

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Л.С.Скрупська, О.А.Сахно

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ  
ДІАГНОСТУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ  
ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ  
СТРУМУ**

*Монографія*

Запоріжжя • НУ «Запорізька політехніка» • 2023

УДК 621.3.048.1 : 004.93

С 45

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національного університету «Запорізька політехніка»,  
(Протокол № 2 від 25.09.2023 р.)*

**Автори**

Л.С. Скрупська, ст. викл. (розділи 1, 2, 3, 4, підрозділи 2.1 – 2.5, 3.1.);

О.А. Сахно, к. т. н., доц. (підрозділи 2.6 – 2.8; 3.2, 3.3).

**Рецензенти:**

*С. М. Гребенюк* – завідувач кафедри фундаментальної та прикладної математики, д-р техн. наук, професор Запорізького національного університету;

*С. Е. Остапов* – завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, доктор фіз.-мат. наук, професор Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича.

С 45

**Скрупська Л.С.**

Підвищення ефективності систем діагностування ізоляції вимірювальних трансформаторів струму: монографія. / Л. С. Скрупська, О. А. Сахно – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 105 с.

ISBN 978-617-529-423-9

Монографія присвячена підвищенню ефективності систем діагностування ізоляції вимірювальних трансформаторів струму. Для досягнення цієї мети були виконані:

1. аналіз існуючих методів діагностування ізоляції вимірювальних трансформаторів струму;

2. розроблена неймережева модель діагностування стану ізоляції вимірювальних трансформаторів струму, яка дозволяє ефективно апроксимувати нелінійні залежності між діагностичними ознаками;

3. розроблений метод визначення залишкового ресурсу внутрішньої ізоляції вимірювальних трансформаторів струму на основі кластеризації трендів діагностичних ознак;

4. розроблена модель прогнозування на основі інтенсивності часткових розрядів ймовірності безвідмовної роботи паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму.

5. Розроблені UML - моделі, що дозволяють програмно реалізувати запропоновані моделі діагностування і прогнозування стану основної ізоляції трансформаторів струму без прив'язки до конкретної мови програмування і без обмежень в апаратній платформі.

Для науковців, практичних працівників, викладачів і студентів, широкого кола читачів.

УДК 621.3.048.1 : 004.93

ISBN 978-617-529-423-9

© Скрупська Л.С., 2023

© Сахно О.А., 2023

© Національний університет  
«Запорізька політехніка», 2023

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ГЛАВА 1 Аналіз методів і засобів діагностування високовольтних трансформаторів струму.....	11
1.1 Високовольтні трансформатори струму в структурі експлуатованих трансформаторів України.....	11
1.2 Аналіз параметрів контролю високовольтних трансформаторів струму.....	14
1.3 Методи прогнозування надійності високовольтних трансформаторів струму.....	17
1.4 Методи штучного інтелекту, що застосовуються для діагностування високовольтного обладнання.....	19
ГЛАВА 2 Діагностування стану паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму.....	23
2.1 Постановка завдання розробки моделі діагностування стану вимірювальних трансформаторів струму.....	23
2.2 Розробка діагностичної моделі.....	24
2.3 Експериментальна перевірка моделі.....	30
2.4 Постановка завдання розробки методу прогнозування відмов у високовольтному трансформаторному обладнанні.....	32
2.5 Метод прогнозування відмов у високовольтному трансформаторному обладнанні на основі метричної класифікації.....	33
2.6 Експериментальна перевірка запропонованого методу.....	38
2.7 Додаткові діагностичні параметри ізоляції вимірювальних трансформаторів струму.....	41
2.8 Висновки до розділу.....	47
ГЛАВА 3 Прогнозування на основі інтенсивності часткових розрядів вірогідності безвідмовної роботи паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму.....	48
3.1 Побудова моделі.....	49

3.2	Експериментальне дослідження запропонованої моделі.....	59
3.3	Висновки до розділу.....	61
ГЛАВА 4	Реалізація інформаційних моделей процесу діагностування і прогнозування стану ізоляції трансформаторів струму.....	62
4.1	Розробка UML-моделей.....	65
4.2	Програмна реалізація запропонованих моделей.....	70
4.3	Експериментальна перевірка запропонованих моделей і програмної реалізації.....	84
4.4	Висновки до розділу.....	94
ВИСНОВКИ.....		96
СПИСОК ДЖЕРЕЛ.....		98

## ВСТУП

Серед високовольтних електричних машин та апаратів, що експлуатуються в електричних мережах та системах України вимірювальні маслонаповнені трансформатори струму (ТС) на класи напруги 110 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. Наявність досить високої аварійності свідчить про необхідність удосконалювання системи експлуатаційної діагностики та прогнозування технічного стану апаратів.

Напрацювання 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 старіння парку устаткування; автоматизація діагностування для створення підстанцій (ПС) без постійного обслуговуючого персоналу та створення інтелектуальних електроенергетичних систем в Україні.

Тому сучасний фахівець в області електрообладнання, що застосовується у електричних станціях, підстанціях та системах повинен володіти знаннями необхідними для створення та використання сучасних систем діагностики.

Дефекти в ізоляції ТС розвиваються поступово і безперервно в номінальних режимах і прискорюються в аварійних режимах.

Необхідний обсяг експлуатаційних випробувань визначається виходячи з конструкції обладнання і можливих його дефектів. Необхідна періодичність контролю визначається можливою швидкістю розвитку дефектів.

Діагностика електричних апаратів високої напруги реалізується в наступних формах:

- періодичний контроль з виводом контрольованого об'єкта з роботи (off-line);
- періодичний контроль під робочою напругою (on-line);

- безперервний автоматизований (автоматичний) (on-line) контроль і діагностування (моніторинг);
- комплексне діагностичне обстеження.

Періодичний контроль під робочою напругою найменш витратний, але не забезпечує виявлення дефектів, що мають велику швидкість розвитку дефектів (таку, що у рази перевищує періодичність діагностування). Контроль з виводом обладнання з експлуатації надає великі можливості для обстеження, але порушує режим роботи енергооб'єкту та мережі.

Безперервний експлуатаційний контроль (моніторинг) технічного стану високовольтного електрообладнання є оптимальним рішенням задачі реорганізації експлуатаційної діагностики. Автоматизований безперервний контроль має ряд переваг перед періодичним, такі як: скорочення міжконтрольного періоду, відсутність людського фактору, врахування впливу експлуатаційних факторів, накопичення діагностичної інформації, віддалене надання інформації різного рівня та ін. Впровадження автоматизованого моніторингу дозволить планувати ремонти обладнання і при необхідності проводити термінове відключення обладнання, що знаходиться в передаварійному стані, а також здійснити перехід від застарілої системи періодичного обслуговування до обслуговування по реальному технічному стану об'єкта.

Одним з напрямків побудови моделей прогнозування технічного стану – це використання методів нечіткого моделювання, що дозволяє: проводити прогнозування лише за інформацією, яка доступна для спостереження та вимірювання (обмеження можливості отримання даних в процесі експлуатації апаратів); вимірювання та спостереження процесів, що здійснюються з деякою мірою достовірності (помилки можуть сягати 20 % із-за експлуатаційних впливів та недосконалості методів та засобів діагностування); проводити прогнозування за відсутністю аналітичних залежностей взаємовпливу діагностичних параметрів з ймовірністю відмови електричного апарату.

Відмова високовольтного апарату може відбутися як внаслідок природного старіння ізоляції, так і внаслідок впливу,

наприклад, струмів короткого замикання і різкого погіршення характеристик ізоляції з подальшим її електричним пробоем. Процес відмови основної ізоляції апарату є ланцюговим процесом з лавиноподібним руйнуванням. Початковий стан апарату може не бути ідеальним (позбавленим дефектів), внаслідок недосконалості виробництва, завжди має ряд дефектів, які посилюються під впливом часу та експлуатаційних впливів. Модель кількісного прогнозу залишкового ресурсу повинна враховувати реальний поточний стан апарату, а також враховувати той факт, що стан може змінитися в будь-який момент часу внаслідок випадкового впливу, при цьому модель повинна миттєво перерахувати залишковий ресурс апарату. Тому модель повинна будуватися основі даних від системи безперервного контролю стану апарату. На вибір методу розрахунку показників надійності накладаються деякі обмеження: - целюлозний ізоляція деградує незалежно від впливу випадкових чинників, а також може мати деякі дефекти, які посилюються під впливом часу та експлуатаційних впливів.

Розробці методів і засобів діагностування високовольтного обладнання присвячено значну кількість робіт. Істотний внесок в розвиток даної галузі науки внесли вчені: П. Сві, Б. Боянич, Ф. Салфнер, Л. Ван дер Зел, Д. Банджевіч, С. А. Бажанов, Ю. А. Фокін, Ю. Б. Гук, А. Н. Рассальській, Андрієнко П.Д., Журахівський А.В., та ін.

Але, відомі методи прогнозування залишкового ресурсу трансформаторів струму не забезпечують раннє виявлення дефектів і не дозволяють прогнозувати залишковий ресурс на тривалий інтервал часу, в результаті чого знижується ефективність заходів щодо запобігання розвитку несправностей.

В цієї монографії проведено аналіз методів діагностування стану ізоляції високовольтного обладнання, включаючи розгляд:

–існуючих діагностичних моделей на основі закону розподілу Вейбулла для обчислення ймовірності безвідмовної роботи;

–поширених моделей прогнозування ймовірності безвідмовної роботи ізоляції трансформаторів струму;

- діагностичних параметрів та їх цінності для прогнозування ресурсу ТС;

- нейромережевої моделі діагностування стану ізоляції вимірювальних трансформаторів струму, яка дозволяє ефективно апроксимувати нелінійні залежності між діагностичними ознаками;

- методів визначення залишкового ресурсу внутрішньої ізоляції вимірювальних трансформаторів струму на основі кластеризації трендів діагностичних ознак;

- приклад моделі прогнозування ресурсу на основі інтенсивності часткових розрядів та ймовірності безвідмовної роботи паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму.

- приклад UML - моделі, що дозволяє програмно реалізувати запропоновані моделі діагностування і прогнозування стану основної ізоляції трансформаторів струму без прив'язки до конкретної мови програмування і без обмежень в апаратній платформі.

Для вирішення цих проблем актуальною і важливою є розробка моделей і методів діагностування та прогнозування стану ізоляції високовольтного обладнання.

В монографії викладено результати нових шляхів вирішення науково практичної задачі – підвищення якості діагностики та ефективності систем діагностування високовольтного обладнання шляхом розробки моделей і методів діагностування та прогнозування стану ізоляції вимірювальних трансформаторів струму

Метою написання монографіє є ознайомлення читачів з наявними підходами до прогнозування технічного стану високовольтних ТС та методами підвищення ефективності систем діагностування. Спеціалісти, що займаються питаннями діагностики та прогнозом ресурсу обладнання з монографії можуть отримати таку нову та унікальну інформацію інформацію про:

- нейромережеву модель, яка дозволяє виконувати діагностування стану основної ізоляції трансформаторів

струму по вимірювальним значенням вхідних характеристик: тангенсу кута діелектричних втрат основної ізоляції під робочою напругою, відхилення ємності основної ізоляції від паспортного значення, температури і вологості повітря навколишнього середовища (як фактору зовнішнього впливу на значення діагностичних критеріїв);

- метод прогнозування відмов у високовольтному трансформаторному обладнанні на основі метричної класифікації, який передбачає розбиття на класи початкової множини вимірних значень характеристик трансформаторів в залежності від часу до їх відмови і обчислення координат геометричних центрів кожного з класів в просторі нормованих характеристик;
- нейромережеву модель, що враховує характеристики часткових розрядів в ізоляції і дозволяє виконувати прогнозування стану ізоляції вимірювальних трансформаторів струму з врахуванням цього параметру;
- реалізацію моделі діагностування стану ізоляції вимірювальних трансформаторів струму, що дозволяє зробити висновок про можливість подальшої експлуатації трансформаторів з великою ймовірністю адекватності виведення ( $\approx 0,984$ );
- реалізація методу прогнозування відмов у високовольтному трансформаторному обладнанні, що дає можливість визначити залишковий ресурс трансформаторів і виявляти виникаючі несправності на початкових стадіях;
- реалізація прогнозування на основі характеристик часткових розрядів ймовірності безвідмовної роботи паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму, що дозволяє з прийнятною помилкою ( $43.81 \cdot 10^{-5}$ ) виконувати прогнозування ймовірності безвідмовної роботи трансформаторів струму.

Результати, викладені в монографії можуть бути застосовані при виробництві систем неперервного контролю та при вивченні

дисциплін «Основи теорії електричних апаратів», «Обчислювальна техніка та програмування», «Технічна діагностика електромеханічних пристроїв та систем»

Застосування наведеної в монографії інформації може сприяти:

- скороченню переліку необхідних періодичних випробувань,

- спрощенню алгоритму контролю технічного стану обладнання,

- зниженню впливу людського фактору на результати діагностики, а також прогнозування технічного стану, планування ремонтів і замінів, а також перехід від застарілої системи періодичного обслуговування, до обслуговування за технічним станом обладнання.

# ГЛАВА 1

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

Процес діагностування може бути виконаний із застосуванням різних методів. Класифікацією методів діагностування запропоновані в роботах [1 - 5]. До основних з них можна віднести методи вимірювання параметрів стану об'єкта діагностування, методи скорочення розмірності даних, методи прийняття діагностичних рішень.

Методи вимірювання параметрів стану об'єкта діагностування складають фізичні методи контролю: магнітного, електричного, вихретокового, радіохвильового, теплового і т.д.

Методи скорочення розмірності і прийняття діагностичних рішень відносяться до інформаційних технологій діагностування. Вони представляють собою технологічний процес, результатом якого є інформація [6].

Об'єктом дослідження даної роботи є процес діагностування високовольтних трансформаторів струму.

Предмет дослідження - моделі і методи діагностування стану високовольтних трансформаторів струму.

### 1.1 Високовольтні трансформатори струму в структурі експлуатованих трансформаторів України

Як в Україні, так і за кордоном, застосовується велика кількість високовольтних трансформаторів струму. Їх значна частка вже відпрацювала встановлений ресурс в 25 років і продовжує експлуатуватися. Надійність такого обладнання знижується протягом експлуатації внаслідок процесів старіння органічної ізоляції та впливу експлуатаційних факторів.

За даними НЕК «Укренерго» найбільш використовуваним в магістральних мережах України є клас напруги 330 кВ, при цьому термін експлуатації більше половини таких трансформаторів струму в цих мережах перевищив номінальний [7]. Отже,

дослідження процесу діагностування трансформаторів струму на клас напруги 330 кВ є актуальним.

У зв'язку з впровадженням стандарту ДСТУ ІЕС 60044-2-1: 2008 відбулася зміна найменування таких трансформаторів на 362 кВ. Істотна частка виготовлених в Україні трансформаторів струму 362 кВ зроблена Запорізьким заводом високовольтної апаратури. Такі трансформатори мають три основних конструктивних виконання: з U - образною первинною обмоткою і паперово-масляною конденсаторною ізоляцією (БМКІ), з римовідною вторинною обмоткою та БМКІ, з елегазовою ізоляцією. Найпоширеніші серії трансформаторів струму з БМКІ: ТФУМ-362 (ТФКН330), ТФРМ-330 (ТРН-330). Конденсаторна ізоляція дозволяє зменшити матеріалоемність, однак, вимоги до дотримання регламенту виробничого процесу такої ізоляції зростають. Найменші дефекти, допущені при виготовленні трансформаторів струму, можуть проявитися через час і викликати пошкодження ізоляції.

Більшість пошкоджень супроводжується вибухом, пожежею, і розладами в роботі системи. При цьому аналіз служби діагностики Запорізьких МЕМ показав, що практично всі трансформатори струму перед пошкодженням мали задовільні характеристики ізоляції і масла [8, 9]. Це дозволяє зробити висновок про те, що застосовувані системи діагностики не досить ефективні для своєчасного виявлення дефектів.

Специфіка трансформаторів струму в порівнянні з іншими типами високовольтного маслонаповненого обладнання, є те, що відношення маси вільного масла до маси целюлози в них набагато менше, ніж, наприклад, в силових трансформаторах. Тому газоутворення в целюлозі є переважаючим. Газ довго проникає через шар целюлози в масло. Циркуляція масла всередині апарату відбувається з малою інтенсивністю, тому гази можуть потрапити в пробу для аналізу масла, через значний проміжок часу, після початку газоутворення [10]. Отже, контроль часткових розрядів і тангенса кута діелектричних втрат може зафіксувати дефект, що розвивається, в ізоляції, набагато раніше, чим хроматографічний аналіз розчинених газів масла. Процеси, які відбуваються в ізоляції під впливом різних експлуатаційних

факторів і природного старіння, призводять до її деградації. Найбільш характерними причинами пошкодження для трансформаторів струму є дефекти ізоляції (56%) і розгерметизація (30,5%). Аналіз пошкоджуваності трансформаторів струму типу ТФРМ на класи напруги 330 кВ показав, що причиною відмов є розвиток іонізаційних процесів в ізоляції трансформаторів струму через ненадійність конструкції вузла герметизації [11]. Для трансформаторів струму типу ТФУМ 70% ушкоджень відбувається через 15 - 20 років експлуатації, причому в літній період. 80% пошкоджень припадає на негерметичність конструкції. Розвиток дефекту пов'язано з ростом діелектричних втрат, тепловим і електричним старінням ізоляції, і її пробоем. Для трансформаторів струму ТФРМ найбільш частими причинами відмови є старіння ізоляції, висока температура навколишнього середовища (34% відмов); зволоження, розгерметизація, в тому числі після ремонту (17%); руйнування контактів: заземлення нульової обкладки, обмотки з виведенням між ступенями (17%) [7].

Серед конструкцій на клас 330 кВ найбільш надійні трансформатори струму типу ТФУМ, кількість відмов даного типу на 70% нижче, ніж ТФРМ.

Зниження електричної міцності ізоляції трансформаторів струму 220 кВ і вище в основному, є наслідком наступних дій: часткові розряди в основній ізоляції; високочастотні перенапруги; короткі замикання (особливо поблизу підстанції); локальні перегіви ізоляції внаслідок дефектів конструкції; витікання масла (елегаза); газоутворення масла; підвищена вологість ізоляційних матеріалів. Причинами цих дефектів можуть бути: доливка масла при недостатній його підготовці; аварійні режими роботи; комутаційні і грозові перенапруження; розгерметизація і зволоження; утворення провідних відкладень на внутрішніх поверхнях фарфору; тріщини фарфору та догляд за маслом, вплив зовнішніх джерел нагріву (сонячна радіація і т.д.); різкі коливання температури довкілля; неякісне виготовлення апарату [12-14].

Найбільш характерними дефектами для трансформаторів струму на клас напруги 330 кВ є місцеві дефекти, розвиток яких

призводить або до теплового пробою, або до появи часткових розрядів і електричного пробою основної ізоляції. Дефекти і пошкодження накопичуються в ізоляції протягом усього терміну експлуатації, тому для оцінки їх впливів потрібні прямі вимірювання характеристик цих впливів. Однак, для прямих вимірювань, методики оцінки наслідків впливів на ізоляцію відсутні, а також неможливо застосувати такий підхід на вже працюючому обладнанні. Тому найбільш ефективним методом діагностики є безперервний контроль непрямих критеріїв стану ізоляції, при цьому найбільш доцільно проводити контроль рівня діелектричних втрат і характеристик часткових розрядів в основній ізоляції трансформаторів струму. Контроль часткових розрядів в експлуатації – важкий процес, а його інтерпретація не регламентується стандартами. Одним з ефективних методів оцінки поточного стану трансформатора струму, є контроль тангенса кута діелектричних втрат і ємності основної ізоляції [15, 16]. Контроль тільки цих параметрів не дозволяє з високою вірогідністю оцінити стан трансформатора, що має початковий ступень розвитку дефекту, тому в роботі запропоновано застосування методів штучного інтелекту для відбору критеріїв (ознак) стану трансформаторів струму на клас напруги 330 кВ.

## 1.2 Аналіз параметрів контролю високовольтних трансформаторів струму

Накопичений досвід діагностування технічного стану вимірювальних трансформаторів струму сформував перелік діагностичних критеріїв, що можуть аналізуватися для оцінки поточного та прогнозу стану апарату.

Значення тангенса кута діелектричних втрат ( $tg\delta_I$ ) і ємності ( $C_I$ ) основної ізоляції. Найбільш істотні діагностичні критерії, безпосередньо пов'язані з основними характеристиками ізоляційного матеріалу - діелектричними втратами і діелектричної проникністю. Діелектрична проникність визначається ступенем поляризації діелектрика, замість неї, для ізоляційних конструкцій, прийнято розглядати пропорційну їй

ємність між електродами конденсатора. При поляризації діелектрика енергія поля витрачається на переміщення електричних зарядів, частина цієї енергії розсіюється в обсязі діелектрика. Цю частину енергії характеризує потужність діелектричних втрат. Потужність діелектричних втрат залежить не тільки від характеристик діелектрика і частоти прикладеної до нього напруги, але і від обсягу ізоляції. Тому для оцінки стану ізоляції прийнято використовувати тангенс кута діелектричних втрат, який майже не залежить від розмірів ізоляційної конструкції [17]. Величина  $tg\delta_I$  дає усереднену об'ємну характеристику стану діелектрика, так як активна складова струму, викликана діелектричними втратами у місцевому дефекті відноситься до загального ємнісного тока об'єкту. Зміна  $tg\delta_I$  дає можливість зафіксувати дефект на ранній стадії розвитку і можливість прогнозування відмови обладнання [18].

