ТС під час організації безперервного контролю. Від стандартної вона відрізняється застосуванням розділового трансформатора струму, використання якого дозволяє виконати вимоги діючих Правил улаштування електроустановок у частині підключення до вимірювального виводу ізоляції трансформаторів струму.

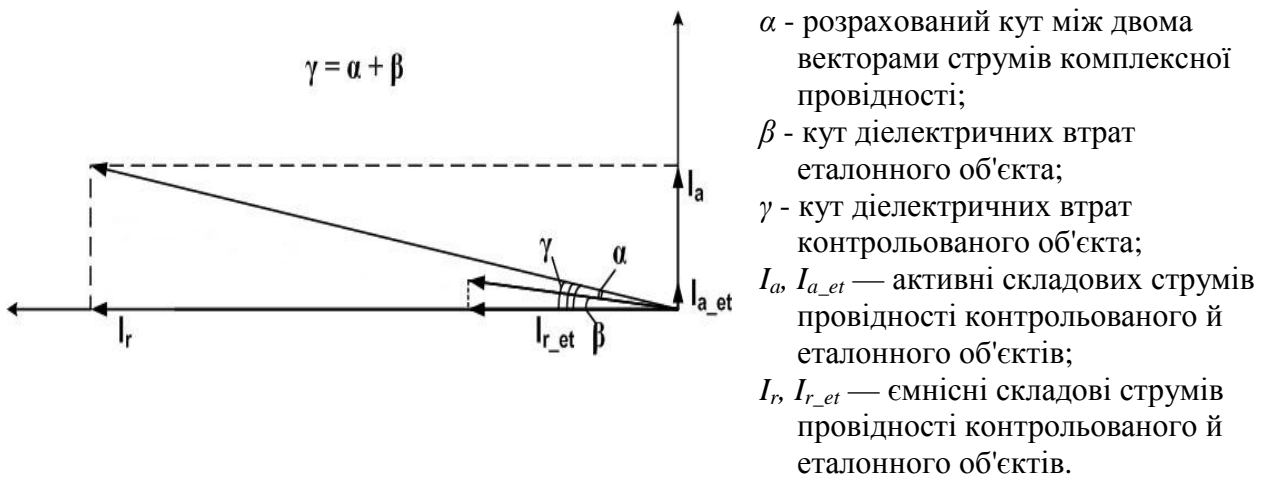


Рис. 2. Векторна діаграма для обчислення кута діелектричних втрат

Планові технічне обслуговування та ремонт за технічним станом передбачають істотне зниження експлуатаційних витрат за рахунок зниження числа планово-попереджувальних відключень обладнання, зниження числа міжремонтних випробувань, а також зниження числа аварій енергосистеми, пов'язаних з відмовою ТС, за рахунок більш ефективного розподілу ресурсів служби діагностики підприємств і автоматизації процесу контролю.

Третій розділ присвячено розробці моделі прогнозу залишкового ресурсу (ЗР) трансформаторів струму 330 — 750 кВ.

У розділі досліджено вплив старіння паперово-масляної ізоляції на значення діагностичних параметрів функції (1). Результати дослідження представлені у табл.1.

Всі розрахунки з обробки даних виконувалися в пакеті автоматизованого статистичного аналізу Statistica for Windows v6.0. Для оцінки адекватності моделі (1) обчислювалися значення χ^2 -критерію як функції логарифму правдоподібності для моделі з усіма оціненими параметрами (L_1) і логарифма правдоподібності моделі, у якій всі коваріати звертаються в «0» (L_0). Величина критерію Пірсона $\chi^2 = 42,91$ (більше критичного 9,49 для кількості ступенів свободи 4) статистично значуща ($p < 0,05$), тому відкидалася нульова гіпотеза, тобто діагностичні параметри значуще впливають на ймовірність безвідмовної роботи ТС.

Таблиця 1

Базові функції діагностичних параметрів

Конструкція ТС Коваріата функції (1)	З U-подібною первинною обмоткою	З римоподібною вторинною обмоткою
$\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_1(t) = 0,1136 + 0,00921 \cdot t$	$\text{tg}\delta_1(t) = 0,1578 + 0,00716 \cdot t$
$\Delta \text{tg}\delta_1$	$\Delta \text{tg}\delta_1(t) = 0,0308 + 0,002167 \cdot t$	$\Delta \text{tg}\delta_1(t) = 0,0007 + 0,001986 \cdot t$
$v_{\text{tg}\delta_1}$	$v_{\text{tg}\delta_1} = 0,0089$	
α	$\alpha(t) = 0,0057 + 0,000114 \cdot t$	

Проводилася оцінка рівня застосовності моделі Кокса до початкових даних за формулою, запропонованою Коксом:

$$R^2 = 1 - \exp\left(\frac{2}{N} \cdot (L_0 - L_1)\right), \quad (2)$$

де N — число періодів часу для розрахунку моделі.

