

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**ЗАГАЙНОВА ОЛЕКСАНДРА АНАТОЛІЇВНА**

УДК 621.314



**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ  
ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВВОДІВ ЗА РАХУНОК ЗНИЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ  
РИЗИКІВ**

Спеціальність 05.14.02 - електричні станції, мережі і системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** кандидат технічних наук, доцент  
**Шутенко Олег Володимирович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
доцент кафедри передачі електричної енергії.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Говоров Пилип Парамонович**,  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова  
професор кафедри світлотехніки та джерел світла;  
  
кандидат технічних наук,  
**Бедерак Ярослав Семенович**  
провідний інженер НПО «Азот» м. Черкаси.

Захист відбудеться «05» травня 2021 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.050.06 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «02» квітня 2021р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради



Дмитро ДАНИЛЬЧЕНКО

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Забезпечення надійного та якісного постачання електричної енергії в умовах суттєвої зношеності обладнання електричних мереж є актуальною задачею як для електроенергетики України, так і більшості закордонних країн. Як вітчизняний, так і зарубіжний досвід експлуатації показує, що високовольтні вводи (ВВ), поряд з обмотками трансформаторів і пристроями РПН, є одними з вузлів високовольтних силових трансформаторів, які найбільш пошкоджуються. На цей час для оцінки технічного стану ізоляції ВВ використовуються періодичні випробування і контроль під робочою напругою. Рішення про технічний стан ВВ при проведенні періодичних випробувань приймається на підставі порівняння виміряного значення показника з його гранично допустимим значенням (ГДЗ). Достовірність прийнятого рішення і, як наслідок, експлуатаційна надійність ВВ буде визначатися тим, наскільки коректно обрані ГДЗ цих показників, наскільки адекватно вони відображають особливості процесів старіння ізоляції ВВ і наскільки повно вони враховують вплив експлуатаційних факторів на інтенсивність старіння. ГДЗ показників ізоляції регламентуються діючими міжнародними і національними стандартами і нормуються з урахуванням класу напруги, типу ізоляції, типу захисту і сорту масел. У той же час такі фактори, як тривалість експлуатації, режими роботи електричних мереж, склад споживачів не враховуються. Більш того, на цей час відсутній метод визначення ГДЗ, який би враховував значення показників ізоляції для справного та дефектного станів. Ще одним істотним недоліком існуючої системи оцінки технічного стану високовольтних ввідів є відсутність можливостей для виявлення несправностей високовольтних ввідів на ранній стадії, коли значення показників ізоляції знаходяться в області ГДЗ. Більш того, характер залежностей показників ізоляції ВВ від тривалості експлуатації практично не досліджений, це істотно ускладнює перехід на обслуговування обладнання електричних мереж за поточним станом, а не за календарним планом. Використання безперервного контролю, що виконують під робочою напругою, дає змогу своєчасно виявляти дефекти, які швидко розвиваються, це дозволяє значно підвищити експлуатаційну надійність ВВ. Пристрої безперервного контролю, які розроблені, реалізують нерівноважно - компенсаційний метод. Істотним недоліком даного методу є вимоги про наявність симетрії струмів і напруг в мережі, що не завжди має місце в умовах реальної експлуатації. У той же час більш простий до реалізації ватметровий метод не отримав значного поширення через необхідність приділяти особливу увагу ланцюгам живлення обмотки напруги ватметра, які є джерелом істотних похибок вимірювання.

Тому удосконалення методів і критеріїв оцінки технічного стану ВВ в умовах тривалої експлуатації та обґрунтованості прийняття рішень до їх подальшої експлуатації є актуальною науково-практичною задачею, вирішенню якої присвячена дисертаційна робота.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до наукових напрямків досліджень кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані

автором при виконанні досліджень за держбюджетними НДР МОН України: «Розробка системи безперервного контролю внутрішньої ізоляції обладнання об'єктів електричних систем» (DPN 0100U001673), «Розробка теоретичних засад створення інформаційно-діагностичного комплексу для оцінювання стану об'єктів електроенергетичної системи» (DPN 0106U001490), в них здобувач була відповідальним виконавцем та виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є вдосконалення методів і критеріїв оцінки технічного стану високовольтних вводів в умовах тривалої експлуатації, підвищення ефективності системи оцінки технічного стану та обґрунтованості прийняття рішень щодо їх подальшої експлуатації.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) на основі аналізу літературних джерел встановити напрямки дослідження підвищення ефективності експлуатації високовольтних вводів під час тривалої експлуатації;

2) виконати аналіз чинників, що впливають на значення показників ізоляції високовольтних вводів протягом тривалої експлуатації;

3) проаналізувати закони розподілу показників ізоляції для високовольтних вводів, що мають різний стан;

4) розробити метод для визначення гранично допустимих значень показників ізоляції високовольтних вводів, який дозволить врахувати вплив конструкції вводів, строки та режими експлуатації;

5) проаналізувати вплив режимів та терміну експлуатації справних вводів, а також ймовірності виникнення дефектів та їх «важкість» на гранично допустимі значення показників ізоляції високовольтних вводів;

6) виконати аналіз характеру залежностей показників ізоляції від тривалості експлуатації для високовольтних вводів з різним станом та розробити метод для раннього прогнозування несправностей високовольтних вводів на основі аналізу динаміки зміни показників у часі;

7) удосконалити метод безперервного контролю внутрішньої ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів та розробити пристрій для безперервного контролю внутрішньої ізоляції конденсаторного типу.

*Об'єкт дослідження* – процеси зміни стану високовольтних маслонаповнених вводів протягом тривалої експлуатації в електричних мережах України.

*Предмет дослідження* – показники та характеристики ізоляції високовольтних вводів в умовах тривалої експлуатації з урахуванням конструкції та режимів роботи електричних мереж.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених у дисертації задач застосовані такі методи проведення досліджень: інтегральне і диференціальне числення; методи теорії ймовірності; методи математичної статистики; теорія ризику і моделювання ризикових рішень; методи аналізу часових рядів; чисельні методи рішень нелінійних алгебраїчних рівнянь; метод експериментального дослідження; методи теорії електричних ланцюгів.

**Наукова новизна** отриманих у дисертації результатів полягає у наступному:

1. Отримав подальший розвиток метод оцінки впливу експлуатаційних чинників на інтенсивність старіння ізоляції, який відрізняється від існуючих урахуванням струму завантаження та складу споживачів, що дозволяє підвищити

достовірність оцінки стану високовольтних вводів шляхом коригування гранично допустимих значень показників.

2. Вперше науково обґрунтовано, що значення показників ізоляції в справних та дефектних вводах можуть бути описані розподілом Вейбула, при цьому математичні очікування показників справних високовольтних вводів зміщуються в область більш високих значень зі зростанням завантаження вводів, а функції щільності розподілів показників для дефектного та справного стану перетинаються, що робить неможливим визначення гранично допустимих значень показників, використання яких не призводить до хибних рішень під час експлуатації.

3. Вперше запропоновано метод визначення гранично допустимих значень показників ізоляції високовольтних вводів в якому гранично допустимі значення показників визначаються за рахунок мінімізації функції середнього ризику з урахуванням розподілу значень показників для справного та дефектного стану, а також особливостей конструкції вводів та режимів їх експлуатації, що забезпечує мінімум можливих збитків в разі прийняття хибних рішень. Встановлено, що отримані гранично допустимі значення показників забезпечують значення ризику в 1,5–33 рази менші в порівнянні з гранично допустимими значеннями, регламентованими чинним в Україні стандартом, і в 1,1–13 разів менші, ніж гранично допустимі значення, отримані методом інтегральних функцій.

4. Вперше науково обґрунтовано, що розвиток дефектів у високовольтних вводах може призвести не тільки до зміни значень показників ізоляції, але і до зміни характеру залежностей показників від тривалості експлуатації, а поява статистично значущої систематичної складової в залежностях показників від тривалості експлуатації є свідченням наявності дефекту, навіть якщо значення показників не перевищують гранично допустимої величини, що дозволяє виявляти несправності вводів на ранній стадії їх розвитку.

5. Знайшов подальший розвиток метод безперервного контролю стану внутрішньої ізоляції, який відрізняється від існуючих тим, що для контролю стану ізоляції високовольтних вводів виконується оцінка не тільки значень струму витoku та тангенса кута діелектричних втрат, але й зміни втрат активної потужності, що дозволяє виявляти дефекти на ранній стадії.

**Практична цінність** отриманих у дисертації результатів полягає у наступному:

1. Розроблена методика статистичної обробки результатів періодичних випробувань використовується в науковій діяльності кафедри передачі електроенергії НТУ «ХП» при дослідженні процесів старіння ізоляції високовольтного обладнання електричних мереж.

2. Алгоритмічно розроблені та програмно реалізовані окремі модулі інформаційно-аналітичної системи «СИРЕНА», яка на теперішній час розробляється на кафедрі «Передача електричної енергії» НТУ «ХП», що реалізують метод для визначення гранично допустимих значень показників ізоляції високовольтних вводів, а також метод раннього прогнозування стану високовольтних вводів.

3. Розроблено структурну та принципову схему функціонування пристрою безперервного контролю для вимірювання діелектричних параметрів внутрішньої ізоляції конденсаторного типу в маслонаповненому високовольтному обладнанні.

4. Розроблено алгоритм способу контролю діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції конденсаторного типу під робочою напругою для забезпечення роботи пристрою безперервного контролю.

5. Виготовлено дослідний зразок пристрою безперервного контролю електричних параметрів внутрішньої ізоляції конденсаторного типу в маслonaповненому високовольтному обладнанні як елемент АСК ТП ПС для впровадження на ПС «Артема-330 кВ» Північної електроенергетичної системи НЕК «Укренерго» для контролю під робочою напругою вводів 110 кВ і 330 кВ трифазного силового автотрансформатора.

6. Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі передачі електричної енергії НТУ «ХП» – в лекційних курсах «Математичні задачі енергетики», «Математичні основи технічної діагностики», «Основи експлуатації об'єктів електроенергетичних систем».