Контроль зміни ємності здатний зафіксувати грубий дефект, такий як перекриття частини ізоляції апарату, на завершальній стадії ушкодження, для негайного (години або дні) аварійного його відключення. Наявність кореляційного зв'язку між значеннями  $tg\delta_I$  ізоляції і часом, що залишився до відмови об'єкта виявлено для введів і трансформаторів струму з паперово-масляною ізоляцією. Цей параметр може бути прийнятий в якості того, що прогнозує, що підтверджується зниженням пошкоджуваності після відбракування апаратів за результатами контролю. Однак шляхом контролю абсолютного значення  $tg\delta_I$  виявляються не всі дефекти, що призводять до відмови, точність оцінки надійності невисока [19]. Відома математична модель, що встановлює кількісний зв'язок між  $tg\delta_I$ , температурою, електричними впливами і періодом експлуатації основної ізоляції апарату [20]. Наявність такого взаємозв'язку підтверджує необхідність контролю цього параметра, у відсутності можливості прямого контролю впливів на ізоляції. Цей параметр нормується для контролю під робочою напругою [21].

Середньоквадратичне значення струму комплексної провідності (або провідність) ізоляції є додатковим діагностичним параметром, він придатний для контролю різкої зміни ємності і може використовуватися як його аналог.

Абсолютні значення  $tg\delta_1$  і  $C_1$  не дозволяють визначити стан трансформатора струму, важливі зміни цих параметрів за різні періоди, швидкість зміни, абсолютна зміна, а також середньодобові, тижневі, сезонні, річні коливання значення  $tg\delta_1$  [22]. Для бездефектної ізоляції  $tg\delta_1$  не збільшується протягом всього терміну його служби, тобто початкові значення  $tg\delta_1$ , служать основою для порівняння з отриманими даними при чергових вимірах. Швидкість зміни  $tg\delta_1$  також в деяких випадках може бути критерієм майбутньої відмови, спостереження показують, що навіть якщо абсолютне значення  $tg\delta_1$  досягло свого передаварійного значення, але значення стабільно, то експлуатація такого апарату може тривати досить великий період часу (кілька років). Різке зростання  $tg\delta_1$ , може свідчити про майбутні відмови, навіть якщо абсолютне значення  $tg\delta_1$  не досягло ще критичного рівня. Швидкість зростання параметра можна розглядати як критерій відмови.

Температурний коефіцієнт - це критерій, збільшення якого свідчить про розвиток дефекту у целюлозній ізоляції або про погіршення характеристик масла. Значення цього параметра дозволяє зробити непрямий висновок про наявність домішок у маслі, високу вологість масла, наявність джерел інтенсивних часткових розрядів в основній ізоляції і її перегрівих.

Амплітуда і фаза вектора небалансу струмів комплексної провідності ізоляції 3-х фазної групи, де амплітуда кількісно характеризує дефект, а фаза вектора вказує в якому з трьох об'єктів він розвивається. Даний метод виявився малоефективним при прогнозуванні технічного стану [23], його застосування більше підходить для попередження аварійних випадків (по суті аналог реєстрації зміни ємності та провідності).

Розрахункова вологовмістність ізоляції. Основні електричні характеристики паперово-масляної конденсаторної ізоляції погіршуються зі збільшенням вологості. Добре висушена ізоляція має залишковий вміст води менше 1%. Різке зниження пробивної напруги настає, якщо вміст води перевищує 2,5 - 3%, що є гранично допустимим; при цьому зменшується майже в 2 рази і напруга початку часткових розрядів критичної інтенсивності. У негерметизованих конструкціях за рахунок

природного вологообміну вологовміст ізоляційного остова через кілька років експлуатації може досягти 4 - 5%. При вологовмісту ізоляції близько 1% термін її руйнування розрядами з зарядом 10 нКл - кілька тисяч годин; при вологовмісту 7% руйнування відбувається за хвилини [24].

Часткові розряди в основній ізоляції трансформатора струму є причиною зміни  $tg\delta_l$  і  $C_l$ . Тому важливо контролювати інтенсивність, рівень і сумарну потужність часткових розрядів.

Таким чином, до основних діагностичних критеріїв трансформаторів струму на номінальну напругу 330 кВ можна віднести:

- тангенс кута діелектричних втрат (миттєве значення є головним критерієм);
- зміна ємності (є критерієм негайного (години, дні) відключення трансформатора струму);
- температурний коефіцієнт ізоляції;
- вологомісткість твердої ізоляції;
- амплітуда і фаза вектора небалансу струмів комплексної провідності (є критерієм негайного (години, дні) відключення трансформатора струму);
- інтенсивність часткових розрядів;
- швидкість зміни тангенса кута діелектричних втрат;
- зміна струму комплексної провідності (є критерієм негайного (години, дні) відключення трансформатора струму);
- усереднені періодичні значення тангенса кута діелектричних втрат;
- абсолютна зміна значення тангенса кута діелектричних втрат.

### 1.3 Методи прогнозування надійності високовольтних трансформаторів струму

Одними з основних показників надійності є залишковий ресурс і напрацювання на відмову. Залишковий ресурс – це сумарне напрацювання об'єкта від моменту контролю його технічного стану до переходу в граничний стан [25]. Прогноз залишкового ресурсу безпосередньо пов'язаний з розрахунком

основних показників надійності апарату. Для вимірювальних трансформаторів струму повинні нормуватися напрацювання на відмову і ймовірність безвідмовної роботи. Напрацювання на відмову - напрацювання об'єкта від початку експлуатації до виникнення першої відмови. Ймовірність безвідмовної роботи - ймовірність того, що в межах заданого напрацювання відмова об'єкта не виникне [26].

Знос паперової ізоляції відбувається поступово, і в цьому процесі немає випадкових складових [27]. Однак сторонні впливи, а також режим експлуатації апарату, вносять стохастичну складову. Достовірне прогнозування значення цієї випадкової складової неможливо, проте оцінка стану об'єкта, в якому він опинився під впливом, в тому числі, і випадкових процесів можлива.

Найбільш популярними моделями визначення ймовірності безвідмовної роботи електричних апаратів є експоненціальні моделі [28, 29]. Такі моделі допускають, що ймовірність безвідмовної роботи не залежить від подій, що сталися з обладнанням в попередньому періоді роботи, а залежить тільки від розглянутого інтервалу часу. В [30-33] описані методи прогнозу залишкового ресурсу силових трансформаторів на основі закону розподілу відмов Вейбулла. Такі моделі враховують тільки період роботи конкретного трансформатора в експлуатації. Недоліки класичних моделей обговорюються в роботах [34, 35]. В [34] запропоновано модель розрахунку ресурсу на основі рестрації експлуатаційних впливів і їх відхилення від норм, що вимагає наявності системи безперервного контролю на всьому обладнанні з моменту першого запуску в експлуатацію.

В [36] запропоновано метод пропорційних інтенсивностей Кокса для прогнозу показників надійності обладнання: використанні ідентифікатори відмови, характеризуючі послідовність подій (що відбулися на досить тривалому інтервалі часу), як коваріати в моделі Кокса. Метод дозволив врахувати при моделюванні параметрів надійності обладнання ряд впливів, отриманих апаратом, в процесі експлуатації, і природний знос, а також отримати кількісну оцінку показників його надійності.

Досвід застосування нечіткого моделювання та нейромережових методів при прогнозі залишкового ресурсу електроустаткування описан в [37]. Було запропоновано використання екстраполяційних методів прогнозування, які більш застосовні до параметрів, одержуваних від комплексної діагностики трансформатора струму.

#### 1.4 Методи штучного інтелекту, що застосовуються для діагностування високовольного обладнання

Методи штучного інтелекту знаходять все більше застосування в галузях техніки. У даній роботі пропонується застосування даних методів в системі діагностики вимірювальних трансформаторів струму.

Штучні нейронні зв'язки дозволяють ефективно апроксимувати багатовимірні нелінійні залежності і мають високі узагальнюючі здібності, що дозволяє будувати високоточні моделі діагностування обладнання [39 - 42].

До основних груп методів штучного інтелекту можна віднести наступні:

- скорочення розмірності навчальної вибірки;
- витяг ознак;
- імовірнісні методи;
- детерміновані методи;
- прийняття рішень.

Коротко розглянемо ці групи методів.

Скорочення розмірності початкової вибірки даних для побудови діагностичної моделі по прецедентах [43, 44] є важливим завданням діагностування, оскільки дозволяє прискорити процес побудови моделі і спростити її структуру. Застосування відомих методів повного та скороченого перебору потребує оцінювання значного числа комбінацій ознак, складених з вихідної сукупності ознак, що робить неможливим використання такого підходу при великій кількості ознак у вихідному наборі за прийнятний час. Тому для відбору інформативних ознак доцільно використовувати методи

імовірнісного пошуку, оскільки вони більш пристосовані для знаходження нових рішень за рахунок об'єднання кращих рішень, отриманих на різних ітераціях, не вимагають дослідження всього простору пошуку, а також володіють можливостями для виходу з локальних оптимумів [41].

Методи вилучення ознак [45, 46]:

–аналіз головних компонентів - використовує ортогональне перетворення набору можливо корельованих змінних в безліч некоррелірованих перемінних, які називаються головними компонентами, число яких менше або дорівнює числу вихідних змінних, ранжируваних за зменшенням дисперсії (недолік - чутливість до відносного масштабування вихідних змінних) [47];

–напіввизначене вкладення – використовує полувизначене програмування для нелінійного скорочення розмірності даних, прагнучи відобразити багатовимірні дані в Евклідовий простір малої розмірності, використовуючи локальну лінійність;

–багатофакторне скорочення розмірності - метод виявлення і опису комбінації дискретних вхідних змінних, спільно впливають на бінарну вихідну перемінну, заснований на конструктивному алгоритмі індукції, який змінює простір представлення даних для виявлення такого уявлення, яке полегшує виявлення нелінійних взаємодій між ознаками [48].

Недоліком розглянутих груп методів вилучення ознак є: відсутність гарантії поліпшення роздільності класів, втрата частини інформації, що міститься у вихідній вибірці, зміна топологічних і статистичних властивостей вибірки, практично повна втрата фізичного сенсу вихідних змінних і складність інтерпретації. Також дані методи є обчислювально витратними і передбачають участь користувача для оцінки якості збудованого перетворення [41].

До імовірнісним методам [49, 50] відносять:

–простий випадковий відбір (з вихідної вибірки випадковим чином підбирається задане число примірників);

–систематичний відбір (вихідна вибірка упорядковується певним чином і розбивається на послідовні групи примірників, в кожній з яких вибирається для включення у формовану вибірку об'єкт із заданим порядковим номером в групі);

–стратифікований відбір (вихідна вибірка поділяється на непересічні однорідні підмножини - страти, що представляють всі види примірників, в кожному з яких застосовується випадковий або систематичний відбір);

–імовірнісний пропорційний до обсягу відбір (використовується, коли є «допоміжна змінна» або «метрика обсягу», яка передбачається пов'язаною зі змінною, що цікавить, для кожного екземпляра, вірогідність вибору для кожного елемента вихідної вибірки буде пропорційна його метриці обсягу);

–відбір на основі кластер-аналізу (вихідна вибірка поділяється на кластери, з групи примірників кожного кластера випадково вибирається деяка підмножина екземплярів для формування вибірки).

Перевагами даних методів є їх відносна простота і можливість оцінки помилки вибірки, а недоліками - то, що вони не гарантують, що сформована вибірка малого обсягу буде добре відображати властивості вихідної вибірки, а також не буде надмірною і не буде штучно спрощувати задачу [41].

Детерміновані методи включають в себе методи на основі [51, 52]:

–зручного відбору: формує нерепрезентативну вибірку з найбільш доступних для дослідження об'єктів;

–квотного відбору: початкова вибірка розділяється на підгрупи, що відрізняються властивостями, після чого з кожної підгрупи відбираються об'єкти на основі заданої пропорції;

–цільового відбору: об'єкти витягуються з вихідної вибірки дослідником відповідно до його думки щодо їх придатності для дослідження.

Недоліком даних методів є неможливість оцінювання помилок сформованих вибірок. Перевагою детермінованих методів є те, що вони можуть виявити найбільш значущі для вирішення завдання побудови діагностичної моделі прецеденти, які також можуть бути використані для ініціалізації моделей, що розпізнають і прискорення процесу навчання [41].

Методи ухвалення діагностичних рішень для побудови діагностичних моделей дозволяють створювати моделі і

визначають принципи їх функціонування. Такі методи є найбільш перспективними для дослідження.

## ГЛАВА 2 ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ПАПЕРОВО-МАСЛЯНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

Своєчасне виявлення несправностей електричних апаратів дозволяє підтримувати їх в робочому стані, попереджати поломки, подовжувати ресурс і планувати майбутні заміни.

Для підвищення надійності електропостачання в даний час активно застосовуються системи безперервного контролю стану електричних апаратів [17, 52]. Перевага безперервного контролю полягає в багаторазовому зниженні межконтрольного інтервалу, в порівнянні з класичним періодичним контролем, проте в процесі своєї роботи такі системи формують великі за обсягом масиви даних, які необхідно зберігати і обробляти для отримання діагностичного висновку про стан обладнання.

Аналіз отриманих від таких систем даних щодо трансформаторів струму показує, що погіршення технічного стану основної ізоляції відбувається безперервно, як при роботі в номінальних, так і в аварійних і недовантажених режимах [53], тому особливо важливо вчасно виявляти тенденції в розвитку дефектів основної ізоляції трансформаторів струму. Дану задачу можна вирішити за допомогою відповідних моделей діагностування стану вимірювальних трансформаторів.

### 2.1 Постановка завдання розробки моделі діагностування стану вимірювальних трансформаторів струму

Моделі, які широко застосовуються в діагностуванні електричних апаратів на основі закону розподілу Вейбулла для обчислення ймовірності безвідмовної роботи не дозволяють виявити тенденції до виходу конкретної одиниці обладнання з ладу [54, 55]. Моделі для пооб'єктного обчислення показників ймовірності безвідмовної роботи мають теж недолік, пов'язаний з неоднозначністю укладення, наприклад, якщо об'єкт має ймовірність безвідмовної роботи на прогнозованому інтервалі,

яка дорівнює 0,8, то не ясно чи потрібно його бракувати або можна продовжувати подальшу експлуатацію. Широко поширені регресійні моделі мають також недолік, що полягає в лінійності опису залежності між параметрами, що характеризують стан електричного апарату, і його реальним станом, що негативно позначається на їх точності.

Тому для побудови моделі діагностування стану ізоляції трансформаторів струму в даній роботі пропонується використовувати моделі на основі штучних нейронних мереж [56, 59], які дозволяють ефективно апроксимувати багатовимірні нелінійні залежності і мають високі узагальнювальні здібності.

Метою даної роботи є розробка нейромережевих моделей діагностування стану паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму, що дозволяють описати нелінійні залежності між параметрами основної ізоляції ( $x_1$  - тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції під робочою напругою;  $x_2$  - відхилення ємності основної ізоляції від паспортного значення;  $x_3$  і  $x_4$  - вологість і температура повітря навколишнього середовища, відповідно) і більш ефективно прогнозувати стан ізоляції ( $Y$ ) для здійснення своєчасного превентивного обслуговування.

## 2.2 Розробка діагностичної моделі

Оскільки на стан ізоляції трансформатора і на його можливість виходу з ладу впливає безліч факторів, в якості базису для побудови діагностичної моделі доцільно вибрати моделі на основі штучних нейронних мереж прямого поширення. Для побудови діагностичної моделі на основі нейронної мережі прямого поширення було досліджено стан 320 трансформаторів ТФКН-330, та виявлено діагностичні ознаки [60], які суттєво впливають на стан ізоляції вимірювального трансформатора струму. За результатами досліджень сформована навчальна вибірка (2.1), що містить, відповідно 320 примірників, кожен з яких характеризувався чотирма ознаками:

$$D = \langle X, Y \rangle, \quad (2.1)$$

де  $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$  - безліч вхідних ознак, що описують стан паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму;

$x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}\}$  - безліч значень  $i$ -ї ознаки в навчальній вибірці  $D$ ;

$x_{ij}$  - значення  $i$ -ї ознаки для  $j$ -го примірника, що відповідає значенню  $i$ -ї характеристики  $j$ -го трансформатора;

$N = 320$  - кількість примірників у вибірці  $D$ ;

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$  - безліч значень вихідного параметра.

Таким чином, навчальна вибірка представляла собою таблицю чисел, що складається з 320 рядків і п'яти стовпців, що містять значення чотирьох вхідних ознак і одного вихідного для кожного з досліджених трансформаторів.

З метою виключення впливу різного порядку значень ознак на модель, що синтезується попередньо виконувалося нормування ознак, тобто приведення діапазону їх значень до єдиного інтервалу  $x_{in} \in [0; 1]$  за формулою (2.2):

$$x_{ijn} = \frac{x_{ij} - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}} \quad (2.2)$$

де  $x_{ijn}$  - нормоване значення  $i$ -ї ознаки  $j$ -го примірника,  $i = \overline{1; 4}$ ,  $j = \overline{1; 320}$ ;

$x_{i \min}$  і  $x_{i \max}$  - відповідно, мінімальне і максимальне значення  $i$ -ї ознаки в навчальній вибірці  $D$ .

Фрагмент навчальної вибірки, що містить нормовані значення ознак, наведено в табл. 2.1.

Моделювання стану справності ізоляції трансформаторів здійснювалося на основі побудованої навчальної вибірки за допомогою тришарового перцептрона [56-58], перший шар якого містив чотири нейрона, другий шар - два нейрона, третій шар - один нейрон. Всі нейрони першого шару мали сигмоїдну функцію активації (2.3):

$$\psi(\varphi) = \frac{1}{1 + e^{-\varphi}} \quad (2.3)$$

де  $\varphi$  - аргумент функції активації, який представляє собою дискримінантну функцію [56-59, 61, 62]  $\varphi = \varphi(w; x)$ ;

$w$  - матриця вагових коефіцієнтів;

$x$  - безліч аргументів дискримінантної функції.

Таблиця 2.1 - Фрагмент навчальної вибірки

Номер трансформатору	Значення ознак				Y
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	
1	0,5364	0,0681	0	0,3287	1
2	0,5231	0,4772	1	0,2986	1
3	0,5463	0,8181	1	0,3534	1
4	0,5496	0,3636	0	0,5452	1
5	0,5364	0,5681	0	1	0
6	0,5496	0,7045	0	0,9219	1
7	0,5430	0,6818	0	0,9506	1
8	0,5364	0,5454	0	0,9945	0
9	0,5463	0,4090	0	0,9520	1
10	0,5364	0,25	0	0,55890	1
...	...	...	...	...	...
320	0,8212	0,8182	0	0,6822	0

При синтезі нейромоделі для автоматизації діагностування стану паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму в якості дискримінантної функції використовувалася зважена сума (2.4):

$$\varphi(w; x) = w_0 + \sum_{i=1}^{|x|} w_i x_i \quad (2.4)$$

де  $w_i$  – значення  $i$ -го вагового коефіцієнта, що визначає значимість  $i$ -го вхідного параметра  $x_i$  в функції  $\varphi(w; x)$ ;

$|x|$  - кількість аргументів функції  $\varphi(w;x)$ ;

$w_0$  - значення зміщення функції  $\varphi(w;x)$ .

Таким чином, структура тришарової нейромоделі, що синтезується  $Y_{NN}$  може бути представлена наступним чином (2.5):

$$\begin{cases} Y_{NN} = \psi_{(3,1)}(\varphi_{(3,1)}(w_{(3,1)}; \psi_{(2)})); \\ \psi_{(2)} = \{\psi_{(2,1)}; \psi_{(2,2)}\}; \\ \psi_{(2,k)} = \psi_{(2,k)}(\varphi_{(2,k)}(w_{(2,k)}; \psi_{(1)})), k = 1,2; \\ \psi_{(1)} = \{\psi_{(1,1)}; \psi_{(1,2)}; \psi_{(1,3)}; \psi_{(1,4)}\}; \\ \psi_{(1,l)} = \psi_{(1,l)}(\varphi_{(1,l)}(w_{(1,l)}; X)), l = 1,2,3,4, \end{cases} \quad (2.5)$$

де  $\psi_{(\mu,\rho)}$  - функція активації  $\rho$ -го нейрона  $\mu$ -го шару;

$\varphi_{(\mu,\rho)}$  - дискримінантна функція  $\rho$ -го нейрона  $\mu$ -го шару.

Для побудови нейромоделі і визначення значень її параметрів (вагових коефіцієнтів і зсувів кожного нейрона) на її входи подавалися значення ознак, що пронормували, на вихід - значення вихідного параметра для відповідного примірника (0 - ізоляція трансформатора потребує ремонту і рекомендується його виведення з експлуатації; 1 - ізоляція трансформатора придатна до подальшої експлуатації).

В якості цільової функції при навчанні нейромоделі використовувався мінімум помилки  $P_0$  розпізнавання, яка визначається як відношення кількості помилково класифікованих трансформаторів  $K_0$  до загальної кількості примірників (трансформаторів) в навчальній вибірці  $N$  (2.6)

$$P_0 = \frac{K_0}{N} \quad (2.6)$$

Навчання нейромережі робилося на основі методу зворотного поширення помилки [4-7, 9, 10]. Прийнятним вважається досягнення помилки розпізнавання, що не перевищує значення  $P_{0\min} = 0,01$ .

Матриця вагових коефіцієнтів  $w$  побудованої нейромоделі приведена в табл. 2.2.

