

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки і електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Удосконалення моделей прогнозової діагностики та оцінки стану
трансформаторного обладнання для підвищення рівня енергетичної безпеки
енергооб'єктів
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2м курсу, групи ДЕА-ЕБ23мг-1
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Денис ЗЕЛЕНСЬКИЙ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Костянтин БРОВКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Світлана АРТЮХ
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

К.Т.Н., доцент Артем ЧЕРНЮК

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти

здобувачу вищої освіти Денису ЗЕЛЕНСЬКОМУ

1. Тема «Удосконалення моделей прогнозної діагностики та оцінки стану трансформаторного обладнання для підвищення рівня енергетичної безпеки енергооб'єктів»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Моделі предикативності; типи силових трансформаторів, характеристики сигналів; Інформаційне забезпечення

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

ВСТУП; РОЗДІЛ 1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ ДЛЯ
ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ; РОЗДІЛ 2 ВИБІР МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ
ДЛЯ РОЗРОБКИ ПРЕДИКТИВНИХ І АДАПТИВНИХ МОДЕЛІВ ОЦІНКИ
СТАНУ ТРАНСФОРМАТОРІВ; ВИСНОВКИ; ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ
ДЖЕРЕЛ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024р.

Керівник _____ Костянтин БРОВКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Денис ЗЕЛЕНСЬКИЙ
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка) _____ Денис ЗЕЛЕНСЬКИЙ
(підпис) (ім'я, прізвище)

Нормоконтроль _____ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – ____ ; рисунків – ____ ; таблиць – ____ ;
літературних джерел – ____ .

У сучасних економічних умовах важливим завданням електроенергетики залишається забезпечення надійності електропостачання споживачів. Підвищені вимоги щодо надійності пред'являються до всієї системи передачі та розподілу електричної енергії, найважливішим елементом якої є трансформаторне обладнання. Силові трансформатори (СТ) електростанцій та електричних мереж є критично важливим обладнанням електроенергетичної системи (ЕЕС) в силу своєї складності, високої вартості та функціональної відповідальності. Підтримка експлуатаційної надійності та запобігання аварійним відключенням трансформаторів покликана забезпечувати система технічного обслуговування та ремонтів за фактичним технічним станом.

Об'єкт дослідження. Процес функціонування трансформаторного обладнання, встановленого на об'єктах ЕЕС.

Предмет дослідження. Математичні моделі та алгоритми оцінки технічного стану СТ, правила прийняття рішень щодо їх надійної експлуатації.

Ціль роботи. Удосконалення математичних моделей оцінки технічного стану силових трансформаторів та алгоритмів прийняття рішень щодо їх надійної експлуатації у складі енергооб'єктів електроенергетичних систем, що відрізняються властивостями предикативності (передбачуваності) та адаптивності (пристосовуваності).

ABSTRACT

Pages of text – ____ ; pictures – ____ ; tables – ____ ;
literary sources – ____ .

In modern economic conditions, ensuring the reliability of electricity supply to consumers remains an important task of the electric power industry. Increased reliability requirements are imposed on the entire system of transmission and distribution of electrical energy, the most important element of which is the transformer equipment. Power transformers (CT) of power plants and electrical networks are critically important equipment of the electric power system (EES) due to their complexity, high cost and functional responsibility. Maintenance of operational reliability and prevention of emergency disconnections of transformers is designed to be provided by the system of maintenance and repairs according to the actual technical condition.

Object of research. The process of operation of the transformer equipment installed at the facilities of the UES.

Subject of research. Mathematical models and algorithms for assessing the technical condition of STs, decision-making rules regarding their reliable operation.

The purpose of the work. Improvement of mathematical models for assessing the technical condition of power transformers and decision-making algorithms regarding their reliable operation as part of energy objects of electric power systems, which differ in the properties of predicability (predictability) and adaptability (adaptability).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	
ВСТУП.....	
РОЗДІЛ 1. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ.....	
1.1 Характеристика властивостей предикативності у завданнях моделювання з метою оцінки технічного стану устаткування.....	
1.2 Силкові трансформатори як критичний тип активів енергопідприємств.....	
1.3 Інформаційне забезпечення у завданнях оперативної та предикативної оцінки технічного стану та залишкового ресурсу силових трансформаторів.....	
1.4 Оцінка ефективності методів моніторингу параметрів технічного стану трансформаторного обладнання.....	
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	
РОЗДІЛ 2. ВИБІР МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ ДЛЯ РОЗРОБКИ ПРЕДИКТИВНИХ І АДАПТИВНИХ МОДЕЛІВ ОЦІНКИ СТАНУ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	
2.1 Моделі та алгоритми предиктивної діагностики та оцінки технічного стану трансформаторів із застосуванням методів машинного навчання.....	
2.2 Розробка нечітких предикативних моделей інтерпретації результатів аналізу розчинених газів трансформаторів у програмному середовищі проектування.....	
2.3 Верифікація розроблених нечітких предикативних моделей інтерпретації типу дефектів у силових трансформаторах.....	

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	
ВИСНОВКИ.....	
СПИСОК ПОСИЛАНЬ.....	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕЕС – електроенергетична система

МНТО – маслонаповнене трансформаторне обладнання

СТ – силовий трансформатор

ФУ – функціональний вузол

ІТС – індекс технічного стану

АРГ – аналіз розчинених газів

ФХА – фізико-хімічний аналіз масла

ВВІ – високовольтні випробування

ТВК – тепловізійний контроль

АЧХ - аналіз частотної характеристики

ЧР – аналіз часткових розрядів

ТОіР – технічне обслуговування та ремонт

КР – капітальний ремонт

ПР – поточний ремонт

ТО – технічне обслуговування

ШІ – штучний інтелект

ШНМ – штучні нейронні мережі

ЕС – експертні системи

СВМтД – система віддаленого моніторингу та діагностики

ІАС – інформаційно-аналітична система

СППР - система підтримки прийняття рішень

СДМ – система діагностичного on-line моніторингу

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних економічних умовах важливим завданням електроенергетики залишається забезпечення надійності електропостачання споживачів. Підвищені вимоги щодо надійності пред'являються до всієї системи передачі та розподілу електричної енергії, найважливішим елементом якої є трансформаторне обладнання. Силкові трансформатори (СТ) електростанцій та електричних мереж є критично важливим обладнанням електроенергетичної системи (ЕЕС) в силу своєї складності, високої вартості та функціональної відповідальності. Підтримка експлуатаційної надійності та запобігання аварійним відключенням трансформаторів покликана забезпечувати система технічного обслуговування та ремонтів за фактичним технічним станом.

Цілком очевидним фактом сьогодні є те, що ефективна експлуатація об'єктів ЕЕС базується на ефективній діагностиці електроустаткування (у тому числі трансформаторного). Сучасні завдання ефективної діагностики не обмежуються: вибором комплексу інформативних контрольованих параметрів обладнання, якісним їх виміром в умовах експлуатації та достовірною інтерпретацією отриманих результатів. Завдяки цифровій трансформації галузі ці завдання отримали значне розширення у напрямку: раціонального поєднання методів on-line та off-line моніторингу СТ енергооб'єктів, включаючи технології віддаленого моніторингу, інтегральної оцінки стану та прогнозування відмови та залишкового експлуатаційного ресурсу СТ, формування математичних моделей предикативної аналітики на основі методів штучного інтелекту та машинного навчання, розробки систем прийняття рішень та вибору ефективних експлуатаційних впливів. Одним із суттєвих обмежень при формулюванні та вирішенні низки перерахованих задач є відсутність технічної можливості застосування багатокомпонентного діагностування в режимі on-line моніторингу. Зазначене обмеження зумовлене низкою причин, включаючи, головним чином, низький рівень контролю придатності окремих

функціональних вузлів та елементів конструкції СТ. З одного боку, це ускладнює розробку моделей оперативної та предикативної оцінки технічного стану та вимагає додаткових досліджень, а з іншого, робить не очевидною необхідність створення універсальних багатокомпонентних моделей на єдиній апаратно-алгоритмічній платформі.

Незважаючи на численні та всеосяжні дослідження завдання вдосконалення математичних моделей оперативної та передиктивної оцінки технічного стану СТ, а також систем підтримки прийняття рішень щодо забезпечення їх надійної експлуатації, як і раніше, є досить гострою та актуальною. У магістерській роботі запропоновано нові технічні рішення щодо забезпечення надійної експлуатації СТ у складі енергетичних об'єктів ЕЕС за рахунок удосконалення діагностичних моделей, алгоритмів прийняття рішень та їхньої програмної реалізації.

Об'єкт дослідження – процес функціонування трансформаторного обладнання, встановленого на об'єктах ЕЕС.

Предмет дослідження – математичні моделі та алгоритми оцінки технічного стану СТ, правила прийняття рішень щодо їх надійної експлуатації.

Мета роботи – удосконалення математичних моделей оцінки технічного стану силових трансформаторів та алгоритмів прийняття рішень щодо їх надійної експлуатації у складі енергооб'єктів електроенергетичних систем, що відрізняються властивостями предикативності (передбачуваності) та адаптивності (пристосовуваності).

Для досягнення поставленої мети сформульовано та вирішено такі **наукові завдання**:

1. Порівняльний аналіз методів та моделей для оцінки технічного стану та залишкового ресурсу електрообладнання (включаючи маслонаповнені силові трансформатори);
2. Вибір математичного апарату для розробки предикативних та адаптивних моделей оцінки технічного стану трансформаторного обладнання;

3. Розробка (удосконалення) математичних моделей для оперативної оцінки технічного стану та залишкового ресурсу СМТ, дослідження можливості підвищення достовірності діагностичних оцінок.

Методи дослідження. У роботі використано положення теорії ймовірності та математичної статистики, методи Байєсівської теорії прийняття рішень, методи теорії розпізнавання образів та нечіткі логіки.

РОЗДІЛ 1. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

1.1 Характеристика властивостей предикативності у завданнях моделювання з метою оцінки технічного стану устаткування

Предикативна аналітика – використання даних, статистичних алгоритмів і методів машинного навчання визначення ймовірності майбутніх результатів з урахуванням історичних даних. Мета предикативної аналітики у тому, ніж обмежуватися знанням те, що сталося, щоб дати найкращу оцінку те, що станеться у майбутньому [1-5]. Хоча прогнозна аналітика існує вже кілька десятиліть, час усвідомленого застосування цієї технології лише настав. Все більше і більше організацій звертаються до прогносної аналітики, щоб збільшити свій прибуток та конкурентну перевагу. Причини необхідності предикативності аналітики:

- Зростання обсягів і типів даних, а також зростання інтересу до використання даних для отримання цінної інформації.
- Більш швидкі та дешеві комп'ютери.
- Програмне забезпечення, простіше у використанні.
- Більш жорсткі економічні умови та необхідність конкурентної диференціації.

З поширенням простого у використанні інтерактивного програмного забезпечення прогнозна аналітика більше не є сферою діяльності математиків і статистиків, оскільки вона стала широко використовуватися інженерами-енергетиками та технічними фахівцями при аналізі даних електричного обладнання з метою діагностики технічних станів, відстеження відхилень, а також прогнозування несправностей електрообладнання. (У тому числі трансформаторного).

Моделі предикативності

Використовуються відомі результати розробки (навчання) моделі, яку можна застосовувати для прогнозування значень традиційних чи нових даних. Моделювання надає результати у формі прогнозів, які становлять ймовірність цільової змінної на основі оцінки значущості набору входних змінних. Відомі два типи прогнозних моделей:

1. Класифікаційне прогнозне моделювання – це завдання апроксимації відображає функцію (f) від входних змінних (X) до дискретних вихідних змінних (Y). Вихідні змінні часто називають мітками чи категоріями. Функція відображення передбачає клас чи категорію для цього спостереження. Наприклад, технічний стан силового трансформатора можна розділити на нормальне за відсутності ознак дефектів, і відхилення від норми, коли виявлено ознаки дефектів. При необхідності можна класифікувати стан відхилення від норми за видами дефектів на електричні, термічні або змішані несправності [6].

- Проблема класифікації вимагає, щоб стан було віднесено до одного з двох або більше класів.

- Класифікація може виконуватися при безперервних або дискретних змінних входних.

- Проблема з двома класами часто називається проблемою двокласової чи двійкової класифікації.

- Проблема із більш ніж двома класами часто називається проблемою класифікації кількох класів.

- Проблема, коли аналізованому стану присвоюється кілька класів, називається проблемою класифікації з кількома мітками.