Для $N = 44$, $R^2 = 0,62$, а значить, модель Кокса застосовна до досліджуваних даних. Значення t-критерію й рівня значущості свідчать про значущий вплив всіх коваріат на ймовірність безвідмовної роботи ТС (табл. 2), тому висунута гіпотеза (1) підтверджується.

Для розрахунку базових законів розподілу ймовірності безвідмовної роботи ТС перевірялася відповідність емпіричних розподілів теоретичним законам Вейбула й Гомпертца. Найбільш точно дані відповідали теоретичному закону Гомпертца. Стандартна помилка оцінки функції ймовірності безвідмовної роботи для всіх груп, отримана в роботі, на порядок нижче самої оцінки, тому ймовірність безвідмовної роботи була використана як основний прогностичний критерій залишкового ресурсу апаратів.

Результати розрахунку моделі

Коваріата	Коефіцієнти функції (1)	Стандартна помилка коефіцієнтів	t-критерій (t > 2,0)	Рівень значущості (p<0,05)
$\text{tg}\delta_1$	4,09973	1,141208	3,592444	0,000328
$v_ \text{tg}\delta_1$	8,26857	3,992332	2,071114	0,038356
α	23,52839	8,749141	2,689223	0,007166
$\Delta \text{tg}\delta_1$	2,21677	1,039463	2,132611	0,032964

Розрахунок залишкового ресурсу ТС у моделі базується на припущенні, що подальше зношування ресурсу буде відбуватися тільки через старіння. Після аварійного впливу значення параметрів змінюються та ресурс повинен перераховуватися.

Головною перевагою розробленої моделі є те, що вона ґрунтується не тільки на фактичному часу роботи апарата, а й враховує його реальний технічний стан на підставі значень діагностичних параметрів. Вперше встановлені кількісні показники зв'язку комплексу діагностичних параметрів з показниками надійності високовольтних трансформаторів струму, а також запропоновано видавати технічний діагноз про стан основної ізоляції за декількома діагностичними параметрами, а не за відхиленнями кожного параметра окремо. Використання запропонованої моделі дозволить планувати технічне обслуговування і ремонт обладнання, а також розподіл фінансових активів в енергосистемах.

У четвертому розділі розглянуто й вирішено завдання вивчення особливостей безперервного контролю діагностичних параметрів та забезпечення розробленої моделі достовірними значеннями у безперервному режимі.

У розділі проведено дослідження характеру завад, що реєструються, під час виміру струму провідності основної ізоляції ТС. Встановлено, що максимальна амплітуда завад становить 25 – 100% від діючого значення корисного сигналу, амплітуда завад не залежить від фази прикладеної напруги і не повторюється періодично, розподіл амплітуд завад відповідає нормальному закону, процес стаціонарний і є результатом накладення великої кількості процесів, виникаючих незалежно один від іншого. Передбачення миттєвих значень такого процесу неможливе. Розрахунок різниці початкових фаз струмів на необробленому сигналі дає відносну похибку розрахунку $\text{tg}\delta_1$ 10 — 1000%, що повністю знецінює результати діагностування.

У розділі запропоновано алгоритм представлення сигналу струму провідності ізоляції на основі апроксимації поліномами Чебишева, яка, порівняно з дискретним перетворенням Фур'є та тригонометричною апроксимацією за методом найменших квадратів, дає найменшу фазову

похибку. Найбільше відхилення під час апроксимації синусоїди виходить на межах періоду сигналу. Тому пропонується проводити апроксимацію кожного півперіоду окремо поліномами 8-го порядку. При цьому апроксимацію півперіоду синусоїдальної напруги необхідно проводити на інтервалі $(\pi \pm 0,15\pi)$. Для дослідження кутової похибки, внесеної запропонованим методом, на підставі проведених досліджень завод, була створена випробувальна комп'ютерна модель. На вихідні сигнали з відомими фазовими кутами накладалися аперіодичні випадкові завади з максимальною амплітудою $\pm(0,005\dots 0,04)$ А. Обчислення кута між векторами двох сигналів провадилися на 25 періодах промислової частоти. Статистична обробка результатів обчислень показала, що середня похибка визначення $\text{tg}\delta_1$ $0,015 \cdot 10^{-2}$ і практично не залежить від максимальної амплітуди завад, у діапазоні до 0,04 А. Результат роботи алгоритму представлений на рис. 3.