Підставивши отримані значення вагових коефіцієнтів і зсувів в систему (2.5), а також, враховуючи, що в якості функції активації і дискримінантної функції використовувалися (2.3) і (2.4), отримуємо математичний опис синтезованої нейромережевої моделі діагностування стану паперово -масляної ізоляції вимірвальних трансформаторів струму (2.7).

$$\begin{cases} Y_{NN} = \psi_{(3,1)} = \left(1 + e^{-(-547,979 + 772,39\psi_{(2,1)} + 659,629\psi_{(2,2)})}\right)^{-1}; \\ \psi_{(2,1)} = \left(1 + e^{-(-1,145 - 8,493\psi_{(1,1)} - 529,631\psi_{(1,2)} + 9,555\psi_{(1,3)} - 8,287\psi_{(1,4)})}\right)^{-1}; \\ \psi_{(2,2)} = \left(1 + e^{-(-1,095 + 69,829\psi_{(1,1)} + 11,735\psi_{(1,2)} - 69,994\psi_{(1,3)} + 69,967\psi_{(1,4)})}\right)^{-1}; \\ \psi_{(1,1)} = \left(1 + e^{-(-30,161 - 1,76x_1 - 99,142x_2 + 7,413x_3 + 13,707x_4)}\right)^{-1}; \\ \psi_{(1,2)} = \left(1 + e^{-(-36,203 + 7,8x_1 + 0,667x_2 + 0,852x_3 + 39,674x_4)}\right)^{-1}; \\ \psi_{(1,3)} = \left(1 + e^{-(-168,607 + 59,402x_1 - 227,376x_2 - 81,146x_3 - 10,997x_4)}\right)^{-1}; \\ \psi_{(1,4)} = \left(1 + e^{-(-30,194 - 46,056x_1 + 44,165x_2 - 15,499x_3 - 35,356x_4)}\right)^{-1}. \end{cases} \quad (2.7)$$

Графічна інтерпретація синтезованої нейромоделі для прогнозування стану ізоляції трансформатора наведена на рис. 2.1.

Побудована нейромережева модель являє собою ієрархічну структуру, яка містить обчислювальні елементи (нейрони), і дозволяє виконувати діагностування стану паперово-масляної ізоляції вимірвальних трансформаторів струму по вимірюваним значенням вхідних характеристик.

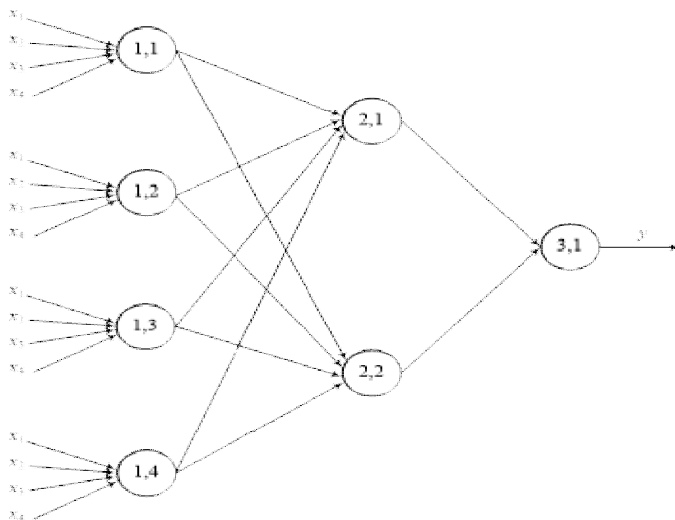


Рисунок 2.1 - Синтезована нейромережева модель

Таблиця 2.2 - Матриця вагових коефіцієнтів  $w$

Номер шару, $\mu$	Номер нейрона в шарі, $\rho$	Значення зміщення $w_0$	Зв'язки (з'єднання)	
			вузол, від якого йде з'єднання	значення вагового коефіцієнту
1	1	30,161	Ознака $x_1$	-1,76
			Ознака $x_2$	-99,142
			Ознака $x_3$	7,413
			Ознака $x_4$	13,707
	2	-36,203	Ознака $x_1$	7,8
			Ознака $x_2$	0,667
			Ознака $x_3$	0,852
			Ознака $x_4$	39,674
	3	168,607	Ознака $x_1$	59,402
			Ознака $x_2$	-227,376
			ознака $x_3$	-81,146
			Ознака $x_4$	-10,997

Продовження табл. 2.2

Номер шару, $\mu$	Номер нейрона в шарі, $\rho$	Значення зміщення $w_0$	Зв'язки (з'єднання)	
			вузол, від якого йде з'єднання	значення вагового коефіцієнту
1	4	30,194	Ознака $x_1$	-46,056
			Ознака $x_2$	44,165
			ознака $x_3$	-15,499
			Ознака $x_4$	-35,356
2	1	-1,145	нейрон (1,1)	-8,493
			нейрон (1,2)	-529,631
			нейрон (1,3)	9,555
			нейрон (1,4)	-8,287
	2	1,095	нейрон (1,1)	69,829
			нейрон (1,2)	11,735
			нейрон (1,3)	-69,994
			нейрон (1,4)	69,967
3	1	-547,979	нейрон (2,1)	772,39
			нейрон (2,2)	659,629

### 2.3 Експериментальна перевірка моделі

Для використання синтезованої нейромережевої моделі на практиці було розроблено програмне забезпечення, що реалізує вираз (2.7) і приймає в якості вхідних даних вищевказані характеристики ізоляції трансформаторів.

Для оцінювання доцільності застосування запропонованої моделі проводилося її порівняння з регресійною моделлю  $Y_r$  (2.8), побудованою на основі навчальної вибірки (2.1), що містить нормовані значення вхідних параметрів:

$$Y_r = 1,1468 - 0,2856x_1 + 0,144x_2 - 0,0312x_3 - 0,3151x_4 \quad (2.8)$$

Для перевірки ефективності застосування побудованої нейромережевої моделі для діагностування стану паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму проводилося експериментальне дослідження на даних тестової вибірки, що містить значення діагностичних характеристик  $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$  492-х примірників, що не входять в навчальну вибірку.

Результати експериментів наведені в табл. 2.3, де використовуються такі позначення:  $K_{on}$  - кількість трансформаторів струму, у яких основна ізоляція придатна до експлуатації, проте невірно віднесена до числа непридатних для подальшого використання;  $K_{og}$  - кількість трансформаторів струму, у яких основна ізоляція непридатна до експлуатації, проте невірно віднесена до числа придатних для подальшого використання;  $K_o = K_{on} + K_{og}$  - кількість помилково класифікованих трансформаторів;  $P_0$  - помилка розпізнавання (2.6).

Таблиця 2.3 - Результати експериментів

Критерій порівняння	Навчальна вибірка		Тестова вибірка	
	Регресійна модель (8)	Нейромережева модель (7)	Регресійна модель (8)	Нейромережева модель (7)
$K_o$	26	3	63	8
$K_{on}$	2	3	14	8
$K_{og}$	24	0	49	0
$P_0$	0,081	0,0094	0,128	0,016

Як видно з табл. 2.3, запропонована нейромережева модель забезпечує найкращі значення помилки розпізнавання (0,0094 в порівнянні з 0,081), що підтверджує доцільність її застосування на практиці. Показники  $K_o$ ,  $K_{on}$  і  $P_0$  дещо збільшилися на даних тестової вибірки (так, наприклад, значення помилки розпізнавання зросла з 0,0094 до 0,016). Не дивлячись на це, нейромережева модель більш адекватна і цілком прийнятна для практичного застосування на відміну від регресійної моделі. Важливо відзначити, що всі випадки помилкової класифікації за допомогою синтезованої нейромоделі відносяться до ситуацій,

коли екземпляри (основна ізоляція трансформаторів) є придатними до експлуатації, проте невірно віднесені до непридатних для подальшого використання. Отже, навіть ті рідкісні випадки помилкової класифікації за допомогою запропонованої моделі (2.7) не призведуть до продовження експлуатації аварійно небезпечних трансформаторів, а лише викличуть необхідність додаткового дослідження примірників, що є придатними для подальшого використання.

#### 2.4 Постановка завдання розробки методу прогнозування відмов у високовольтному трансформаторному обладнанні

В основу прогнозування відмов у високовольтному трансформаторному обладнанні можна покласти математичний апарат метричної класифікації даних [63,66], що дозволяє будувати системи, що навчаються, що дасть можливість підвищити ефективність діагностування високовольтного обладнання. У даній роботі запропоновано метод, який на основі інтелектуальних обчислень дозволяє на ранньому етапі прогнозувати відмови в високовольтному трансформаторному обладнанні за заданою кількістю діагностичних ознак.

Для діагностування будемо використовувати базу даних результатів вимірювань характеристик аналогічного обладнання, стан якого за шкалою "працездатний - відмова" відомо в момент вимірювання. Нехай в базі є безліч наборів

$$D = \langle n, t, x, y \rangle \quad (2.9)$$

де  $n$  – номер об'єкта  $n = \overline{1, N}$  ;

$t$  - відносний дискретний час виміру,  $t = \overline{0, T_d}$  ;

$x$  - вектор результатів вимірювань розмірністю  $I$ ;

$y$  - стан об'єкта,  $y = 0$  - відмова,  $y = 1$  - працездатний;

$N$  - кількість об'єктів в базі.

Перехід від дискретного часу до безперервного виконується за формулою :

$$t_n = t_{но} + t\Delta$$

де  $t_{но}$  - момент першого вимірювання для даного об'єкту;

$\Delta$  - інтервал часу між двома вимірами.

Тоді на основі заданої множини  $D$  (2.9) необхідно побудувати модель  $M = M(D)$ , що дозволяє виконувати діагностування (визначати значення вихідного параметра  $y$ ) стану високовольтного трансформаторного обладнання за набором його характеристик, а для обладнання визнаного працездатним оцінити залишковий ресурс.

Завдання даної роботи – розробка методу прогнозування відмов у високовольтному трансформаторному обладнанні, що дозволяє на ранніх етапах прогнозувати розвиток дефектів.

## 2.5 Метод прогнозування відмов у високовольтному трансформаторному обладнанні на основі метричної класифікації

Для визначення стану трансформатора  $T_q$  на основі метричної класифікації [63] будемо будувати модель  $M = M(D)$ , що представляє собою набір геометричних центрів класів. З цією метою в базі  $D$  виділимо об'єкти, які визнані несправними і об'єднаємо з вимірювання в момент  $T_q$  в клас  $k_0$ . Вимірювання об'єктів, які при всіх  $t \in [0, T_d]$  визнані працездатними об'єднаємо в клас  $k_1$ . Виміри об'єктів в моменти часу передуючі відмові об'єднаємо в класи  $k_{\Delta t}$ ,  $k_{2\Delta t}$ ,  $k_{3\Delta t}$  і т.д. Ці виміри проводилися в моменти:  $T_d - 1$  для класу  $k_{\Delta t}$ ,  $T_d - 2$  для класу  $k_{2\Delta t}$  і т.д. Значення  $i$ -й координати ( $i = \overline{1, I}$ ) центру  $k$ -го класу  $C_i^k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) визначимо за формулою (2.10):

$$C_i^k = \frac{1}{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} \{x_{ij}\} \quad (2.10)$$

де  $N_k$  - число вимірювань у вибірці  $D$  (2.9) віднесених до класу  $k$  ;

$x_{ij}$  - значення  $i$ -ї ознаки для  $j$ -го екземпляра об'єкту, віднесеного до класу  $k$ .

Розрахований таким чином набір координат центрів класів  $C^1, C^2, \dots, C^K$ ,  $C^k = \{C_1^k, C_2^k, \dots, C_{N_x}^k\}$ , дозволяє оцінювати приналежність до класів  $\{1, 2, \dots, K\}$  екземплярів  $T_q$ , що не входять до вибірки  $D$  (1), виходячи з вимірних значень вхідних характеристик  $\{x_{1q}, x_{2q}, \dots, x_{N_x q}\}$  і близькості їх розташування до центрів  $C^1, C^2, \dots, C^K$

При цьому можуть бути використані різні метрики [65,66]:

- Евклідова метрика:

$$R(T_q, C^k) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_x} (x_{iq} - C_i^k)^2} \quad (2.11)$$

- метрика Хеммінга:

$$R(T_q, C^k) = \sum_{i=1}^{N_x} |x_{iq} - C_i^k| \quad (2.12)$$

- максимум з відстаней по кожній координаті:

$$R(T_q, C^k) = \max_{i=1, 2, \dots, N_x} |x_{iq} - C_i^k| \quad (2.13)$$

- мінімум з відстаней по кожній координаті:

$$R(T_q, C^k) = \min_{i=1, 2, \dots, N_x} |x_{iq} - C_i^k| \quad (2.14)$$

Потім в залежності від відстані  $R(T_q, C^k)$  відбувається віднесення трансформатора до класу  $k$ , відстань  $R(T_q, C^k)$  до якого є найменшим:

$$k(T_q) = \arg \min_{k=1, 2, \dots, K} R(T_q, C^k) \quad (2.15)$$

де  $\arg \min_{k=1,2,\dots,K}$  - функція, яка визначає номер класу  $k$ , відстань до якого є найменшою:  $R(T_q, C^k)$ .

При обчисленні оцінки  $k(T_q)$  можливі ситуації, коли результати вимірювання трансформатора виявляться однаково близькими до центрів декількох класів (наприклад  $k_{a\Delta t}$  і  $k_{b\Delta t}$ ). В такому випадку можна поступити одним з наступних способів:

- з метою зменшення потенційних втрат від прийняття помилкового рішення (віднесення примірника до класу справних в разі його відмови або стану, близького до відмови) віднести трансформатор  $T_q$  до класу  $k_{a\Delta t}$  з геометричним центром  $C^k$ , ближчим до класу  $k_0$   $R(C^{k_0}, C^{k_{a\Delta t}}) < R(C^{k_0}, C^{k_{b\Delta t}})$ ;

- віднести екземпляр  $T_q$  до класу  $k_{a\Delta t}$  з великою кількістю екземплярів у вибірці  $D(N_{D|k=a\Delta t} > N_{D|k=b\Delta t})$ .

В результаті прийняття рішення про віднесення до класу  $k_0$  обладнання вважається несправним, при віднесення до класу  $k_1$  трансформатор вважається без ознак наявності несправностей. При прийнятті рішення  $k = k_{a\Delta t}$  трансформатор вважається таким, що очікуваний час його виходу з ладу складе не менше  $a\Delta t$ , де  $a$  - величина, відповідна числу інтервалів  $\Delta t$  до виходу трансформатора з ладу. У разі якщо величина  $a\Delta t$  менше мінімально прийняттого очікуваного часу  $t_{\min}$  ( $a\Delta t < t_{\min}$ ), виконуються заходи з обстеження трансформатора і усунення виявлених несправностей [67-69].

На рис. 2.2 зображена графічна інтерпретація безлічі екземплярів, що відповідають різним класам  $k_0, k_{\Delta t}, k_{2\Delta t}, \dots, k_{a\Delta t}, k_1$  в двовимірному просторі нормованих характеристик  $x_1, x_2$ . При цьому виділені класи, в яких  $y = 0$ , тобто зафіксована відмова обладнання, і  $y = 1$ , тобто обладнання працездатне з різним ступенем розвитку дефекту.

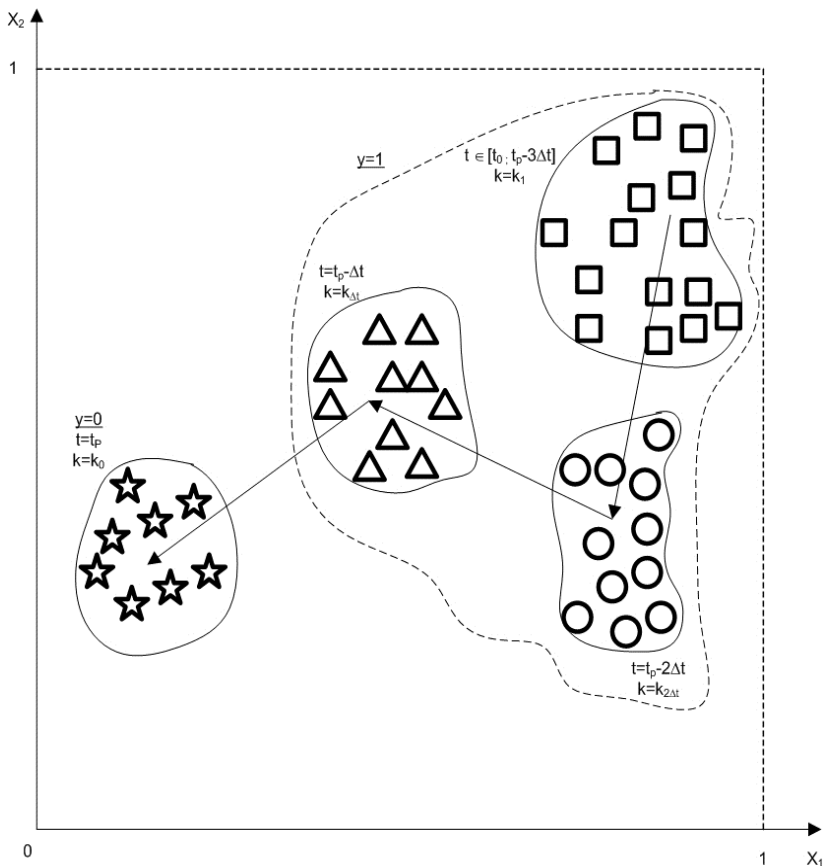


Рисунок 2.2 - Графічна інтерпретація зміни значень характеристик  $x_1, x_2$  при поступовому переході безлічі екземплярів (трансформаторів) з працездатного стану ( $y = 1$ ) в стан відмови ( $y = 0$ )

З рис. 2.2 видно можливий варіант поступового переходу з працездатного стану ( $y = 1; k = k_1, k = k_{2\Delta t}, k = k_{\Delta t}$ ) в стан відмови ( $y = 0; k = k_0$ ).

Виходячи з вищесказаного, метод прогнозування відмов у високовольтному трансформаторному обладнанні може бути представлений таким чином.

На етапі ініціалізації задається навчальна вибірка  $D$  (2.9) і параметри, необхідні для роботи методу. Потім на підставі вихідної вибірки  $D$  формується безліч  $D'$  ( $D \rightarrow D'$ ), в якому кожному трансформатору  $T_j$  в залежності від часу  $t$  до поломки присвоюється відповідний клас  $k_0, k_{\Delta t}, k_{2\Delta t}, \dots, k_{a\Delta t}, k_1$ . При цьому кожному трансформатору з нульовим значенням вихідного параметра ( $y=0$ ) ставиться у відповідність клас  $k=k_0$ , трансформаторам, дослідження стану яких проводилося за час  $\Delta t$  до виходу з ладу – клас  $k=k_{\Delta t}$  і т.д.

Далі для екземплярів  $k$ -го класу ( $k=1, 2, \dots, K$ ) за формулою (2.10) визначаються координати центру  $C^k = \{C_1^k, C_2^k, \dots, C_{N_x}^k\}$ . Таким чином, синтезується модель  $M = M(D)$ , що представляє собою набір координат  $C_i^k$  ( $i=1, 2, \dots, N_x$   $k=1, 2, \dots, K$ ) центрів класів, обчислених по заданому набору даних  $D$  (2.9). Використання даної моделі полягає в тому, що для кожного вимірювання трансформатора  $T_q: \{x_{iq}\}$ ,  $i=1, 2, \dots, N_x$  визначається відстань  $R(T_q, C^k)$  до центру  $C^k$  кожного класу.

Таким чином, запропонований метод прогнозування відмов у високовольтному трансформаторному обладнанні на основі метричної класифікації передбачає створення діагностичної моделі шляхом розбиття на класи початкової множини значень характеристик обладнання в залежності від часу до їх виходу з ладу, а також обчислення геометричних центрів кожного з класів. Обчислюючи відстань координат вимірюваних параметрів діагностуемого трансформатора до центрів класів моделі можна визначити найбільш близький клас  $i$ , отже, залишковий ресурс цього трансформатора.

## 2.6 Експериментальна перевірка запропонованого методу

Для проведення експериментів запропонований метод прогнозування відмов у високовольтному трансформаторному обладнанні на основі метричної класифікації був програмно реалізований стосовно до вимірювальних трансформаторів струму. На основі розробленого методу та програмного забезпечення вирішувалося завдання діагностування стану паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму [70]. При цьому було досліджено стан п'ятнадцяти трансформаторів ТФКН-330, які перебували в експлуатації в магістральних мережах. В якості вхідних ознак (характеристик) для побудови діагностичної моделі обрано такі [70]:

- $x_1$  - тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції під робочою напругою;
- $x_2$  - відхилення ємності і основної ізоляції від паспортного значення;
- $x_3$  - температура повітря навколишнього середовища.

Фрагмент безлічі нормованих результатів вимірювань  $D$  (2.9) наведено в табл. 2.4, де  $Y=1$  - працездатний стан трансформатора,  $Y=0$  - стан відмови.

Таблиця 2.4 - Фрагмент безлічі результатів вимірювань трансформаторів, що використовуються для побудови діагностичної моделі

Номер вимірювання	Номер трансформатора	Нормовані значення ознак			Y	Клас k
1	1	0,460	0,937	0,563	1	$k_{3\Delta}$
10	3	0,440	0,644	0,781	1	$k_{3\Delta}$
15	1	0,767	0,286	0,500	0	$k_0$
18	4	0,574	0,928	0,332	0	$k_0$
34	6	0,499	0,880	0,767	1	$k_{\Delta}$
45	8	0,490	0,933	0,900	1	$k_{\Delta}$

Продовження таблиці 2.4

Номер вимірювання	Номер трансформатора	Нормовані значення ознак			Y	Клас k
47	8	0,468	0,882	0,333	1	$k_{2\Delta t}$
6	1	0,478	0,955	0,643	1	$k_{2\Delta t}$
71	11	0,407	0,877	0,964	1	$k_1$
91	13	0,233	0,962	0,435	1	$k_1$
...	...	...	...	...	...	...
183	15	0,609	1,0	1,0	0	$k_0$

Вимірювання значень параметрів трансформаторів проводились із середньою періодичністю  $\Delta t = 3$  місяці. Завдання полягало у побудові моделі  $M = M(D)$ , що дозволяє виявляти тенденції до виникнення несправностей за  $t_{progn} = 9$  місяців до їх прояву і виходу трансформатора з ладу. Отже, безліч вимірів  $D$  (стовпці,  $x_1, x_2, x_3, Y$  в табл.1) в залежності від часу до відмови було розбите на класи  $k_0, k_1$ , а також на  $C = \frac{t_{progn}}{\Delta t} = \frac{9}{3} = 3$  класа ( $k_{\Delta t}, k_{2\Delta t}, k_{3\Delta t}$ ), відповідних станам поступового переходу від працездатного стану до відмови.