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові положення і результати, наведені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. Серед них: обґрунтовано критерій для визначення гранично допустимих значень показників ізоляції ВВ; наведено обґрунтування математичної моделі для оцінки впливу умов експлуатації на інтенсивність старіння ізоляції ВВ; виконано аналіз законів розподілу показників ізоляції ВВ у вводах з різним станом; дана оцінка незалежності показників ізоляції ВВ; визначено ГДЗ показників ізоляції ВВ з подальшою оцінкою достовірності отриманих результатів; обґрунтована мінімізація ризиків експлуатації обладнання електричних мереж за рахунок коригування ГДЗ показників якості ізоляції ВВ з урахуванням впливу експлуатаційних факторів; зроблена оцінка відмінностей швидкостей старіння ізоляції ВВ, які експлуатуються в різних умовах; дана оцінка впливу тривалості експлуатації на характер зміни показників ізоляції в часі для ВВ з різним станом; проведено аналіз динаміки зміни показників у часі для ВВ з різним станом; розроблен метод для раннього виявлення пошкоджень ВВ на основі аналізу динаміки зміни показників ізоляції в часі; запропонован метод безперервного контролю під робочою напругою внутрішньої ізоляції ВВ і його реалізація на сучасній елементній базі.

**Апробація результатів дисертації.** Дисертаційна робота і її основні положення доповідалися і обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Інформаційні технології: Наука, Техніка, Технологія, Освіта, Здоров'я» (м. Харків, 2004, 2007, 2011-2020 рр.); «Сучасні методи розробки і дослідження систем автоматизації, енергозбереження в промисловості та сільському господарстві» (м. Кировоград, 2007р.); «Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціалу в сучасних умовах» (п. Славське, Карпати, 2008); «Сучасні методи і засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики» (м. Ялта, 2008 року); «Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем – 2011» (КРЕС –2011), (Святогірськ, 2011 р.); «Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів» (м. Донецьк, 2012 р.); «Проблеми енергоресурсозбереження в електромеханічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2016 р.); 2018 Intelligent Energyand Powersystem (IEPS) (Kharkiv, 2018); Electrical and Computer Engineering (Lviv, 2019); Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (м. Харків, 2019).

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи відображено у 30 наукових публікаціях, з яких 20 статей – у наукових фахових виданнях України, в тому числі 4 із них – у міжнародних науково-метричних базах даних (3 – Scopus, 1 – Web of Science), 2 – патенти України на корисну модель, 8 – у матеріалах конференцій.

**Структура і обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 249 сторінки; з них: 39 рисунків по тексту; 14 рисунків на окремих сторінках; 37 таблиць по тексту; 8 таблиць на окремих сторінках, зі списку використаних джерел із 166 найменувань на 22 сторінках, 5 додатків на 59 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, вказано на зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Відзначено внесок вчених і фахівців з теми дослідження: Кириленко О. В., Стогній Б. С., Воропай М. І., Костерев М. В., Лежнюк П. Д., Соколов В. В., Бардик Є. І., Рубаненко О. Є., Абрамов В. Б., Шинкаренко Г. В., Сві П. М., Давиденко І. В., Amit Mehta, Feilat E. A., Martin Anghuber, Knock C. та ін. Сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет досліджень, зазначено методи виконання досліджень, показано наукову новизну та практичну значущість роботи, наведено відомості про апробацію та публікацію наукових результатів, а також про їх впровадження.

У **першому розділі** виконано аналіз експлуатаційної надійності ВВ. Розглянуті основні причини ушкодження ВВ з різним типом ізоляції та захисту масел. Визначені основні дефекти, що призводять до пошкоджуваності ВВ. Проаналізовані методи та критерії, що використовуються для оцінки технічного стану ВВ при проведенні періодичних випробувань. Розглянуті основні методи, що використовуються для контролю стану ізоляції ВВ під робочою напругою. Проаналізовані основні напрямки удосконалення методів оцінки технічного стану ВВ, що застосовуються закордонними дослідниками. Дана коротка характеристика сучасних інформаційно-вимірювальних систем та систем моніторингу, що використовуються для оцінки технічного стану обладнання електричних мереж.

У **другому розділі** розроблено метод для визначення ГДЗ показників ізоляції ВВ, що мінімізує економічні втрати в разі прийняття хибних рішень. Обґрунтовано використання методу мінімального ризику для визначення ГДЗ показників. Для забезпечення максимальної адекватності ГДЗ показників ВВ фізичним процесам, що розвиваються в умовах тривалої експлуатації, виконано аналіз факторів, що впливають на інтенсивність старіння. Використовуючи результати періодичних випробувань для ВВ напругою 110, 220 та 330 кВ, які експлуатуються в Харківській, Полтавській та Луганській областях України та апарат двохфакторного дисперсійного аналізу було встановлено, що на значення показників в справних ВВ, крім номінальної напруги, конструкції ВВ, типу ізоляції, сорту та типу захисту масел, що відомо і відображено в діючих нормативних документах, значущий вплив здійснюють значення струмів завантаження вводів і склад споживачів. Перевірка гіпотези про значущість впливу факторів і їх взаємодій здійснювалися за допомогою критерію Фішера. Гіпотеза про відсутність впливу фактора або ефекту взаємодії не була відкинута, якщо розрахункове значення  $F$ -критерію не перевищувало

табличного, при відповідних значеннях числа степенів вільності і рівні значущості  $\alpha=0,05$ . Результати дисперсійного аналізу наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати перевірки впливу умов і режимів експлуатації на технічний стан основної ізоляції високовольтних вводів різної конструкції

Суми дисперсійного розкладання		Число степенів вільності		F-критерій		
				F	розрахунковий	критичний
<b>Фактор А: тривалість експлуатації; Фактор В: струм завантаження</b>						
$Q_{\Sigma}$	4,04846814	$\nu_{\text{заг}}$	146	$F_A$	12,081	2,408
$Q_A$	0,09121385	$\nu_A$	6	$F_B$	66,106	3,688
$Q_B$	1,85823026	$\nu_B$	2	$F_{AB}$	1,945	1,944
$Q_{AB}$	0,32810803	$\nu_{AB}$	12	–	–	–
$Q_{\epsilon}$	1,77091600	$\nu_{\text{залиш.}}$	126	–	–	–
<b>Фактор А: тривалість експлуатації; Фактор В: тип ізоляції</b>						
$Q_{\Sigma}$	3,31623392	$\nu_{\text{заг}}$	155	$F_A$	1,342	2,566
$Q_A$	0,13251054	$\nu_A$	5	$F_B$	8,970	5,023
$Q_B$	0,17708677	$\nu_B$	1	$F_{AB}$	1,659	2,566
$Q_{AB}$	0,16377262	$\nu_{AB}$	5	–	–	–
$Q_{\epsilon}$	2,84286400	$\nu_{\text{залиш.}}$	144	–	–	–
<b>Фактор А: тривалість експлуатації; Фактор В: тип вводу</b>						
$Q_{\Sigma}$	10,89121597	$\nu_{\text{заг}}$	119	$F_A$	1,715	2,696
$Q_A$	0,76959727	$\nu_A$	5	$F_B$	0,0234	5,179
$Q_B$	0,00210003	$\nu_B$	1	$F_{AB}$	0,962	2,696
$Q_{AB}$	0,43157527	$\nu_{AB}$	5	–	–	–
$Q_{\epsilon}$	9,68794340	$\nu_{\text{залиш.}}$	108	–	–	–
<b>Фактор А: тривалість експлуатації; Фактор В: тип захисту вводу</b>						
$Q_{\Sigma}$	86,37834620	$\nu_{\text{заг}}$	199	$F_A$	2,706	2,113
$Q_A$	9,42011144	$\nu_A$	9	$F_B$	10,771	5,023
$Q_B$	4,16478660	$\nu_B$	1	$F_{AB}$	0,917	2,113
$Q_{AB}$	3,19455864	$\nu_{AB}$	9	–	–	–
$Q_{\epsilon}$	69,59888950	$\nu_{\text{залиш.}}$	180	–	–	–
<b>Фактор А: тривалість експлуатації; Фактор В: фаза трансформатора</b>						
$Q_{\Sigma}$	29,69716083	$\nu_{\text{заг}}$	149	$F_A$	5,597	2,221
$Q_A$	8,54927057	$\nu_A$	9	$F_B$	0,431	3,688
$Q_B$	0,14630625	$\nu_B$	2	$F_{AB}$	0,208	1,872
$Q_{AB}$	0,63580441	$\nu_{AB}$	18	–	–	–
$Q_{\epsilon}$	20,36577960	$\nu_{\text{залиш.}}$	120	–	–	–
<b>Фактор А: тривалість експлуатації; Фактор В: клас напруги вводу</b>						
$Q_{\Sigma}$	8,48736900	$\nu_{\text{заг}}$	107	$F_A$	1,456	2,730
$Q_A$	0,31276389	$\nu_A$	5	$F_B$	41,017	3,865
$Q_B$	3,52232289	$\nu_B$	2	$F_{AB}$	1,835	2,213
$Q_{AB}$	0,78793222	$\nu_{AB}$	10	–	–	–
$Q_{\epsilon}$	3,86435000	$\nu_{\text{залиш.}}$	90	–	–	–
<b>Фактор А: тривалість експлуатації; Фактор В: регіон України</b>						
$Q_{\Sigma}$	51,90583892	$\nu_{\text{заг}}$	107	$F_A$	1,817	2,730
$Q_A$	1,54170486	$\nu_A$	5	$F_B$	92,550	3,865
$Q_B$	31,3946097	$\nu_B$	2	$F_{AB}$	2,184	2,213
$Q_{AB}$	15,26477017	$\nu_{AB}$	10	–	–	–
$Q_{\epsilon}$	0,00010008	$\nu_{\text{залиш.}}$	90	–	–	–



Для визначення законів розподілу показників ізоляції ВВ необхідно забезпечити статистичну однорідність результатів випробувань, тобто сформувати масиви показників ізоляції для ВВ, що експлуатуються зі схожими значеннями коефіцієнтів завантаження, мають близький склад споживачів і т.д. Для вирішення цієї задачі в умовах обмеженості апріорної виміральної інформації запропоновано триетапний алгоритм статистичної обробки результатів випробувань. Формування масивів з однорідними значеннями показників ізоляції виконувалось за умови подібності законів розподілів, рівності вибіркового середнього і вибіркового дисперсії для результатів випробувань по кожному з показників для різних ВВ. Практичне використання цього алгоритму дозволило істотно знизити неоднорідність результатів періодичних випробувань стану ізоляції ВВ, що в свою чергу дозволило виконати аналіз законів розподілу показників ізоляції вводів.