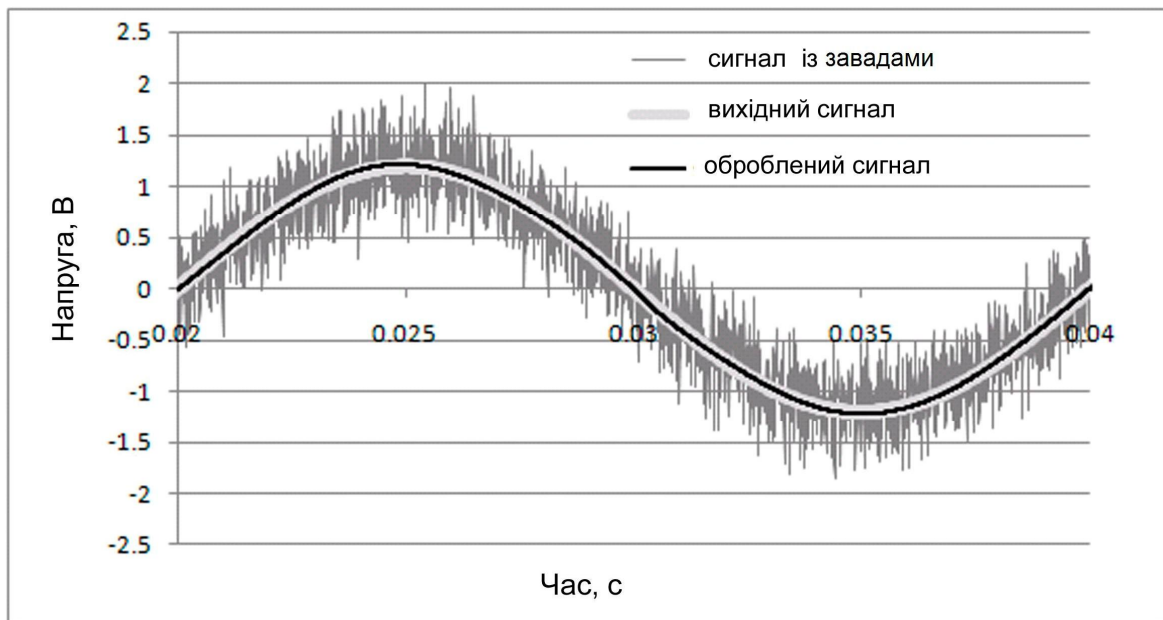


Рис. 3. Обробка сигналу струму провідності основної ізоляції апарата

Основною проблемою диференціального методу контролю $\text{tg}\delta_1$ є необхідність достовірного опорного сигналу. За наявною в енергосистемах практикою, як еталонні об'єкти виділялася група найбільш нових ТС у розподільчому пристрої. За такого підходу існує небезпека не зафіксувати зміну характеристик ТС еталонної групи, відомі випадки аварій внаслідок цього. Для виключення цього недоліку в роботі запропонований алгоритм перехресного виміру диференційних $\text{tg}\delta_1$ і методика обробки його результатів. Алгоритм ґрунтується на використанні кожного об'єкта однойменної фази як у якості еталонного, так і у якості контрольованого об'єкту. У результаті такого алгоритму виходить $(N - 1)^2$ величин відносних кутів (де N – кількість об'єктів контролю, приєднаних до однієї фази). Розрахунки C_1 і $\text{tg}\delta_1$, у запропонованому алгоритмі, проводяться на підставі припущення про те, що значення цих

критеріїв хоча б у половини контрольованих об'єктів залишилися без зміни від моменту попереднього виміру (близько 30 хв.).