Після виділення класів (перетворення  $D \rightarrow D'$ ) виконувалося визначення центрів класів  $C^k$  ( $k = k_0, k_{\Delta t}, k_{2\Delta t}, k_{3\Delta t}, k_1$ ) за формулами (2.10). Результати виділення центрів класів  $C^k$  наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 - Центри класів

Клас $k$	Значення координат центрів класів $C_i^k$		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
$k_0$	0,5222	0,8551	0,5159
$k_{\Delta t}$	0,4880	0,8505	0,7462
$k_{2\Delta t}$	0,4696	0,8491	0,7257
$k_{3\Delta t}$	0,4595	0,8580	0,6268
$k_1$	0,4341	0,8661	0,7683

Потім виконувалося віднесення кожного вимірювання трансформатора  $T_j$  до класів  $k = k_0, k_{\Delta t}, k_{2\Delta t}, k_{3\Delta t}, k_1$  в залежності від значень вхідних характеристик  $x_1, x_2, x_3$  і їх близькості  $R(T_j, C^k)$  до центрів класів, використовуючи Евклидову метрику (2.11) і вираження (2.15). Помилка  $E$  побудованої моделі  $M = M(D)$  для навчальних даних  $D$ , представлених у вигляді табл. 2.4, обчислювалась як відношення неправильно класифікованих трансформаторів  $N_{err}$  до загального їх числа  $N_D$  в вибірці  $D$ :

$$E = \frac{N_{err}}{N_D} = \frac{9}{183} = 0,049 \quad (2.16)$$

Для перевірки адекватності синтезованої моделі  $M = M(D)$  виконувалося її використання на даних  $D_{test}$ , що не входять в безліч  $D$ . При цьому кількість вимірювань трансформаторів у вибірці  $D_{test}$  становила  $N_{D_{test}} = 134$  шт. Помилка  $E_{test}$  моделі  $M = M(D)$ , обчислена для даних  $D_{test}$  була визначена наступним чином:

$$E_{test} = \frac{N_{err, test}}{N_{D_{test}}} = \frac{12}{134} = 0,089 \quad (2.17)$$

Як видно, помилка  $E_{test}$  на даних  $D_{test}$  трохи вище помилки  $E$ , обчисленої для даних  $D$ . Значення обох характеристик  $E$  і  $E_{test}$  знаходяться в межах допустимої похибки 10 %, що дозволяє зробити висновок про доцільність застосування запропонованого методу на практиці. Крім того, всі випадки помилкової класифікації відносять працездатні трансформатори до числа тих, що відмовили, що менш критично в порівнянні з віднесенням трансформатора, що відмовив, до числа придатних.

## 2.7 Додаткові діагностичні параметри ізоляції вимірювальних трансформаторів струму

Аналіз запропонованої моделі та методу показав, що для підвищення якості діагностування необхідно враховувати додаткові діагностичні параметри, до яких можна віднести наступні:

- амплітуда і фаза вектора небалансу струмів комплексної провідності ізоляції 3-х фазної групи, де амплітуда кількісно характеризує дефект, а фаза вектора вказує в якому з об'єктів він розвивається;

- інтенсивність часткових розрядів - часткові розряди в основній ізоляції в багатьох випадках є першопричиною зміни  $tg\delta_l$  і  $C_l$ .

Метод аналізу амплітуди і фази вектора небалансу струмів комплексної провідності ізоляції 3-х фазної групи, як зазначено, наприклад, в [71, 72], на практиці виявився малоефективним.

Часткові розряди (ЧР) мають, як правило, більшу інтенсивність тому створення вимірювальних пристроїв з необхідною чутливістю не викликає труднощів. Однак, можливість виявлення дефектів ізоляції, реєстрацією ЧР в експлуатації визначається не чутливістю апаратури, а здатністю фільтрації зовнішніх перешкод, тобто з усуненням перешкод або зниженням їх рівня.

На рис. 2.3 - 2.5 показані приклади реєстрації рівнів часткових розрядів. На рис. 2.3 і 2.4 зареєстрована розрядна

активність має виражену кореляцію з температурою ізоляції, що дозволяє зробити припущення про зв'язок, зареєстрованої розрядної активності, зі станом ізоляції.

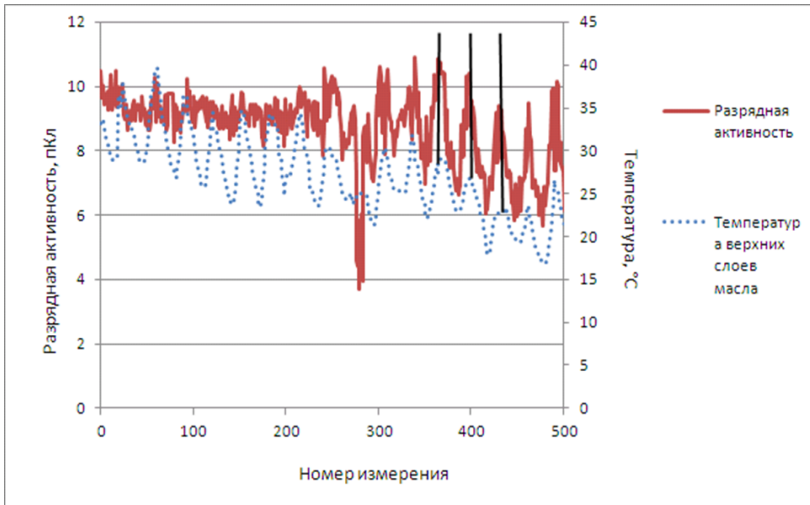


Рисунок 2.3 - Кореляція значень розрядної активності з температурою верхніх шарів масла вводу з БМКІ 220кВ (дані від системи SAFE - Т, ТОВ «Енергоавтоматизація»)

Перешкоди при вимірюванні ЧР можуть викликатися будь-якими процесами в мережі, пов'язаними з різкими змінами струму, а також джерелами високочастотних напруг. При вимірах часткових розрядів в умовах експлуатації джерела перешкод, як правило, не можуть бути усунені. Додаткові перешкоди можуть створювати радіопередавачі, ЧР в сусідньому обладнанні, розряди між шинами, розряди між елементами струмопроводов, розряди на загострених краях арматури або на кінцях ножів відключених роз'єднувачів і т. п.

Основним джерелом непереборних перешкод при вимірах в експлуатаційних умовах є коронні розряди на дротах, арматурі і обладнанні (так званий основний рівень перешкод), які мають характеристики схожі з характеристиками ЧР при реєстрації

електричними методами. Вібрація обладнання створює перешкоди при реєстрації акустичними методами. Тому, основною проблемою при вимірюванні в умовах експлуатації є селекція часткових розрядів. Незважаючи на велику кількість робіт, що описують дані методики селекції, практичні спостереження показують, що часто дані алгоритми і методики в умовах високовольтних станцій і підстанцій виявляються малоєфективними [73].

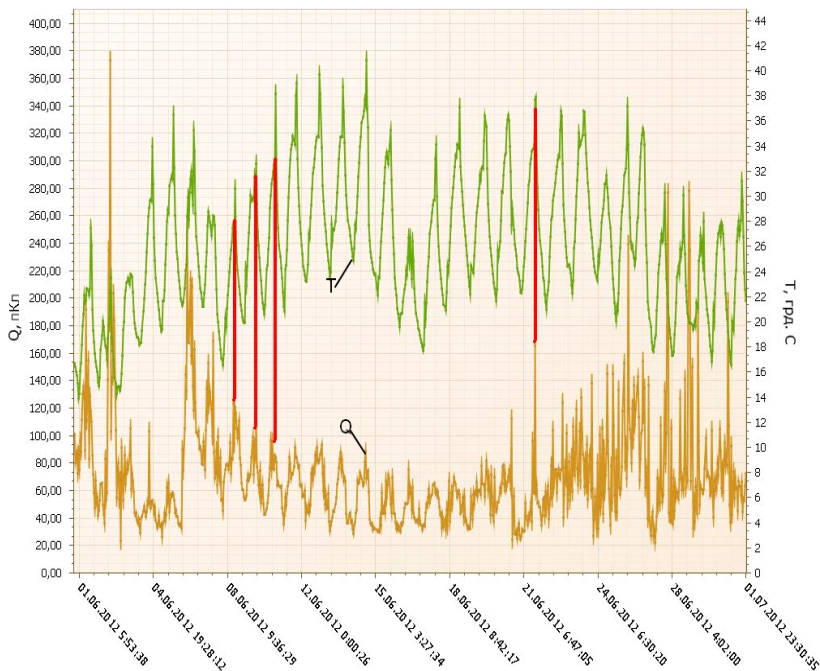
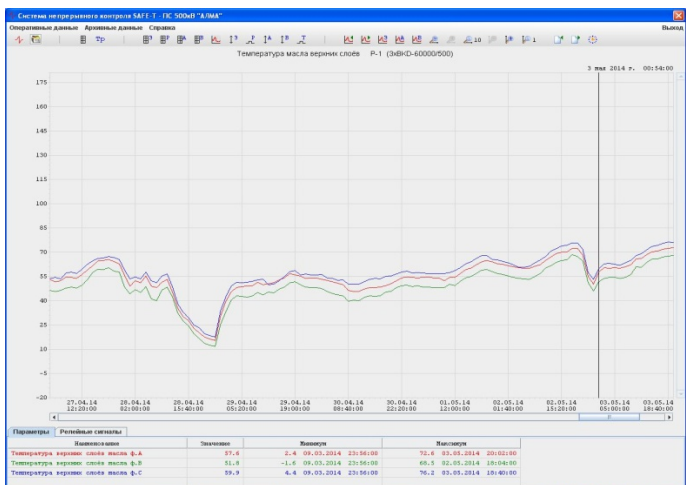


Рисунок 2.4 - Кореляція значень розрядної активності з температурою ізоляції трансформатора струму (ТФКН-330, негерметичний, дата виготовлення: 1962 року, дата введення в експлуатацію: 1971 р (дані від системи SAFE - Т, з приладом Omicron MPD 600)



а)



б)

Рисунок 2.5 - Разрядная активність вводов і температура верхніх шарів масла РОМ-60000/500

а) - розрядна активність, б) - температура верхніх шарів масла

На рис. 2.5 показаний приклад реєстрації рівня часткових розрядів, однак, зв'язок отриманих даних з реальним технічним станом об'єкта контролю встановити неможливо. До того ж рівень уявного заряду, який, вимірює прилад, як заявлено виробником приладу, не може бути в реальності (більше 1000 пКл), з розрядами такого рівня ввод пропрацював би не більше кількох годин або днів.

Як показано на цих прикладах до контролю часткових розрядів в експлуатації необхідно ставитися як до додаткового методу, який в сукупності з основними може дозволити підвищити достовірність оцінки технічного стану вводу або трансформатора струму. Також для введів слід пам'ятати, що нормальним рівнем часткових розрядів в основній ізоляції вважається 5пКл, а для ізоляції обмоток силових трансформаторів - 300пКл, тому зрозуміло, що виявлення дефектів введів по даному параметру дуже ускладнено.

Слід зазначити, що методики кількісного визначення величини уявного заряду часткових розрядів в умовах експлуатації є теоретично малообґрунтованими, а з точки зору практики - малодослідженими. Тому для експлуатаційного контролю характеристик часткових розрядів в основній ізоляції трансформаторів струму і введів коректніше було б застосовувати термін «розрядна активність». Розрядна активність - це безрозмірна величина, що передбачає умовну кількісну оцінку зміни рівня часткових розрядів в основній ізоляції. Наприклад, якщо рівень активності виріс з 10 до 20 одиниць, то можна зробити висновок про те, що рівень уявного заряду часткових розрядів зріс удвічі, тобто . якщо система контролю вводилася на новому устаткуванні, можна припустити, що рівень з нормальних 5пКл виріс до 10пКл.

З огляду на це авторами пропонується спрощений підхід до контролю характеристик розрядної активності в основній ізоляції введів і трансформаторів струму, заснований на спектральному аналізі сигналу струму провідності основної ізоляції введів і подальшому розрахунку інтегрального діючого значення

складових в діапазоні 8-10МГц. Такий алгоритм впроваджений в блоках моніторингу SAFE-T ТОВ «Енергоавтоматизація» [74].

В якості додаткових сигналів, що дозволяють локалізувати місце появи дефекту, можна використовувати високочастотні складові струмів заземлення нейтралей і баків трансформаторного обладнання.

З урахуванням додаткового діагностичного параметра ізоляції трансформаторів струму, а саме часткових розрядів, можна вдосконалити відповідні математичні моделі, наприклад, модель [53] прийме наступний вигляд:

$$S(t, (tg\delta_1, \Delta tg\delta_1, Q, a)) = S_0(t)^{\exp(b_1 \cdot tg\delta_1 \cdot b_2 \cdot \Delta tg\delta_1 + b_3 \cdot Q + b_4 \cdot a)}, \quad (2.18)$$

де  $S(t, (tg\delta_1, \Delta tg\delta_1, Q, a))$  - результуюча ймовірність, при заданих для відповідного спостереження значеннях параметрів;

$S_0(t)$  - базова ймовірність безвідмовної роботи, отримана, наприклад, на основі розподілу Вейбулла;

$t$  - фактичний період експлуатації апарату,

$tg\delta_1$  - відхилення тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції від базового значення;

$\Delta tg\delta_1$  - відхилення модуля зміни тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції від базового значення;

$Q$  - відхилення рівня розрядної активності від базового значення;

$a$  - відхилення температурного коефіцієнта від базового значення;

$b_1, b_2, b_3, b_4$  - вагові коефіцієнти (кількісна оцінка впливу діагностичних параметрів).

Таким чином, використання додаткових діагностичних параметрів дозволяє підвищити точність математичних моделей паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму.

## 2.8 Висновки до розділу

У розділі розроблена модель діагностування стану вимірювальних трансформаторів струму, за допомогою прогнозування відмов на основі метричної класифікації та розглянуті додаткові діагностичні параметри ізоляції.

Результати експериментів показали, що побудована нейромережева модель забезпечує прийнятну точність і може бути використана для діагностування стану паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму, на основі вимірюваних значень вхідних параметрів.

Наукова новизна полягає в тому, що запропонована діагностична нейромережева модель, яка являє собою ієрархічну структуру, містить обчислювальні елементи (нейрони), і дозволяє виконувати діагностування стану основної ізоляції трансформаторів струму по вимірюваним значенням вхідних характеристик (тангенс кута діелектричних втрат та ємність основної ізоляції під робочою напругою, температура та вологість повітря навколишнього середовища). Розроблений метод прогнозування відмов на основі метричної класифікації, який передбачає розбиття на класи початкової множини значень характеристик трансформаторів в залежності від часу до їх відмови, обчислення координат геометричних центрів кожного з класів в просторі нормованих характеристик. Належність трансформатора, який діагностується до одного з цих класів визначається по мінімуму відхилень координат його поточних характеристик від координат центрів класів. Належність трансформатора до певного класу запропонованої моделі характеризує його залишковий ресурс, з точністю, яка залежить від інтервалу вимірювань характеристик, використаних для побудови моделі. Це дозволяє виявляти виникаючі несправності на початкових стадіях.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що модель дозволяє виконувати діагностування стану основної ізоляції трансформаторів і робити висновок про можливість їх подальшої експлуатації з великою вірогідністю адекватності ( $\approx 0,984$ ).

### ГЛАВА 3

## ПРОГНОЗУВАННЯ НА ОСНОВІ ІНТЕНСИВНОСТІ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ ВІРОГІДНОСТІ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ ПАПЕРОВО-МАСЛЯНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

Ефективне прогнозування ймовірності безвідмовної роботи ізоляції трансформаторного обладнання важливо для своєчасного запобігання виходу виробу з ладу. Воно дозволяє внести істотний внесок у вирішення актуального завдання підвищення технічної стійкості електричних машин і апаратів станцій, підстанцій та мереж.

Таке прогнозування може бути здійснено методом математичного моделювання: в модель підставляються значення найважливіших характеристик ізоляції (вхідні ознаки), а вихідним значенням моделі служить ймовірність безвідмовної роботи виробу [53]. При цьому ймовірність порядку 0,4 і нижче можна трактувати як сигнал про швидкий вихід трансформатора з ладу, що свідчить про необхідність проведення превентивного ремонту [25, 30].

Існуючі математичні моделі прогнозування ймовірності безвідмовної роботи трансформаторного обладнання в якості вхідних ознак використовують в основному тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції, відхилення ємності ізоляції від паспортного значення, температуру і вологість повітря навколишнього середовища [53, 30, 70]. При побудові математичних моделей прогнозування ймовірності безвідмовної роботи вимірювальних трансформаторів струму важливо використовувати додаткові ознаки, такі як амплітуда і фаза вектора небалансу струмів комплексної провідності ізоляції 3-х фазної групи, інтенсивність часткових розрядів і т.д. Це дозволить підвищити точність моделей, а відтак вчасно попереджати аварійні випадки.

В якості базової математичної моделі прогнозування ймовірності безвідмовної роботи трансформаторного обладнання використовується наступна [53]:

$$S(t, tg\delta, \Delta C, T, H) = S_0(t)^{\exp(b_1 \cdot tg\delta + b_2 \cdot \Delta C + b_3 \cdot T + b_4 \cdot H)} \quad (3.1)$$

де  $t$  - час роботи трансформатора (базовий параметр);

$tg\delta$  - тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції (характеристика наявності дефектів, що можуть набути розвитку);

$\Delta C$  - відхилення ємності основної ізоляції від паспортного значення (критерій часткової відмови та первісник аварійного стану);

$T$  - температура повітря навколишнього середовища (експлуатаційний вплив);

$H$  - вологість повітря (корегувальний параметр);

$S_0(t)$  - базова функція ймовірності безвідмовної роботи на основі закону розподілу Вейбулла [75];

$b_i$  - коефіцієнти моделі.

В роботі [73] обґрунтовано необхідність враховувати у відповідних математичних моделях інтенсивність часткових розрядів, яка в багатьох випадках є першопричиною розвитку дефектів.

Тому метою даної глави є побудова моделі прогнозування ймовірності безвідмовної роботи паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму шляхом уточнення моделі [53] за рахунок обліку інтенсивності часткових розрядів. Дане завдання може бути вирішене методом кореляційного аналізу експериментальних даних, що дозволяє визначити вплив часткових розрядів на ймовірність безвідмовної роботи, розрахованої за допомогою моделі (3.1). В роботі також застосовано метод нейромережевого моделювання, що дозволяє описати нелінійні залежності між вхідними ознаками.

### 3.1 Побудова моделі

Метою кореляційного аналізу є встановлення факту лінійної залежності між інтенсивністю часткових розрядів  $Q$  і розрахованої за допомогою формули (3.1) ймовірністю безвідмовної роботи вимірювальних трансформаторів струму

однієї з підстанцій магістральних мереж України 330кВ. Для цього використана база з більш 1620 вимірів  $tg\delta$ ,  $\Delta C$ ,  $T$ ,  $H$  і  $Q$  виконаних для трансформаторів струму через приблизно рівні інтервали часу.

За допомогою критерію Пірсона [76] був обчислений коефіцієнт лінійної кореляції між величиною  $Q$  і розрахованою за формулою (3.1) ймовірністю безвідмовної роботи  $S$ . При рівні значущості 0,05 він склав 0,28, отже, між  $Q$  і  $S$  може існувати залежність, яку неможливо точно описати лінійним виразом. Тому в роботі застосований метод нейромережевого моделювання, що дозволяє визначити нелінійну залежність між вхідними ознаками, в тому числі інтенсивністю часткових розрядів, і розрахованою за формулою (3.1) ймовірністю безвідмовної роботи вимірювальних трансформаторів струму.

Для побудови діагностичної моделі, що враховує  $tg\delta$ ,  $\Delta C$ ,  $T$ ,  $H$  і  $Q$  використана штучна нейронна мережа прямого поширення. Було досліджено стан п'яти трансформаторів струму підстанції «Дніпро-Донбас» 362 кВ.

По кожному трансформатору сформовано вибірку з 236 вимірів вхідних ознак, а так само розрахована ймовірність безвідмовної роботи за формулою (3.1), яка не враховує інтенсивність часткових розрядів. Таким чином, була сформована навчальна вибірка (3.2), що містить 1180 станів, що характеризуються п'ятьма ознаками:

$$D = \langle X, Y \rangle \quad (3.2)$$

де  $X = \{tg\delta, \Delta C, T, H, Q\}$  - безліч вхідних ознак, що описують стан паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму;

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$  - безліч значень вихідного параметра, тобто ймовірності безвідмовної роботи  $S$ ;

$N = 1180$  - кількість станів у вибірці  $D$ .

Таким чином, навчальна вибірка представляла собою таблицю чисел, що складається з 1180 рядків і шести стовпців,

що містять значення п'яти вхідних ознак і одного вихідного для кожного з досліджених трансформаторів.

З метою виключення впливу різного порядку значень ознак на модель, що синтезується попередньо виконувалося нормування ознак, тобто приведення діапазону їх значень до єдиного інтервалу  $x_{in} \in [0; 1]$  за формулою (3.3) :

$$x_{ijn} = \frac{x_{ij} - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}} \quad (3.3)$$

де  $x_{ijn}$  - нормоване значення і-ї ознаки j-го виміру,  $i = \overline{1; 5}$ ,  $j = \overline{1; 1180}$  ;

$x_{i \min}$  і  $x_{i \max}$  - відповідно, мінімальне і максимальне значення і-ї ознаки в навчальній вибірці D.