За результатами аналізу (табл. 2) встановлено, що як в справних, так і в дефектних ВВ герметичного і негерметичного виконання всі досліджувані показники: тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції ( $\text{tg}\delta_1$ ) і вимірального конденсатора ( $\text{tg}\delta_2$ ), ємність основної ізоляції ( $C_1$ ) і вимірального конденсатора ( $C_2$ ), можуть бути описані законом розподілу Вейбула. Аналізуючи взаємне розташування теоретичних щільностей розподілу параметрів ізоляції для справних і дефектних ВВ одного класу напруги і однієї конструкції (рис.1), зроблено ряд важливих висновків: а) значення математичного очікування для різних масивів одного і того ж показника зміщені один щодо одного, це свідчить про різну ступень старіння ізоляції ВВ в умовах реальної експлуатації в зв'язку з різним завантаженням трансформаторів, на яких встановлені дані вводи, і різним терміном експлуатації; б) взаємне розташування щільностей розподілу для справних ВВ герметичної і негерметичної конструкції так само зміщені один щодо одного, це свідчить про значний вплив типу захисту масла вводів на значення показників основної ізоляції; в) щільності розподілу для справного і дефектного станів ВВ перетинаються, а отже, не може бути вибраний ГДЗ параметрів ізоляції, які б не давали помилкових рішень.

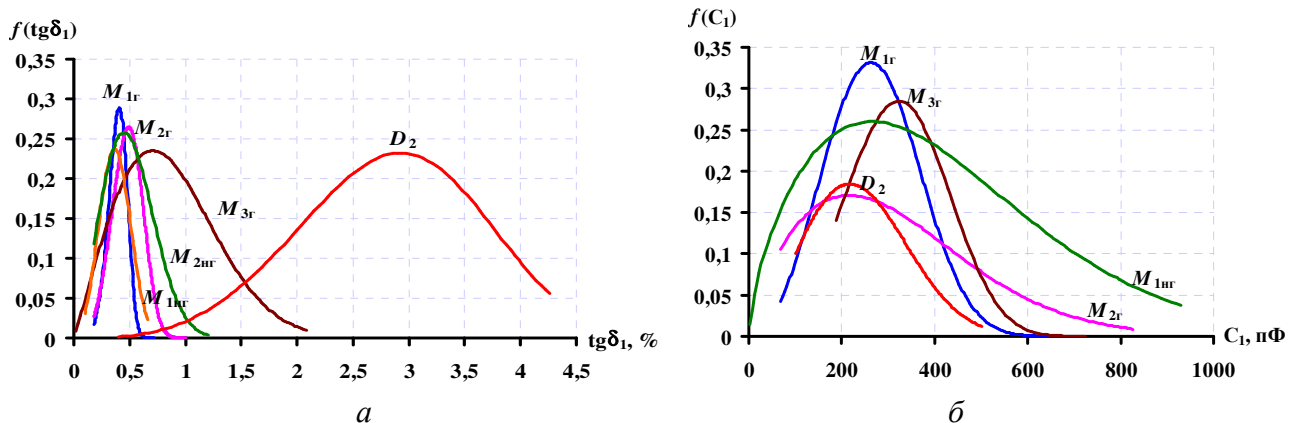


Рисунок 1 – Щільності теоретичних розподілів параметрів ізоляції справних герметичних ( $M_{1r}$ ,  $M_{2r}$ ,  $M_{3r}$ ), справних негерметичних ( $M_{1nr}$ ,  $M_{2nr}$ ,  $M_{3nr}$ ), і дефектних ( $D_2$ ) вводів:  $a$  –  $\text{tg}\delta_1$ ;  $b$  –  $C_1$

За результатами аналізу кореляційних зв'язків між показниками ізоляції ВВ обґрунтовано можливість використання одномірних розподілів показників ізоляції ВВ для визначення ГДЗ методом мінімального ризику.

Таблиця 2 – Значення параметрів закону розподілу Вейбулла, а також розрахункові та критичні значення (при  $\alpha = 0,05$ ) критеріїв Пірсона і Колмогорова – Смирнова для показників ізоляції справних вводів

Показник	масив	Параметри закону розподілу		Значення критерію Пірсона			Значення критерію Колмогорова-Смирнова	
		$\alpha$	$\beta$	$f$	$\chi^2_{розр}$	$\chi^2_{крит}$	$\lambda_{розр}$	$\lambda_{крит}$
		Вводи негерметичної конструкції						
$tg\delta_1$	$M_1$	0,563209	2,413753	2	0,488	5,990	0,213	1,360
	$M_2$	0,415860	3,093468	3	0,939	7,820	0,174	1,360
$tg\delta_2$	$M_1$	0,699454	1,923409	2	1,421	5,990	0,451	1,360
	$M_2$	1,069031	2,019215	2	1,012	5,990	0,361	1,360
$C_1$	$M_1$	464,4127	1,653419	3	2,677	7,820	0,406	1,360
$C_2$	$M_1$	435,3072	1,992624	3	1,350	7,820	0,268	1,360
Вводи герметичної конструкції								
$tg\delta_1$	$M_1$	0,424122	5,414246	2	2,933	5,990	0,588	1,360
	$M_2$	0,530256	4,008926	4	4,396	9,490	0,604	1,360
	$M_3$	0,973090	2,073233	4	1,351	9,490	0,277	1,360
$tg\delta_2$	$M_1$	0,462615	5,837836	2	4,878	5,990	0,692	1,360
	$M_2$	0,535515	6,670923	2	2,539	5,990	0,644	1,360
	$M_3$	0,939447	2,222901	4	4,949	9,490	0,445	1,360
$C_1$	$M_1$	350,8528	1,725618	4	3,848	9,490	0,503	1,360
	$M_2$	353,7525	1,737734	5	3,933	11,100	0,450	1,360
	$M_3$	357,5067	3,395118	2	3,546	5,990	0,603	1,360
$C_2$	$M_1$	324,9421	1,708024	2	4,693	5,990	0,774	1,360
	$M_2$	384,5258	1,924692	3	5,862	7,820	0,860	1,360
	$M_3$	572,7063	3,297039	4	3,002	9,490	0,452	1,360
Дефектні вводи								
$tg\delta_1$		3,150824	3,933431	3	3,128	7,820	0,598	1,360
$tg\delta_2$		2,575944	3,113934	3	0,248	7,820	0,150	1,360
$C_1$		270,2578	2,437388	5	3,578	11,100	0,326	1,360
$C_2$		621,6017	4,455534	3	4,493	7,820	0,715	1,360

У табл. 2  $M_1$ – $M_3$  масиви показників сформовані для вводів з ідентичними умовами експлуатації

Визначення ГДЗ виконувалось шляхом мінімізації функції середнього ризику, яка з урахуванням визначеного розподілу Вейбула має вигляд

$$R = C_{21} P_1 \int_{tg\delta_{гр}}^{\infty} \frac{\beta_1}{\alpha_1^{\beta_1}} \cdot tg\delta^{\beta_1-1} \cdot e^{-\left(\frac{tg\delta}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}} dtg\delta + C_{12} P_2 \int_{-\infty}^{tg\delta_{гр}} \frac{\beta_2}{\alpha_2^{\beta_2}} \cdot tg\delta^{\beta_2-1} \cdot e^{-\left(\frac{tg\delta}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}} dtg\delta, \quad (1)$$

де  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$  – значення параметрів масштабу і форми для розподілу значень  $tg\delta$  в справних та в дефектних вводах відповідно;  $tg\delta_{гр}$  – гранично допустиме значення  $tg\delta$ .

Враховуючи, що точне аналітичне рішення для (1) відсутнє, то для визначення ГДЗ  $tg\delta$  був використаний чисельний метод Ньютона. На рис. 2 показані залежності значення середнього ризику від  $tg\delta_1$ , для значень параметрів розподілу справного стану, відповідних масиву  $M_1$ .

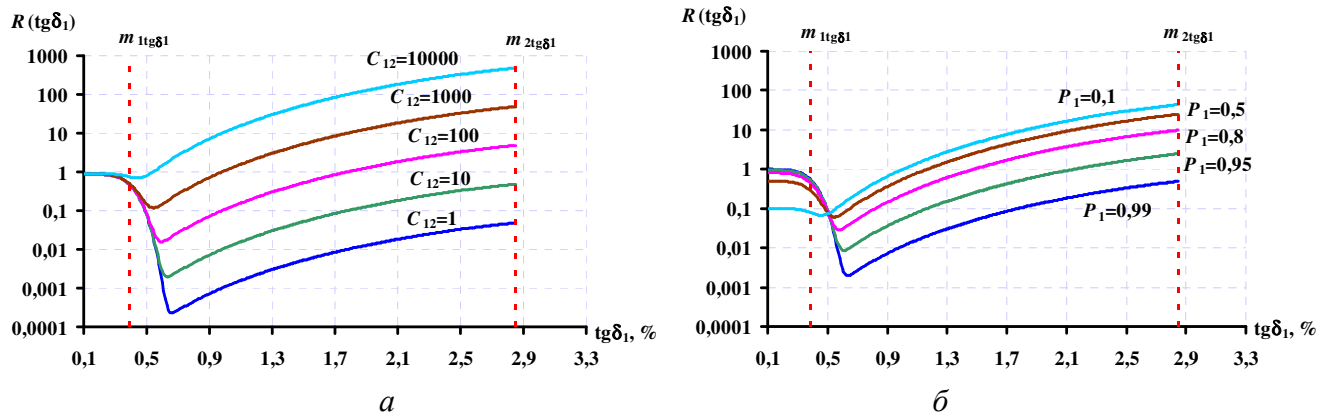


Рисунок 2 – Залежності значень середнього ризику від значень  $\text{tg}\delta_1$  для масиву  $M_1$ : *a* – при різних значеннях ціни «пропуску дефекту»; *б* – при різних значеннях ймовірностей справного стану

ГДЗ  $\text{tg}\delta_1$ , що забезпечують мінімум ризику, отримані шляхом мінімізації функції (1) для значень  $P_1=0,9$ ,  $P_2=0,1$ ,  $C_{12}=100$  та  $C_{12}=1$  та методом інтегральних функцій наведені в табл. 3. Аналіз даних з табл. 3 показує, що граничні значення, які забезпечують мінімум ризику для різних масивів даних ізоляції справних ВВ, істотно розрізняються. Це свідчить про необхідність коригування ГДЗ показників ізоляції вводів з урахуванням впливу конкретних умов експлуатації.