У розділі наведено результати експериментальних досліджень впливу апаратної реалізації СБК та експлуатаційних факторів на результати виміру $\text{tg}\delta_1$. Досліджено й запропоновано алгоритми мінімізації сторонніх впливів на результати вимірів, таких як вплив паразитного струму провідності забрудненою поверхнею ізолятора, розгерметизація датчика. Алгоритми базуються на розрахунку коефіцієнтів кореляції значень діагностичних параметрів з відносною вологістю повітря, яке відіграє вирішальну, після завад, роль у спотворенні результатів діагностування. Встановлені вимоги до характеристик аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) системи контролю: мінімальна частота дискретизації — 60 кГц, розрядність — 16 біт. У роботі досліджено вплив електричного поля сусіднього устаткування на результати контролю. Встановлено, що такий вплив на розподільчому пристрої 330 кВ відсутній за використання запропонованих методів. Таким чином, удосконалено метод безперервного контролю зміни діелектричних втрат в основній ізоляції трансформаторів струму, на основі алгоритму перехресного виміру, що дозволяє проводити контроль в умовах експлуатації і не потребує виділених опорних сигналів, а також відрізняється простотою апаратної реалізації. Контроль базується на диференційному методі виміру, з використанням математичного обчислення кута між векторами струмів провідності основної ізоляції апаратів.

У **п'ятому розділі** розглянуто й вирішено завдання з оцінки ефективності вдосконаленої системи діагностики ТС на основі безперервного контролю й прогнозу залишкового ресурсу.

Результати дисертаційної роботи використовувалися під час створення системи безперервного контролю стану основної ізоляції ТС *SAFE-CT*TM, виробництва ТОВ «Енергоавтоматизація» (м. Запоріжжя) для підстанції «Дніпро – Донбас 330». Від системи були отримані результати автоматизованого контролю, а також прогноз залишкового ресурсу, які були використані для подальшого аналізу.

Помилку визначення ймовірності безвідмовної роботи і відповідно залишкового ресурсу визначають стандартні відхилення коефіцієнтів функції (1) (табл. 2). Система розраховує мінімальний і максимальний прогнозований залишковий ресурс виходячи з найгіршого й найкращого відхилення всіх вагових коефіцієнтів. Середня величина діапазону прогнозованого часу відмови ТС за контрольною вибіркою становить близько чотирьох років.

У розділі проведено аналіз результатів діагностування ТС, виконаний трьома методами: метод, що використовується в енергосистемах (за завищенням $\text{tg}\delta_1$); метод, запропонований у роботі (з розрахунком залишкового ресурсу на основі показань СБК); метод на основі вимірів уявного заряду часткових розрядів під робочою напругою в процесі експлуатації.

Зв'язок прогнозованого залишкового ресурсу з результатами виміру уявного заряду часткових розрядів (рис. 4) свідчить про подібність результатів діагностики, отриманих двома незалежними методами.