Відомий ряд способів оцінки властивостей моделі прогнозної класифікації, проте найпоширенішим є обчислення точності класифікації [7]. Точність класифікації – це відсоток правильно класифікованих прикладів із усіх зроблених прогнозів.

$$T = (C/A)*100\% \quad (1.1)$$

де T – точність, C – кількість правильних прогнозів, A – загальна кількість прогнозів. Алгоритм, здатний навчати модель прогнозу класифікації, називається алгоритмом класифікації.

2. Прогнозоване регресійне моделювання – це завдання апроксимації функції відображення (f) від вхідних змінних (X) до безперервної вихідної змінної (Y). Безперервна вихідна змінна - це речове значення, таке як ціле число або значення з плаваючою комою. Розглянемо, наприклад, аналіз характеристик життєвого циклу силового трансформатора з урахуванням прогнозуючої регресії.

- Завдання регресії потребує передбачення кількості.
- Регресія може мати безперервні або дискретні змінні вхідні.
- Завдання з кількома змінними вхідними часто називається проблемою багатовимірної регресії.
- Завдання регресії, у якій вхідні змінні впорядковані за часом, називається завданням прогнозування часових рядів.

Оскільки модель прогнозування регресії передбачає кількість, властивість моделі має сприйматися як помилка у цих прогнозах. Існує низка способів оцінити ефективність моделі прогнозування регресії. Найбільш поширеною є середньоквадратична помилка, скорочена ВСКО.

$$ВСКО = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Ai)^2}{N}} \quad (1.2)$$

де Pi прогнозне значення, Ai – фактичне значення, N – загальна кількість спостережень. Перевага ВСКО у тому, що одиниці оцінки помилки перебувають у тієї ж одиницях, як і прогнозоване значення. Алгоритм, здатний навчати моделі прогнозування регресії, називається алгоритмом регресії [8].

Методи предикативного моделювання

Існує безліч додатків, що використовуються для прогнозування технічного стану силових трансформаторів, ретельно досліджених [7, 15]. Серед цих поширених додатків:

- дерева рішень – це моделі класифікації, які поділяють дані на підмножини на основі категорій вхідних змінних. Дерево рішень виглядає як дерево, в якому кожна гілка є вибір між декількома альтернативами, а кожен лист являє собою класифікацію або рішення [8]. Така модель дивиться на дані та намагається знайти одну змінну, яка розбиває дані на логічні групи з найбільшою відмінністю. Дерева рішень популярні, тому що їх легко зрозуміти та інтерпретувати [9]. Вони також добре обробляють пропущені значення та корисні для попереднього вибору змінних. На рис. 1.1 показано простий приклад моделі дерева розв'язків.

- регресія (лінійна та логістична) – один із найпопулярніших методів статистики. Регресійний аналіз оцінює взаємозв'язок між змінними. Призначений для безперервних даних, які, як можна припустити, наслідують нормальний розподіл, він знаходить ключові шаблони у великих наборах даних і часто використовується для визначення того, наскільки конкретні фактори впливають на рух до мети [10].



Рисунок 1.1 – Модель дерева рішень

За допомогою регресійного аналізу ми хочемо передбачити число, яке називається відгуком або змінною Y . При лінійній регресії одна незалежна змінна використовується для пояснення та/або прогнозування результату Y . Множинна регресія використовує дві або більше незалежних змінних для прогнозування результату. При логістичній регресії невідомі значення дискретної змінної прогножуються з урахуванням відомих значень інших змінних. Змінна відгук є категоріальною, тобто може приймати лише обмежену кількість значень [11]. При бінарній логістичній регресії змінна відповіді має лише два значення, наприклад 0 або 1. У множинній логістичній регресії змінна відгуку може мати кілька рівнів, наприклад низький, середній і високий або 1, 2 і 3 (рис. 1.2).

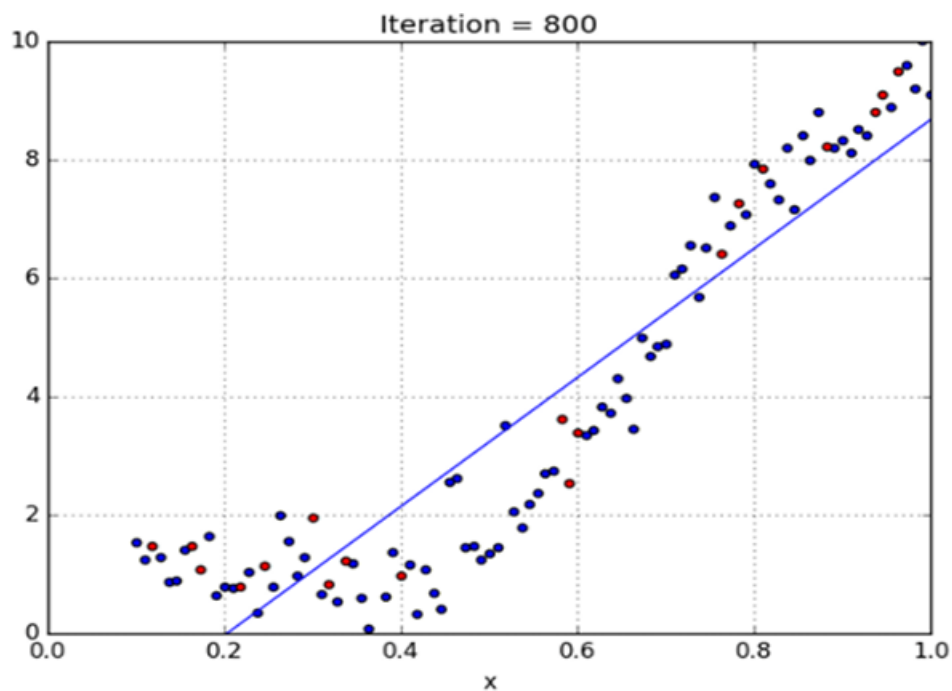


Рисунок 1.2 – Регресійна модель

Одним із перспективних практичних додатків регресійного типу моделей є так звані «швидкі» моделі прогнозування залишкового експлуатаційного ресурсу обладнання енергооб'єктів ЕЕС [15]. Такі моделі формуються практично миттєво на основі декількох пов'язаних у часі

послідовних поточного та попереднього вимірювань контрольованого ресурсного параметра $X_i t_i, X_{i-1} (t_{i-1})$ та мають вигляд (1.3):

$$R_{\text{ост}} = A \cdot X_{\text{пр}} - X_i + B. \quad (1.3)$$

Де $A = \frac{t_i - t_{i-1}}{X_i - X_{i-1}}$ – обчислювальна константа, що характеризує інтенсивність деградації функціонального вузла одиниці устаткування; $X_{\text{пр}}$ – гранично-допустиме значення ресурсного параметра; B – вільний член полінома, який може приймати довільне значення або дорівнювати нулю.

– **нейронні мережі** є складні техніки, здатні моделювати надзвичайно складні відносини. Вони популярні, тому що мають міць і гнучкість. Сила полягає в їх здатності обробляти нелінійні відносини в даних, що стає все більш поширеним у міру того, як ми об'єднуємо більше даних [12]. Вони часто використовуються для підтвердження результатів, отриманих за допомогою простих методів, таких як регресія та дерева рішень. Нейронні мережі ґрунтуються на розпізнаванні образів та деяких процесах штучного інтелекту, які графічно «моделюють» параметри. Вони працюють добре, коли невідома математична формула, яка пов'язує вхідні дані з вихідними, прогнозування важливіше пояснення або є багато навчальних даних. На рис. 1.3 представлена проста модель нейронної мережі.

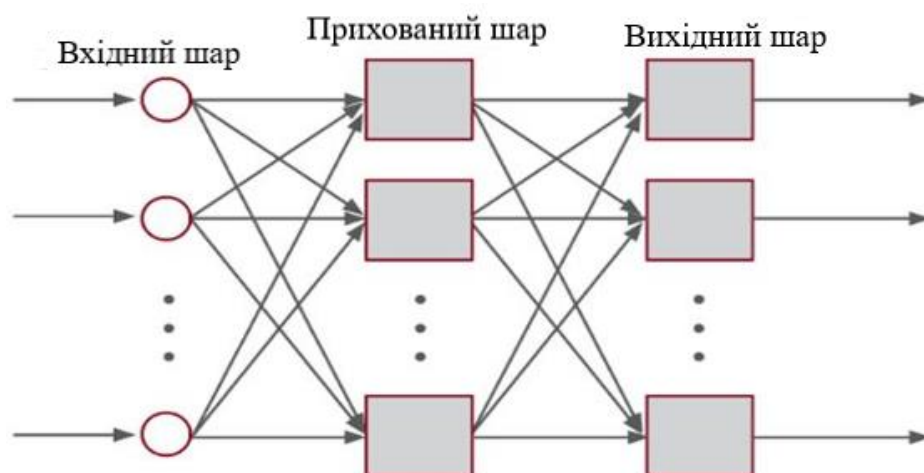


Рисунок 1.3 – Модель нейронної мережі

Штучні нейронні мережі спочатку були розроблені дослідниками, які намагалися імітувати нейрофізіологію людського мозку [13].

– **Байєсовський аналіз та класифікація.** Байєсовські методи прийняття рішень розглядають параметри як випадкові величини і визначають ймовірність як «ступінь впевненості» (тобто ймовірність події – це ступінь, у якому визнається, що подія є істинною). Застосування Байєсівської теорії рішень починається з попереднього твердження щодо розподілу ймовірностей невідомого параметра [14, 15]. При отриманні нової інформації (емпіричних даних) оновлюються (уточнюються) отримані відомості про невідомий параметр. Математичною основою Байєсовської теорії рішень є формула Байєса:

$$P(\Pi_j/X) = \frac{P(X/\Pi_j)P(\Pi_j)}{p(X)}. \quad (1.4)$$

Де: $X \in \{x_i\} (i = \overline{1, m})$ - вибіркова сукупність контрольованих параметрів; $P(\Pi_j), j = \overline{1, k}$ - апіорні ймовірності приналежності до кожного з можливих класів; $p(X)$ - щільність ймовірності вектора контрольованих параметрів. Байєсовський класифікатор за наявності дихотомії класів станів об'єкта ($j = 1, 2$) перетворюється на вид [Застосування методів штучного інтелекту...] (1.5):

$$g(X) = -\ln \left[\frac{p(X/\Pi_1)}{p(X/\Pi_2)} \right] - \ln \left[\frac{P(\Pi_2)}{P(\Pi_1)} \right] \begin{matrix} > 0 \\ < 0 \end{matrix} \rightarrow X \in \begin{matrix} \Pi_1 \\ \Pi_2 \end{matrix}. \quad (1.5)$$

Де: $\frac{p(X/\Pi_1)}{p(X/\Pi_2)}$ – відношення правдоподібності, а $\frac{P(\Pi_2)}{P(\Pi_1)}$ - його довільне граничне значення, що залежить від умов класифікації і характеризує сумарну помилку діагнозу $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$; ε_1 - помилка першого роду або "перепустка дефекту"; ε_2 - Помилка другого роду або "хибна тривога". Відповідно до теорії [11] Байєсовський класифікатор забезпечує мінімальну ймовірність сумарної

помилки рішення і, у цьому сенсі, є оптимальним. Відома канонічна форма Байєсовського класифікатора [12], яка за допомогою дискримінантової функції $g(X)$ відповідність вектора параметрів X класу станів Π_i встановлює за справедливості умови $g_i(X) > g_j(X)$ для всіх $j \neq i$ (рис. 1.4). У загальному випадку дискримінанта функція $g(X)$ може бути задана у вигляді лінійного, нелінійного полінома або матричної форми $g(X) = W \cdot X$ де, W - вектор вагових коефіцієнтів.