Таблиця 3 – Гранично допустимі значення показників ізоляції вводів, що забезпечують мінімум ризику

Показник	Масив	Гранично допустимі значення	
		методом мінімуму ризику	методом інтегральних функцій
$\text{tg}\delta_1$	$M_1$	0,596	0,46
	$M_2$	0,775	0,59
	$M_3$	1,117	1,27
$\text{tg}\delta_2$	$M_1$	0,593	0,49
	$M_2$	0,659	0,57
	$M_3$	0,754	1,2

У табл. 4 наведено порівняльний аналіз середніх ризиків, які виникають при використанні ГДЗ показників ізоляції ВВ, отриманих різними методами. Аналізуючи дані з табл. 4, можна констатувати, що використання в якості ГДЗ показників, отриманих різними методами, супроводжується різними значеннями ризику. Мінімальне значення ризиків забезпечують ГДЗ показників, які отримані методом мінімального ризику з урахуванням умов експлуатації ВВ. При цьому отримані ГДЗ показників забезпечують значення ризику в 1,5–33 рази менші в порівнянні з ГДЗ, регламентованими чинним в Україні стандартом, і в 1,1–13 разів менші, ніж ГДЗ, отримані методом інтегральних функцій. Максимальне значення ризику забезпечує ГДЗ показників, які регламентуються чинним в Україні нормативним документом. Порівнюючи значення ризиків, які супроводжують використання ГДЗ, отриманих методом інтегральних функцій, і значення ризику, які отримані при використанні ГДЗ показників, регламентованих чинним в Україні стандартом, легко побачити, що урахування умов експлуатації ВВ дозволяє знизити можливі ризики навіть при використанні методу інтегральних функцій. Для всіх без винятку ГДЗ показників (незалежно від того, яким методом вони отримані),

спостерігається зниження значень ймовірності прийняття правильних рішень у міру погіршення умов експлуатації справних вводів. Зростання терміну експлуатації і збільшення навантажувальних струмів призводить до збільшення значення ризику.

Таблиця 4 – Значення ймовірностей правильних і помилкових рішень, значення ризиків отриманих при використанні ГДЗ показників, які розраховані різними методами

Показник	Масив	Значення ймовірностей помилкових і правильних рішень				R
		$P_{11}$	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{12}$	
<b>Гранично допустимі значення показників, регламентовані чинним в Україні стандартом</b>						
$tg\delta_1$	$M_1$	1	0	0,9475	0,0525	0,526
	$M_2$	1	0	0,9475	0,0525	0,526
	$M_3$	0,9139	0,0861	0,9475	0,0525	0,602
$tg\delta_2$	$M_1$	1	0	0,8306	0,1694	1,694
	$M_2$	1	0	0,8306	0,1694	1,694
	$M_3$	0,9410	0,0590	0,8306	0,1694	1,747
<b>Гранично допустимі значення показників, отримані методом інтегральних функцій</b>						
$tg\delta_1$	$M_1$	0,7882	0,2118	0,9995	0,0005	0,195
	$M_2$	0,7844	0,2156	0,9986	0,0014	0,207
	$M_3$	0,8239	0,1761	0,9723	0,0277	0,435
$tg\delta_2$	$M_1$	0,7532	0,2469	0,9943	0,0057	0,279
	$M_2$	0,7805	0,2195	0,9909	0,0091	0,288
	$M_3$	0,8215	0,1785	0,9115	0,0885	1,045
<b>Гранично допустимі значення показників, отримані методом мінімального ризику</b>						
$tg\delta_1$	$M_1$	0,9982	0,0018	0,9986	0,0014	0,016
	$M_2$	0,9904	0,0096	0,9959	0,0041	0,048
	$M_3$	0,7360	0,2640	0,9832	0,0168	0,406
$tg\delta_2$	$M_1$	0,9859	0,0141	0,9897	0,0103	0,115
	$M_2$	0,9815	0,0185	0,9858	0,0142	0,158
	$M_3$	0,4585	0,5415	0,9784	0,0216	0,703

За результатами аналізу встановлено (рис. 3), що збільшення ймовірності виникнення дефекту і його умовної вартості, а також збільшення терміну експлуатації ВВ і їх завантаження (збільшення параметра масштабу розподілу Вейбулла для справних ВВ) приводить до зниження ГДЗ показників.

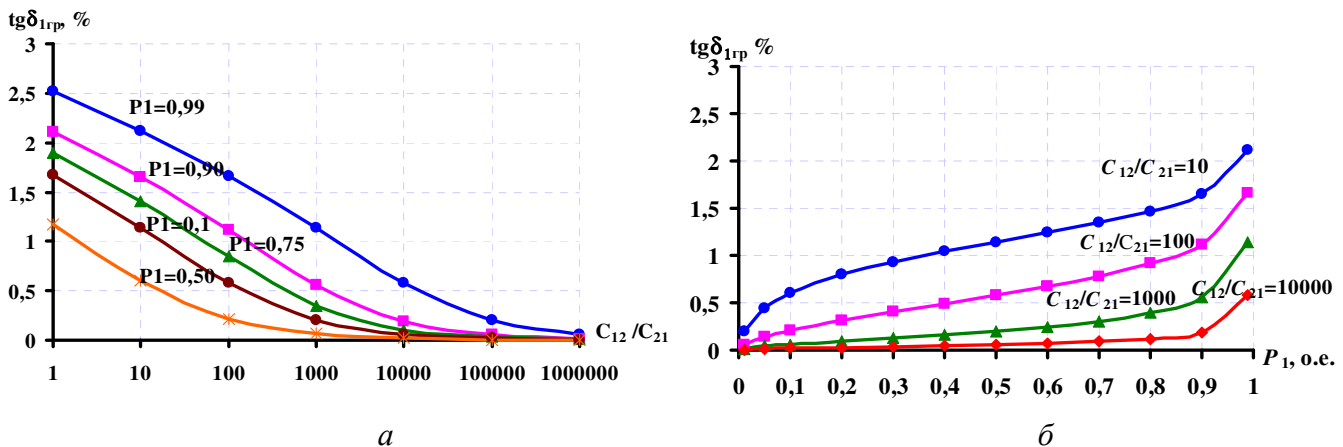


Рисунок 3 – Залежність ГДЗ  $tg\delta_1$ :  $a$  – від ймовірності справного стану вводів при різних значеннях умовних вартостей помилкових рішень;  $b$  – від відношення вартостей помилкових рішень при різних значеннях ймовірностей справного стану вводів

Наприклад, збільшення ймовірності появи дефекту з 0,75 до 0,9 в. о. при  $C_{12}/C_{21} = 100$  призводить до зниження ГДЗ  $\text{tg}\delta_1$  в 1,33 рази, а збільшення умовної вартості пропуску дефекту з 100 до 1000 у. о. при  $P_1 = 0,9$  призводить до зниження ГДЗ  $\text{tg}\delta_1$  в 2 рази. Таким чином, доведено, що гранично допустимі значення показників ізоляції не можуть бути незмінними, а повинні коригуватися з урахуванням струмів завантаження.

У **третьому розділі** розроблено метод для раннього прогнозування пошкоджень ВВ на основі аналізу динаміки зміни показників у часі. За результатами коваріаційного аналізу лінійних моделей показників ізоляції на тривалість експлуатації встановлено, що як для справних, так і для дефектних ВВ швидкість зміни показників ізоляції у часі суттєво відрізняється, що повністю співпадає з результатами двохфакторного дисперсійного аналізу. Крім того встановлено суттєва відмінність між характером часових залежностей показників в справних та дефектних ВВ. Для більш детального аналізу характеру залежностей показників ізоляції від тривалості експлуатації для ВВ, що мають різний стан, виконан регресійний аналіз за показниками для кожного окремого вводу. Вплив тривалості експлуатації визнавався значущим, якщо розрахункове значення  $F$ -критерію перевищувала табличне значення при основній гіпотезі  $H_0: b_1 = 0$  – кутовий коефіцієнт регресії дорівнює нулю, тобто лінія тренда паралельна осі часу. Результати регресійного аналізу наведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Результати регресійного аналізу для показників ізоляції справних та дефектних високовольтних вводів напругою 110 кВ

Показник	N	n	Стаціонарні часові ряди ( $F_{\text{рас}} < F_{\text{кр}}$ )						Нестационарні часові ряди ( $F_{\text{рас}} > F_{\text{кр}}$ )			
			$b_1 < 0$		$b_1 > 0$		$b_1 = 0$		$b_1 < 0$		$b_1 > 0$	
			N	n	N	n	N	n	N	n	N	n
Справні високовольтні вводи герметичної конструкції												
<b>tgδ<sub>1</sub></b>	453	68	204	28	223	36	5	1	0	0	21	3
<b>tgδ<sub>2</sub></b>	453	68	200	34	229	31	0	0	24	3	0	0
<b>C<sub>1</sub></b>	453	68	171	33	157	25	0	0	73	7	52	3
<b>C<sub>2</sub></b>	453	68	136	22	184	32	0	0	54	7	79	7
<b>R</b>	453	68	25	4	29	5	285	51	114	8	0	0
Справні високовольтні вводи негерметичної конструкції												
<b>tgδ<sub>1</sub></b>	140	19	49	8	49	7	0	0	6	1	36	3
<b>tgδ<sub>2</sub></b>	140	19	35	5	75	11	0	0	0	0	30	3
<b>C<sub>1</sub></b>	140	19	51	7	89	12	0	0	0	0	0	0
<b>C<sub>2</sub></b>	140	19	39	6	38	6	0	0	35	4	28	3
<b>R</b>	140	19	52	6	22	2	56	11	0	0	0	0
Дефектні вводи												
<b>tgδ<sub>1</sub></b>	60	9	23	3	9	1	0	0	0	0	28	5
<b>tgδ<sub>2</sub></b>	60	9	0	0	9	1	0	0	0	0	51	8
<b>C<sub>1</sub></b>	60	9	22	3	14	2	0	0	14	2	10	2
<b>C<sub>2</sub></b>	60	9	0	0	12	2	0	0	48	7	0	0
<b>R</b>	60	9	22	3	5	1	15	3	9	1	9	1