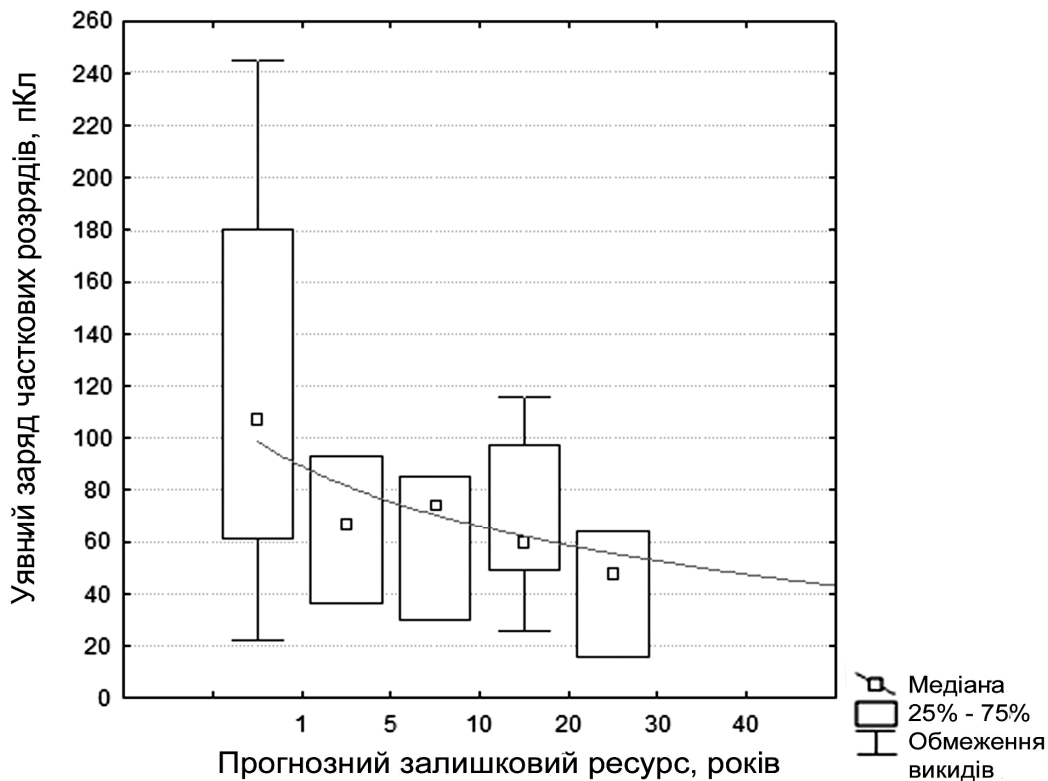


Рис. 4. Залежність рівня уявного заряду часткових розрядів в основній ізоляції ТС від прогнозованого залишкового ресурсу

За результатами роботи системи безперервного контролю на підстанції було виявлено 4 трансформатори струму у погіршеному стані, однак використання СБК дозволило безпечно продовжити їхню експлуатацію, до виділення коштів для їхньої заміни або до критичного погіршення їхнього стану. Запропонований у роботі метод відбраковування ТС з розрахунком прогнозованого залишкового ресурсу на основі показів СБК є найбільш чутливим до дефектів, що розвиваються в основній ізоляції ТС. Затверджений діючими нормами метод в одному випадку не дозволив виявити ТС, що перебуває в погіршеному стані. Аналіз результатів роботи впровадженої СБК підтвердив адекватність моделей і методів, запропонованих у роботі. Порівняння результатів прогнозу залишкового ресурсу ТС за моделлю, що враховує поточний стан ТС (на основі оцінки за комплексом діагностичних параметрів), та з найбільш поширеною моделлю, на основі розподілу Вейбула (що враховує тільки напрацювання ТС), показало, що остання прогнозує у ряді випадків залишковий ресурс, який не підтверджується оцінкою реального технічного стану ТС. Різниця значень, отриманих двома моделями залишкового ресурсу, свідчить про ступінь

скорочення ресурсу внаслідок експлуатаційних впливів, велика різниця (більше 30 - 40%) в показах двох моделей може свідчити про дефекти в ізоляції та є досить ефективним діагностичним параметром.

Існуюча система діагностики повинна бути модернізована на базі методу прогнозу залишкового ресурсу за показниками СБК, для цього необхідно масове впровадження систем безперервного контролю за станом устаткування на підстанціях в Україні, що дозволить знизити експлуатаційні витрати й підвищити показники надійності енергосистем, а також забезпечить можливість інтелектуалізації електроенергетики України.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення ефективності експлуатації високовольтних електричних мереж та систем на основі вдосконалювання існуючої системи експлуатаційної діагностики ТС на класи напруги 110 кВ і вище на базі автоматизованого безперервного контролю поточного стану й прогнозу залишкового ресурсу основної ізоляції. Результатом модернізації є зниження експлуатаційних витрат на устаткування за підвищення стійкості енергосистеми; можливість оцінки поточного стану й прогноз залишкового ресурсу устаткування, для планування розподілу фінансових активів, в умовах критичного старіння експлуатованого парку устаткування; можливість створення підстанцій без постійного обслуговуючого персоналу та «інтелектуальних» електроенергетичних систем. Основні наукові й практичні результати, отримані в роботі, полягають у наступному.

1. Вперше запропоновано проводити технічне діагностування стану основної ізоляції трансформаторів струму за сумарним значенням таких діагностичних параметрів: тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції, його зміна (від значення, отриманого під час введення апарату в експлуатацію), швидкість зміни та температурний коефіцієнт, а не за відхиленнями кожного параметра окремо, що підвищує чутливість виявлення дефектів в апаратах на початковому етапі їх розвитку та дає можливість планувати технічне обслуговування обладнання електроенергетичних систем.

2. Вперше отримано математичну залежність значень показників надійності трансформаторів струму зі значеннями діагностичних параметрів, яка враховує поточний технічний стан ізоляції конкретного апарату, що підвищує вірогідність прогнозу залишкового ресурсу та дає можливість планувати технічне обслуговування за станом обладнання.

3. Вперше отримано математичну модель для визначення абсолютного значення тангенсу кута діелектричних втрат основної ізоляції трансформаторів струму та уводів шляхом використання перехресного алгоритму контролю та методу векторного порівняння струмів провідності ізоляції, що дозволяє

безперервно діагностувати стан апаратів у різних режимах роботи електричної мережі без використання виділених опорних сигналів та моста змінного струму.