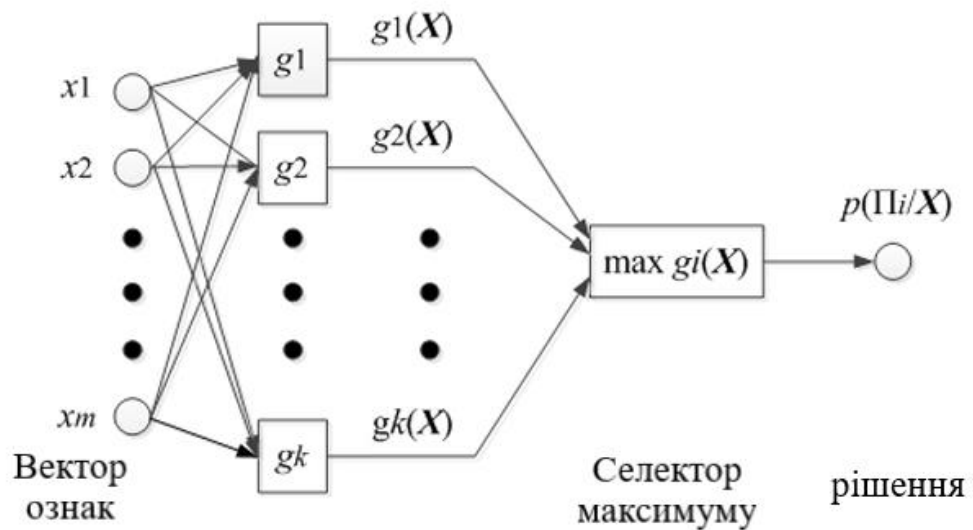


Рисунок 1.4 – Канонічна форма Байєсовського класифікатора

Для дихотомії класів вирішальна функція працює так:

$$g(X) = W \cdot X \begin{cases} > 0, \text{ якщо } X \in \Pi_1 \\ < 0, \text{ якщо } X \in \Pi_2 \end{cases}$$

Основними етапами створення моделі є: визначення виду $g(X)$ вибір способу розрахунку вектора вагових коефіцієнтів W .

Одним із класів моделей, заснованих на статистичній (Байєсівській) класифікації та розпізнаванні образів у додатках до оцінки технічного стану обладнання об'єктів ЕЕС є так звані "повільні" моделі [14]. Назва вказує на багатоетапність їх отримання: від формування вектора властивостей до побудови класифікатора та оцінки X достовірності рішень. Зате вже сформовані моделі не містять звичних обмежень, мають просте та ефективне практичне

застосування та можуть легко адаптуватися до однотипного обладнання енергооб'єктів та умов його експлуатації.

1.2 Силові трансформатори як критичний тип активів енергопідприємств

Основна мета будь-якої електроенергетичної системи (ЕЕС) – це ефективне виконання вимог електропостачання споживачів за рахунок забезпечення безперервного процесу передачі та розподілу електроенергії з високою надійністю, кращою якістю та достатньою економічністю [16, 17].

Трансформаторне обладнання є найважливішим компонентом об'єктів електроенергетичної системи. Силові трансформатори є основним обладнанням електростанцій і електромережових підстанцій, які надійна робота, зрештою визначає надійне функціонування ЕЕС [14, 17]. Трансформаторне обладнання ЕЕС включає до свого складу силові трансформатори, автотрансформатори, шунтуючі реактори. Конструктивно маслонаповнений силовий трансформатор (СТ) складається з набору функціональних вузлів (структурних елементів), які виконують різні функції та забезпечують його застосування за призначенням. Коротко розглянемо характеристики кожного з функціональних елементів СТ та основні методи контролю стану.

Ізоляційна система (ІС) трансформаторів є складною системою, що складається з різних конструктивних елементів [19]. Ізоляцію можна розділити на дві частини: внутрішню ізоляцію та зовнішню ізоляцію. Зовнішня ізоляція – це ізоляція покриття введів, повітряних проміжків між вводами обмотки та заземлених частин. Внутрішня (маслонаповнена, газова, лита) ізоляція трансформатора ділиться на основну та поздовжню ізоляцію обмоток, ізоляцію прохідного монтажу, ізоляцію відводів, РПН тощо. Основна ізоляція обмоток – це ізоляція від даної обмотки до заземлених частин осердя, ярма, бака та інших обмоток (зокрема інших фаз). Поздовжня ізоляція – це ізоляція між різними точками однієї обмотки: між витками, шарами та витками.

Набір методів призначений для оцінки та діагностики технічного стану функціонального вузла ІС. Це забезпечує виявлення несправностей (дефектів) у цьому функціональному вузлі. До методів діагностування (моніторингу) параметрів стану ІВ, закріплених нормативними документами [49], слід зарахувати:

- 1) аналіз розчинених газів (АРГ) в маслі (концентрації газів H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO , CO_2);
- 2) фізико-хімічний аналіз олії (ФХА) (пробивна напруга, $tg\delta_{\text{масла}}$ вміст вологи, ін.);
- 3) контроль стану целюлози ($W_{\text{цел.}}$, сод.фуран. похідних, ін.);
- 4) контроль відношення концентрацій пар характерних газів.

Магнітна система (МС) – конструктивна частина трансформатора (магнітопровід), призначена для каналізації магнітного потоку в необхідному напрямку та розміщення обмоток, які беруть участь у процесі перетворення електромагнітного поля на електричну енергію. Для виготовлення магнітопроводу використовують феромагнітні матеріали з анізотропними властивостями: спеціальна електротехнічна сталь, ферит, пермалою та ін. Кожен магнітопровід поділяють на два основні елементи:

- 1) ярма - горизонтальні частини магнітопроводу, які розташовані вище і нижче обмоток.
- 2) стрижні – вертикальні частини магнітопроводу для встановлення обмоток.

Залежно від просторового розташування стрижнів магнітопроводу, розрізняють вироби просторові та плоскі. Силовий трансформатор СТ, як правило, виконують із плоским магнітопроводом з електротехнічної сталі [10].

Для контролю технічного стану МС нормативно закріплено низку методів [49], серед яких слід зазначити:

- 1) контроль локального нагріву бака СТ за результатами тепловізійного контролю (ТБК);
- 2) вимірювання втрат холостого ходу ΔP_X ;

Обмотки (ОБМ) складаються з провідників, намотаних навколо секцій осердя, і вони повинні бути належним чином ізольовані, підтримуватись та охолоджуватися, щоб витримувати умови експлуатації та випробувань. Мідь та алюміній є основними матеріалами, що використовуються як провідники в обмотках силових трансформаторів [20]. Хоча алюміній легший і зазвичай дешевше, ніж мідь, необхідно використовувати алюмінієвий провід більшого перерізу, щоб пропускати струм з такими ж характеристиками, як у міді. Мідь має більш високу механічну міцність і використовується майже виключно у всіх діапазонах навантажувальних струмів, крім найменших, де алюмінієві провідники можуть бути прийнятними з техніко-економічної точки зору.

У випадках, коли виникають екстремальні навантаження, для ще більшої міцності можна використовувати такі матеріали, як мідь, що містить срібло.

Провідники, що використовуються в силових трансформаторах, зазвичай скручені з прямокутним поперечним перерізом, хоча деякі трансформатори з найнижчими номіналами можуть використовувати провідники листові або фольгові.

Набір методів, призначених для діагностики та оцінки технічного стану функціонального вузла ОБМ, включає такі:

- 1) контроль геометрії обмоток ΔZ_k
- 2) високовольтні випробування (зміна $tg\delta_{\text{цел}}, R_{60}$ порівняно з еталонними значеннями)
- 3) вимірювання активного опору (R) постійному струму обмоток ВН, ПН.

Високовольтні вводи (ВВ) є елементами інтерфейсу, так що електрична енергія проходить через бар'єр. Центральний осердя зазвичай виготовляється з алюмінію або міді і має відповідний розмір, щоб пропускати струм від одного боку бар'єру до іншого [11]. Центральна жила міститься у системі ізоляції, покритої ізолятором. Системи ізоляції вводів на 35 кВ та нижче можуть бути спроектовані з використанням твердих матеріалів, таких як порцеляна, силікон або композит на основі смоли. Для вводів, розрахованих на напругу більше 35

кВ, потрібні шари провідного матеріалу або фольги, що перемежаються шарами паперу, щоб розподіляти напруги та мінімізувати великі градієнти напруги. Шари провідників та ізоляції утворюють концентричні конденсатори між бар'єром та центральною жилою.

Сьогодні просочені маслом паперові вводи є типами вводів, що найбільш широко використовуються, для напруг вище 35 кВ [12]. У цій конструкції папір забезпечує каркас для утримання ізоляційного масла. Масло діє як основна ізоляція та охолоджувальна рідина для прохідного ізолятора. Зовнішня оболонка зазвичай виготовляється з порцеляни, але деякі виробники використовують інші матеріали через тривалі терміни виготовлення та складність виготовлення зовнішніх порцелянових оболонок.

Набір методів, призначених для діагностики та оцінки технічного стану функціонального вузла ВВ, як правило, включає:

- 1) контроль за станом ізоляції (тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta$, активний опір – R, ємність – C);
- 2) АРГ (концентрації діагностичних газів);
- 3) ФХА (пробивна напруга, $tg\delta_{\text{масла}}$, ін.)
- 4) контроль механічної цілісності конструкції (тиск, температура – $\theta^{\circ}\text{C}$, ін.)

Система регулювання напруги РПН (СРН) являє собою пристрій РПН у додатках, де переривання живлення під час перемикання неприйнятно, трансформатор часто оснащується більш дорогим та складним пристроєм, механізм перемикавання крана навантаження. Перемикачі відгалужень під навантаженням зазвичай класифікуються як механічні, з електронним керуванням або електронні. Ці системи, як правило, мають 19 відводів (один у центрі «номінальний» відвід та шістнадцять для збільшення та зменшення коефіцієнта трансформації СТ) та допускають відхилення, наприклад $\pm 9 \times 1,78\%$ від номінальної напруги [13].

Набір методів, призначених для діагностики та оцінки технічного стану функціонального вузла РНР, представлений такими:

1) контроль стану масла: пробивна напруга, $W_{\text{масла}}$, ін.;

2) контроль стану механізмів приводу та контактора.

Система охолодження (СО). Жоден трансформатор не є дійсно «ідеальним трансформатором», і, отже, кожен із них зазнає певних втрат, більша частина яких перетворюється на тепло. Якщо це тепло не розсіюється належним чином, перевищення температури трансформатора може викликати серйозні проблеми, такі як порушення ізоляції. Вочевидь, що трансформатору потрібна система охолодження. Трансформатори можна розділити на два типи: сухі та маслонаповнені. Різні методи охолодження трансформаторів [25]:

1. Для сухих трансформаторів: природна чи примусова циркуляція повітря.

2. Для маслонаповнених трансформаторів: природна (М) циркуляція масла, примусова (Д) циркуляція повітря, примусова циркуляція масла та повітря (ДЦ).

Набір методів призначених для діагностики та оцінки технічного стану функціонального вузла СО включає:

1) контроль стану бака та навісного обладнання;

2) контроль стану захисного устаткування.

1.3 Інформаційне забезпечення у завданнях оперативної та предикативної оцінки технічного стану та залишкового ресурсу силових трансформаторів

Трансформатор є одним із найбільш відповідальних та дорогих пристроїв в ЕЕС. Надійна та ефективна робота трансформатора відіграє вирішальну роль у забезпеченні електропостачання. У трансформаторі масляна та паперова ізоляція руйнуються під впливом термічних, електричних, хімічних, механічних стресів у його роботи [16, 17]. За останні роки виріс інтерес до оцінки стану ізоляції СТ. Насамперед це пов'язано з тим, що у всьому світі збільшується парк трансформаторів, що експлуатуються. У зв'язку

з цим оцінка стану ізоляції трансформатора становить великий промисловий інтерес. Отже, щоб зменшити кількість відмов та продовжити термін служби трансформатора, вживаються деякі заходи, відомі як моніторинг стану. Переваги моніторингу стану: завчасне попередження про виникнення несправностей, своєчасне виконання вимірювань, скорочення незапланованих простоїв, запобігання катастрофічних відмов та руйнувань периферійного обладнання, підтвердження наявності несправних газів у разі аварійних сигналів, своєчасне проактивне рішення для створення витрат та ін [6, 8, 13, 16]. Найпрогресивніші методи діагностики включають аналіз розчинених у маслі газів (АРГ), теплове моделювання (ТМ), аналіз часткових розрядів (ЧР), аналіз частотної характеристики (АЧХ). Методи діелектричної діагностики необхідні розуміння впливу різних стресів, як-от теплові, електричні та інших. Ці методи дають ранню вказівку змін діелектричних властивостей ізоляційного масла, надають корисну інформацію про зміну характеристик целюлозної ізоляції.

Існує п'ять основних аспектів моніторингу та оцінки технічного стану СТ (рис. 1.5): теплове моделювання (ТМ), аналіз розчинених в маслі газів (АРГ), аналіз частотної характеристики обмоток СТ (АЧХ), аналіз часткових розрядів (ЧР), аналіз вологості ізоляції.