Аналіз даних, наведених у табл. 5, показує, що для справних вводів як герметичної, так і негерметичної конструкції, зі зростанням тривалості експлуатації практично не спостерігається статистично значуща зміна значень показників ізоляції

в часі ( $b_1=0$ ). Тобто залежності показників ізоляції від тривалості експлуатації не є монотонними. В той же час, розвиток дефекту в ізоляції ВВ призводить до появи в часових залежностях показників значущої систематичної складової ( $b_1>0$ ). При цьому, на відміну від справних вводів, в кожному дефектному ввіді виявлена значна систематична складова, як мінімум, для одного показника. Таким чином, поява значущої систематичної складової в залежностях показників від тривалості експлуатації є ознакою наявності дефекту ВВ. Розвиток дефектів в ізоляції ВВ призводить не тільки до появи статистично значущої складової в залежностях показників від тривалості експлуатації, але й до зміни характеру взаємозалежностей між окремими показниками вводів, та між показниками вводів, що розташовані на сусідніх фазах трансформаторів. Зокрема встановлено, що для справних вводів має місце відсутність значущої кореляції між показниками ізоляції та тривалістю експлуатації, практична відсутність кореляції між окремими показниками та наявність значущої кореляції між показниками ізоляції вводів, встановлених на сусідніх фазах. В якості прикладу в табл. 6-7, наведено результати кореляційного аналізу для справного вводу герметичної конструкції ГМТА – 90-110/1000, який встановлено у фазі А автотрансформатора АТДЦТН-200000/330/110. Як видно з табл. 6, для справних вводів відсутня значуща кореляція між тривалістю експлуатації та значеннями показників ізоляції. Також відсутня значуща кореляція між значеннями показників.

Таблиця 6 – Кореляційні зв'язки між значеннями показників ізоляції і тривалістю експлуатації і між окремими показниками справного вводу ГМТА - 90-110/1000

Показник	Тривалість експлуатації	$\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2$	$C_1$	$C_2$	R
$n=10 \ r_{\text{крит. } 8, 0,95}=0,632$						
$\text{tg}\delta_1$	-0,255	<b>1,00</b>	-0,444	-0,132	-0,022	0,110
$\text{tg}\delta_2$	0,221	-0,444	<b>1,00</b>	0,145	0,104	-0,010
$C_1$	0,271	-0,132	0,145	<b>1,00</b>	0,505	0,583
$C_2$	0,104	-0,022	0,104	0,505	<b>1,00</b>	0,211
R	-0,439	0,110	-0,010	0,583	0,211	<b>1,00</b>

Аналізуючи дані, які наведені у табл. 7, легко побачити, що для справних високовольтних вводів має місце наявність значущої кореляції між значеннями показників для всіх трьох фаз, виняток може становити опір вимірювального вивода. З рис. 4 випливає, що динаміка зміни показників ізоляції в часі ідентична, це дозволяє більш точно виконувати порівняння стану ізоляції вводів, установлених на сусідніх фазах обладнання.

Таблиця 7 – Кореляційні зв'язки між значеннями показників ізоляції справного вводу ГМТА - 90-110 / 1000 (фаза А) і показниками справних вводів на сусідніх фазах (В і С)

Фаза	$\text{tg}\delta_1/\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2/\text{tg}\delta_2$	$C_1/C_1$	$C_2/C_2$	R/R
$n=12 \ r_{\text{крит. } 10, 0,95}=0,576$					
А-В	0,870	0,929	0,740	0,686	0,519
А-С	0,781	0,963	0,892	0,897	1,000
В-С	0,968	0,968	0,871	0,755	0,519

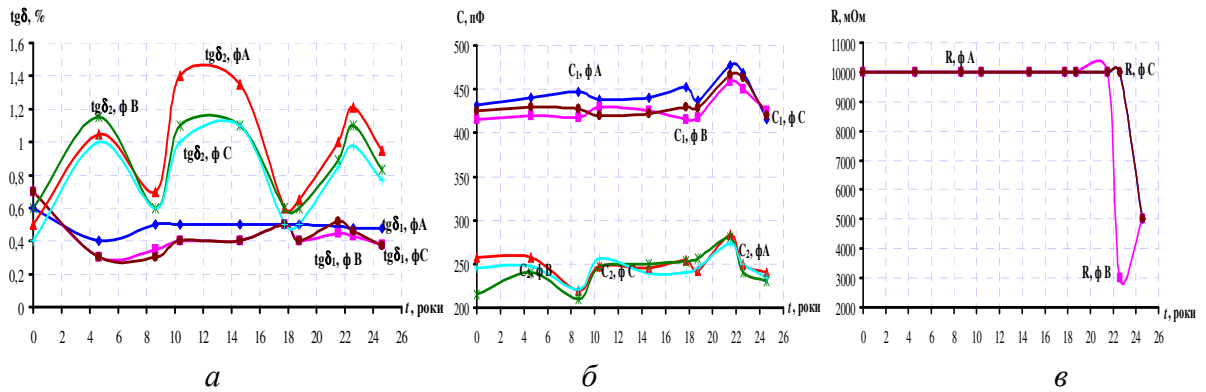


Рисунок 4 – Залежності показників ізоляції від тривалості експлуатації для справного вводу ГМТА - 90-110 / 1000 (фаза А) і справних вводів, установлених на сусідніх фазах (фази В і С): а –  $\text{tg}\delta_1$  та  $\text{tg}\delta_2$ ; б – ємність  $C_1$  та  $C_2$ ; в – опору  $R$

Слід зазначити, що наявність значущої кореляції між значеннями показників у справних вводах, встановлених на сусідніх фазах, виявлено і в тих випадках, коли значення показників ізоляції перевищують ГДЗ через порушення при проведенні випробувань. Наявність значущої кореляційної залежності між показниками ВВ, встановлених на сусідніх фазах, дозволяє визначити причину зростання значень показників і мінімізувати помилкове відбраковування вводів. В той же час виконаний аналіз встановив відсутність значущої кореляції між показниками ізоляції ВВ, встановлених на сусідніх трансформаторах ПС. Що свідчить про індивідуальний характер зміни показників у часі для вводів, встановлених на окремих трансформаторах, та не дає можливості використовувати метод траєкторій для прогнозування значень показників ізоляції. В той же час поява дефекту в ВВ як герметичної, так і негерметичної конструкції призводить до наявності значущої кореляції між показниками ізоляції та тривалістю експлуатації, наявності значущої кореляції між окремими показниками, та відсутності значущої кореляції між показниками ізоляції вводів, встановлених на сусідніх фазах трансформаторів. В якості прикладу в табл. 8–9 приведені результати кореляційного аналізу для вводу ПМВП - 110, встановленого на фазі С вимикача 110 кВ. Даний ввід був виведений з експлуатації 02.09.2015 за результатами контролю значення  $\text{tg}\delta_2$ . Як видно з табл. 8, з п'яти показників значущий зв'язок з тривалістю експлуатації виявлено для чотирьох показників. При цьому значення  $\text{tg}\delta_1$ ,  $\text{tg}\delta_2$  і  $C_2$  значимо збільшуються зі зростанням тривалості експлуатації, а значення  $C_1$  значимо знижуються. З табл. 8 також видно, що значний кореляційний зв'язок виявлен не тільки між показниками, що мають значимий зв'язок з тривалістю експлуатації ( $\text{tg}\delta_1$  і  $\text{tg}\delta_2$ ;  $\text{tg}\delta_1$  і  $C_1$ ;  $\text{tg}\delta_2$  і  $C_1$ ), але і між  $\text{tg}\delta_1$  і  $R$ . Слід зазначити, що опір вимірювального виводу не має значущого зв'язку з тривалістю експлуатації. Незважаючи на те, що і ємності  $C_1$  і  $C_2$ , значимо змінюються у часі, кореляційний зв'язок між цими показниками є не значущий. З табл. 9 видно, що характер залежностей  $\text{tg}\delta_1$ ,  $\text{tg}\delta_2$ ,  $C_2$  і  $R$  від тривалості експлуатації в справних вводах збігається, але відрізняються від характеру залежностей даних показників для несправного вводу (див. рис. 5, а). У той же час характер залежностей ємності основної ізоляції від тривалості експлуатації для справного вводу фази В і несправного вводу фази С збігається (див. рис. 5, б).

Принципово важливим є те, що виявлені відмінності в характері часових залежностей показників проявляються ще до того, як значення показників ізоляції

перевищують свої ГДЗ, що дає можливість виявляти дефекти високовольтних вводів на ранній стадії їх розвитку вне залежності від значення показників ізоляції.

Таблиця 8 – Аналіз кореляційних зв'язків між значеннями показників ізоляції і тривалістю експлуатації і між окремими показниками високовольтного негерметичного вводу ПМВП - 110

Показник	Тривалість експлуатації	$\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2$	$C_1$	$C_2$	R
$n = 8, r_{\text{крит. 6, 0,95}} = 0,707$						
$\text{tg}\delta_1$	<b>0.800</b>	<b>1,00</b>	<b>0.760</b>	<b>-0.842</b>	0.543	<b>-0.715</b>
$\text{tg}\delta_2$	<b>0.751</b>	<b>0.760</b>	<b>1,00</b>	<b>-0.728</b>	0.419	-0.514
$C_1$	<b>-0.859</b>	<b>-0.842</b>	<b>-0.728</b>	<b>1,00</b>	-0.660	0,636
$C_2$	<b>0.855</b>	0.543	0.419	-0.660	<b>1,00</b>	0.148
<b>R</b>	-0.264	<b>-0.715</b>	-0.514	0,636	0.148	<b>1,00</b>

Таблиця 9 – Аналіз кореляційних зв'язків між значеннями показників ізоляції несправного вводу ПМВП - 110 кВ (фаза C) і показниками справних вводів встановлених на сусідніх фазах (A і B)

Фаза	$\text{tg}\delta_1/\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2/\text{tg}\delta_2$	$C_1/C_1$	$C_2/C_2$	R/R
$n = 8, r_{\text{крит. 6, 0,95}} = 0,707$					
<b>A-B</b>	<b>0,923</b>	<b>0,758</b>	0,244	<b>0,792</b>	<b>0,935</b>
A-C	-0,323	-0,471	0,355	0,075	0,470
<b>B-C</b>	-0,069	-0,388	<b>0,979</b>	0,653	0,691