4. Дістали подальший розвиток теорії мінімізації впливу високочастотних завад та паразитних струмів витоку на значення діагностичних параметрів, теорії базуються на математичних методах апроксимації сигналів та кореляції значень діагностичних параметрів із вологістю навколишнього середовища, що, на відміну від відомих, забезпечує достовірність та безперервність експлуатаційного контролю трансформаторів струму та введів без використання додаткових апаратних рішень.

5. На основі наведених у роботі положень запропоновано удосконалення системи експлуатаційної діагностики високовольтних трансформаторів струму, що забезпечує зниження обсягу періодичних випробувань, підвищення безпеки персоналу, можливість планування технічного обслуговування розподільних пристроїв на основі реального технічного стану обладнання, можливість безпечного продовження ресурсу апаратів.

6. Наведені в дисертації науково-обґрунтовані рішення використані під час розробки систем безперервного контролю стану трансформаторів струму *SAFE-STTM*, виробництва ТОВ «Енергоавтоматизація»; система встановлена на підстанції "Дніпро-Донбас 330 кВ" Запорізьких магістральних електричних мереж ДП НЕК "Укренерго"; проводяться подальші впровадження таких систем на підстанціях 330 – 750 кВ на території України та за кордоном. Отримані результати також можуть бути використані під час виробництва переносних приладів, стаціонарних систем та випробувальних комплексів для реєстрації стану та захисту обладнання електроенергетичних систем, зокрема трансформаторів струму, введів, нелінійних обмежувачів перенапруг.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Рассальский А. Н. Анализ методов непрерывного контроля характеристик изоляции трансформаторов тока и вводов на подстанциях 330 — 750 кВ / А. Н. Рассальский, А. А. Сахно, С. П. Конограй, А. Г. Спица, А. А. Гук // Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського. — 2009. — № 3 (56), часть 1. — С. 67—70.

2. Сахно А. А. Алгоритм измерения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции трансформаторов тока и вводов 330 — 750 кВ при непрерывном контроле, под рабочим напряжением / А. А. Сахно // Електротехніка і електромеханіка. — 2010. — № 2. — С. 54—56.

3. Рассальский А. Н. Методика измерения и обработки сигнала тока комплексной проводимости основной изоляции высоковольтной аппаратуры при диагностике под рабочим напряжением / А. Н. Рассальский, А. А. Сахно, С. П. Конограй, А. В. Козлов // Електротехніка та електроенергетика. — 2010. — № 2. — С. 12—17.

4. Рассальский А. Н. Комплексный подход к диагностике высоковольтного оборудования подстанций 220 — 1150 кВ под рабочим напряжением в режиме эксплуатации / А. Н. Рассальский, А. А. Сахно, С. П. Конограй, А. А. Гук // *Електротехніка і електромеханіка*. — 2010. — № 4. — С. 23—25.

5. Сахно А. А. Математическая модель прогноза остаточного ресурса трансформаторов тока 330 – 750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа / А. А. Сахно // *Вісник НТУ "ХП"*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. — 2010. — № 55. — С. 97—106.

6. Андриенко П. Д. Результаты внедрения системы непрерывного контроля характеристик основной изоляции высоковольтных трансформаторов тока на ПС «Днепр – Донбасс 330» / П. Д. Андриенко, А. А. Сахно // *Електротехніка та електроенергетика*. — 2011. — № 2. — С. 63—68.

7. Рассальский А. Н. Совершенствование системы диагностики высоковольтных трансформаторов тока на основе автоматизированного непрерывного контроля и прогноза остаточного ресурса / А. Н. Рассальский, П. Д. Андриенко, А. А. Сахно // *Вісник НТУ "ХП"*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. — 2011. — № 48. — С. 50—55.

8. Рассальский А. Н. Основные принципы непрерывного контроля высоковольтного маслонаполненного электрооборудования с изоляцией конденсаторного типа под рабочим напряжением / А. Н. Рассальский, А. А. Сахно, С. П. Конограй, А. Г. Спица, А. А. Гук // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. — 2009. — № 2. — С. 53—55.