Рисунок 1.5 – Моніторинг параметрів стану СТ

Теплове моделювання

Фактичний термін служби трансформатора частково обмежений погіршенням властивостей ізоляції внаслідок термічного старіння, що визначається головним чином щоденними циклічними навантаженнями.

Посібники з навантаження трансформатора дають рекомендації щодо вибору відповідних номіналів трансформатора для надання умов навантаження та охолодження, особливо для умов з потужностями навантаження вище за номінальну потужність трансформатора. Для маслонаповнених силових трансформаторів можна використовувати посібник із завантаження 60354 Міжнародної електротехнічної комісії ІЕС [18]. Розробка точної теплової моделі завжди розглядається як одна з найважливіших проблем моніторингу стану трансформатора. Загальноприйняті методи, про які повідомляють ІЕС та ІЕЕЕ, можуть використовуватися для прогнозування зон температури гарячої точки у трансформаторі у вигляді суми температури навколишнього середовища, перевищення температури верхніх шарів олії над температурою навколишнього середовища та гарячої точки над температурою верхніх шарів олії. Два стійкі перевищення температури верхніх шарів олії та нижніх шарів олії над температурою навколишнього середовища можна оцінити окремо. Однак традиційний розрахунок внутрішньої температури трансформатора є складним завданням, тому необхідно розробити більш точну і змістовну теплову модель для обліку теплових характеристик трансформатора.

Аналіз розчинених газів у маслі СТ

Маслонаповнені силові трансформатори заповнені рідиною, яка служить різним цілям. Рідина діє як захисне середовище, ізолятор та теплоносій. Найбільш поширений тип рідини, що використовується у трансформаторах, має мінеральне походження. Під час нормальної роботи зазвичай відбувається повільне розкладання мінеральної олії з утворенням певних газів, які розчиняються у маслі. Тим не менш, коли в трансформаторі виникає несправність (дефект), гази генеруються з більшою інтенсивністю. АРГ

ймовірно, є методикою раннього виявлення дефектів, що найбільш широко використовується сьогодні, яка використовується для моніторингу роботи трансформатора в режимі он-лайн. Різними організаціями розроблено ряд посібників з інтерпретації результатів АРН. Застосовуючи метод інтерпретації результатів АРГ до зразка олії, концентрацію розчинених газів можна визначити кількісно. Концентрації та співвідношення окремих газів дозволяють прогнозувати, чи є несправність, який тип несправності, який ступінь небезпеки несправності з погляду подальшої експлуатації (рис. 1.6).

Діагностичні гази: водень (H_2), метан (CH_4), етан (C_2H_6), етилен (C_2H_4), ацетилен (C_2H_2), окис і двоокис вуглецю (CO , CO_2) утворюються в трансформаторному маслі за певних температур. Склад і концентрації газів залежатимуть від конкретного виду дефекту, що розвивається, і ступеня його розвитку. Як видно з рис. 1.6, водень і метан починають виділятися в маслі СТ при температурі масла $150^{\circ}C$.

Протягом майже сорока років АРГ та його інтерпретація були корисним та надійним інструментом для контролю стану маслонаповнених трансформаторів та іншого маслонаповненого електричного обладнання. Однак, ґрунтуючись на традиційних методиках інтерпретації АРГ, дуже складно визначити типи несправностей та інтервали відбору проб олії через різні несправності та інші фактори, що впливають. Крім того, визначення взаємозв'язків між рівнями газу та умовами спаду є складним завданням через складні комбінації діагностичних газів. Було зроблено багато спроб вирішити проблеми інтерпретації АРГ за допомогою кількох нещодавно розроблених методів штучного інтелекту (ІІ), серед яких штучні нейронні мережі (ІНС) є класифікаторами помилок для АРГ, що найбільш широко використовуються. Експертні системи (ЕС) у поєднанні з іншими методами ІІ також були розроблені для АРГ, наприклад, нечіткі множини та еволюційні алгоритми. Ці методи можуть оцінити поточний стан трансформатора, а також запропонувати правильні дії з технічного обслуговування.

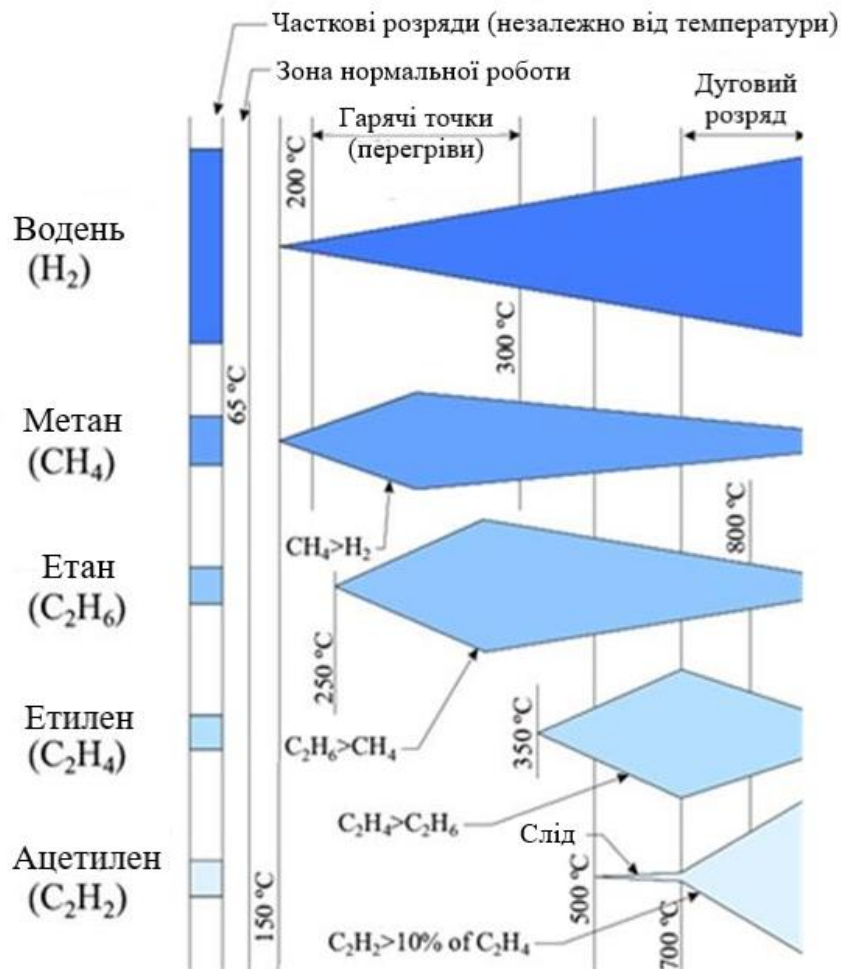


Рисунок 1.6 – Діаграма газоутворення у маслі СТ

Аналіз частотної характеристики (АЧХ)

Нині метод розгортки АЧХ отримав всесвітнє застосування з метою оцінки механічного стану обмоток трансформатора, поступово замінюючи методику низьковольтних імпульсів. Чутливість методу АЧХ досить висока і дозволяє виявляти дефекти деформації обмоток, викликані втратою рівня пресування або електродинамічних зусиль при протіканні по обмотках наскрізних струмів короткого замикання [33]. У промисловій практиці АЧХ є одним із найбільш підходящих інструментів діагностики обмоток, які можуть вказувати на зміщення та деформацію. Він може застосовуватися як спрощений метод, щоб уникнути періодичних і дорогих операцій з розкриття бака трансформатора і проведення дегазації та сушіння трансформаторного масла. Це може мінімізувати вплив на роботу системи та недовипуски електроенергії

споживачам, а отже забезпечити істотну економію витрат через своєчасне обслуговування. Більшість комунальних компаній мають бази даних, що містять історичні дані АЧХ (FRA) для великих силових трансформаторів. Наприклад, великі трансформатори регулярно тестуються з використанням даних АЧХ у діапазоні частот до 10 МГц. При цьому проводиться порівняння частотних характеристик, виміряних під час планового технічного обслуговування з вимірюванням, отриманим на більш ранній стадії експлуатації. АЧХ широко використовується комунальними підприємствами як порівняльний метод у низькочастотному діапазоні від кількох десятків кГц до 1 МГц. Відмінності можуть виявити внутрішні пошкодження трансформатора, тому інспекції можуть бути заплановані для визначення необхідності виведення СТ в ремонт [14]. Однак такий порівняльний метод не може кількісно оцінити зміни, спричинені несправністю, та визначити її місцезнаходження. Отже, необхідно розробити точне моделювання АЧХ та надійний підхід до діагностики несправностей для інтерпретації фізичного сенсу під зміною даних АЧХ, що становить значний промисловий інтерес.

Аналіз часткових розрядів (ЧР)

Електрична ізоляція відіграє у будь-яких високовольтних силових пристроях, особливо у силових трансформаторах. Частковий розряд (ЧР) виникає, коли локальне електричне поле перевищує граничне значення, що призводить до часткового руйнування навколишнього середовища. Його сукупний ефект призводить до погіршення ізоляції. Вимірювання можуть бути зібрані, щоб виявити ці ЧР та контролювати надійність ізоляції протягом терміну служби силового трансформатора. ЧР проявляються у вигляді різких імпульсів струму на клеммах трансформатора, характер яких залежить від типів ізоляції, типу дефектів і вимірювальних ланцюгів і детекторів, що використовуються. Традиційний електричний вимір часткових розрядів полягає у виявленні імпульсів струму часткового розряду за допомогою випробувальної схеми. Однак, враховуючи, що експериментальні дані завжди складаються із

сигналів ЧР, синусоїдальних сигналів та фонового шуму, вилучення корисної інформації із сигналів ЧР є досить складним завданням. Виявлення ЧР може бути виконане різними методами, найчастіше електричними, акустичними, оптичними та хімічними [15].

Існує три типи методів аналізу ЧР, а саме: аналіз часткових розрядів із тимчасовим дозволом, аналіз часткових розрядів на основі спектрів інтенсивності та аналіз часткових розрядів із фазовим дозволом. Через особливі характеристики ЧР традиційні методи цифрової обробки сигналів не підходять для аналізу сигналів ЧР. Інші корисні частотно-часні інструменти, наприклад, перетворення Фур'є та Вейвлет-перетворення можуть бути використані для аналізу ЧР для усунення шумів, виділення характеристик та класифікації даних. Он-лайн моніторинг часткових розрядів для силових трансформаторів був використаний за допомогою імпульсного упорскування через відведення високовольтних ввідів трансформатора. Таким чином, більшість методів, що використовуються для аналізу ЧР, призначені для діагностики сигналів ЧР та отримання корисних імпульсів ЧР, які знаходяться в області розширеної обробки сигналів.

Аналіз вологовмісту

Вміст води в ізоляційних матеріалах збільшує електропровідність та коефіцієнт розсіювання та знижує електричну міцність. Звичайною практикою є вимірювання вмісту води в маслі методом титрування Карла Фішера [16], а потім оцінка вологості у твердій ізоляції за допомогою різних кривих рівноваги [17]. В даний час в літературі повідомляється про декілька методів прямого вимірювання вмісту води. Тонко плівковий ємнісний датчик вологості був випробуваний для визначення вологості в трансформаторному маслі. Цей датчик добре відреагував на наявність олії в трансформаторі в холодних та теплих погодних умовах. Їхні результати показали, що спектроскопія поряд з розробленим багатовимірним моделюванням може призвести до неточної оцінки вологості. Кілька методів діелектричної діагностики, заснованих на

поляризації, також використовуються в даний час для непрямого аналізу вологості бумажно-масляної системи ізоляції.

1.4 Оцінка ефективності методів моніторингу параметрів технічного стану трансформаторного обладнання

Підтримка надійності обладнання, що становить електроенергетичну систему, необхідне підтримки надійності функціонування ЕЕС загалом. Одним із найважливіших компонентів ЕЕС є маслонаповнені СТ. Правильне виконання функцій СТ, таких як регулювання напруги, перетворення електричного струму в магнітне поле, перетворення напруги тощо забезпечує вміст у конструкції СТ функціональних вузлів.