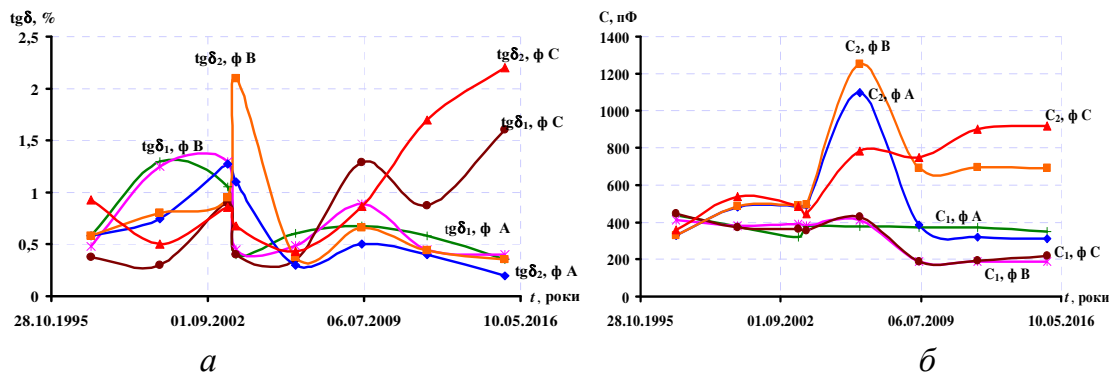


Рисунок 5 – Залежності показників ізоляції від тривалості експлуатації для несправного вводу ГМТА-110/630-У1 110 кВ (фаза А) і справних вводів (фази В і С): а –  $\text{tg}\delta_1$  та  $\text{tg}\delta_2$ ; б –  $C_1$  та  $C_2$ .

Виявлені відмінності в характері зміни в часі показників ізоляції в справних і несправних вводах дозволили розробити метод для прогнозування дефектів ВВ.

Суть пропонованого методу полягає в тому, що після проведення випробувань стану ізоляції вводів і протоколювання значень показників ізоляції, крім порівнянь значень показників з ГДЗ, визначаються: 1) значення коефіцієнтів парної кореляції між показниками ізоляції і тривалістю експлуатації; 2) значення коефіцієнтів парної кореляції між показниками в аналізованому вводі; 3) значення коефіцієнтів парної кореляції між показниками вводів сусідніх фаз. Пошкодження ВВ прогнозується при наявності значної кореляції між показником ізоляції і тривалістю експлуатації, при наявності значного зв'язку між показниками ізоляції аналізованого вводу і при відсутності значимої кореляції між показниками аналізованого вводу і показниками вводів сусідніх фаз. Нормальний стан вводу прогнозується при відсутності значимої



кореляції між показником ізоляції і тривалістю експлуатації, при відсутності або наявності значущого зв'язку між показниками ізоляції аналізованого вводу і при наявності значної кореляції між показниками аналізованого вводу і показниками вводів сусідніх фаз. Виконана перевірка запропонованого методу на незалежній вибірці показала його високу достовірність: прогнозований стан вводу співпадав з реальним станом на 92 % (для 22 вводів з 24). Слід зазначити, що для двох вводів, для яких прогнозований стан не співпав з реальним станом, було прогнозовано наявність пошкодження, в той же час вводи виявилися справними.

Виконані дослідження показали, що не всі дефекти ВВ можуть бути виявлені на основі аналізу результатів випробувань ізоляції на низькій напрузі. На основі співставлення результатів аналізу розчинних в маслі газів з результатами періодичних випробувань встановлено, що такі дефекти, як часткові розряди з низькою щільністю енергії не завжди призводять до погіршення значень показників ізоляції. При цьому в ВВ з частковими розрядами динаміка зміни показників у часі практично не відрізняється від динаміки зміни показників в справних ВВ. В зв'язку з цим, для достовірного виявлення дефектів, в тому числі і часткових розрядів, доцільніше використовувати методи безперервного контролю під робочою напругою.

В четвертому розділі наведено вдосконалений метод контролю ізоляції конденсаторного типу маслонаполненого високовольтного обладнання під робочою напругою та розроблено дослідний зразок пристрою на сучасній елементній базі як елемент АСК ТП підстанції. В основу методу покладено завдання контролю діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції конденсаторного типу вводів силових трансформаторів і вимірювальних трансформаторів струму під робочою напругою, по якому перевіряють у часі зміни потужності втрат в ізоляції контрольованого об'єкта як результати опосередкованих вимірювань, що визначається по результатам прямих вимірювань струму в колі заземлення виводу від вимірювальної обкладинки ізоляції об'єкта контролю і фазної напруги вказаного об'єкта, множення миттєвих значень струму на миттєві значення напруги і розрахунку середнього значення добутку за період промислової частоти.

На рис. 6 зображена функціональна схема пристрою для реалізації методу контролю на основі мікропроцесорної техніки і промислової ЕОМ:

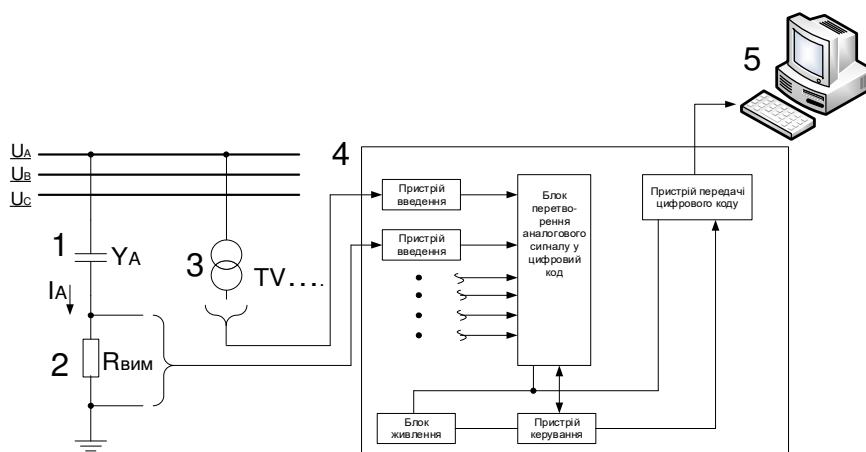


Рисунок 6 – Функціональна схема пристрою контролю

конденсаторного типу об'єкта контролю; 2 – вимірювальний резистор пристрою приєднання до потенційного виводу вимірювальної обкладинки ізоляції конденсаторного типу; 3 – вимірювальний трансформатор напруги; 4 – пристрій контролю на основі цифрової техніки; 5 – промислова ЕОМ.

Істотна відмінність метода полягає в тім, що при перевірці у часі зміни потужності втрат в ізоляції



Рисунок 7 – Загальний вид пристрою контролю ізоляції вводів

контрольованого об'єкта, отриманої як результат опосередкованих вимірювань, що визначається по результатам прямих вимірювань струму в колі заземлення виводу від вимірювальної обкладинки ізоляції об'єкта контролю і фазної напруги вказаного об'єкта, множення миттєвих значень струму на миттєві значення напруги і розрахунку середнього значення добутку за період промислової частоти, виконують вимірювання навантаження і коефіцієнт потужності навантаження вимірювального трансформатора напруги приєднаного до тієї ж фази системи шин, що і контрольований об'єкт, при відсутності дефекту і при контролі, розраховують його погрішність в напрузі і куту, з компенсацією яких визначають фазну напругу об'єкта контролю і результат опосередкованих вимірювань потужності

втрат, запам'ятовують значення робочої фазної напруги при відсутності дефекту та множать при кожному контролі результат опосередкованих вимірювань потужності втрат в ізоляції контрольованого об'єкта на квадрат відношення робочих фазних напруг при відсутності дефекту і при контролі. Виготовлено дослідний зразок (рис. 7) пристрою безперервного контролю електричних параметрів внутрішньої ізоляції конденсаторного типу в маслонаповненому високовольтному обладнанні як елемент АСУ ТП ПС для впровадження на ПС «Артема-330 кВ» Північної електроенергетичної системи НЕК «Укренерго» для контролю під робочою напругою вводів 110 кВ і 330 кВ трифазного силового автотрансформатора. Удосконалений метод безперервного контролю захищено 2 патентами на корисну модель.

У додатках наведено список публікацій здобувача, акти впровадження результатів, отриманих при виконання дисертаційної роботи, результати аналізу кореляційних зв'язків між показниками ізоляції високовольтних вводів, результати оцінки законів розподілу показників ізоляції герметичних і негерметичних вводів з різним станом та щільності і функції розподілу для аналізованих законів і вирази для оцінки значень параметрів цих законів.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності експлуатації ВВ за рахунок зниження технічних ризиків шляхом удосконалення методів і критеріїв оцінки технічного стану ВВ в умовах тривалої експлуатації. В результаті чого отримано наступні науково-практичні результати і дозволяють зробити такі висновки.

1. На основі аналізу експлуатаційної надійності обладнання електричних мереж, встановлено що як в Україні, так і за її межами ВВ є одним з найбільш пошкоджуваних вузлів силових трансформаторів, шунтуючих реакторів та вимикачів. При цьому існуюча система оцінки технічного стану ВВ має ряд суттєвих недоліків, зокрема практична відсутність методу для визначення ГДЗ

показників ізоляції, відсутність можливості прогнозування дефектів ВВ, на ранній стадії, а також наявність похибок методів контролю під робочою напругою, пов'язаних зі зміною напруги в мережі і її симетрією. В зв'язку з цим удосконалення методів оцінки технічного стану ВВ та зниження ризиків їх експлуатації є актуальною та вкрай важливою задачею.

2. Встановлено, що на інтенсивність старіння основної ізоляції вводів, крім номінальної напруги, типу ізоляції та типу захисту масел, які враховуються при коригуванні ГДЗ показників, значний вплив здійснюють значення коефіцієнтів завантаження вводів та щільність графіка навантаження, обумовлений складом споживачів.

3. За результатами аналізу законів розподілу показників ізоляції для справних та дефектних ВВ встановлено, що значення показників ізоляції як в справних, так й в дефектних вводах можуть бути описані розподілом Вейбулла, при цьому математичні очікування показників справних ВВ зміщуються в область більш високих значень по мірі зростання завантаження вводів. Також встановлено, що функції щільності розподілів показників для дефектного та справного стану перетинаються, це свідчить про те, що принципово неможливо визначити гранично допустимі значення показників, які не призводили до хибних рішень.