Фрагмент навчальної вибірки, що містить нормовані значення ознак, наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Фрагмент навчальної вибірки

Номер вимірювання	Значення ознак					S (Y)
	$tg \delta$ ( $x_1$ )	$\Delta C$ ( $x_2$ )	T ( $x_3$ )	H ( $x_4$ )	Q ( $x_5$ )	
1	0,257	0,089	0,111	0,737	0,130	0,660
2	0,247	0,075	0,146	0,667	0,185	0,647
3	0,226	0,036	0,176	0,632	0,284	0,652
4	0,202	0,099	0,266	0,544	0,126	0,655
5	0,177	0,089	0,342	0,491	0,124	0,670
6	0,157	0,055	0,427	0,421	0,102	0,672
7	0,141	0,058	0,492	0,404	0,381	0,676
8	0,118	0,083	0,573	0,368	0,098	0,688
9	0,104	0,136	0,608	0,333	0,274	0,685
10	0,093	0,099	0,668	0,333	0,331	0,688
...	...	...	...	...	...	...
1180	0,375	0,711	0,353	1,000	0,839	0,2

Моделювання стану ізоляції трансформаторів здійснювалося на основі побудованої навчальної вибірки за допомогою тришарового перцептрона, перший шар якого містив чотири нейрона, другий шар - два нейрона, третій шар - один нейрон. Така структура мережі показала ефективні результати в роботі [70] при моделюванні стану паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму. Однак, структура такої моделі не забезпечила прийнятне значення помилки розпізнавання (помилка розпізнавання склала 0,181).

Тому були здійснені спроби побудови нейромережових моделей інших структур (двошаровий перцептрон, що містить п'ять нейронів на першому шарі і один на другому; тришаровий перцептрон з п'ятьма нейронами на першому шарі, трьома нейронами на другому і одним - на третьому, а також інші поширені структури [61]. Такі моделі також не забезпечили прийнятний рівень помилки розпізнавання (для різних структур помилка розпізнавання становила від 0,127 до 0,192). Це зумовило доцільність застосування еволюційних методів комп'ютерного моделювання [77, 78] для пошуку прийнятної структури нейромережової моделі, а також налаштування її параметрів.

Методи еволюційної оптимізації є випадково-орієнтованими і не зациклюються на локальних екстремумах [10]. Синтез структури нейромережі за допомогою генетичних алгоритмів, які відносяться до методів еволюційної оптимізації, дозволяє вибрати топологію мережі і підібрати вагові коефіцієнти. Суть застосування генетичних алгоритмів полягає в наступному: випадковим чином генерується набір хромосом (структур мережі) і підбираються вагові коефіцієнти. Цільовою функцією є середньоквадратична помилка  $mse$  - сума квадратів відхилень між реальним і модельним виходом мережі:

$$mse = \frac{1}{N_{ekz}} \sum_{j=1}^{N_{ekz}} (Y_{NN_j} - S_j)^2 \quad (3.4)$$

де  $N_{ekz}$  - кількість примірників в навчальній вибірці;

$Y_{NNj}$  - значення вихідного параметра для  $j$ -го трансформатора навчальної вибірки, розраховане по синтезованій нейромережевій моделі;

$S_j$  - значення вихідного параметра (розрахованої за формулою [1] ймовірності безвідмовної роботи) для  $j$ -го трансформатора в навчальній вибірці.

Якщо досягнуто прийнятне значення цільової функції, то пошук завершується, в іншому випадку виконується схрещування хромосом, в результаті чого утворюються нові структури нейромережевої моделі, для яких виконується аналіз  $mse$ , і так далі поки не буде знайдено прийнятне значення цільової функції. Обрана підсумкова хромосома містить структуру нейромережевої моделі.

Таким чином, за результатами еволюційного моделювання була отримана структура нейронної мережі, зображена на рис. 3.1.

Як видно з рис. 3.1, побудована нейромережева модель прогнозування на основі інтенсивності часткових розрядів ймовірності безвідмовної роботи паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму містить 3 шара, на першому шарі - 7 нейронів, на другому - 4, на третьому - 1 нейрон, що обчислює вихідне значення цільової функції.

Всі нейрони синтезованої нейромережевої моделі мали сигмоїдну функцію активації:

$$\psi(\varphi) = \frac{1}{1 + e^{-\varphi}} \quad (3.5)$$

де  $\varphi$  - аргумент функції активації, який представляє собою функцію дискримінанта [11]  $\varphi = \varphi(w; x)$ ,

$w$  - матриця вагових коефіцієнтів,

$x$  - безліч аргументів дискримінантної функції.

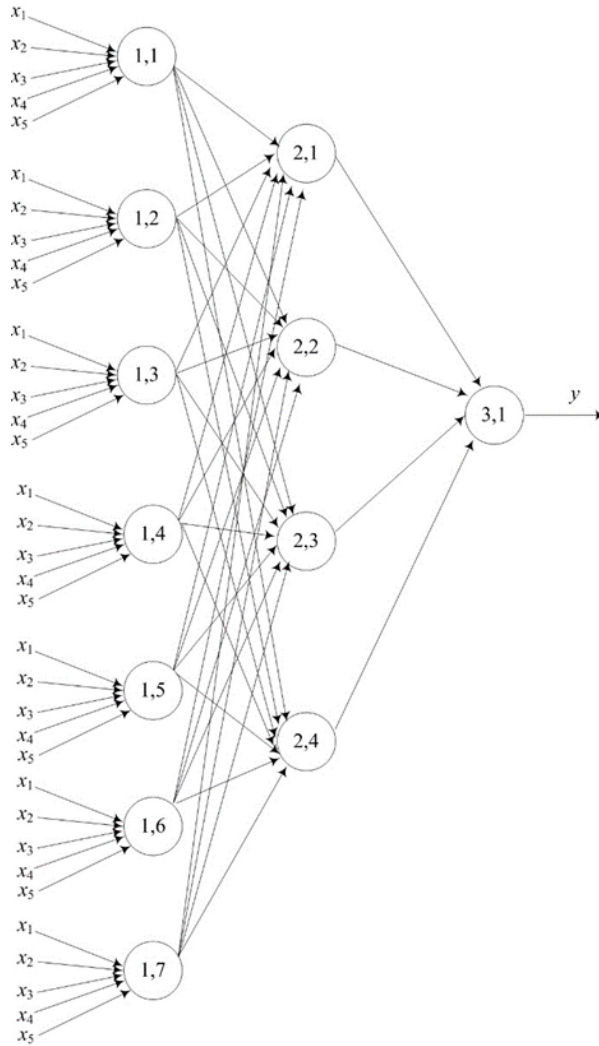


Рисунок 3.1 - Синтезована неймережева модель

При синтезі нейромоделі для автоматизації діагностування стану паперово-масляної ізоляції вимірювальних

трансформаторів струму в якості дискримінантної функції використовувалася зважена сума:

$$\varphi(w; x) = w_0 + \sum_{i=1}^{|x|} w_i x_i \quad (3.6)$$

де  $w_i$  – значення  $i$ -го вагового коефіцієнта, що визначає значимість  $i$ -го вхідного параметра  $x_i$  в функції  $\varphi(w; x)$ ;

$|x|$  – кількість аргументів функції  $\varphi(w; x)$ ;

$w_0$  – значення зміщення  $\varphi(w; x)$ .

Таким чином, структура тришарової нейромоделі, що синтезується  $Y_{NN}$  може бути представлена наступним чином:

$$\begin{cases} Y_{NN} = \psi_{(3,1)}(\varphi_{(3,1)}(w_{(3,1)}; \psi_{(2)})); \\ \psi_{(2)} = \{\psi_{(2,1)}; \psi_{(2,2)}; \psi_{(2,3)}; \psi_{(2,4)}\}; \\ \psi_{(2,k)} = \psi_{(2,k)}(\varphi_{(2,k)}(w_{(2,k)}; \psi_{(1)})), k = 1, \dots, 4; \\ \psi_{(1)} = \{\psi_{(1,1)}; \dots; \psi_{(1,7)}\}; \\ \psi_{(1,l)} = \psi_{(1,l)}(\varphi_{(1,l)}(w_{(1,l)}; X)), l = 1, \dots, 7, \end{cases} \quad (3.7)$$

де  $\psi_{(\mu,\rho)}$  – функція активації  $\rho$ -го нейрона  $\mu$ -го шару;

$\varphi_{(\mu,\rho)}$  – дискримінантна функція  $\rho$ -го нейрона  $\mu$ -го шару.

Для побудови моделі і визначення значень її параметрів (вагових коефіцієнтів і зсувів кожного нейрона) на її вхід подавалися значення ознак, що пронормували, на вихід – значення вихідного параметра для відповідного примірника – ймовірність безвідмовної роботи екземпляра трансформатора, розраховану за допомогою моделі (1). В якості цільової функції при навчанні нейромоделі використовувався мінімум середньоквадратичного критерію  $mse$  (3.4).

Матриця вагових коефіцієнтів  $w$  побудованої нейромоделі наведена в табл. 3.2.

Таким чином, підставивши отримані значення вагових коефіцієнтів і зсувів в систему (3.7) з урахуванням дискримінантної функції отримуємо математичний опис синтезованої моделі прогнозування на основі інтенсивності часткових розрядів ймовірності безвідмовної роботи паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму (3.8):

$$\begin{cases}
 Y_{NN} = \psi_{(3,1)} = \left(1 + e^{(-7,478 + 2,907\vartheta_{(2,1)} + 0,404\vartheta_{(2,2)} + 5,022\vartheta_{(2,3)} + 5,300\vartheta_{(2,4)})}\right)^{-1}; \\
 \psi_{(2,1)} = \left(1 + e^{(-6,1359 + 2,597\vartheta_{(1,1)} + 2,764\vartheta_{(1,2)} - 3,363\vartheta_{(1,3)} + 4,732\vartheta_{(1,4)} + 0,264\vartheta_{(1,5)} - 0,188\vartheta_{(1,6)} - 5,338\vartheta_{(1,7)})}\right)^{-1}; \\
 \psi_{(2,2)} = \left(1 + e^{(-1,046 + 1,783\vartheta_{(1,1)} + 4,485\vartheta_{(1,2)} + 2,714\vartheta_{(1,3)} - 2,665\vartheta_{(1,4)} + 2,896\vartheta_{(1,5)} - 1,289\vartheta_{(1,6)} + 1,728\vartheta_{(1,7)})}\right)^{-1}; \\
 \psi_{(2,3)} = \left(1 + e^{(-3,882 + 2,063\vartheta_{(1,1)} - 1,075\vartheta_{(1,2)} + 2,470\vartheta_{(1,3)} + 1,869\vartheta_{(1,4)} + 4,915\vartheta_{(1,5)} + 3,589\vartheta_{(1,6)} + 3,623\vartheta_{(1,7)})}\right)^{-1}; \\
 \psi_{(2,4)} = \left(1 + e^{(-0,895 + 0,059\vartheta_{(1,1)} + 2,981\vartheta_{(1,2)} - 2,358\vartheta_{(1,3)} - 0,860\vartheta_{(1,4)} + 5,013\vartheta_{(1,5)} - 1,549\vartheta_{(1,6)} - 1,756\vartheta_{(1,7)})}\right)^{-1}; \\
 \psi_{(1,1)} = \left(1 + e^{(-10,326 + 0,650\vartheta_1 - 0,643\vartheta_2 + 2,035\vartheta_3 + 1,721\vartheta_4 + 7,036\vartheta_5)}\right)^{-1}; \\
 \psi_{(1,2)} = \left(1 + e^{(-1,474 + 3,894\vartheta_1 + 7,194\vartheta_2 - 3,297\vartheta_3 - 0,546\vartheta_4 + 4,783\vartheta_5)}\right)^{-1}; \\
 \psi_{(1,3)} = \left(1 + e^{(-0,641 + 2,5,915\vartheta_1 + 3,131\vartheta_2 - 2,442\vartheta_3 + 3,587\vartheta_4 + 6,261\vartheta_5)}\right)^{-1}; \\
 \psi_{(1,4)} = \left(1 + e^{(-5,373 + 9,1,214\vartheta_1 - 4,679\vartheta_2 - 4,976\vartheta_3 - 1,510\vartheta_4 + 0,431\vartheta_5)}\right)^{-1}; \\
 \psi_{(1,5)} = \left(1 + e^{(-1,376 + 5,6,358\vartheta_1 - 10,965\vartheta_2 - 1,736\vartheta_3 - 5,815\vartheta_4 - 3,692\vartheta_5)}\right)^{-1}; \\
 \psi_{(1,6)} = \left(1 + e^{(-2,691 + 8,0,868\vartheta_1 + 6,487\vartheta_2 - 4,763\vartheta_3 - 2,406\vartheta_4 - 1,622\vartheta_5)}\right)^{-1}; \\
 \psi_{(1,7)} = \left(1 + e^{(-1,577 + 4,1,464\vartheta_1 - 4,364\vartheta_2 + 0,658\vartheta_3 + 8,572\vartheta_4 + 0,805\vartheta_5)}\right)^{-1}.
 \end{cases} \tag{3.8}$$

Таблиця 3.2 – Матриця вагових коефіцієнтів  $w$ 

Номер шару, $\mu$	Номер нейрона в шарі, $\rho$	Значення зміщення $w_0$	Зв'язки (з'єднання)	
			вузол, від якого йде з'єднання	значення вагового коефіцієнта
1	1	-10,3266	Ознака $x_1$	0,6509
			Ознака $x_2$	-0,6431
			Ознака $x_3$	2,0358
			Ознака $x_4$	1,7211
			Ознака $x_5$	7,0363
1	2	1,4743	Ознака $x_1$	1,8947
			Ознака $x_2$	7,1942
			Ознака $x_3$	-3,2972
			Ознака $x_4$	-0,5464
			Ознака $x_5$	4,7834
1	3	0,6412	Ознака $x_1$	-5,9152
			Ознака $x_2$	3,1312
			Ознака $x_3$	-2,4422
			Ознака $x_4$	3,5875
			Ознака $x_5$	6,2612
1	4	5,3739	Ознака $x_1$	-1,2143
			Ознака $x_2$	-4,6796
			Ознака $x_3$	-4,9762
			Ознака $x_4$	-11,5101
			Ознака $x_5$	0,4317
1	5	1,3765	Ознака $x_1$	-6,3586
			Ознака $x_2$	-10,9655
			Ознака $x_3$	-1,7367
			Ознака $x_4$	-5,8159
			Ознака $x_5$	-3,6925

Продовження таблиці 3.2

Номер шару, $\mu$	Номер нейрона в шарі, $\rho$	Значення зміщення $w_0$	Зв'язки (з'єднання)	
			вузол, від якого йде з'єднання	значення вагового коефіцієнта
1	6	-2,6918	Ознака $x_1$	-0,8681
			Ознака $x_2$	6,4870
			Ознака $x_3$	-4,7637
			Ознака $x_4$	-2,4065
			Ознака $x_5$	-1,6228
1	7	1,5774	Ознака $x_1$	1,4648
			Ознака $x_2$	-4,3641
			Ознака $x_3$	0,6580
			Ознака $x_4$	8,5722
			Ознака $x_5$	0,8051
2	1	6,1359	нейрон (1,1)	-2,5979
			нейрон (1,2)	2,7649
			нейрон (1,3)	-3,3634
			нейрон (1,4)	4,7321
			нейрон (1,5)	0,2641
			нейрон (1,6)	-0,1888
			нейрон (1,7)	-5,3388
2	2	1,0461	нейрон (1,1)	-1,7837
			нейрон (1,2)	4,4856
			нейрон (1,3)	2,7141
			нейрон (1,4)	-2,6650
			нейрон (1,5)	2,8964
			нейрон (1,6)	-1,2898
			нейрон (1,7)	1,7281

Продовження таблиці 3.2

Номер шару, $\mu$	Номер нейрона в шарі, $\rho$	Значення зміщення $w_0$	Зв'язки (з'єднання)	
			вузол, від якого йде з'єднання	значення вагового коефіцієнта
2	3	-3,8820	нейрон (1,1)	-2,0637
			нейрон (1,2)	-1,0753
			нейрон (1,3)	2,4708
			нейрон (1,4)	1,8698
			нейрон (1,5)	4,9156
			нейрон (1,6)	3,5897
			нейрон (1,7)	3,6233
2	4	-0,8951	нейрон (1,1)	-0,0594
			нейрон (1,2)	2,9819
			нейрон (1,3)	-2,3583
			нейрон (1,4)	-0,8607
			нейрон (1,5)	5,0139
			нейрон (1,6)	-1,5493
			нейрон (1,7)	-1,7566
3	1	-7,4784	нейрон (2,1)	2,9078
			нейрон (2,2)	0,4004
			нейрон (2,3)	5,0228
			нейрон (2,4)	5,3002

### 3.2 Експериментальне дослідження запропонованої моделі

Для проведення експериментів було розроблено програмне забезпечення, що реалізовує запропоновану нейромережеву модель, що приймає як вхідні дані вищезгадані характеристики ізоляції трансформаторів, а в якості вихідної характеристики що прогнозує вірогідність безвідмовної роботи виробів.

Для перевірки ефективності запропонованої моделі була

сформована тестова вибірка, до якої увійшли трансформатори, не представлені в навчальній вибірці. Розмір тестової вибірки склав 638 вимірювань стану ізоляції трансформаторів струму.

Фрагмент результатів експериментів на тестовій вибірці показаний в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Фрагмент результатів експериментів

$S(Y)$ , передбачене	$S(Y)$ , розраховане за допомогою моделі (3.1)
0.6661	0.6683
0.6674	0.6632
0.6568	0.6593
0.6528	0.6534
0.6466	0.6600
0.6483	0.6473
0.6567	0.6516
0.6664	0.6547
0.6739	0.6702
0.6738	0.6723
0.6871	0.6763
0.6851	0.6876
0.6841	0.6852
0.6920	0.6881
...	...
0.2679	0.2700

Помилка прогнозування за допомогою запропонованої моделі приведена в табл. 3.4, де показана ефективність моделі на навчальній і тестовій вибірках за критерієм  $mse$ . Чим менше  $mse$ , тим менше помилка прогнозування.

Таблиця 3.4 - Помилка прогнозування

Тип вибірки трансформаторів	Значення $mse$
Навчальна	$9.88 * 10^{-5}$
Тестова	$43.81 * 10^{-5}$

Як видно з табл. 3.3 і 3.4, запропонована нейромережева модель забезпечує прийнятну помилку прогнозування, яка на тестовій вибірці збільшилася в порівнянні з навчальною вибіркою в 4,43 рази, однак, як і раніше збереглася на прийнятному рівні.

Таким чином, результати експериментів показали, що побудована нейромережева модель уточнює базову модель (3.1) шляхом обліку інтенсивності часткових розрядів і дозволяє забезпечити прийнятний рівень помилки прогнозування.

### 3.3 Висновки до розділу

У розділі вирішено актуальне завдання прогнозування ймовірності безвідмовної роботи паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму.

Наукова новизна полягає в тому, що запропонована нейромережева модель, яка враховує крім тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції, відхилення ємності основної ізоляції, температури і вологості повітря навколишнього середовища, також і інтенсивність часткових розрядів і уточнює математичну модель (3.1), при цьому запропонована модель не використовує розподіл Вейбулла.

Практична цінність полягає в тому, що запропонована модель, яка приймає вхідні дані значення вказаних характеристик ізоляції вимірювальних трансформаторів струму, дозволяє з прийнятною помилкою виконувати прогнозування ймовірності безвідмовної роботи трансформаторів струму шляхом підстановки в неї вимірних значень інтенсивності часткових розрядів, тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції, відхилення ємності основної ізоляції від паспортного значення, температури і вологості повітря навколишнього середовища.

## ГЛАВА 4

### РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТУВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

Для виявлення тенденцій до несправностей, що виникають в електричних апаратах, і їх своєчасного усунення широко застосовується метод математичного моделювання [17, 53]. У модель підставляються вхідні характеристики, а на виході отримуємо результат в діапазоні від нуля до одиниці, що свідчить про ймовірність безвідмовної роботи. Зокрема, математичні моделі успішно використовуються для діагностування стану ізоляції трансформаторів струму. Застосування таких моделей істотно подовжує термін служби виробів, тому що дозволяє превентивно вивести виріб в резерв для здійснення ремонту.

Робота з такими математичними моделями на практиці ускладнена обмеженнями їх програмної імплементації, наприклад, специфікою конкретної мови програмування, застосованої для реалізації тієї чи іншої моделі. Крім того, реалізація математичної моделі на конкретній мові накладає обмеження на апаратну платформу, на якій вона буде виконуватися. Тому актуально і важливо розробити інформаційні моделі діагностування і прогнозування стану ізоляції трансформаторів струму з застосуванням апарату UML-моделювання, що дозволить реалізувати ці моделі на будь-якій мові програмування під будь-яку апаратну і програмну платформу.

Метою даної глави є підвищення ефективності діагностування та прогнозування стану основної ізоляції трансформаторів струму із застосуванням сучасних програмних засобів.