9. Рассальский А. Н. Источники погрешности при контроле характеристик основной изоляции трансформаторов тока и вводов 330 — 750 кВ под рабочим напряжением: (доклады XII международной научно-технической конференции «Трансформаторостроение — 2009») [Электронный ресурс] / А. Н. Рассальский, А. А. Сахно, С. П. Конограй, А. Г. Спица, А. А. Гук // *Энерго-инфо* — 2009. — Режим доступа до журн. : <http://www.energo-info.ru/content/view/12648/173/>

10. Конограй С. П. Методы непрерывного контроля и оценки состояния высоковольтного оборудования подстанций: Материалы VII Международной научно-технической конференции «Силовые трансформаторы и системы диагностики» (Д39) [Электронный ресурс] / С. П. Конограй, А. Н. Рассальский, А. А. Сахно. — 80 Min / 700 MB. — Москва : МА ТРАВЭК. — 2010. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) ; 12 см. — Систем. вимоги: Pentium ; 32 Mb RAM ; Windows 95, 98, 2000, XP ; Adobe Acrobat Reader 5.0. — Назва з контейнера.

АНОТАЦІЇ

Сахно О. А. Система безперервного контролю та прогнозу залишкового ресурсу високовольтних трансформаторів струму. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі та системи. Національний університет «Львівська політехніка», Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, Львів, 2012.

Дисертація присвячена вирішенню питань удосконалення існуючої планово-попереджувальної системи технічного обслуговування і ремонтів високовольтних трансформаторів струму за рахунок застосування автоматизованого безперервного контролю характеристик основної ізоляції і прогнозу залишкового ресурсу на основі отриманих значень. Вперше запропоновано модель прогнозу залишкового ресурсу оливнонаповнених трансформаторів струму, яка враховує як процеси природного старіння ізоляції, так і реальний поточний стан апарата за рахунок контролю характеристик його головної ізоляції та комплексної оцінки стану на їх основі. Удосконалено метод безперервного контролю характеристик основної ізоляції трансформаторів струму 330 — 750 кВ. Від існуючих він відрізняється можливістю найбільш достовірного визначення тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції під час безперервного контролю в умовах експлуатації за рахунок: застосування алгоритмів відтворення сигналу, що не створюють додаткових фазових зсувів вихідних сигналів; застосування перехресного алгоритму вимірювання; застосування алгоритмів мінімізації сторонніх впливів; розробки додаткових і систематизації існуючих вимог до апаратної частини мікропроцесорних систем контролю. Описано результати впровадження розробок в експлуатацію, проведено аналіз результатів, сформульовані основні практичні рекомендації.

Ключові слова: вимірювальні трансформатори струму, діагностика в процесі експлуатації, головна ізоляція, прогноз залишкового ресурсу, система автоматизованого контролю.

Сахно А. А. Система непрерывного контроля и прогноза остаточного ресурса высоковольтных трансформаторов тока. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. Национальный университет «Львовская политехника», Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины, Львов, 2012.

Диссертация посвящена исследованию и решению проблем усовершенствования диагностики высоковольтных измерительных трансформаторов тока (ТТ) в процессе эксплуатации и является продолжением развития научно-практических тем по повышению технической стойкости электрических сетей, созданию «необслуживаемых» подстанций и

интеллектуальных электроэнергетических сетей.