4. Запропоновано метод визначення ГДЗ показників ізоляції ВВ, який відрізняється від існуючих тим, що ГДЗ показників визначаються за рахунок мінімізації функції середнього ризику з урахуванням розподілу значень показників для справного та дефектного стану, а також особливостей конструкції ВВ та режимів їх експлуатації, що забезпечує мінімум можливих збитків в разі прийняття хибних рішень. Виконаний аналіз дозволив встановити, що отримані ГДЗ показників забезпечують значення ризику в 1,5–33 рази менші в порівнянні з ГДЗ, регламентованими чинним в Україні стандартом, і в 1,1–13 разів менші, ніж ГДЗ, отримані методом інтегральних функцій.

5. Встановлено, що при погіршенні умов експлуатації справних ВВ (з ростом терміну експлуатації і збільшенням навантажувальних струмів), значення ймовірності прийняття правильних рішень зменшується, а значення ризику і, відповідно, величина можливих економічних втрат зростає. Збільшення ймовірності виникнення дефекту і його умовної вартості, а також збільшення терміну експлуатації ВВ і їх завантаження (збільшення параметра масштабу розподілу Вейбулла для справних вводів) призводить до зниження ГДЗ показників. Таким чином, доведено, що ГДЗ показників ізоляції не можуть бути незмінними, а повинні корегуватися з урахуванням струмів завантаження вводів, складу споживачів, терміну експлуатації та інших чинників.

6. Виконаний аналіз дозволив встановити, що для справних ВВ як герметичного, так і негерметичного виконання має місце відсутність значущої кореляції між показниками ізоляції і тривалістю експлуатації, практична відсутність значимої кореляції між показниками ізоляції (за винятком  $C_1$  і  $C_2$ ), а також наявність значущої кореляції між показниками ізоляції вводів, встановлених на сусідніх фазах. За результатами досліджень виявлено, що для справних ВВ має місце наявність значущої кореляції між показниками ізоляції і тривалістю експлуатації, наявність значущої кореляції між показниками ізоляції, а також відсутність значимої кореляції між показниками несправного вводу і показниками справних вводів, установлених

на сусідніх фазах. Запропоновано метод раннього прогнозування дефектів ВВ, в якому в якості критерію наявності дефекту використовуються не тільки значення показників ізоляції, але й характер зміни цих показників в часі. Зокрема рішення щодо наявності дефекту, незалежно від значень показників приймається в разі наявності значущої кореляції між показниками ізоляції і тривалістю експлуатації, наявність значущої кореляції між показниками ізоляції, а також відсутність значимої кореляції між показниками несправного вводу і показниками справних вводів, установлених на сусідніх фазах, що дозволяє виявляти і розпізнавати пошкодження вводів на ранній стадії.

7. Удосконалено метод безперервного контролю внутрішньої ізоляції конденсаторного типу в маслонаповненому енергетичному обладнанні високої напруги, який полягає у перевірці в часі зміни потужності втрат у внутрішній ізоляції контрольованого об'єкта. Розроблено пристрій безперервного контролю внутрішньої ізоляції конденсаторного типу. Пристрій реалізований на сучасній елементній базі як елемент АСК ТП підстанції. Впровадження подібних систем контролю дозволить продовжити ресурс чинного, але яке виробило свій ресурс, устаткування, виключити аварії з високовольтними вводами. Результати роботи було впроваджено в АТ «Харківобленерго» та навчальному процесі на кафедрі передачі електричної енергії НТУ «ХП» – в лекційних курсах «Математичні задачі енергетики», «Математичні основи технічної діагностики», «Основи експлуатації об'єктів електроенергетичних систем».

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Zagaynova A. Determining the maximally permissible values for the indicators of insulation of sealed entrance bushings with a voltage of 110 kv using the method of minimal risk / A. Zagaynova, G. Serdyukova, O. Shutenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – №5/8 ( 95 ). – P. 6-15.– DOI: 10.15587/1729-4061.2018.142185.

*Здобувачем запропоновано метод визначення гранично допустимих значень показників ізоляції високовольтних маслонаповнених вводів, які забезпечують мінімальне значення ризику.*

2. Загайнава А. А. Анализ влияния условий и режимов эксплуатации на техническое состояние основной изоляции высоковольтных вводов различной конструкции / О. В. Шутенко, А. А. Загайнава, Г. Н. Сердюкова // Електротехніка і електромеханіка. – 2019. – №1. – С.57-66. DOI: 10.20998/2074 272X.2019.1.10.

*Здобувачем виконано аналіз факторів, що впливають на значення діагностичних показників високовольтних вводів в процесі тривалої експлуатації.*

3. Zagaynova A. Analysis of distribution laws of insulation indicators of high-voltage oil-filled bushings of hermetic and non-hermetic execution / A. Zagaynova, G. Serdyukova, O. Shutenko // TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES. – 2018. – Issue 4/1 (42), P. 30 – 39. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.140873>.

*Здобувачем виконано аналіз законів розподілу показників ізоляції для справних і дефектних високовольтних вводів герметичного і негерметичного виконання.*

4. Загайнова А. А. Аналіз впливу різноманітних чинників на інтенсивність старіння ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів / А. А. Загайнова // Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 10(141). – С. 17-25.

5. Загайнова А. А. Оценка информационной значимости показателей измерительного эксплуатационного контроля технического состояния изоляции высоковольтных маслонаполненных вводов / А. А. Загайнова, В. О. Бондаренко, П. Ф. Щапов, О. В. Шутенко // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Автоматика та приладобудування»– Харків: НТУ «ХП». – 2005. – №17.– С. 96-99.

*Здобувачем розроблена інформаційна модель вимірювального опосередкованого контролю ізоляції високовольтних вводів.*

6. Загайнова А. А. Тестирование статистических моделей старения трансформаторных масел по результатам ускоренных испытаний / А. А. Загайнова // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП» . – 2007.– № 37. – С.44-47.

7. Загайнова А. А. Повышение эксплуатационной надежности маслонаполненного оборудования путем усовершенствования методик контроля состояния изоляции / А. А. Загайнова // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету.– Кіровоград: КНТУ.– 2007– №19. –С. 20-24.

8. Загайнова А. А. Мониторинг электрических параметров изоляции высоковольтных вводов и измерительных трансформаторов под рабочим напряжением / А. А. Загайнова // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків : НТУ «ХП». – 2011. – № 3. – С. 61-68.

9. Загайнова А. А. Удосконалення методики контролю діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції конденсаторного типу високовольтного устаткування під робочою напругою / А. А. Загайнова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – Донецьк : КРЕС. – 2011. –№ 11 (186). – С. 160-163.

10. Загайнова А. А. Аналіз погрішності пристрою безперервного контролю електричних параметрів ізоляції конденсаторного типу у маслонаповненому високовольтному устаткуванні / А. А. Загайнова // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП». – 2011. – № 41. – С. 78-82.

11. Загайнова А. А. Использование рандомизированной модели для тестирования результатов профилактического контроля диэлектрических характеристик высоковольтных вводов / А. А. Загайнова // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – № 23. – С. 100-103.

12. Загайнова А. А. Усовершенствованный метод и устройство контроля изоляции конденсаторного типа высоковольтного оборудования под рабочим напряжением / А. А. Загайнова // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 2013. – №30. – С.102-107.

13. Загайнова О. А. Вдосконалення алгоритму аналізу стану ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів / А. А. Загайнова, Г. М. Сердюкова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського

господарства імені Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків. – 2016. – Вип. 175 – С. 46-48.

*Здобувачем запропоновано алгоритм аналізу стану ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів.*

14. Загайнова А. А. Аналіз змін показників якості ізоляції високовольтних вводів протягом тривалої експлуатації / А. А. Загайнова, Г. Н. Сердюкова // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2017. – № 31 (1253). – С. 40–45.

*Здобувачем розроблена математична модель аналізу змін значень показників ізоляції в залежності від тривалості експлуатації та від інших факторів.*

15. Загайнова А. А. Підвищення експлуатаційної надійності маслонаповненого високовольтного обладнання електричних мереж та систем на основі контролю стану ізоляції / А. А. Загайнова, Г. Н. Сердюкова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ. – 2017. – Випуск 186. – С.67-69.

*Здобувачем запропоновано алгоритм підвищення експлуатаційної ефективності ізоляції конденсаторного типу вводів на основі контролю стану ізоляції, який враховує особливості старіння ізоляції на тривалих інтервалах експлуатації.*

16. Zagaunova A. Maximum permissible value correction for dielectric loss tangent of 110 kV air-tight bushing basic insulation subject to operational factors impact / O. Shutenko, A. Zagaunova // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power system (IEPS). September 10–14, 2018, Kharkiv, Ukraine. – P. 46-50.

*Здобувачем удосконалено метод визначення гранично допустимих значень показників ізоляції високовольтних маслонаповнених вводів з урахування впливу найбільш значущих факторів.*

17. Загайнова А. А. Безперервний контроль стану ізоляції високовольтних вводів в середовищі інформаційно-аналітичної системи «Сирена» / О. В. Шутенко, А. А. Загайнова, Г. М. Сердюкова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2018. – Випуск 186. – С.67-69.

*Здобувачем запропоновано метод та алгоритм безперервного контролю стану ізоляції високовольтних вводів і трансформаторів струму.*

18. Zagaunova A. Analysis of Air-Tight High Voltage Bushing Insulation Parameter Dynamic under Various Conditions during Long-term Operation / O. Shutenko, A. Zagaunova, G. Serdyukova // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. Lviv, Ukraine, July 2-6, 2019. – P. 321-326.

*Здобувачем запропоновано метод раннього виявлення дефектів вводів на основі аналізу кореляційних зв'язків між показниками ізоляції.*

19. Загайнова А. А. Диагностика состояния высоковольтных маслонаполненных вводов на основе анализа динамики изменения показателей изоляции во времени / О. В. Шутенко, А. А. Загайнова // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг – Харьков : НТУ «ХПІ». – 2019. – № 18 (1343). – С. 62–76.