Розглянемо математичні моделі діагностування і прогнозування стану ізоляції трансформаторів струму, запропоновані в главах 2 і 3. В другому розділі знайдена нелінійна залежність між параметрами основної ізоляції: тангенсом кута діелектричних втрат основної ізоляції під робочою напругою, відхиленням ємності основної ізоляції від

паспортного значення, вологістю і температурою повітря навколишнього середовища. Модель дозволяє діагностувати стан ізоляції трансформатора струму (Y), який може бути строго «0», що означає високу ймовірність відмови або строго «1», що свідчить про високу ймовірність безвідмовної роботи:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{NN} = \Psi(3,1) = \left( 1 + e^{-(-547979-77239\Psi(2,1)+659629\Psi(2,2))} \right)^{-1}; \\ \Psi(2,1) = \left( 1 + e^{-(-1,1458,493\Psi(1,1)-529631\Psi(1,2)+9,555\Psi(1,3)-8,287\Psi(1,4))} \right)^{-1}; \\ \Psi(2,2) = \left( 1 + e^{-(-1,09569829\Psi(1,1)+11735\Psi(1,2)-69994\Psi(1,3)+69967\Psi(1,4))} \right)^{-1}; \\ \Psi(1,1) = \left( 1 + e^{-(-3016+1,76\alpha_1-9914\alpha_2+7,413\alpha_3+1370\alpha_4)} \right)^{-1}; \\ \Psi(1,2) = \left( 1 + e^{-(-36203-7,8\alpha_1+0,66\alpha_2+0,85\alpha_3+3967\alpha_4)} \right)^{-1}; \\ \Psi(1,3) = \left( 1 + e^{-(-168607-5940\alpha_1-22737\alpha_2-8114\alpha_3-1099\alpha_4)} \right)^{-1}; \\ \Psi(1,4) = \left( 1 + e^{-(-301944-605\alpha_1+44165\alpha_2-1549\alpha_3-3535\alpha_4)} \right)^{-1}. \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Третя глава присвячена прогнозуванню стану ізоляції трансформаторів струму. Вона пов'язує в нелінійну залежність тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції під робочою напругою, відхилення ємності основної ізоляції від паспортного значення, вологість і температуру повітря навколишнього середовища, інтенсивність часткових розрядів. Ця модель дозволяє спрогнозувати стан ізоляції трансформатора струму в діапазоні від «0», що означає достовірну відмову, до «1», що достовірно свідчить про безвідмовну роботу:

$$\begin{cases}
Y_{NN} = \Psi_{(3,1)} = \left(1 + e^{-(-7,47842,9078\Psi_{(2,1)} + 0,404\Psi_{(2,2)} + 5,022\Psi_{(2,3)} + 5,300\Psi_{(2,4)})}\right)^{-1}; \\
\Psi_{(2,1)} = \left(1 + e^{-(-6,13592,5979\Psi_{(1,1)} + 2,7649\Psi_{(1,2)} - 3,3634\Psi_{(1,3)} + 4,732\Psi_{(1,4)} + 0,264\Psi_{(1,5)} - 0,1888\Psi_{(1,6)} - 5,3388\Psi_{(1,7)})}\right)^{-1}; \\
\Psi_{(2,2)} = \left(1 + e^{-(-1,046\Psi_{(1,1)} + 4,4856\Psi_{(1,2)} + 2,714\Psi_{(1,3)} - 2,665\Psi_{(1,4)} + 2,8964\Psi_{(1,5)} - 1,2898\Psi_{(1,6)} + 1,728\Psi_{(1,7)})}\right)^{-1}; \\
\Psi_{(2,3)} = \left(1 + e^{-(-3,882 - 2,063\Psi_{(1,1)} - 1,075\Psi_{(1,2)} + 2,4708\Psi_{(1,3)} + 1,8698\Psi_{(1,4)} + 4,9156\Psi_{(1,5)} + 3,589\Psi_{(1,6)} + 3,623\Psi_{(1,7)})}\right)^{-1}; \\
\Psi_{(2,4)} = \left(1 + e^{-(-0,895 + 0,0594\Psi_{(1,1)} + 2,9819\Psi_{(1,2)} - 2,358\Psi_{(1,3)} - 0,860\Psi_{(1,4)} + 5,013\Psi_{(1,5)} - 1,549\Psi_{(1,6)} - 1,7566\Psi_{(1,7)})}\right)^{-1}; \\
\Psi_{(1,1)} = \left(1 + e^{-(-10,3266 + 0,6509\Psi_1 - 0,643\Psi_2 + 2,035\Psi_3 + 1,721\Psi_4 + 7,036\Psi_5)}\right)^{-1}; \\
\Psi_{(1,2)} = \left(1 + e^{-(-1,4743 + 1,894\Psi_1 + 7,194\Psi_2 - 3,297\Psi_3 - 0,546\Psi_4 + 4,783\Psi_5)}\right)^{-1}; \\
\Psi_{(1,3)} = \left(1 + e^{-(-0,6412 - 5,915\Psi_1 + 3,131\Psi_2 - 2,442\Psi_3 + 3,587\Psi_4 + 6,261\Psi_5)}\right)^{-1}; \\
\Psi_{(1,4)} = \left(1 + e^{-(-5,3739 + 1,214\Psi_1 - 4,679\Psi_2 - 4,976\Psi_3 - 1,510\Psi_4 + 0,431\Psi_5)}\right)^{-1}; \\
\Psi_{(1,5)} = \left(1 + e^{-(-1,3765 + 6,358\Psi_1 - 10,965\Psi_2 - 1,736\Psi_3 - 5,815\Psi_4 - 3,692\Psi_5)}\right)^{-1}; \\
\Psi_{(1,6)} = \left(1 + e^{-(-2,6918 + 0,868\Psi_1 + 6,487\Psi_2 - 4,763\Psi_3 - 2,406\Psi_4 - 1,622\Psi_5)}\right)^{-1}; \\
\Psi_{(1,7)} = \left(1 + e^{-(-1,5774 + 1,464\Psi_1 - 4,364\Psi_2 + 0,658\Psi_3 + 8,572\Psi_4 + 0,805\Psi_5)}\right)^{-1}.
\end{cases}
\tag{4.2}$$

Для практичного застосування нейромережових моделей (4.1) і (4.2) діагностування і прогнозування стану основної ізоляції трансформаторів струму необхідна їх програмна реалізація. Однак, вибір будь-якої окремо узятій мови програмування накладає певні обмеження на таку реалізацію. Тому в даній главі ставиться завдання розробити інформаційні UML-моделі, що дозволяють на концептуальному рівні описати варіанти використання, класи, діяльність, стани і послідовність взаємодії компонентів, в результаті чого можна буде програмно реалізувати моделі (4.1) і (4.2) без прив'язки до конкретної мови програмування і без обмежень в апаратній платформі.

## 4.1 Розробка UML-моделей

Діаграма варіантів використання (рис.4.1) дозволяє обмежити коло завдань, що вирішуються за допомогою реалізованих моделей. Користувач повинен мати можливість взаємодіяти з інтерфейсом моделей: вводити основні параметри ізоляції і отримувати висновок про ймовірність безвідмовної роботи, якщо мова йде про моделі (4.1), або прогноз по такій ймовірності (4.2). При цьому до розрахунків за формулами (4.1) і (4.2) повинна виконуватися перевірка коректності введених параметрів.

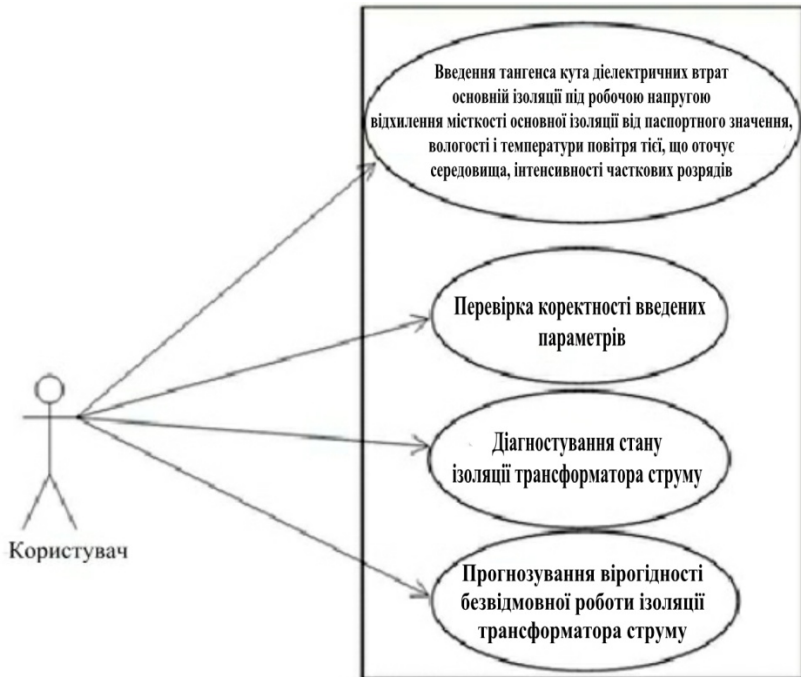


Рисунок 4.1 - Діаграма варіантів використання моделей (4.1) і (4.2)

Діаграма класів описує об'єкти, необхідні для програмної реалізації математичних моделей незалежно від конкретної мови програмування. Основними класами для розглянутих моделей є "Insulation", що описує параметри ізоляції, «Diagnostics», що містить метод діагностування або прогнозування стану ізоляції, і «View», що описує графічний інтерфейс користувача (рис. 4.2).

Клас «Diagnostics» агрегує екземпляр класу «Insulation», тому що використовує параметри ізоляції в методі діагностування. Метод «returnState» виконує діагностування або прогнозування ймовірності безвідмовної роботи ізоляції трансформатора струму за формулами (4.1) або (4.2).

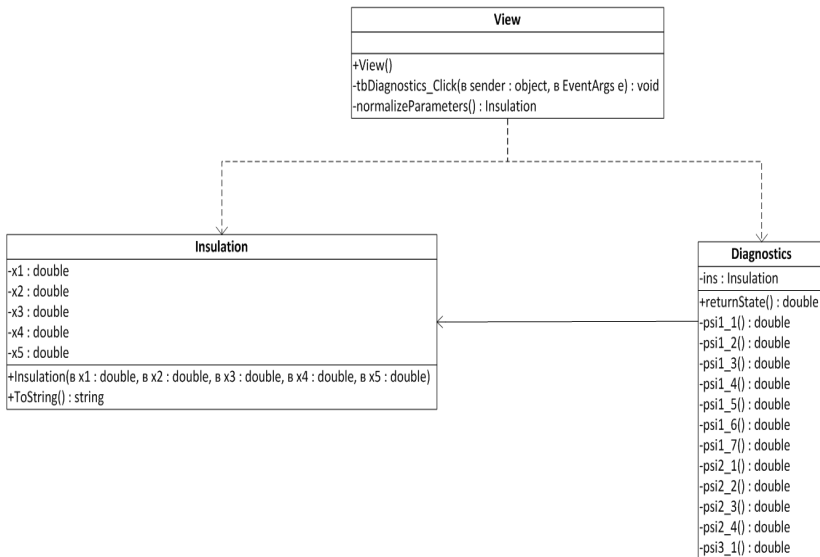


Рисунок 4.2 - Діаграма класів, необхідних для реалізації розглянутих моделей

Діаграма діяльності дозволяє описати на концептуальному рівні алгоритм діяльності реалізації розглянутих моделей (рис.4.3). Після введення параметрів ізоляції в інтерфейс програми, необхідно виконати їх нормування за шкалою від нуля

до одиниці, оскільки моделі (4.1) і (4.2) враховують вже нормовані параметри. Далі виконується передача параметрів в модель, при цьому виконується ініціалізація об'єктів класів «Insulation» і «Diagnostics» (див. рис. 4.2). Потім за допомогою методів класу «Diagnostics» здійснюється розрахунок кожного шару моделі за допомогою функції активації і вагових коефіцієнтів за формулами (4.1) і (4.2). Далі формується прогноз щодо ймовірності безвідмовної роботи ізоляції трансформатора струму. Висновок в інтерфейс здійснюється за допомогою методів класу «View».



Рисунок 4.3. - - Діаграма діяльності реалізації розглянутих моделей

Діаграма станів дозволяє описати стани, в яких може перебувати програма в процесі імплементації моделі (рис. 4.4). У стані «Створення графічного інтерфейсу» програма викликає конструктор класу «View» (див. рис. 4.2), який будує інтерфейс системи. Потім виконується очікування введення параметрів ізоляції. Якщо параметри знаходяться в робочому діапазоні, за яким були побудовані моделі (4.1) і (4.2), програма нормує параметри в конструкторі класу «Insulation» і переходить до розрахунку першого шару моделі: створюється об'єкт класу «Diagnostics», в якому викликаються відповідні методи. При коректному розрахунку першого шару, виконується розрахунок другого, а потім і третього шарів. Після формування результату перевіряється його коректність (приналежність діапазону ймовірності від нуля до одиниці) і за допомогою об'єкта класу «View», програма переходить в стан відображення результатів прогнозування на дисплей.



Рисунок 4.4 - Діаграма станів розглянутих моделей

Діаграма послідовності описує послідовність взаємодії компонентів програми, що реалізує розглянуті моделі (рис. 4.5). Клас «View» ініціалізує роботу програми. Після введення

параметрів і їх нормування, створюється екземпляр класу «Insulation», в конструктор якого передаються нормовані параметри. Примірник «Insulation» передається в клас «Diagnostics», в якому виконується основний розрахунок моделей (4.1) і (4.2) на вимогу, що приходить від класу «View». Результат повертається в клас «View» для відображення на екран.

На діаграмі хрестики означають завершення життєвого циклу об'єкта відповідного класу. При цьому екземпляр класу «View» не знищується до тих пір, поки програма існує в пам'яті, що дозволяє користувачеві за один сеанс роботи виконати неодноразове прогнозування стану ізоляції трансформатора струму з різними вхідними параметрами.

Події в моделі відбуваються синхронно, тобто, поки не повернуто управління з методу одного класу, метод іншого класу не може отримати управління. Наприклад, неможливо розрахувати другий шар моделі, поки не отримані значення всіх функцій активації з першого шару.

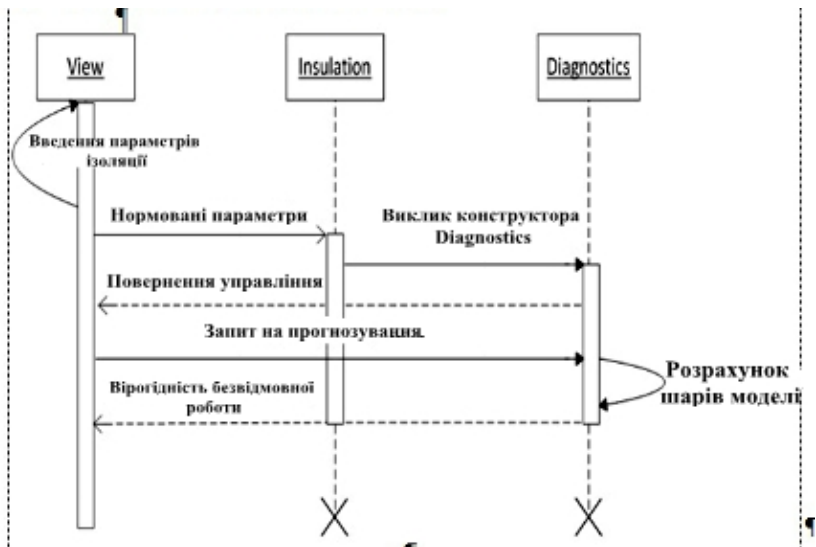


Рисунок 4.5 - Діаграма послідовності взаємодії компонентів моделей

## 4.2 Програмна реалізація запропонованих моделей

Для програмної реалізації запропонованих моделей використана мова C#. Для обох моделей реалізація складається з трьох класів:

«Insulation» - описує параметри ізоляції трансформатора струму,

«Diagnostics» - містить методи діагностування або прогнозування стану ізоляції за формулами (4.1) і (4.2),

«View» - обробляє інтерфейс взаємодії з користувачем.

Програмний код класу «Insulation» для моделі діагностування стану ізоляції трансформатора струму наведений у лістингу 4.1.

Лістинг 4.1 - Програмний код класу «Insulation» для моделі (4.1)

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace Article_1App
{
    class Insulation
    {
        private double x1;
        private double x2;
        private double x3;
        private double x4;
        public Insulation() { }
        public Insulation(double x1, double x2,
double x3, double x4)
        {
            this.x1 = x1;
            this.x2 = x2;
            this.x3 = x3;
```

### Продовження лістингу 4.1

```
        this.x4 = x4;
    public Insulation() { }
    public Insulation(double x1, double x2,
double x3, double x4)
    {
        this.x1 = x1;
        this.x2 = x2;
        this.x3 = x3;
        this.x4 = x4;
    }
    public double X1
    {
        get { return x1; }
        set { x1 = value; }
    }
    public double X2
    {
        get { return x2; }
        set { x2 = value; }
    }
    public double X3
    {
        get { return x3; }
        set { x3 = value; }
    }
    public double X4
    {
        get { return x4; }
        set { x4 = value; }
    }
    public override string ToString()
    {
        return String.Format("x1: {0}, x2:
{1}, x3: {2}, x4: {3}", x1, x2, x3, x4);
    }
}
}
```

Програмний код класу «Insulation» для моделі прогнозування стану трансформатора струму наведений у лістингу 4.2

Лістинг 4.2 - Програмний код класу "Insulation" для моделі (4.2)

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace Article_2App
{
    class Insulation
    {
        private double x1;
        private double x2;
        private double x3;
        private double x4;
        private double x5;
        public Insulation() { }
        public Insulation(double x1, double x2,
double x3, double x4, double x5)
        {
            this.x1 = x1;
            this.x2 = x2;
            this.x3 = x3;
            this.x4 = x4;
            this.x5 = x5;
        }
        public double X1
        {
            get { return x1; }
            set { x1 = value; }
        }
        public double X2
```

## Продовження лістингу 4.2

```
{
    get { return x2; }
    set { x2 = value; }
}
public double X3
{
    get { return x3; }
    set { x3 = value; }
}

public double X4
{
    get { return x4; }
    set { x4 = value; }
}
public double X5
{
    get { return x5; }
    set { x5 = value; }
}
public override string ToString()
{
    return String.Format("x1: {0}, x2:
{1}, x3: {2}, x4: {3}, x5: {4}", x1, x2, x3,
x4, x5);
}
}
```

Програмний код класу «Diagnostics» для моделі діагностування стану ізоляції трансформатора струму наведений у лістингу 4.3.

Лістинг 4.3 - Програмний код класу «Diagnostics» для моделі (4.1)

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace Article_1App
{
    class Diagnostics
    {
        private Insulation ins;
        public Diagnostics(Insulation ins)
        {
            this.ins = ins;
        }
        public int returnState()
        {
            double temp = psi3_1();
            if (temp >= 0.5)
                temp = 1;
            else
                temp = 0;
            return (int)temp;
        }
        //первый слой
        private double psi1_1()
        {
            return 1 / (1 + Math.Exp(-(30.161 -
1.76 * ins.X1 - 99.142 * ins.X2 + 7.413 *
ins.X3 + 13.707 * ins.X4)));
        }
        private double psi1_2()
        {
```

### Продовження лістингу 4.3

```
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(36.203 +
7.8 * ins.X1 + 0.667 * ins.X2 + 0.852 * ins.X3
+ 39.674 * ins.X4)));
    }
    private double psi1_3()
    {
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(168.607
+ 59.402 * ins.X1 - 227.367 * ins.X2 - 81.146 *
ins.X3 - 10.997 * ins.X4)));
    }
    private double psi1_4()
    {
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(30.194 -
46.056 * ins.X1 + 44.165 * ins.X2 - 15.499 *
ins.X3 - 35.356 * ins.X4)));
    }
    //второй слой
    private double psi2_1()
    {
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(-1.145 -
8.493 * psi1_1() - 529.631 * psi1_2() + 9.555 *
psi1_3() - 8.287 * psi1_4())));
    }
    private double psi2_2()
    {
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(1.095 +
69.829 * psi1_1() + 11.735 * psi1_2() - 69.994
* psi1_3() + 69.967 * psi1_4())));
    }
    //третий слой
    private double psi3_1()
    {
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(-547.979
+ 772.39 * psi2_1() + 659.629 * psi2_2())));
    }
}
}
```

Програмний код класу «Diagnostics» для моделі прогнозування стану ізоляції трансформатора струму наведений у лістингу 4.4.

Лістинг 4.4 - Програмний код класу «Diagnostics» для моделі (4.2)

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace Article_2App
{
    class Diagnostics
    {
        private Insulation ins;
        public Diagnostics(Insulation ins)
        {
            this.ins = ins;
        }
        public double returnState()
        {
            double temp = psi3_1();
            return temp = Math.Round(temp, 3);
        }
        //первый слой
        private double psi1_1()
        {
            return 1 / (1 + Math.Exp(-(10.3266
+ 0.6509 * ins.X1 - 0.6431 * ins.X2 + 2.0358 *
ins.X3 + 1.7211 *
            ins.X4 + 7.0363 * ins.X5)));
        }
        private double psi1_2()
        {
```

#### Продовження лістингу 4.4

```
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(1.4743 +
1.8947 * ins.X1 + 7.1942 * ins.X2 - 3.2972 *
ins.X3 - 0.5464 *
        ins.X4 + 4.7834 * ins.X5)));
    }
    private double psi1_3()
    {
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(0.6412 -
5.9152 * ins.X1 + 3.1312 * ins.X2 - 2.4422 *
ins.X3 + 3.5875 *
        ins.X4 + 6.2612 * ins.X5)));
    }
    private double psi1_4()
    {
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(5.3739 -
1.2143 * ins.X1 - 4.6796 * ins.X2 - 4.9762 *
ins.X3 - 11.5101 *
        ins.X4 + 0.4317 * ins.X5)));
    }
    private double psi1_5()
    {
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(1.3765 -
6.3586 * ins.X1 - 10.9655 * ins.X2 - 1.7367 *
ins.X3 - 5.8159 *
        ins.X4 - 3.6925 * ins.X5)));
    }
    private double psi1_6()
    {
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(-2.6918
- 0.8681 * ins.X1 + 6.4870 * ins.X2 - 4.7637 *
ins.X3 - 2.4065 *
        ins.X4 - 1.6228 * ins.X5)));
    }
    private double psi1_7()
    {
```

#### Продовження лістингу 4.4

```
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(1.5774 +
1.4648 * ins.X1 - 4.3641 * ins.X2 + 0.6580 *
ins.X3 + 8.5722 *
    ins.X4 + 0.8051 * ins.X5)));
    }
    //второй слой
    private double psi2_1()
    {
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(6.1359 -
2.5979 * psi1_1() + 2.7649 * psi1_2() - 3.3634
* psi1_3() + 4.7321 * psi1_4() + 0.2641 *
psi1_5() - 0.1888 * psi1_6() - 5.3388 *
psi1_7())));
    }
    private double psi2_2()
    {
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(1.0461 -
1.7837 * psi1_1() + 4.4856 * psi1_2() + 2.7141
* psi1_3() - 2.6650 * psi1_4() + 2.8964 *
psi1_5() - 1.2898 * psi1_6() + 1.7281 *
psi1_7())));
    }
    private double psi2_3()
    {
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(-3.882 -
2.0637 * psi1_1() - 1.0753 * psi1_2() + 2.4708
* psi1_3() + 1.8698 * psi1_4() + 4.9156 *
psi1_5() + 3.5897 * psi1_6() + 3.6233 *
psi1_7())));
    }
    private double psi2_4()
    {
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(-0.8951
- 0.0594 * psi1_1() + 2.9819 * psi1_2() -
2.3583 * psi1_3() - 0.8607 * psi1_4() + 5.0139
* psi1_5() - 1.5493 * psi1_6() - 1.7566 *
psi1_7())));
    }
```

#### Продовження лістингу 4.4

```
    }  
    //третий слой  
    private double psi3_1()  
    {  
        return 1 / (1 + Math.Exp(-(-7.4784  
+ 2.9078 * psi2_1() + 0.404 * psi2_2() + 5.0228  
* psi2_3() + 5.3002 * psi2_4())));  
    }  
}  
}
```

Програмний код класу «View» для моделі діагностування стану ізоляції трансформатора струму наведений у лістингу 4.5.