В работе предложено усовершенствование существующей планово-предупредительной системы технического обслуживания и ремонтов высоковольтных ТТ за счет применения автоматизированного непрерывного контроля характеристик основной изоляции и прогноза остаточного ресурса. Измерительные ТТ на классы напряжения 220 кВ и выше являются одним из самых аварийно-опасных типов электрооборудования, несмотря на использование комплекса диагностических мероприятий при их производстве и эксплуатации. Это дает право сделать выводы о несовершенстве действующей системы эксплуатационной диагностики, которая не позволяет вовремя отбраковывать дефектные аппараты. Ситуация также отягощается критическим старением парка высоковольтного оборудования в Украине. Необходимость модернизации энергосистем, а также ряд других факторов обуславливают актуальность работы. В работе предложена модель расчета вероятности безотказной работы трансформаторов тока с бумажно-масляной конденсаторной изоляцией и количественный прогноз остаточного ресурса на ее основе. Разработана модель на основе метода пропорциональных интенсивностей отказа Кокса. Впервые предложена модель, учитывающая как процессы естественного старения изоляции, так и реальное текущее состояние аппарата за счет контроля характеристик его основной изоляции и комплексной оценки состояния на их основе. Этим модель отличается от существующих моделей прогноза остаточного ресурса высоковольтного электрооборудования, основанных только на распределении отказов во времени. В качестве независимых переменных в модели используется: тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции ($\operatorname{tg}\delta_1$), изменение емкости основной изоляции (ΔC_1), изменение $\operatorname{tg}\delta_1$ ($\Delta\operatorname{tg}\delta_1$), скорость изменения $\operatorname{tg}\delta_1$ ($v_{\operatorname{tg}\delta_1}$), коэффициент температурной зависимости $\operatorname{tg}\delta_1$ (α), наработка (t_e), и конструктивное исполнение трансформатора. В работе впервые исследованы помехи, регистрируемые при измерении тока комплексной проводимости основной изоляции в процессе эксплуатации и разработана модель, позволяющая проводить испытания при разработке алгоритма выделения исходного сигнала. Предложенный алгоритм выделения сигнала не вносит искажения в начальные фазы сигналов, что позволило усовершенствовать дифференциальный метод контроля $\operatorname{tg}\delta_1$ и существенно упростить аппаратную реализацию системы измерения. Предложено использование перекрестного алгоритма измерения при дифференциальном контроле $\operatorname{tg}\delta_1$, что позволяет исключить ошибку вычисления абсолютного значения $\operatorname{tg}\delta_1$ при изменении характеристик изоляции эталонной группы. Исследовано влияние характеристик аналогово-цифрового преобразователя, используемого для записи осциллограмм токов. Исследованы влияния некоторых эксплуатационных факторов на результаты измерения $\operatorname{tg}\delta_1$ и C_1 , таких как увлажнение загрязненной поверхности изолятора, разгерметизация датчика (устройства присоединения), температурная

нестабильность резистивного элемента датчика, влияние электрического поля соседнего оборудования.

Усовершенствован метод непрерывного контроля изменения диэлектрических потерь в основной изоляции трансформаторов тока, позволяющий проводить контроль в условиях эксплуатации, метод не нуждается в выделенных опорных сигналах, а также отличается простотой аппаратной реализации. Разработанные методики, алгоритмы и модели реализуются в системе непрерывного контроля состояния трансформаторов тока 330 кВ на ПС "Днепр-Донбасс 330 кВ" Запорожских магистральных электрических сетей. Массовое внедрение таких систем позволит перейти от периодической системы технического обслуживания и ремонтов к обслуживанию по реальному техническому состоянию, что в свою очередь позволит снизить эксплуатационные затраты и определить нуждающиеся в первоочередной замене единицы оборудования, что очень важно в условиях критического старения эксплуатируемого парка аппаратов.

Ключевые слова: измерительные трансформаторы тока, диагностика в процессе эксплуатации, основная изоляция, прогноз остаточного ресурса, система автоматизированного контроля.

Sakhno O. A. The continuous monitoring and remaining life prediction system for high-voltage current transformers. – Manuscript.

The thesis for Ph.D. degree obtaining in the specialty 05.14.02 – Electric Power Stations, Grids and Systems. National University “Lviv Polytechnics”, Ministry of Education, Youth and Sports of Ukraine, Lviv, 2012.

The thesis is devoted to the improvement of the existing planned-preventive system of service for high-voltage current transformers through the use of automated continuous monitoring system of the main insulation and residual life prediction. For the first time, a model of residual life prediction for current transformers with OIP-insulation was received. It takes into account both the processes of natural aging of isolation and the real technical state of the apparatus, by controlling the characteristics of its main insulation. The method for continuous monitoring of the main characteristics of current transformers 330 - 750 kV was improved. It differs from the other methods by more reliable determination of dielectric loss factor of the main insulation during continuous monitoring in operating conditions, due to: the use of algorithms for noise reduction, which does not create additional phase shift of input signals, the use of cross-measurement algorithm, the use of algorithms to minimize extraneous influences, the developments of additional and systematization of the existing requirements for the hardware of microprocessor control systems. The developments were realized in the on-line monitoring system, which was installed on the substation. The main results of installation were analyzed; the main practical advices were formulated.

Keywords: current transformers, on-line diagnostic, main insulation, remaining life prediction, automated on-line monitoring.

Підписано до друку 27.04.2012 р. Гарнітура Times New Roman.

Папір друкарський. Формат 60x90/16. Умовн. друк. арк. 0,83.

Наклад – 100 прим. Зам. № 5214.

Надруковано з оригінал-макету в типографії
Запорізького державного медичного університету
69035, м. Запоріжжя, пр. Маяковського, 26