Несправності можуть бути діагностовані та визначені для кожного функціонального вузла СТ з використанням набору методів моніторингу та оцінки технічного стану [18]. Кожен метод діагностики спрямовано виявлення несправностей у конкретному функціональному вузлі. Більшість цих методів діагностики використовуються для СТ у робочих режимах без відключення навантаження та зняття робочої напруги. Крім того існують методи тестової діагностики, які передбачають виведення СТ з роботи, подачу на входи калібруючих тестових сигналів, і вимірювання відгуків при порівнянні їх з еталонами. Система діагностики, яка підтримує такі виміри в off-line режимі, наказує кожному за методу діагностики застосування певних умов і періодичностей. Недоліком off-line методів діагностики є відносно низька інформативність через їхню залежність від тестових сигналів, які мають менше параметрів у порівнянні з робочими параметрами (наприклад, методи вимірювання втрат холостого ходу або опору короткого замикання). Крім того, off-line методи діагностики супроводжуються обмеженнями в електропостачанні споживачів. Існують інші методи діагностики для оцінки технічного стану трансформатора за допомогою on-line системи. До таких методів слід віднести, наприклад, тепловійний контроль (ТБК), аналіз

розчинених у маслі газів (АРГ), фізико-хімічний аналіз олії (ФХА), віброконтроль (ВК), контроль часткових розрядів (ЧР) [19].

Метод АРГ вважається одним із найефективніших і надійних методів з показником понад 70% у ранньому виявленні відхилень та несправностей в активних частинах та олії для СТ 35 кВ та вище [10-12]. Серед переваг методу АРГ – можливість використання як у системах on-line, і off-line моніторингу. Однією з технологій, орієнтованої підвищення експлуатаційної надійності маслонаполненого трансформаторного устаткування району електричної мережі, є використання систем віддаленого (дистанційного) моніторингу і діагностики (СУМіД) [13-15]. Оцінка технічного стану та оцінка вартості експлуатаційних впливів електричного обладнання здійснюється шляхом збору, передачі та обробки даних про параметри для кожної підстанції, і це є принципом роботи СУМіД. Основними функціями СУМіД є:

1. Моніторинг основного обладнання (оцінка залишкового ресурсу, раннє виявлення дефектів у СТ, прогнозування ймовірності аварійних подій, відмов);

2. Можливість віддаленого вимкнення обладнання або зміни параметрів та дистанційне керування основним обладнанням.

За допомогою СУМіД оцінюється економічний експлуатаційний вплив компонентів мережі на додаток до оцінки ефективності кожного методу діагностики. Ефективність СУМіД визначається змістом інформації для методів діагностики та моніторингу електрообладнання.

1.4.1 Моделювання ймовірності відмови силового маслонаповненого трансформатора з урахуванням його технічного стану

Неправильна експлуатація трансформаторного обладнання та неправильне його обслуговування можуть призвести до несправності. Відмова СТ є складною випадковою подією, яка станеться при відмові будь-якого з функціональних вузлів (рис. 1.7).

У свою чергу відмова функціонального вузла може статися, наприклад, через помилки в діагностиці та/або через високу швидкість розвитку дефекту. На малюнку 1.7 використано скорочення: СРН – система регулювання напруги, СО – система охолодження, МС – магнітна система, ОБМ – обмотки, ВР – високовольтні вводи, ІВ – ізоляційна система.



Рисунок 1.7 – Події, які призводять до відмови СТ

Функціональні вузли пов'язані один з одним послідовно у структурно-логічній схемі розрахунку надійності СТ. У цьому випадку ймовірність відмови

СМТ $Q_{\text{СМТ}}$ визначається на основі теореми множення ймовірностей за формулою (1.6):

$$Q_{\text{СМТ}} = 1 - \prod_{i=1}^n 1 - Q_i, \quad (1.6)$$

де n та Q_i кількість, і можливість відмови i -го функціонального вузла СТ.

Основною перешкодою є виконання статистичних розрахунків для кожного функціонального вузла СТ з використанням ретроспективних даних про настання аварійних подій для визначення Q_i . Значення $\bar{\omega}_0$ середньої інтенсивності відмов для СТ конкретного класу номінальної напруги є цілком доступною і надійною інформацією [46]. Згідно з методикою оцінки індексу технічного стану [47], важливість кожного функціонального вузла визначається значеннями вагових коефіцієнтів $B_i, i = \overline{1, n}$ для цих вузлів.

При практичному застосуванні діагностики СТ кожному функціональному вузлу призначається набір параметрів діагностики та моніторингу. Ваговий коефіцієнт j -ої групи контрольованих параметрів i -го функціонального вузла $(b_{ij}, j = \overline{1, m}; i = \overline{1, n})$ характеризує його важливість з погляду надійності останнього. У цьому сума b_{ij} дорівнює 1.

У таблиці 1.1 наведено комбінації параметрів стану кожного функціонального вузла, їх методи діагностики та відповідні значення вагових параметрів.

Група несумісних випадкових подій може статися через ймовірність виникнення складної події. Імовірність виникнення складної події розраховується за допомогою рівняння (1.7):

$$Q_{\text{СМТ}} = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n (1 - e^{-\bar{\omega}_0 \cdot B_i \cdot t}) \quad (1.7)$$

Модель відмови (1.7) не враховує індивідуальні особливості старіння функціональних вузлів у СТ та дійсна лише на період їх нормальної експлуатації. Якщо необхідно виділити СТ групи за терміном служби (що

залишився ресурсу), то бажано використовувати складнішу модель відмови, наприклад, отриману [18].

Відповідно до рівняння (1.7) розраховуються ймовірності відмови функціональних вузлів та вагові коефіцієнти для кожного функціонального вузла. Результати для СТ 110 кВ за значення $\bar{\omega}_0 = 0,015$ (рік⁻¹) наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.1 – комбінації параметрів стану функціональних вузлів та значення їх вагових коефіцієнтів

№ п.п.	Функціона- льний вузол	Група контрольованих параметрів	Ваговий коэф-нт, b_{ij}
1	ІС	1) аналіз розчинених газів 2) фізико-хімічний аналіз 3) стан целюлози 4) відношення концентрацій пар характерних газів	0,425 0,425 0,140 0,010
2	МС	1) локальне нагрівання бака за результатами ТВК 2) втрати холостого ходу ΔP_x	0,500 0,500
3	Обм	1) стан геометрії обмоток 2) тенденції зміни $tg\delta_{цел.}, R_{60}$ (у порівнянні з початковим) 3) R постійному струму обмоток ВН, ПН	0,010 0,500 0,490
4	ВВ	1) стан ізоляції 2) аналіз розчинених газів 3) фізико-хімічний аналіз 4) цілісність конструкції	0,250 0,250 0,250 0,250

5	РПН	1) стан масла: пробивна напруга, $W_{\text{масла}}$ 2) стан контактора та механізмів приводу	0,334 0,666
6	СО	1) стан навісного обладнання та бака 2) стан захисного обладнання	0,500 0,500

Найбільша ймовірність відмови може виникнути у системі ізоляції СТ, як показано в таблиці 1.2, що узгоджується з даними багатьох досліджень та джерел.

Таблиця 1.2 - Значення та функціональних вузлів СТ

№ п.п.	Функціональний вузол	$B_i, o. e.$	$Q_i, o. e.$
1	ІС	0,32	0,0048
2	МС	0,18	0,0027
3	Обм	0,18	0,0027
4	ВВ	0,13	0,0019
5	РПН	0,10	0,0015
6	СО	0,09	0,0013
РАЗОМ		1,00	0,0149

Внаслідок адекватних ремонтних впливів виявлені відхилення усунуто за рахунок своєчасних методів діагностики та моніторингу. Зважаючи на те, що ймовірність відмови для кожного функціонального вузла СТ, згаданого в таблиці 1.2, збільшуватиметься за відсутності способу моніторингу та діагностики параметрів функціонального вузла СТ у складі програмно-апаратного комплексу СУМіД.

1.4.2 Критерій оцінки інформативності діагностичного моніторингу силових маслонаповнених трансформаторів із застосуванням аналізу розчинених газів

Розглянемо два протилежні випадки, щоб оцінити ефективність систем моніторингу та діагностики СТ за допомогою методу АРГ. У першому випадку використовуються методи діагностики та моніторингу, зазначені в таблиці 1.1, у програмно-апаратний комплекс СУМіД об'єктів розподільчої електричної мережі. У другому випадку метод АРГ не використовується у програмно-апаратний комплекс СУМіД об'єктів розподільчої електричної мережі.

Звертаючись до таблиці 1.1, можна помітити, що метод АРГ використовується як метод діагностики (моніторингу) параметрів двох функціональних вузлів, а саме ІС та ВР. Метод АРГ сприяє зниженню ймовірності відмови перерахованих функціональних вузлів, а також ймовірності відмови СТ 110 кВ загалом за рахунок виявлення дефектів на ранній стадії розвитку з подальшим усуненням.

Вагові коефіцієнти використовуються при розрахунках індексу технічного стану (ІТС) одиниці обладнання та функціональних вузлів. Параметри моніторингу функціональних вузлів розташовані в порядку їхньої відносної важливості. Значення D є кількісною мірою діагностичної цінності методу моніторингу параметрів при розрахунку ІТС об'єкта, в даному випадку СТ.

Використовуючи співвідношення вагових коефіцієнтів B_i та b_{ij} за виразом (1.8), можна отримати кількісну оцінку $D\%$. Для розрахунку ІТС використовується рівняння (1.8), у якому значення D виходить у відсотках. Усі параметри моніторингу стану функціональних вузлів СМТ слід використовувати спільно.

При відсутності інформації про параметри моніторингу стан будь-якого j -го функціонального вузла, значення $b_{ij} = 0$, а $D > 100\%$. Тоді

$$D = 100 \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{B_i}{\sum_{j=1}^m b_{ij}} \right), \% \quad (1.9)$$

збільшення кількісної оцінки інформативності методу моніторингу функціонального вузла виходить наступним чином: $\Delta D = D - 100, \%$.

Що стосується моніторингу СТ за методом АРГ, то у разі підстановки значень b_{ij} з таблиць 1.1 та 1.2 у формулу (1.8) отримуємо $\Delta D = 27,32\%$. Це означає, що якщо метод АРГ не використовується в наборі методів моніторингу параметрів стану СТ, сумарна діагностична цінність комплексу методів моніторингу, що використовуються, зменшиться на 27,3%. Цим, у свою чергу, буде викликано збільшення ймовірності відмови функціональних вузлів, за які відповідає АРГ. У цьому збільшення ймовірність відмови СТ загалом за відсутності в СУМид СТ даних АРГ становитиме $Q'_{\text{снт}} = 0,0149 \cdot 1,2732 = 0,01897$. Використовуючи рівняння (1.8), отримуємо Q'_i ймовірності відмови функціональних вузлів за відсутності АРГ, як показано у таблиці 1.3. Технічний ефект від використання даних АРГ у СУМид, представлений зменшенням ймовірності відмови функціональних вузлів ІВ та ВР СТ 110 кВ становить:

$$\Delta Q = Q_{\text{снт}} - Q'_{\text{снт}} = Q_{\text{снт}} \cdot \frac{\Delta D}{100} = 0,0188 - 0,0149 = 0,0039$$

Таблиця 1.3 – Значення ймовірностей Q'_i без застосування методу АРГ

Функціональний вузол	ІС	МС	ОБМ	ВВ	СРН	СО
Q'_i	0,00602	0,00338	0,00338	0,00244	0,00188	0,00169

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

1. Використання сучасних методів прогнозування при моніторингу та діагностиці технічного стану трансформаторів компенсує недоліки традиційних методів АРГ та покращує здатність систем точно та надійно діагностувати несправності. У розділі проведено аналіз основних методів та додатків штучного інтелекту, які використовуються для діагностики СТ. Використання програм штучного інтелекту є неминучим і майбутнім вибором для розробки систем діагностики та моніторингу, заснованих на методі АРГ.

2. Маслонаповнений силовий трансформатор складається із сукупності функціональних вузлів (структурних елементів), які виконують різні функції та забезпечують його застосування за призначенням. Силові трансформатори є основним обладнанням електростанцій і електромережових підстанцій, які надійна робота, зрештою, визначає надійне функціонування ЕЕС. Забезпечення безпеки та надійності трансформатора означає забезпечення безперервної роботи передачі та розподілу електроенергії з високою надійністю, кращою якістю та достатньою економічністю.

3. Основна мета моніторингу та діагностики технічного стану СТ – мати набір можливостей для відстеження відхилень експлуатаційних станів трансформаторів та їх прогнозування, щоб ухвалити обґрунтоване рішення до того, як відбудеться відмова. Моніторинг та діагностика технічного стану трансформаторів – потужний, надійний та ефективний інструмент для захисту дорогого та складного обладнання, такого як СТ. У розділі 1.3 пояснюється багато різних методів моніторингу та діагностики технічного стану трансформаторів на основі різних параметрів технічного стану.