#### Лістинг 4.5 - Програмний код класу «View» для моделі (4.1)

```
using System;  
using System.Collections.Generic;  
using System.ComponentModel;  
using System.Data;  
using System.Drawing;  
using System.Linq;  
using System.Text;  
using System.Threading.Tasks;  
using System.Windows.Forms;  
  
namespace Article_1App  
{  
    public partial class View : Form  
    {  
        public View()  
        {  
            InitializeComponent();  
            tbX1.Text = "0,5364";  
            tbX2.Text = "0,5681";  
            tbX3.Text = "13";  
            tbX4.Text = "41,2";  
        }  
    }  
}
```

## Продовження лістингу 4.5

```
private void tbDiagnostics_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (String.IsNullOrEmpty(tbX1.Text)
|| String.IsNullOrEmpty(tbX2.Text) ||
String.IsNullOrEmpty(tbX3.Text) ||
String.IsNullOrEmpty(tbX4.Text))
    MessageBox.Show("Одно из полей не
заполнено");
    else
    {
        Insulation ins =
normalizeParameters();
        if (ins != null)
        {
            Diagnostics d = new
Diagnostics(ins);
            tbStatus.Text =
d.returnState().ToString();
        }
    }
    private Insulation
normalizeParameters()
    {
        double x1 = 0, x2 = 0, x3 = 0, x4 =
0;
        try
        {
            x1 =
Convert.ToDouble(tbX1.Text);
            x2 =
Convert.ToDouble(tbX2.Text);
            x3 =
Convert.ToDouble(tbX3.Text);
```

### Продовження лістингу 4.5

```
        x4 =  
Convert.ToDouble(tbX4.Text);  
    }  
    catch (FormatException ex)  
    {  
        MessageBox.Show(ex.Message);  
        return null;  
    }  
    if ((x1 < 0.385056 || x1 >  
0.603455) || (x2 < 0 || x2 > 0.7678) || (x3 <  
13 || x3 > 100) || (x4 < 10.2 || x4 > 41.2))  
    {  
        MessageBox.Show("Один из параметров за  
пределами диапазона");  
        return null;  
    }  
    if (((x1 - 0.385056) / (0.603455 -  
0.385056)) >= 0.7 && (x2 / 0.7678) > 0.8)  
    {  
        tbStatus.Text = "0";  
        return null;  
    }  
    return new Insulation  
        ((x1 - 0.385056) / (0.603455 - 0.385056),  
        ( x2 / 0.7678), ((x3 - 13) / (100 - 13)),  
        ((x4 - 10.2) / (41.2 - 10.2)));  
    }  
}
```

Програмний код класу «View» для моделі прогнозування стану ізоляції трансформатора струму наведений у лістингу 4.6.

Лістинг 4.6 - Програмний код класу «View» для моделі (4.2)

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace Article_2App
{
    public partial class View : Form
    {
        public View()
        {
            InitializeComponent();
            tbX1.Text = "0,469";
            tbX2.Text = "0,09";
            tbX3.Text = "15,1";
            tbX4.Text = "10,0";
            tbX5.Text = "57,0";
        }

        private void bAccept_Click(object
sender, EventArgs e)
        {
            if (String.IsNullOrEmpty(tbX1.Text)
|| String.IsNullOrEmpty(tbX2.Text) ||
String.IsNullOrEmpty(tbX3.Text) ||
String.IsNullOrEmpty(tbX4.Text) ||
String.IsNullOrEmpty(tbX5.Text))
                MessageBox.Show("Одно из полей не
заполнено");
            else
            {
                Insulation ins =
```

### Продовження лістингу 4.6

```
normalizeParameters();
        if (ins != null)
        {
            Diagnostics d = new
Diagnostics(ins);
            tbStatus.Text =
d.returnState().ToString();
        }
    }
    private Insulation
normalizeParameters()
    {
        double x1 = 0, x2 = 0, x3 = 0, x4 =
0, x5 = 0;
        try
        {
            x1 =
Convert.ToDouble(tbX1.Text);
            x2 =
Convert.ToDouble(tbX2.Text);
            x3 =
Convert.ToDouble(tbX3.Text);
            x4 =
Convert.ToDouble(tbX4.Text);
            x5 =
Convert.ToDouble(tbX5.Text);
        }
        catch (FormatException ex)
        {
            MessageBox.Show(ex.Message);
            return null;
        }
        if ((x1 < 0.469 || x1 > 0.9) || (x2
< 0.09 || x2 > 3.2) || (x3 < 15.1 || x3 > 35.0)
|| (x4 < 10 || x4 > 67) || (x5 < 57) || x5 >
502)
```

#### Продовження лістингу 4.6