*Здобувачем виконано аналіз залежностей показників ізоляції від тривалості експлуатації для справних і несправних високовольтних маслonaповнених вводів.*

20. Загайнова О.А. Аналіз можливості розпізнавання часткових розрядів в ізоляції високовольтних маслonaповнених вводів за результатами періодических випробувань / О. В. Шутенко, О. А. Загайнова, Г.М. Сердюкова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 203. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2019. – С. 45–48.

*Здобувачем виконано аналіз залежностей показників ізоляції від тривалості експлуатації в високовольтних вводах з частковими розрядами.*

21. Патент №34311 Україна, МПК G01R 31/08. Спосіб контролю діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції конденсаторного типу вводів силових трансформаторів під робочою напругою / Загайнова О. А., Минченко А. А. Заявник і власник патенту НТУ «ХП». – №u200802072; заяв. 18.02.2008; опубл. 11.08.2008, Бюл. №15. – 11с.

*Здобувачем запропоновано спосіб контролю діелектричних характеристик вводів під робочою напругою.*

22. Патент №56978 Україна, МПК G01R 31/08. Спосіб контролю діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції конденсаторного типу вводів силових трансформаторів та вимірювальних трансформаторів струму під робочою напругою / Загайнова О. А., Минченко А. А., Богатирев И. М. Заявник і власник патенту НТУ «ХП». – №u201004400; заявл. 15.04.2010; опубл. 11.02.2011, Бюл. №3. – 9 с.

*Здобувачем запропоновано спосіб контролю, по якому перевіряють у часі зміни потужності втрат в ізоляції контрольованого об'єкта як результату опосередкованих вимірювань.*

23. Загайнова А. А. Оценка информационной значимости диагностических показателей изоляции высоковольтного маслонаполненного оборудования / А. А. Загайнова // Тези доп. 19-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», 1-3 червня Харків: НТУ «ХП», 2011. – С. 207.

24. Загайнова А. А. Информационная модель показателей измерительного профилактического контроля высоковольтного оборудования / А. А. Загайнова // Тези доп. 21-ї Міжнар. Наук.-практ. Конф. «Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», 2013 р. – Харків : НТУ «ХП», 2013. – С. 196.

25. Загайнова А. А. Формирование статистически однородных временных рядов показателей качества изоляции конденсаторного типа высоковольтных вводов / А. А. Загайнова // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КрНУ. – 2015. – Вип.1/2015 (3). – С. 201-203.

26. Загайнова А. А. Применение методов математической статистики для усовершенствования процедур оценки степени старения изоляции высоковольтных вводов / А. А. Загайнова // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції у м. Кременчук 17-19 травня 2016 р. – Кременчук: КрНУ. – 2016. – Вип.1/2016 (4). – С. 236-238.

27. Загайнова А. А. Однофакторний дисперсійний аналіз для формування однорідних часових рядів показників якості ізоляції високовольтних вводів / А. А. Загайнова, Г. М. Сердюкова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2017, 2017 р.: у 4 ч. Ч. II.– Харків: НТУ «ХПІ». – 346 с. – Ч. 2– С. 239.

*Здобувачем запропоновано алгоритм для формування однорідних часових рядів показників якості ізоляції високовольтних вводів.*

28. Загайнова А. А. Определение предельно допустимых значений показателей основной изоляции высоковольтных вводов методом минимального риска с учетом эксплуатационных факторов / А. А. Загайнова // Тези доповідей II Всеукраїнської науково-технічної конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем», 2018, Харків: «Друкарня Мадрид». – 2018. – С. 68-70.

29. Загайнова А. А. Учет влияния загрузки высоковольтных вводов при определении предельно допустимых значений показателей изоляции / О. В. Шутенко, А. А. Загайнова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019, 2019 р.: у 4 ч.– Харків: НТУ «ХПІ». Ч. II. – С. 188.

*Здобувачем проаналізовано особливості учета влияния загрузки вводов при определении предельно допустимых значений показателей изоляции.*

30. Загайнова А. А. Визначення гранично допустимих значень показників ізоляції високовольтних маслонаповнених вводів методом мінімального ризику / О.В. Шутенко, А. А. Загайнова // III Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2019)». Збірник наукових праць. Харків: «Друкарня Мадрид», 2019. – С. 101-102.

*Здобувачем розроблено математичну модель визначення гранично допустимих значень показників ізоляції високовольтних маслонаповнених вводів методом мінімального ризику.*

## АНОТАЦІЇ

**Загайнова О. А. Підвищення ефективності експлуатації високовольтних вводів за рахунок зниження технічних ризиків.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021 р.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності функціонування високовольтних вводів електричних мереж та систем шляхом вдосконалення методів і критеріїв оцінки технічного стану ВВ в умовах тривалої експлуатації, а також обґрунтованості прийняття рішень щодо їх подальшої експлуатації. В роботі виконано удосконалення і розробка алгоритмів обробки результатів періодичних випробувань стану ізоляції ВВ з урахуванням впливу конструкції, умов і режимів експлуатації. Запропоновано метод мінімізації ризиків експлуатації ВВ при визначенні ГДЗ показників ізоляції. Запропоновано метод для раннього прогнозування несправностей ВВ на основі аналізу динаміки зміни показників у часі. Запропоновано метод та пристрій безперервного контролю внутрішньої ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів на сучасній елементній базі як елемент АСК ТП підстанції.



*Ключові слова:* обладнання електричних мереж, експлуатація високовольтних вводів, показники ізоляції, струми завантаження, мінімізація ризиків, статистичний аналіз, часові ряди показників, прогнозування дефектів, пристрій контролю під напругою, інформаційно-аналітична система.

**Загайнова А.А. Повышение эффективности эксплуатации высоковольтных вводов за счет снижения технических рисков. На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 - электрические станции, сети и системы. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2021 г.

Диссертация посвящена повышению эффективности функционирования высоковольтных вводов электрических сетей и систем путем усовершенствования методов и критериев оценки технического состояния ВВ в условиях длительной эксплуатации, а также обоснованности принятия решений по их дальнейшей эксплуатации. В работе выполнен усовершенствование и разработка алгоритмов обработки результатов периодических испытаний состояния изоляции ВВ с учетом влияния конструкции, условий и режимов эксплуатации. Предложен метод минимизации рисков эксплуатации ВВ при определении ПДЗ показателей изоляции. Предложен метод для раннего прогнозирования неисправностей ВВ на основе анализа динамики изменения показателей во времени. Предложен метод и устройство непрерывного контроля внутренней изоляции конденсаторного типа ВВ на современной элементной базе как элемент АСУ ТП подстанции.

Результаты научных исследований защищены патентами Украины: №34311 Україна. «Способ контроля диэлектрических характеристик внутренней изоляции конденсаторного типа вводов силовых трансформаторов под рабочим напряжением» и №56978, МПК G01R 31/08 «Способ контроля диэлектрических характеристик внутренней изоляции конденсаторного типа вводов силовых трансформаторов и измерительных трансформаторов тока под рабочим напряжением», а также практических разработок, выполненных в диссертационной работе, внедрены как опытно-промышленные образцы на ПС 110 кВ АК «Харьковоблэнерго» и используются в учебном процессе кафедры передачи электрической энергии НТУ «ХПИ» при подготовке студентов по специальности 05070102 – «Электрические системы и сети».

*Ключевые слова:* оборудования электрических сетей, эксплуатация высоковольтных вводов, показатели изоляции, токи загрузки, минимизация рисков, статистический анализ, временные ряды показателей, прогнозирования дефектов, устройство контроля под напряжением, информационно-аналитическая система.

**Zagaynova A. Improving the efficiency of operation of high-voltage bushings by reducing technical risks. Manuscript.**

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.14.02 - Electric stations, networks and systems. - National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2021.

The methods and criteria used to assess the technical condition of high - voltage bushings (HVB) during periodic examinations are analyzed. A brief description of modern

information and measuring systems and monitoring systems used to assess the technical condition of electrical equipment. It is established that to determine the maximum allowable values of insulation of HVB, it is most appropriate to use the criteria of minimum average risk. It is established that the values of indicators in serviceable inputs, in addition to the rated voltage, input design, type of insulation and type of oil, which is known and reflected in current regulations, have a significant impact on input load currents and consumer composition. It is found that the values of isolation indices in both serviceable and defective inputs can be described by the Weibull distribution. According to the results of the analysis of the closeness of the correlations between the insulation indicators of the inputs, the possibility of using one-dimensional distributions of the insulation indicators of HVB to determine the maximum allowable values by the minimum risk method is substantiated.

A method for determining the maximum allowable values of insulation of HVB, which differs from the existing ones in that the maximum allowable values of indicators are determined by minimizing the function of medium risk taking into account the distribution of values for good and defective conditions, as well as operation, which provides the minimum possible damage in case of wrong decisions. It is proved that the maximum allowable values of insulation indicators cannot be constant, but must be adjusted taking into account the input currents, the composition of consumers, service life and other factors. It is established that the development of defects in HVB can lead not only to changes in the values of insulation, which is known and widely used, but also to change the nature of the dependences of the indicators on the duration of operation. In particular, the appearance of a statistically significant systematic component in the dependence of indicators on the duration of operation is evidence of a defect, even if the values of indicators do not exceed the maximum allowable value, which allows to detect input faults at an early stage of their development.

A method for early prediction of HVB faults is proposed, which consists in determining the pairwise correlation coefficients between the indicators and the service life, between the indicators in the analyzed input and the indicators of the inputs of adjacent phases. The method of continuous control of internal insulation of capacitor type in oil-filled high voltage power equipment is improved, which differs from the existing ones in that for control of insulation condition of HVB the estimation of not only leakage current values, which allows you to detect defects at an early stage. An algorithm for the method of controlling the dielectric characteristics of the internal insulation of the capacitor type under operating voltage has been developed and programmatically implemented. A prototype of a device for continuous control of electrical parameters of the internal insulation of the capacitor type in oil-filled high-voltage equipment as an element of ACS TP substation for implementation on the substation "Artema-330 kV" Northern power system NEC "Ukrenergo" for control under operating voltage power autotransformer. The improved method of continuous control is protected by 2 utility model patents.

Keywords: electrical network equipment, operation of high-voltage bushings, insulation indicators, load currents, risk minimization, statistical analysis, time series of indicators, defect prediction, live control device, information-analytical system.