4. Необхідність оцінки індексу технічного стану (ІТС) СТ в умовах експлуатації із застосуванням системи вагових коефіцієнтів груп контрольованих параметрів та функціональних вузлів обладнання зажадала зіставити застосовувані методи діагностичного моніторингу щодо їх

діагностичної цінності та внеску в оцінку надійності. Розроблено ефективний кількісний показник, який характеризує міру діагностичної цінності будь-якого з методів діагностичного моніторингу СТ, які застосовуються для розрахунку ІТС. Ідея полягає в тому, що повна відсутність даних за будь-яким з методів моніторингу параметрів стану СТ при розрахунку ІТС призведе до завищеної його оцінки і, відповідно, не обґрунтованого рішення про відмову від коригуючого впливу. Це, у свою чергу, може викликати підвищення ймовірності відмови СТ пропорційно величині зазначеного показника та збільшить витрати на найближчому інтервалі його експлуатації.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ ДЛЯ РОЗРОБКИ ПРЕДИКТИВНИХ І АДАПТИВНИХ МОДЕЛІВ ОЦІНКИ СТАНУ ТРАНСФОРМАТОРІВ

2.1 Моделі та алгоритми предиктивної діагностики та оцінки технічного стану трансформаторів із застосуванням методів машинного навчання

Машинне навчання є область штучного інтелекту, яка займається проектуванням і розробкою алгоритмів і методів, які дозволяють комп'ютерам мати властивість «навчання» [15, 16]. Термін «машинне навчання» вперше використав у 1959 році Артур Семюел. У 1960-х роках машинне навчання переважно використовувало класифікацію об'єктів. Загалом, існує два рівні навчання: індуктивний та дедуктивний. Індуктивне виведення загальних правил і суджень із великих даних. Основне завдання машинного навчання – отримання цінної інформації з даних, тому воно дуже близьке до інтелектуального аналізу даних, статистики та теоретичної інформатики. Машинне навчання використовується у багатьох галузях знань – від інженерії до медицини.

Алгоритми машинного навчання поділяються на кілька типів:

- контрольоване навчання – один із найпопулярніших типів машинного навчання, заснований на наявності даних та їх правильних аналогів під час навчання, тому ці дані є реальними прикладами, на яких модель може навчатися;
- напівконтрольоване навчання – існують дані з правильними аналогами, але вони обмежені чи неповні;
- навчання без вчителя – навчання, яке є результатом присутності даних без їх правильних аналогів. Кластеризація – один із найпопулярніших типів навчання без вчителя;

– навчання з підкріпленням – один із типів навчання без вчителя, при якому машина взаємодіє з навколишнім середовищем та формує свій досвід на основі цієї взаємодії. Навчання з підкріпленням вважається одним із найбільш перспективних типів навчання, яке може відіграти значну роль у вирішенні складних проблем у майбутньому.

Методи машинного навчання:

– **штучні нейронні мережі (ІНС).**

Штучні нейронні мережі – це розподілений процесор з масовим паралелізмом, як показано на рис. 2.1, що має природну тенденцію набувати достатніх експериментальних знань і робити їх доступними для використання [17]. Подібно до біологічної нейронної системи, ІНС – це обчислювальна система з великою кількістю одночасно працюючих простих процесів з безліччю зв'язків між вузлами. ІНС передає організаційні принципи, властиві людському мозку, з метою набуття здібностей до навчання та покращення його продуктивності.

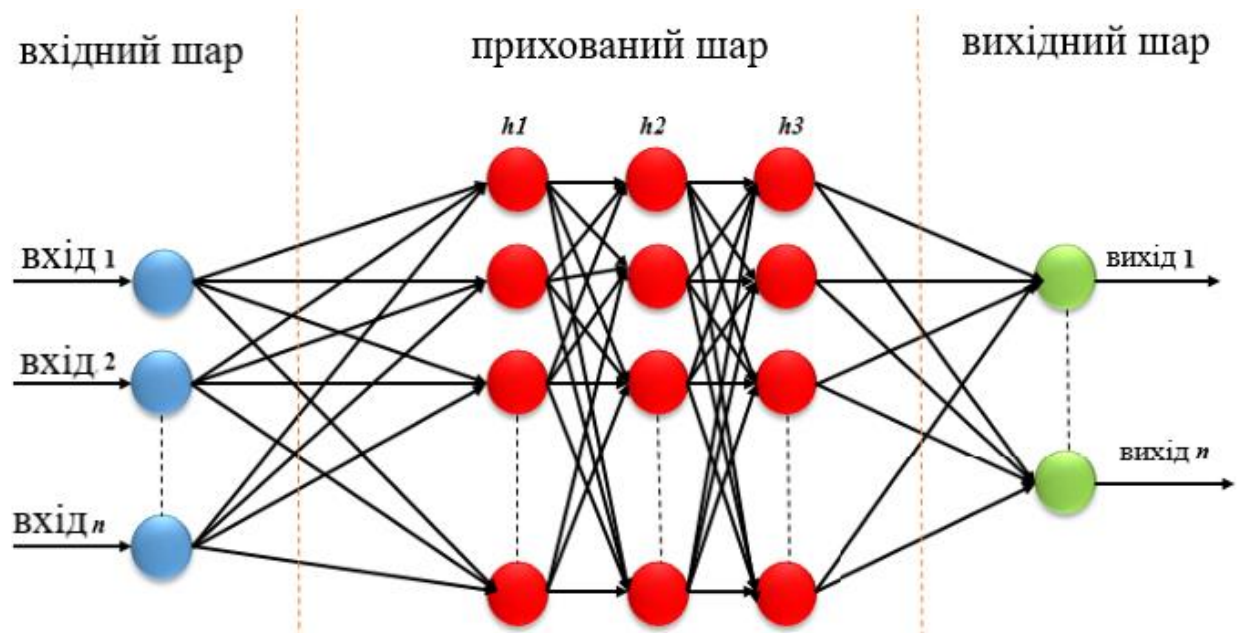


Рисунок 2.1 – Загальний вид архітектури багатошарової ІНС

Процес навчання для ІНС розглядається як ітеративне коригування мережевої архітектури та ваги для отримання бажаних вихідних даних для

даного набору навчальних вибірок, що передаються як вхідні дані. Властивість самонавчання робить ІНС привабливішими порівняно з іншими системами, які суворо відповідають заздалегідь визначеним правилам роботи, сформульованим експертами.

Було визнано [17], що однією з найбільш широко використовуваних архітектур ІНС для завдань класифікації та розпізнавання образів (у тому числі і в галузі технічної діагностики) є багат шаровий персептрон із зворотним розповсюдженням. Тришарова структура персептрона з вхідним, прихованим та вихідним шарами використовується як класифікатор для класифікації дефектів маслонаповненого трансформаторного обладнання [58]. Кожна модель нейрона прихованого шару може мати функцію активації гіперболічного тангенсу, тоді як функція логістичної активації використовується моделей вихідного шару.

– методи теорії нечітких множин та нечіткої логіки.

Нечітке моделювання надає ефективні методи та засоби опису та вивчення складних технічних систем у таких випадках:

- 1) недостатні або невизначені знання про досліджуваний об'єкт;
- 2) адекватна обробка невизначеної та неточної вхідної інформації про об'єкт;
- 3) «прозоре» моделювання та ідентифікація складних динамічних систем на основі вимірювань їх вхідних та вихідних параметрів.

Нечіткі моделі за наявності навчальної вибірки дозволяють апроксимувати функції або виміряні дані з будь-якою необхідною точністю і в цьому сенсі дозволяють віднести їх до універсальних апроксиматорів [19, 20]. Нечіткі моделі в порівнянні з моделями ІНС мають незаперечну перевагу, яка полягає в їхній більшій прозорості завдяки лінгвістичній інтерпретації у вигляді нечітких продукційних правил [11]. До недоліків нечітких моделей, які не обмежують їх широкого практичного застосування, слід віднести:

1) суттєву залежність правильного результату нечіткого моделювання від точності експертних знань у предметній галузі. Концепція нечіткої логіки полягає у переведенні експертних знань на набір зрозумілих для машини правил. На відміну від інших методів штучного інтелекту, таких як нейронні мережі, проблема вирішується через навчання. Чітко певна база знань необхідна нечіткою логікою на вирішення будь-яких проблем. Отже, процес здобуття знань має вирішальне значення, оскільки нечітка система залежить від експертних знань у предметній галузі. Якщо експерти в предметній галузі нададуть неправильну інформацію, система може не працювати належним чином;

2) критичність нечіткого управління недостатністю інформації;

3) відсутність стандартів на проектування нечітких систем та розробку нечітких моделей, які б дозволили підвищити якість результатів та скоротити тимчасові витрати на розробку. Більшість дослідників використовують евристичний підхід у розробці практичних додатків нечіткої логіки. Частково ці обставини спонукали до появи цілого напрямку створення уніфікованих процедур, правил та інструментів для проектування нечітких систем на програмній платформі MATLAB [12–14].

– Характеристика нечіткої логічної системи управління.

Система управління нечіткою логікою переважно складається з чотирьох ключових елементів, до яких відносять блок фазифікації, механізм нечіткого виведення, нечітку базу знань та блок дефазифікації. Типова архітектура системи управління з нечіткою логікою показано рис. 2.2. Вхідні значення моделі зазвичай є чіткими. Тому операції фазифікації і дефазифікації необхідні перетворення цих значень на нечіткі аналоги, використовувані усередині самої системи управління нечіткою логікою, і навіть їм перетворення у чітке значення. Результатом блоку дефазифікації може бути дія з управління певним об'єктом або рішення, засноване на знаннях особи, яка приймає рішення, у нечіткій системі підтримки прийняття рішень.

Таким чином, діагностична експертна система управління станом СТ з нечіткою логікою на основі АРГ міститиме три послідовні процеси: фазифікацію, нечіткий висновок та дефазифікацію. Фазифікація перетворює чітке співвідношення діагностичних газів на нечітке входне членство. Вибрана система нечіткого висновку відповідає за висновок з урахуванням заснованого на знаннях набору нечітких правил лінгвістичного затвердження (IF-THEN). Потім дефазифікація перетворює нечіткі вихідні значення назад у чіткі вихідні дії [10].



Рисунок 2.2 – Архітектура системи управління з нечіткою логікою

– процес фазифікації.

Фазифікація - це процес відображення входних даних, що спостерігаються, в нечіткі множини. У процесі управління дані, що спостерігаються зазвичай знаходяться в чіткому наборі, і потрібна фазифікація, щоб зіставити спостерігається діапазон чітких входних даних з відповідними нечіткими значеннями для входних змінних системи. Зіставлені дані далі перетворюються на відповідні лінгвістичні терміни як мітки нечіткого набору, визначеного для системних входних змінних. Коли змінна класифікується за допомогою функції власності, очікуваним результатом є рівень власності. Цей процес класифікації змінної з використанням функції власності та ступеня власності називається фазифікацією [14, 15].

– нечітка база знань.

Нечітка база знань, як правило, складається з групи нечітких правил, які витягуються з експертів. Немає жодних формальних стандартів, які слід дотримуватися при побудові нечітких правил. У більшості програм інженерного контролю нечіткі правила виражаються в стилі «IF-THEN». Наприклад, «ЯКЩО» x дорівнює A , «ТО» y – B . База правил складається з набору нечітких правил управління, заснованих на цілі управління та політиці управління. Правила нечіткого управління здатні вивести належну керуючу дію для будь-якого входу до універсалу дискурсу [15].

– система нечіткого висновку.

Незважаючи на те, що нечіткі правила здаються суворо визначеними, прикордонні випадки із співвідношенням діагностичних газів (у разі діагностичної моделі на базі АРГ) на лінії між кодами 0, 1, 2 або поруч із нею дозволяють системі нечіткого виведення гнучко інтерпретувати належність до цих правил та класифікувати зазначені випадки за двома різними типами несправностей з індивідуальною ймовірністю появи, прикріпленої до кожного типу. Існують різні типи, в яких вхідні значення, що спостерігаються, можуть використовуватися для визначення найбільш підходящих правил. Найбільш відомими з них є метод імплікації Мах-Мін Мамдані та метод імплікації Мах-Product Ларсена [13, 16, 17].

– процес дефазифікації.

Дефазифікація використовується для перетворення нечіткої лінгвістичної змінної на реальну чітку змінну. Це процес відображення простору передбачуваних нечітких впливів керуючих в простір чітких управляючих впливів. Стратегія дефазифікації спрямована на створення чіткого керуючого впливу, який найкраще представляє розподіл ймовірностей передбачуваного нечіткого керуючого впливу [14].