```
{
MessageBox.Show("Один из параметров за
пределами диапазона");
    return null;
}
if (((x1 - 0.469) / (0.9 - 0.469)) >= 0.7 &&
((x2 - 0.09) / (3.2 - 0.09)) > 0.8)
{
    tbStatus.Text = "0";
    return null;
}
return new Insulation
((x1 - 0.469) / (0.9 - 0.469),
((x2 - 0.09) / (3.2 - 0.09)),
((x3 - 15.1) / (35.0 - 15.1)),
((x4 - 10) / (67 - 10)),
((x5 - 57) / (502-57)));
}
}
```

#### 4.3 Експериментальна перевірка запропонованих моделей і програмної реалізації

Для виконання експериментального дослідження розробленого програмного забезпечення використана комп'ютерна система Національного університету «Запорізька політехніка»:

- Процесори Intel E 3200,
- оперативна пам'ять 1 Гб DDR -2 на кожен вузол,
- комунікаційне середовище Gigabit Ethernet 1 Гб / с.

Головне вікно програми, що реалізує модель діагностування основної ізоляції трансформаторів струму на основі моделі (4.1), наведено на рис. 4.6.

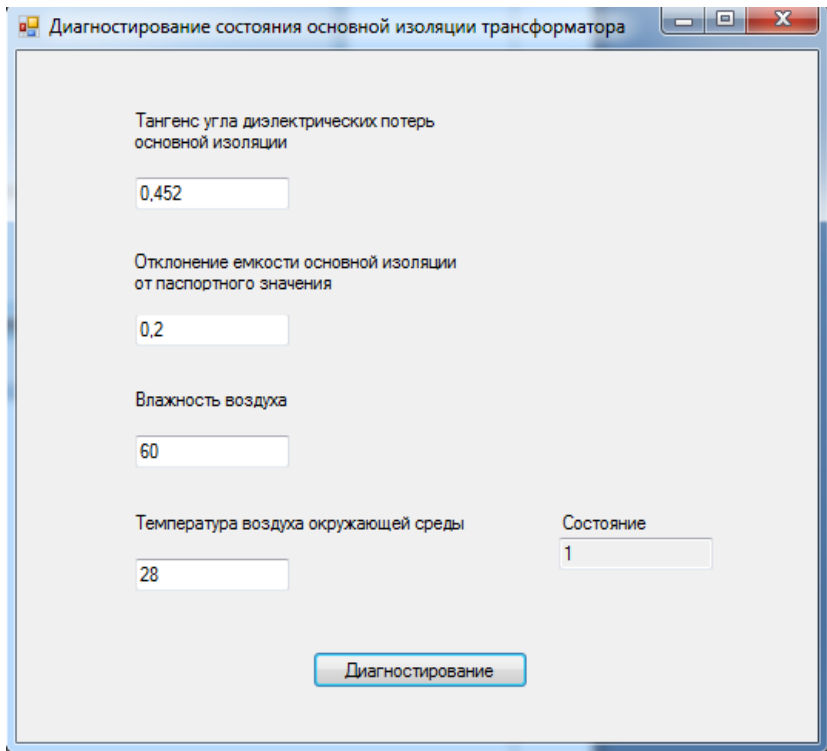


Рисунок 4.6 - Додаток для діагностування основної ізоляції трансформатора струму на основі моделі (4.1)

Аналогічним чином була реалізована модель (4.2) прогнозування стану ізоляції трансформатора струму. Інтерфейс програми показаний на рис. 4.7.

Прогнозирование вероятности безотказной работы трансформаторов

Тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции  
0,469

Отклонение емкости основной изоляции от паспортного значения  
0,09

Температура воздуха окружающей среды  
15,1

Влажность воздуха  
10,0

Состояние  
0,994

Интенсивность частичных разрядов  
57,0

Прогнозирование

Рисунок 4.7 - Додаток для прогнозування стану основної ізоляції трансформатора струму на основі моделі (4.2)

Для експериментального дослідження запропонованих моделей і перевірки розробленого програмного забезпечення були сформовані дві тестові вибірки:

- перша складалася з результатів ста тридцяти шести експериментів, в яких були виміряні тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції під робочою напругою, відхилення ємності основної ізоляції від паспортного значення, вологість і температура повітря навколишнього середовища. Вона

призначена для перевірки моделі (4.1) діагностування стану ізоляції, яку доцільно застосовувати, коли немає можливості виміряти інтенсивність часткових розрядів;

- друга складалася із результатів тридцяти дев'яти експериментів, в яких крім зазначених у першій вибірці параметрів так само була виміряна інтенсивність часткових розрядів. Вона призначена для дослідження моделі (4.2) прогнозування стану ізоляції.

Вибірки включали екземпляри ізоляції трансформаторів струму, що не входять в навчальну для моделей (4.1) і (4.2) вибірку. Так було забезпечено діагностування і прогнозування стану ізоляції, а не просто розпізнавання за навчальною вибіркою.

У розроблене програмне забезпечення були введені характеристики ізоляції трансформатора струму. В результаті в режимі діагностування були отримані значення «0» або «1», які слід трактувати як ймовірна відмова або ймовірна безвідмовна робота трансформатора. Результати експериментального дослідження моделі 4.1 наведені в таблиці 4.1:

де  $T$  – температура повітря навколишнього середовища;

$H$  - вологість повітря;

$\text{tg}\delta$  - тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції, приведений до 20 градусів;

$dC$  - зміна ємності основної ізоляції від паспортного значення;

Фактичний стан ізоляції - працездатна 1 або вийшла з ладу 0;

Розрахований стан ізоляції – 0 або 1 розраховані за допомогою моделі 4.1.

Жирним шрифтом в таблиці виділені екземпляри, в яких модель показала вихід ізоляції з ладу.

Таблиця 4.1 - Результати експериментального дослідження моделі 4.1

№ за /п	T, грд. С	H, %	tgδ, до 20 грд. С	dC, %	Фактичний стан ізоляції	Розрахований стан ізоляції
1	23,2	31	0,26298	0,113178	1	1
2	22	38	0,2625	0,083515	1	1
3	21,1	44	0,26224	0,087459	1	1
4	19,4	48	0,26186	0,08652	1	1
5	18,6	48	0,26161	0,061685	1	1
6	17,5	51	0,26149	0,143648	1	1
7	17,1	52	0,26144	0,201242	1	1
8	17,7	48	0,26164	0,043982	1	1
9	18,9	45	0,262	0,024501	1	1
10	20,7	40	0,26247	0,03625	1	1
11	22,3	37	0,26313	0,077713	1	1
12	23,7	35	0,26392	0,114655	1	1
13	25,1	33	0,26466	0,176768	1	1
14	26	31	0,26594	0,232274	1	1
15	26,9	30	0,26685	0,270009	1	1
16	29	29	0,26765	0,01214	1	1
17	28,6	25	0,26836	0,215424	1	1
18	29,7	27	0,26832	0,17429	1	1
19	31,3	25	0,26912	0,158253	1	1
20	29,8	27	0,26673	0,212302	1	0
<b>21</b>	<b>27,1</b>	<b>46</b>	<b>0,5301</b>	<b>0,29002</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
22	21,4	48	0,262335	0,134254	1	1
23	21,1	50	0,262302	0,166066	1	1
24	21,1	49	0,262346	0,082924	1	1
25	20,9	46	0,262302	0,061272	1	1
26	20,8	47	0,262209	0,056517	1	1
27	20,2	53	0,262122	0,015481	1	1
28	20	54	0,262169	0,075129	1	1
29	20,2	53	0,262219	0,091242	1	1

Продовження таблиці 4.1						
№ за /п	Т, грд. С	Н, %	tgδ, до 20 грд. С	dC, %	Фактичний стан ізоляції	Розрахований стан ізоляції
30	20,7	50	0,262438	0,04269	1	1
31	21,4	50	0,263279	0,075723	1	1
32	24,7	35	0,264861	0,139733	1	1
33	26,3	31	0,266088	0,129423	1	1
34	28	27	0,267305	0,038041	1	1
35	29	23	0,268976	0,131471	1	1
36	29,2	20	0,268832	0,02694	1	1
37	30,3	20	0,271201	0,127017	1	1
38	31,4	20	0,271815	0,06115	1	1
39	30,7	21	0,270445	0,138252	1	1
40	32	19	0,272562	0,130235	1	1
41	29,5	26	0,267305	0,053746	1	1
42	27	29	0,265264	0,130449	1	1
43	25,3	32	0,264019	0,163557	1	1
44	24	35	0,263561	0,041795	1	1
45	23,4	37	0,263186	0,010875	1	1
46	22	41	0,262757	0,102018	1	1
47	22,1	41	0,262685	0,038328	1	1
48	21,9	43	0,262537	0,080152	1	1
49	21,3	52	0,262357	0,020184	1	1
50	20,8	56	0,262229	0,155186	1	1
51	20,1	56	0,262031	0,188062	1	1
52	20,1	52	0,262302	0,078313	1	1
53	20,6	49	0,262438	0,034715	1	1
54	23	47	0,263027	0,027219	1	1
55	23,1	43	0,263498	0,051085	1	1
56	25,6	35	0,265561	0,014978	1	1
57	27,4	29	0,267431	0,204024	1	1
58	28,4	23	0,26791	0,029944	1	1
59	29,8	22	0,269872	0,164341	1	1

Продовження таблиці 4.1

№ за /п	T, грд.С	H, %	tgδ, до 20 грд. С	dC, %	Фактичний стан ізоляції	Розрахований стан ізоляції
60	29,7	21	0,270131	0,240336	1	1
61	32	18	0,270712	0,337642	1	1
<b>62</b>	<b>36</b>	<b>20</b>	<b>0,48012</b>	<b>0,37102</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
63	19,5	53	0,26204	0,12354	1	1
64	19,9	53	0,262324	0,07532	1	1
65	21,5	49	0,262629	0,076018	1	1
66	23,4	45	0,264143	0,171162	1	1
67	25,8	40	0,265908	0,109231	1	1
68	28,2	33	0,267389	0,035371	1	1
69	29,1	29	0,269518	0,129171	1	1
70	29,4	28	0,26827	0,177199	1	1
71	30,6	25	0,27159	0,066792	1	1
72	30,9	25	0,273331	0,152442	1	1
73	31,3	25	0,271256	0,051307	1	1
74	32,5	25	0,270551	0,146291	1	1
75	29,5	30	0,268134	0,143186	1	1
76	27,9	37	0,266462	0,13695	1	1
77	26,8	40	0,265264	0,102378	1	1
78	25,5	41	0,264378	0,204787	1	1
79	24,4	46	0,263478	0,171646	1	1
80	23,4	47	0,263096	0,098589	1	1
81	22,3	49	0,262602	0,085784	1	1
82	21,4	50	0,262346	0,070831	1	1
83	20,6	53	0,26216	0,005106	1	1
84	20	53	0,262031	0,078726	1	1
85	19,4	56	0,261906	0,003762	1	1
86	18,9	56	0,261971	0,030056	1	1
87	20,7	51	0,262313	0,047148	1	1
88	21,7	52	0,26301	0,050605	1	1
<b>89</b>	<b>24,4</b>	<b>45</b>	<b>0,564</b>	<b>0,282061</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
90	26,9	39	0,266655	0,109333	1	1
91	28,9	28	0,268976	0,018546	1	1
92	30,5	24	0,271146	0,068202	1	1

Продовження таблиці 4.1

№ за /п	T, грд. С	H, %	tgδ, до 20 грд. С	dC, %	Фактичний стан ізоляції	Розрахований стан ізоляції
93	30,7	23	0,271815	0,101052	1	1
94	31,2	21	0,270551	0,091124	1	1
95	32,1	20	0,271534	0,190833	1	1
96	31,9	20	0,272679	0,12009	1	1
97	31,2	20	0,270928	0,157371	1	1
98	30,7	22	0,270027	0,0902	1	1
99	29,6	22	0,267777	0,103021	1	1
100	27,9	26	0,266161	0,056749	1	1
101	26,3	28	0,264714	0,082448	1	1
102	24,9	31	0,263805	0,079165	1	1
103	23,6	33	0,263357	0,117218	1	1
104	23,3	32	0,263044	0,112476	1	1
105	22,4	33	0,262602	0,13467	1	1
106	21,1	43	0,262324	0,107111	1	1
107	20,7	49	0,26216	0,200288	1	1
108	20,1	52	0,261997	0,023281	1	1
109	19,5	53	0,262049	0,027935	1	1
110	20,6	49	0,262189	0,122945	1	1
111	22	46	0,263096	0,062683	1	1
112	24,3	39	0,264487	0,137598	1	1
<b>113</b>	<b>26,1</b>	<b>51</b>	<b>0,512</b>	<b>0,301</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
114	33,9	13	0,274679	0,142425	1	1
115	34,2	13	0,276013	0,124488	1	1
116	32,7	16	0,272914	0,068372	1	1
117	32,5	15	0,271146	0,111679	1	1
118	30,7	16	0,269073	0,124221	1	1
119	28,1	26	0,265168	0,140683	1	1
120	24,1	44	0,263186	0,157032	1	1
121	22,8	46	0,262802	0,094026	1	1
122	21,4	50	0,26227	0,030639	1	1

Продовження таблиці 4.1

№ за /п	T, грд. С	H, %	tgδ, до 20 грд. С	dC, %	Фактичний стан ізоляції	Розрахований стан ізоляції
123	20,1	52	0,262023	0,033052	1	1
124	19,2	54	0,261779	0,158346	1	1
125	18,3	58	0,261578	0,343394	1	1
126	17,4	59	0,261389	0,083664	1	1
127	16,9	62	0,261242	0,088733	1	1
128	16	65	0,261109	0,259754	1	1
129	16	65	0,261196	0,033663	1	1
130	16,5	63	0,261399	0,006262	1	1
131	17,2	60	0,261562	0,166288	1	1
132	18,5	57	0,261914	0,049858	1	1
133	20,6	51	0,262487	0,003055	1	1
134	22,4	44	0,263416	0,087383	1	1
135	24,4	39	0,264656	0,185418	1	1
136	26,3	35	0,265137	0,170915	1	1

Як видно з таблиці 4.1, в тестовій вибірці три екземпляри (№21, №62, №113) зі ста тридцяти шести вийшли з ладу, при цьому модель 4.1 успішно виявила їх. На примірнику № 89 зафіксовано помилкове спрацьовування моделі.

У режимі прогнозування модель 4.2 дає результат в діапазоні від «0» до «1». Результат можна трактувати як ймовірність безвідмовної роботи основної ізоляції трансформатора струму при заданих її характеристиках.

Результати експериментального дослідження моделі 4.2 наведені в таблиці 4.2, де Q - інтенсивність часткових розрядів.

Фактичний стан ізоляції - працездатна 1 або вийшла з ладу 0;  
Розрахований стан ізоляції - від 0 до 1 розраховані за допомогою моделі 4.2.

Жирним шрифтом в таблиці виділені екземпляри, в яких модель сигналізує про майбутній вихід ізоляції з ладу.

Таблиця 4.2 - Результати експериментального дослідження моделі 4.2

№ за/п	T, грд.С	H, %	tgδ, до 20 грд.С	dC, %	Q, пк	Фактичний стан ізоляції	Розрахований стан ізоляції
1	18	25	0,469	0,12	86	1	0,685
2	20	15	0,521	0,14	92	1	0,79
3	22	16	0,52	0,1	126	1	0,617
4	22	16	0,47	0,1	182	1	0,702
5	23	18	0,47	0,14	90	1	0,734
6	23	16	0,47	0,14	140	1	0,711
7	23	16	0,47	0,14	140	1	0,711
<b>8</b>	<b>23</b>	<b>19</b>	<b>0,54</b>	<b>0,31</b>	<b>192</b>	<b>1</b>	<b>0,212</b>
<b>9</b>	<b>23</b>	<b>19</b>	<b>0,55</b>	<b>0,332</b>	<b>202</b>	<b>0</b>	<b>0,207</b>
10	18	25	0,472	0,201	74	1	0,618
11	20	22	0,48	0,1	82	1	0,718
12	19	24	0,47	0,11	121	1	0,623
13	16	25	0,48	0,17	92	1	0,718
14	17	24	0,49	0,18	107	1	0,602
15	19	25	0,47	0,11	201	1	0,441
<b>16</b>	<b>19</b>	<b>25</b>	<b>0,48</b>	<b>0,19</b>	<b>258</b>	<b>1</b>	<b>0,308</b>
17	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>0,48</b>	<b>0,23</b>	<b>291</b>	<b>1</b>	<b>0,277</b>
<b>18</b>	<b>21</b>	<b>25</b>	<b>0,49</b>	<b>0,235</b>	<b>318</b>	<b>0</b>	<b>0,189</b>
19	23	20	0,48	0,1	69	1	0,68
20	23	21	0,49	0,1	91	1	0,575
21	18	20	0,48	0,14	83	1	0,838
22	20	18	0,521	0,14	72	1	0,84
23	16	22	0,49	0,16	102	1	0,747
24	17	23	0,47	0,16	132	1	0,683
25	19	28	0,47	0,09	58	1	0,498
26	20	16	0,495	0,09	201	1	0,651

Продовження таблиці 4.2

№ за/п	T, грд.С	H, %	tgδ, до 20 грд.С	dC, %	Q, пк	Фактичний стан ізоляції	Розрахований стан ізоляції
27	20	19	0,469	0,12	69	1	0,875
28	21	22	0,51	0,1	76	1	0,533
29	20	20	0,5	0,1	201	1	0,497
30	18	10	0,6	0,11	169	1	0,477
31	18	11	0,47	0,1	201	1	0,928
32	21	15	0,5	0,2	92	1	0,773
33	20	19	0,52	0,21	106	1	0,508
34	20	20	0,504	0,09	58	1	0,791
35	18	21	0,521	0,1	149	1	0,552
36	19	17	0,51	0,1	231	1	0,54
37	22	19	0,5	0,21	58	1	0,594
38	20	23	0,487	0,17	101	1	0,515
39	22	19	0,51	0,21	92	1	0,462

Як видно з таблиці 4.2, модель 4.2 дає можливість спрогнозувати майбутній вихід ізоляції з ладу до моменту її фактичного виходу з ладу. Таким чином, отримані результати свідчать про можливість застосування запропонованих інформаційних моделей та програмного забезпечення на практиці.

#### 4.4 Висновки до розділу

У розділі вирішено актуальне завдання розробки інформаційних UML-моделей, що дозволяють на концептуальному рівні описати варіанти використання, класи, діяльність, стани і послідовність взаємодії компонентів. Наукова новизна полягає в тому, що розроблені UML-моделі, що дозволяють програмно реалізувати моделі діагностування (4.1) і прогнозування (4.2) стану основної ізоляції трансформаторів

струму без прив'язки до конкретної мови програмування і без обмежень в апаратній платформі. Практична цінність: за допомогою запропонованих UML-моделей розроблено програмне забезпечення, що реалізує діагностування і прогнозування стану ізоляції трансформаторів струму.

## ВИСНОВКИ

Результати виконаного в монографії дослідження є новим рішенням науково практичної задачі підвищення якості діагностики та енергоефективності систем діагностування високовольтного обладнання шляхом розробки моделей і методів діагностування та прогнозування стану ізоляції вимірювальних трансформаторів струму.

Отримані наступні теоретичні і практичні результати:

1. Виконано аналіз існуючих методів діагностування ізоляції вимірювальних трансформаторів струму, виявлено їх основні недоліки, рішення яких поставило завдання дослідження.

2. Розроблена нейромережева модель діагностування стану ізоляції вимірювальних трансформаторів струму, яка дозволяє ефективно апроксимувати нелінійні залежності між тангенсом кута діелектричних втрат основної ізоляції під робочою напругою, відхиленням ємності основної ізоляції від паспортного значення, температурою і вологістю повітря навколишнього середовища. Модель дозволяє з великою ймовірністю адекватності ( $\approx 0,984$ ) робити висновок про можливість подальшої експлуатації трансформаторів.

3. Розроблений метод визначення залишкового ресурсу внутрішньої ізоляції вимірювальних трансформаторів струму на основі кластеризації трендів діагностичних ознак, який передбачає розбиття на класи початкової множини вимірюваних значень характеристик трансформаторів в залежності від часу до їх виходу з ладу, обчислення геометричних центрів кожного з класів. Це дозволяє визначати по набору вхідних параметрів стану трансформаторів, і, відповідно, виявляти на початкових стадіях виникнення несправностей.

4. Розроблена модель прогнозування на основі інтенсивності часткових розрядів ймовірності безвідмовної роботи паперово-масляної ізоляції вимірювальних трансформаторів струму, яка на відміну від базової математичної моделі, не використовує розподіл Вейбулла і дозволяє з прийнятною помилкою ( $43.81 \cdot 10^{-5}$ ) виконувати прогнозування ймовірності безвідмовної роботи трансформаторів струму.

5. Розроблені UML-моделі, що дозволяють на концептуальному рівні описати варіанти використання, класи, діяльність, стан і послідовність взаємодії компонентів систем діагностування та прогнозування стану основної ізоляції трансформаторів струму, що дозволяє реалізувати такі системи без прив'язки до конкретної мови програмування і без обмежень в апаратній платформі.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Yang Q. Model-based and data driven fault diagnosis methods with applications to process monitoring: thesis ... doctor of philosophy / Yang Qingsong. Cleveland: Case Western Reserve University, 2004. - 191 p.
2. Althoff K. Evaluating case-based reasoning systems: the INRECA case study: habilitationsschrift / Althoff Klaus-Dieter. - Kaiserslautern: University of Kaiserslautern, 1997. - 326 p.
3. Salfner F. A survey of online failure prediction methods / F. Salfner. M. Lenk, M. Malek // ACM computing surveys, 2010. - Vol. 42, Issue 3. - P. 1-42.
4. Venkatasubramanian V. A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods / V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, S. Kavuric // Computers and chemical engineering, 2003. - Vol.27, Issue 3. - P. 293-311.
5. Schwabacher MA A survey of data-driven prognostics / MA Schwabacher // Infotech @ Aerospace: conference, Arlington, P. 26-29
6. Автоматизовані системи. Терміни та визначення: ДСТУ 2226-93. К.: Держстандарт України, 1993. - 86 с. (Національний стандарт України).
7. September 2005: Додати proceedings. – Arlington : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005. – 5 p.
8. Шинкаренко Г. В. Технічні вимоги до систем безперервного контролю трансформаторів струму 330-750 кВ під робочою напругою: засідання електротехнічної секції науково технічної ради НЕК «Укренерго», 17-21 жовт. 2008 р. «Вимірювальні маслонаповнені трансформатори струму і напруги 110-750 кВ. Діагностика. Рекомендації щодо продовження ресурсу» / Г. В. Шинкаренко. - Вінниця, 2008. – 13 с.
9. Перевірка ізоляції трансформаторів струму 330 - 750 кВ під робочою напругою: СОУ-Н МПЕ 40.1.46.301-2006. - Офіц. вид. - К.: ГРІФРЕ: Міністерство палива та енергетики України, 2006. -

31 с. - (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Інструкція).

10. Інструкція № 19 - 07/03 по вимірюванню тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції трансформаторів струму 330 - 750 кВ під робочою напругою. - Затверджено голов. інж. Запорізьких магістральних електричних мереж 2003-10-10. - Запоріжжя: Зап. МЕС, 2003. - 15 с.

11. Van der Zel L. Condition Monitoring and Diagnostics of Bushings, Current Transformers, and Voltage Transformers by Oil Analysis / L. van der Zel, EPRI, and Palo Alto, CA, 2006. 1012343. - 37 p.

12. Issouf Fofana Power Transformer Diagnostics, Monitoring and Design Features / Fofana Issouf. - Energies, 2018. - 254 p.

13. Current Transformer Testing at NML - Volume 3 of National Measurement Laboratory technical paper: National Measurement Laboratory / P. J. Betts, H. A. Smith // Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia, 1976. - 22 p.

14. Черноготский В.М. Напряжение на первичных обмотках трансформаторов тока 330-750 кВ при высокочастотных перенапряжениях: Трансформаторостроение, 2009 : XIII! междунар. науч. техн. конф. (7—11.09 2009 г.). – Запоріжжя, 2009. – 6 с.

15. Pansini Anthony J. Electrical Transformers and Power Equipment / Pansini Anthony J. - Fairmont Press, 1999. - 394 p.

16. Kulkarni, S.V. Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics, Second Edition / Kulkarni, S.V., and Kharparde, S.A. - CRC Press, 2017. - 750 p.

17. 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 [и др.] // Електромеханічні и енергозберігаючі системи, 2009. - № 2. - С. 53-55.

18. Kind Dieter High Voltage Test Techniques / Dieter Kind, Kurt Feser. - Elsevier Science, 2001. - 320p.

19. 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.

20. Hauschild Wolfgang High-Voltage Test and Measuring Techniques / Hauschild Wolfgang and Lemke Eberhard. - Springer International Publishing, 2018 – 546 p.

21. Verma P. Condition Monitoring of Transformer Oil and Paper: a Thesis Submitted for the Award of the Degree of Doctor of Philosophy / Piush Verma. - Patiala, India, 2005. - 172 с.

22. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 — Офіц. вид., приказ Мінпаливенерго 2007-01-15 г. №13. — К. : ОЕП «ГРИФРЕ» : Міністерство палива та енергетики України, 2007. - 262 с. - (Нормативний документ Мінпаливенерго України).

23. Client Removes Bushing with Help from Doble IDD: Double Engineering Company Technical Paper. - Double EC, 2010. - 4 p.

24. Шинкаренко Г. В. Контроль опорных трансформаторов тока и вводов силовых трансформаторов под рабочим напряжением в энергосистемах Украины / Г. В. Шинкаренко // *Электрические станции*, 2001. - №5. - С. 55-62.

25. Banjevic D. Remaining useful life in condition based maintenance: Is it useful: Modelling in Industrial Maintenance and Reliability. Proceedings of MIMAR2007: the 6th IMA International Conference, (10-11 Sept. 2007) [Электронный ресурс] / D. Banjevic, AKS Jardine, - Manchester, United Kingdom, 2007. – 3 . 7-12 с.

26. IEEE Standard Techniques for High-voltage Testing. United States, IEEE, 1978. – 125 p.

27. Kuchler Andreas High Voltage Engineering: Fundamentals - Technology – Applications / Kuchler Andreas. - Springer Berlin Heidelberg, 2017. – 650 p.

28. Guyer, J. Paul An Introduction to Electrical Transformer Testing / Guyer, J. Paul. - Independently Published, 2019. - 38 p.

29. High-voltage Testing and Measuring Techniques On-site Including Condition Monitoring and Diagnostics: Application of Digital Techniques in High-voltage Testing. Finland, Helsinki University of Technology, High Voltage Institute, 1999. – 191 p.

30. Milano, B. High-voltage Testing Current Measurement Techniques. United States, Power and Instrumentation Branch, Division of Research, Engineering and Research Center / Milano, B. - U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1981 – 8 p.

31. Hong Y. Prediction of remaining life of power transformers based on left truncated and right censored lifetime data / Y.Hong, WQMeeker JD McCalley // *Annals of Applied Statistics*, 2009. - № 2, т. 3. - P. 857-879.

32. Nordman D. Weibull Prediction Intervals for a Future Number of Failures. / Daniel J. Nordman and William Q. Meeker // *Technometrics*, 2002. - № 1, т. 44. P. - 15-23.

33. Mirzai M. Failures Analysis and Reliability Calculation for Power Transformers / M. Mirzai, A. Gholami, F. Aminifar // *Journal Electrical Systems*, 2006. - № 2-1.- P. 1-12

34. Jonger R. A Statistical Approach to Processing Power Transformer Failure Data : 19th International Conference on Electricity Distribution (21-24 May 2007) [Электронный ресурс] / Rogier Jonger, Peter Morshuits, Johan Smit. - Paper № 546. - Vienna, 2007. – 4 p.

35. Khrennikov Alexander Diagnostics of Electrical Equipment Faults and Power Overhead Transmission Line Condition by Monitoring Systems (smart Grid): Short-circuit Testing of Power Transformers / A. Khrennikov . - Nova Publishers, 2016. – 150 p.

36. He J. Transformer real-time reliability model based on operating conditions / He Jian, Cheng Lin, Sun Yuan-Zhang // *Journal Zhejiang University - Science A.*, 2007. - № 8 (3). - P. 378-383.

37. Li Z. Failure event prediction using the Cox proportional hazard model driven by frequent failure signatures / Zhiguo Li, Shiyu Zhou, Suresh Choubey, Crispian Sievenpiper // *IEE Transactions*, 2007. - № 39. - P. 303-315.

38. Костерев Н. В Нечеткие алгоритмы оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования / Н. В. Костерев, Е. И. Бардик, Р. В. Вожаков [и др.] / *Наукові праці ДонНТУ — Електротехніка і енергетика*, 2008. - № 8 (140). - С. 65-70.

39. Ekman Magnus Learning Deep Learning: Theory and Practice of Neural Networks, Computer Vision, Natural Language

Processing, and Transformers Using TensorFlow / Ekman Magnus. - United Kingdom, Pearson Education, 2021. – 752 p.

40. Руденко О. Г. Штучні нейронні мережі / О. Г. Руденко, Є. В. Бодяньський. - Х. : Компанія СМІТ, 2006. – 404 с.

41. Интеллектуальные информационные технологии проектирования автоматизированных систем диагностирования и распознавания образов : монография / С. А. Субботин, Ан. А. Олейник, Е. А. Гофман, С. А. Зайцев, Ал. А. Олейник; под ред. С. А. Субботина. – Харьков: ООО “Компания Смит”, 2012. - 317 с.

42. Субботін С. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: монографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник ; під заг. ред. С.О. Субботіна. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. - 375 с.

43. Handbook of Technical Diagnostics: Fundamentals and Application to Structures and Systems. Germany, Springer Berlin Heidelberg, 2013. – 566 p.

44. Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надёжности авиадвигателей : монография / [В. И. Дубровин, С. А. Субботин, А. В. Богуслаев, В. К. Яценко]. - Запорожье : ОАО "Мотор Сич", 2003. - 279 с.

45. Jensen R. Computational intelligence and feature selection: rough and fuzzy approaches / R. Jensen, Q. Shen. - Hoboken; John Wiley & Sons, 2008. -339 p.

46. Dimension reduction: technical report UCD-CSI-2007-7 / University College Dublin; C. Padraig. - Dublin, 2007. - 24 p.

47. Venkatasubraman V. A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods / V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, S. Kavuric // Computers and chemical engineering, 2003. - Vol. 27, Issue 3. - P. 293-311.

48. Multifactor dimensionality reduction for detecting haplotype-haplotype interaction / Y. Jiang, R. Zhang, G. Liu // Fuzzy systems and knowledge discovery: sixth international conference, Tianjin, 14-16 August 2009: proceedings. - Los Alamitos: IEEE, 2009. - P. 241 -245.

49. Encyclopedia of survey research methods / ed. PJ Lavrakas. - Thousand Oaks: Sage Publications, 2008. - Vol. 1-2.-968 p.

50. Hansen MH Sample survey methods and theory / MH Hansen, WN Hurtz, WG Madow. - Vol. 1: Methods and applications. - New York: John Wiley & Sons, 1953. - 638 p.

51. Multivariate analysis, design to experiments, and survey sampling / ed. S. Ghosh. - New York: Marcel Dekker Inc., 1999. - 698 p. Smith G. A deterministic approach to partitioning neural network training data for the classification problem: dissertation doctor of philosophy in business / Smith Gregory. - Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute & State University, 2006.-110p.

52. H. Bülent Ertan Transformers: Analysis, Design, and Measurement / H. Bülent Ertan, Janusz Turowski, Xose M. López-Fernández. - United States, CRC Press, 2017. – 623 p.

53. Сахно А.А. Математическая модель прогноза остаточного ресурса трансформаторов тока 330-750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа / А.А. Сахно // Вісник НТУ"ХПІ", 2010. - №55. - С. 97-105.

54. Kaboli Shahriyar Reliability in Power Electronics and Electrical Machines: Industrial Applications and Performance Models / Shahriyar Kaboli, Hashem Oraee. - United States, IGI Global, 2016. – 481 p.

55. Fuqua Norman B. Reliability Engineering for Electronic Design. N.p. / Norman B. Fuqua.- CRC Press, 2020. – 406 p.

56. Da Silva Ivan Nunes Artificial Neural Networks: A Practical Course / Ivan Nunes da Silva, Danilo Hernane Spatti, etc.- Germany, Springer International Publishing, 2016. – 307 p.

57. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі / О.Г. Руденко, Є.В. Бодяньській. - Х.: Компанія СМІТ, 2006. – 404 с.

58. Інтелектуальні інформаційні технології проектування автоматизованих систем діагностування та розпізнавання образів: монографія / С.А. Субботін, Ан.А. Олійник, Є.А. Гофман, С.А. Зайцев, Ал.А. Олійник; під ред. С.А. Суботіна. - Харків: ТОВ "Компанія Сміт", 2012. - 317 с.

59. Субботін С.О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей:

монографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник ; під заг. ред. С.О. Субботіна. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. - 375 с.

60. Сахно А.А. Алгоритм вимірювання тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції трансформаторів струму і вводів 330-750 кВ при безперервному контролі, під робочою напругою / А.А. Сахно // Електротехніка и Електромеханіка, 2010. - №2. - С. 54-56.

61. Математичні та програмні засоби для прийняття рішень, розпізнавання образів й інтелектуального діагностування [Текст] : монографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, Є. М. Федорченко [та ін.] ; під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя : НУ "Запорізька політехніка", 2020. – 271 с.

62. Sabouret Nicolas Understanding Artificial Intelligence /Sabouret Nicolas. - United Kingdom, CRC Press, 2020. - 174 p.

63. Ding SX Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools / SX Ding. - Berlin: Springer, 2008. - 473 p.

64. Інтелектуальні інформаційні технології проектування автоматизованих систем діагностування та розпізнавання образів: монографія / С.А. Субботін, Ан.А. Олійник, Є.А.Гофман, С.А. Зайцев, Ал.А. Олійник; під ред. С.А. Суботіна. - Харків: ТОВ "Компанія Сміт", 2012. - 317 с.

65. ASM handbook. - Vol. 17: Nondestructive evaluation and quality control. - Cleveland: ASM International, 1997. - 1607 p.

66. Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems / [G. Vachtsevanos, F. Lewis, M. Roemer et al.]. - New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. – 434 p.

67. Боянич Б. Измерительные трансформаторы – диагностика как предпосылка надежной работы / Б. Боянич, М. Поляк // Электротехнический институт, Загреб, 2007. - №1. - С. 26-37.

68. Transformers: Basics, Maintenance, and Diagnostics - Denver: Hydroelectric Research and Technical Services Group, 2005. - 256 p.

69. Kulkarni SV Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics, Second Edition / SV Kulkarni; SA Khaparde.: CRC Press, 2012. - 750 p.

70. Скрупская Л.С. Построение моделей диагностирования состояния бумажно-масляной изоляции измерительных трансформаторов тока / Л.С. Скрупская, А.А. Олейник, А.А. Сахно // Электротехника и электромеханика, 2014. - №2. С. 27-31.

71. Shinkarenko GV Kontrol 'opornyx transformatorov toka i vvodov silovykh transformatorov pod ra-bochim napryazheniem v e'nergosistemax Ukrainy / GV Shinkarenko // E'lektricheskie stancii, 2001. - №5. - P. 55-62.

72. Sakhno A.A Razvitie metodologii diagnostiki vysokovol'tnogo oborudovaniya v sistemax nepreryv-nogo kontrolya SAFE - T // A.A. Sakhno, S.P. Konograj, A.G. Spitsa / МА TRAVE'K, 2013. - 1 elektron. opt. Disk.

73. Андрієнко П.Д. Особливості моніторингу технічного стану основної ізоляції високовольтних ввідів і трансформаторів струму / П.Д. Андрієнко, А.А. Сахно, С.П. Конограй, А. Г. Спиця, Л. С. Скрупская // "Електротехніка та електроенергетика", 2014 р - №2 – С 43-49.

74. Sistemy monitoringa vysokovol'tnogo oborudovaniya SAFE-T // <http://www.enera.com.ua/>

75. Nordman D. Weibull Prediction Intervals for a Future Number of Failures. / Daniel J. Nordman and William Q. Meeker // Technometrics, 2002. - № 1, т. 44. P. - 15-23.

76. Bernstein Ira H. Statistical Data Analysis Using Your Personal Computer / Bernstein, Ira H. and Rowe Nancy A. - United Kingdom, SAGE Publications, 2001. - 446 p.

77. The Practical Handbook of Genetic Algorithms. Volume II. New Frontiers / Ed. LD Chambers. - Florida: CRC Press, 2000.-421 p.

78. Maniezzo V. Genetic Evolution of the Topology and Weight Distribution of Neural Networks // IEEE transactions on neural networks, 1994. - № 1 (5). - P. 39-53.

*Наукове видання*

СКРУПСЬКА Людмила Степанівна  
САХНО Олександр Анатолійович

Підвищення ефективності систем  
діагностування ізоляції вимірювальних  
трансформаторів струму

*Монографія*

Комп'ютерний набір *Скрупська Л.С.*  
Верстання *Скрупська Л.С.*

Підписано до друку 30.08.2023. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 6,1.  
Тираж 100 прим. Зам. № 621.

Національний університет «Запорізька політехніка»  
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64  
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.