Розглянуті методи та правила нечіткої логіки знайдуть застосування у наступних розділах цієї глави. Дослідження будуть присвячені можливостям розробки та верифікації, нечітких предикативних моделей для визначення

типу дефектів в маслонаповненому трансформаторному устаткуванні на основі відомих методів інтерпретації результатів АРГ.

2.2 Розробка нечітких предикативних моделей інтерпретації результатів аналізу розчинених газів трансформаторів у програмному середовищі проектування

Методи інтерпретації результатів АРГ СТ на основі співвідношень концентрацій характерних газів в маслі, такі як метод відносин Дорненбурга, метод трикутника Дюваля та ін. є на сьогодні основними інструментами діагностичного аналізу типів несправностей обладнання та входять до низки міжнародних та національних стандартів за АРГ [10, 19].

Дослідження минулих років та нещодавні розробки підбивають підсумок порівняння різних методів інтерпретації результатів АРГ у маслі СТ та підкреслюють актуальність переходу в практиці діагностування типу дефектів по АРГ від моделей, заснованих на професійних думках окремих експертів до цифрових предикативних моделей на основі методів штучного інтелекту та машин.

Метою розділу є об'єднання трьох найбільш відомих та ефективних методів інтерпретації типу несправностей трансформаторного обладнання за даними АРГ на основі апарату нечіткої логіки та нечіткого логічного висновку, розробка нечітких предикативних моделей діагностичної оцінки, а також верифікація отриманого інструментарію на основі взаємного порівняння та результатів) оцінок. Однією з значних переваг розроблених автором нечітких предикативних моделей визначення типу несправностей у СТ є програмна реалізація на єдиній цифровій платформі. Це дозволяє відтворювати діагностичні оцінки з різних моделей з єдиним рівнем достовірності при варіації вихідних даних.

– *Нечітка модель прогнозування типу дефектів у СТ методом ІЕС.*

Метод ІЕС використовується протягом тривалого періоду часу, що призвело до накопичення великого експертного досвіду в різних країнах для діагностики несправностей у маслonaповнених силових трансформаторах. Таблиці 2.1 та 2.2 ілюструють правила інтерпретації АРГ за методом ІЕС.

Таблиця 2.1 – Коди відносин за методом ІЕС

Відношення 1 (O1) C2H2/C2H4	Відношення 2 (O2) CH4/H2	Відношення 3 (O3) C2H4/C2H6
$O1 < 0,1 = A1$	$O2 < 0,1 = A2$	$O3 < 1 = A3$
$0,1 \leq O1 \leq 3 = B1$	$0,1 \leq O2 \leq 1 = B2$	$1 \leq O3 \leq 3 = B3$
$O1 > 3 = C1$	$O2 > 1 = C2$	$O3 > 3 = C3$

Таблиця 2.2 – Класифікація несправностей у СТ на основі кодів ІЕС

N	O1	O2	O3	Характерна несправність
1	A1	B2	A3	Нормальне старіння
2	A1	B2	A3	Частковий розряд низької щільності енергії
3	B1	A2	B3	Частковий розряд високої щільності енергії
4	B1	B2	B3	Розряди низької енергії (безперервне іскріння)
5	C1	B2	B3	Розряди низької енергії (безперервне іскріння)
6	C1	B2	C3	Розряди низької енергії (безперервне іскріння)
7	B1	B2	C3	Розряд високої енергії (дуга)
8	B1	C2	C3	Розряд високої енергії (дуга)

9	B1	C2	A3	Розряд високої енергії (дуга)
10	A1	B2	B3	Теплова несправність < 150 ° С
11	A1	C2	A3	Теплова несправність 150 - 300 ° С
12	A1	C2	B3	Теплова несправність 300 - 700 ° С
13	A1	C2	C3	Теплова несправність > 700°С

Система нечіткої логіки ІЕС, як впливає з табл.2.1 включає 3 діагностичні коди як вхідні змінні. Лінгвістичні змінні за значеннями класифікуються на чотири зони: Нормальна (N), Низька (A), Середня (B) або Висока (C) відповідно до інтервалів приналежності, як визначено нижче:

1. $O1 = C2H2/C2H4 = (N1, A1, B1, C1)$
2. $O2 = CH4/H2 = (N2, A2, B2, C2)$
3. $O3 = C2H4/C2H6 = (N3, A3, B3, C3)$

Функції приладдя для вхідних змінних, отриманих за допомогою інструмента нечіткої логіки, показано на рис. 2.3 – 2.5.

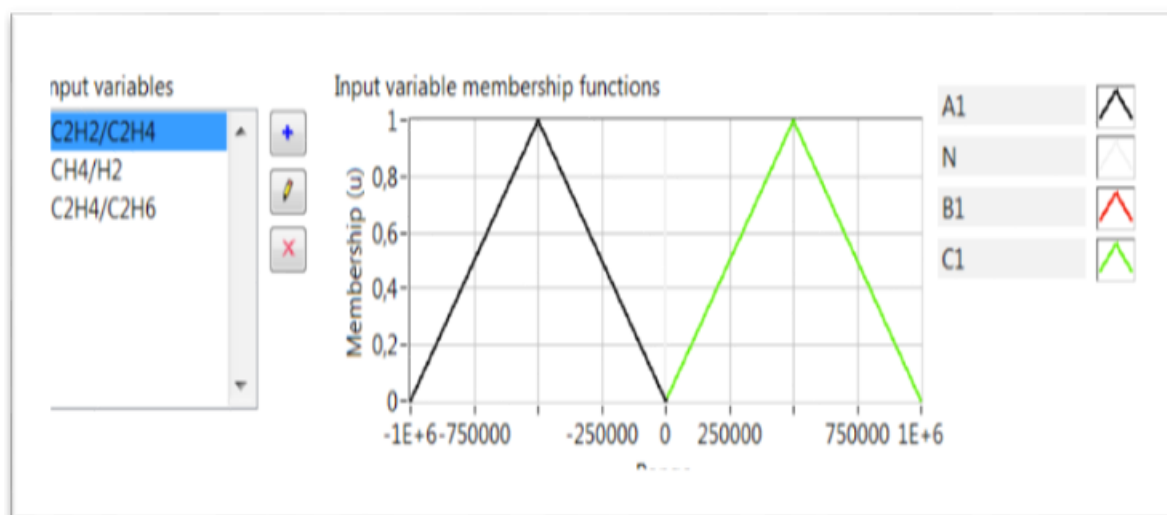


Рисунок 2.3 – Функція приналежності вхідної змінної O1

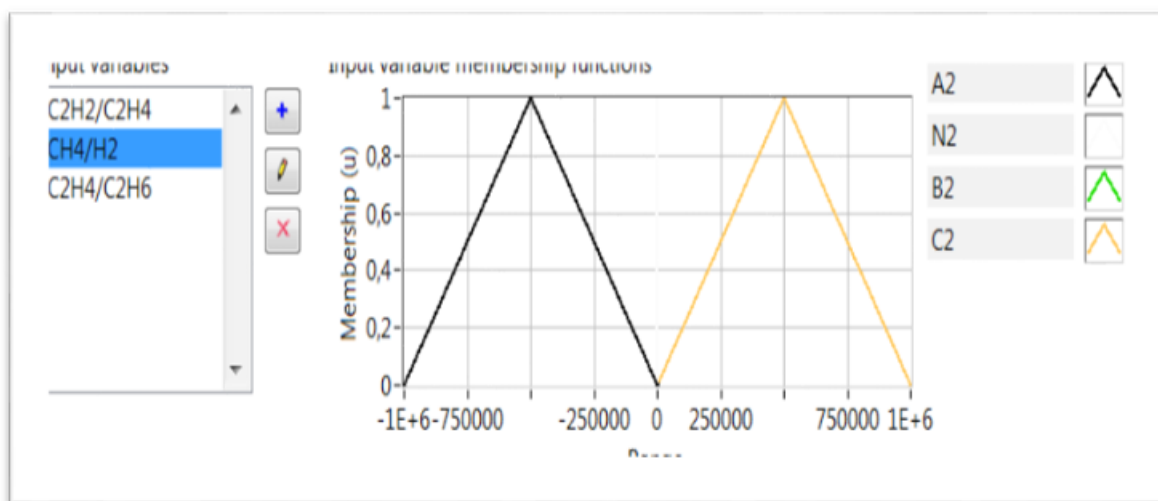


Рисунок 2.4 – Функція приладдя вхідної змінної O2

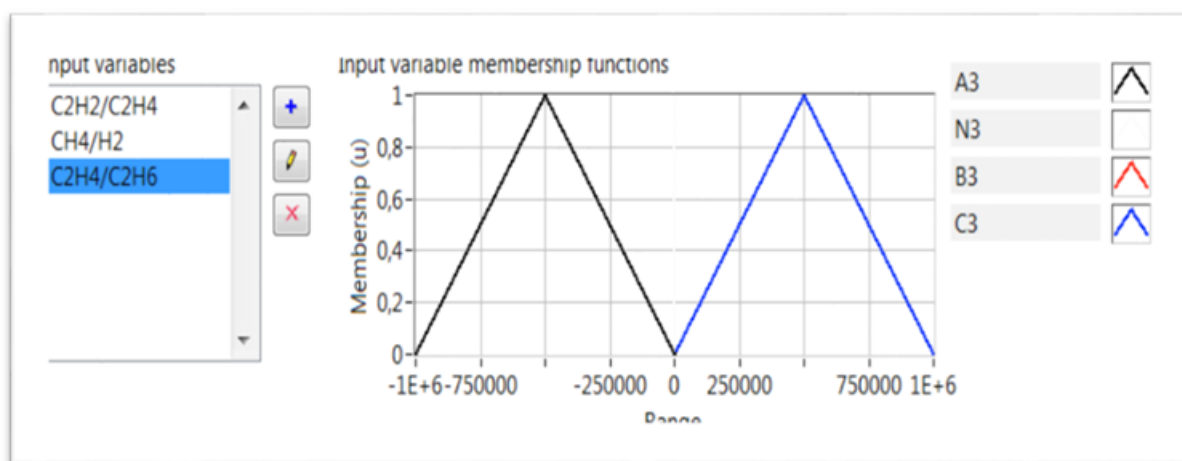


Рисунок 2.5 – Функція приладдя вхідної змінної O3

На рис. 2.6 показано, як формувати нечіткі виходи, що є можливими дефектами трансформатора, зазначені в таблиці 2.2, відповідно до інтерпретації за методом ІЕС.

У разі нечіткий висновок і двох компонентів: антецедента (IF) і слідства (THEN). На рис. 2.7 показані приклади правила нечіткого висновку, що ґрунтуються на інтерпретаціях дефектів СТ.

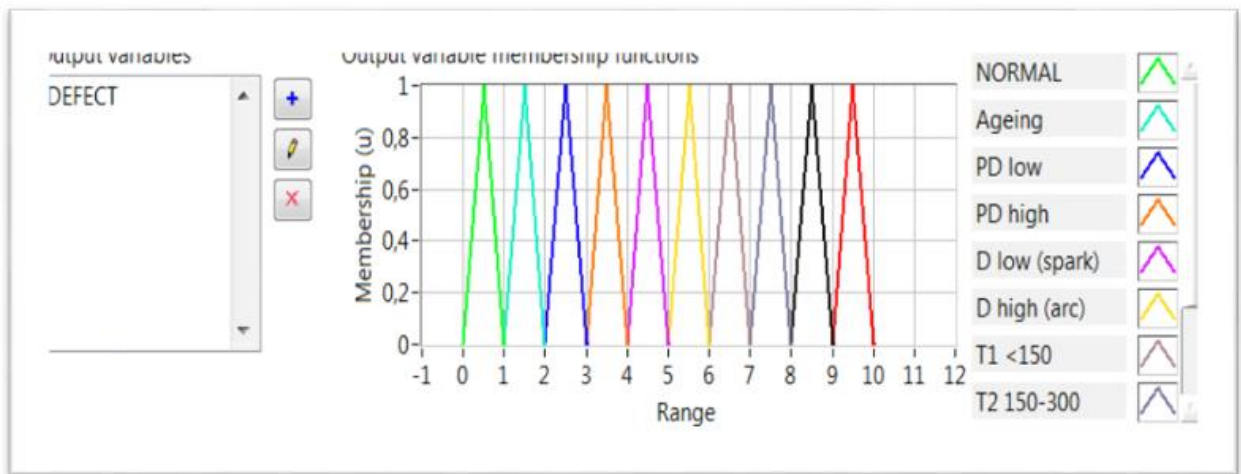


Рисунок 2.6 – Функції належності вихідної змінної типу дефектів

Результат нечіткого висновку можна отримати з використанням техніки композиції Мах–Мін Мамдані [13]. Тут логічне «AND» замінюється оператором мінімізації, а логічне «OR» – оператором максимізації. Розроблений набір нечітких правил пов'язує вхідні та вихідні змінні для методу інтерпретації ІЕС та показаний на тривимірних поверхневих графіках (рис. 2.8).

Рисунок 2.7 – Приклади правил нечіткого логічного висновку

Спеціальну програму нечіткого моделювання було розроблено автором із застосуванням середовища програмування LabVIEW 2018 для

прикладних завдань діагностування стану СТ за методом ІЕС. На рис. 2.9 показаний інтерфейс програми, але в рис. 2.10 алгоритм її роботи.

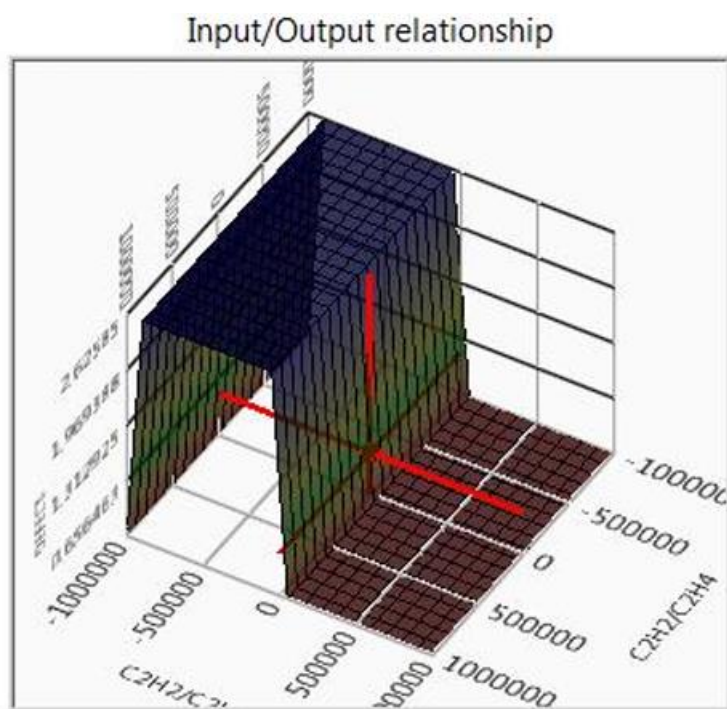


Рисунок 2.8 – Поверхневі графіки для методу ІЕС

The screenshot shows the "Метод ІЕС" (IES Method) software interface. It has a blue header bar with the title "Метод ІЕС". Below the header, there are two main panels. The left panel, titled "путь к файлу НЛ" (Path to NL file), contains a text field with the path "C:\Users\Ammar\" and a list of gas ratios: H2 (34), CH4 (147,9), C2H2 (4,5), C2H4 (397,5), C2H6 (55,9). The right panel, titled "Код дефекта" (Defect code), contains a text field with the value "9,52381" and a grid of buttons for selecting defect types. The buttons are arranged in two columns: "НР низкий" (Low N2), "НР высокий" (High N2), "D1 Искра" (Spark), "D2 дуга" (Arc), "T1", "T2", "T3", and "T4". The "T4" button is highlighted in red. To the right of the grid, there is a text box labeled "Тип дефекта" (Defect type) containing the text "Тепловая неисправность > 700°C".

Рисунок 2.9 – робочий інтерфейс програми, що реалізує нечітку модель прогнозування дефектів СТ за методом ІЕС

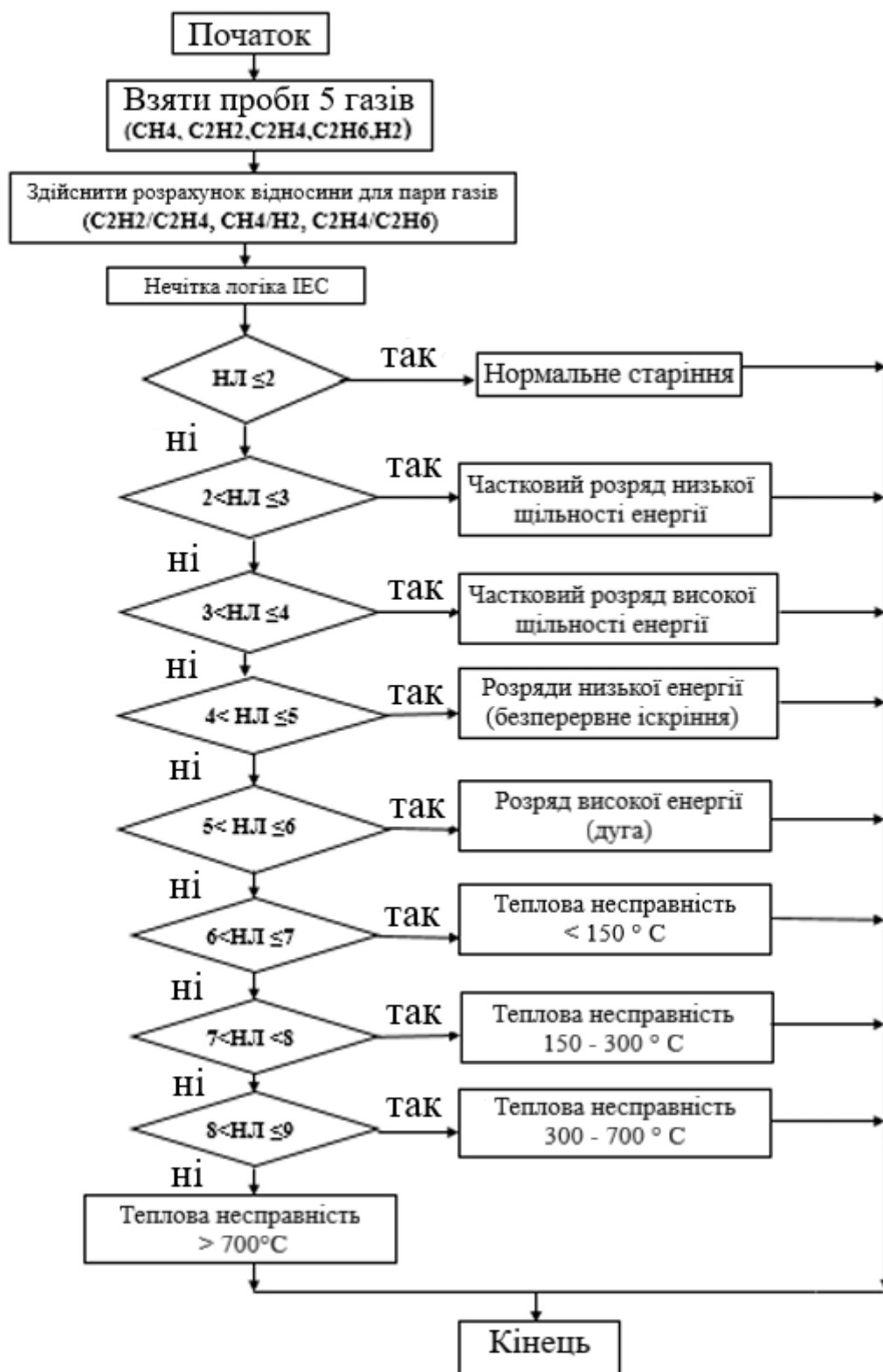


Рисунок 2.10 – Алгоритм програми нечіткого прогнозування дефектів СТ за методом ІЕС

– Нечітка модель прогнозування дефектів СТ методом Дорненбурга.

У цьому методі інтерпретації результатів АРГ сформульовано наступний підхід: спочатку вимірюються розчинені гази в маслі СТ, потім використовується метод ключового газу. Якщо гази знаходяться в допустимих межах, стан СТ буде оцінено як «норму».

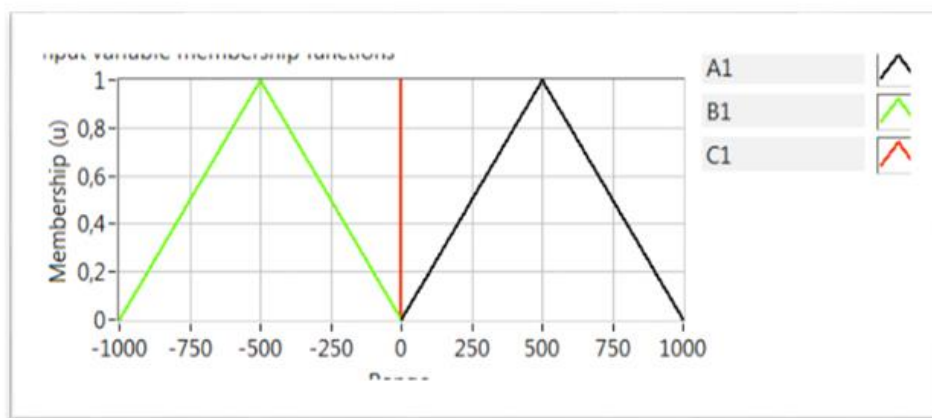
Якщо якийсь із ключових газів перевищує допустиме значення, це вказує на стан прогнозованого дефекту «відхилення від норми», і, відповідно, розраховуються чотири відносини для застосування методу інтерпретації Дорненбурга. Вхідні співвідношення класифікуються, як показано у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Коди відносин Дорненбурга

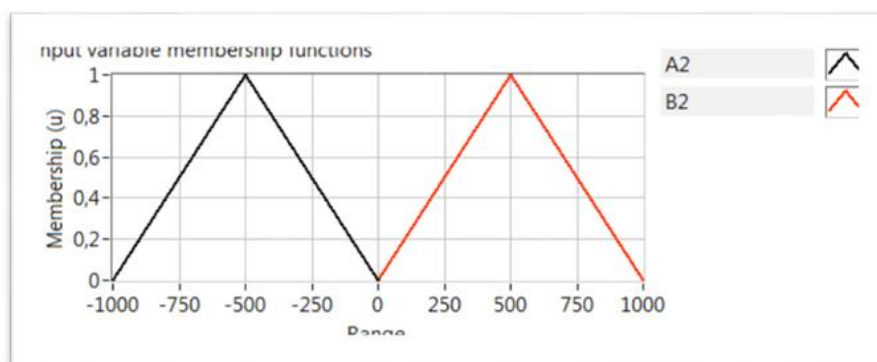
Відношення (O1) CH ₄ /H ₂	Відношення (O2) C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	Відношення (O3) C ₂ H ₂ /CH ₄	Відношення (O4) C ₂ H ₆ /C ₂ H ₂
$O1 > 1 = A1$	$O2 < 0,75 = A2$	$O3 < 0,3 = A3$	$O4 > 0,4 = A4$
$O1 < 0,1 = B1$	$O2 > 0,75 = B2$	$O3 > 0,3 = B3$	$O4 < 0,4 = B4$
$0,1 < O1 < 1 = C1$			

У таблиці 2.4 показані типи дефектів СТ та їх коди в інтерпретації Дорненбурга для подальшого використання під час створення нечіткої логічної системи.

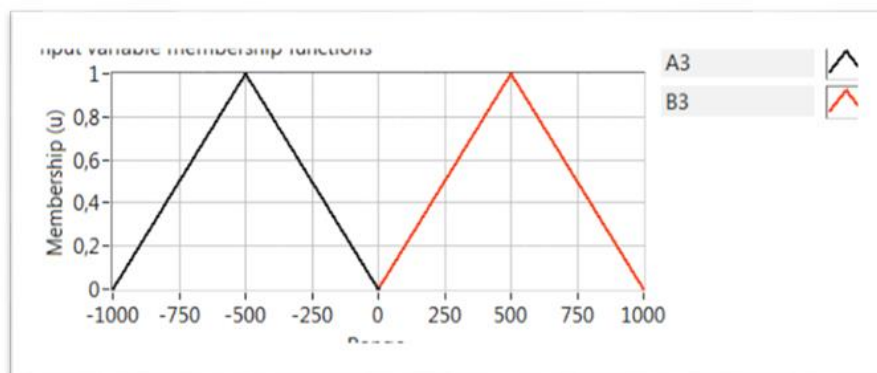
a



b



c



d

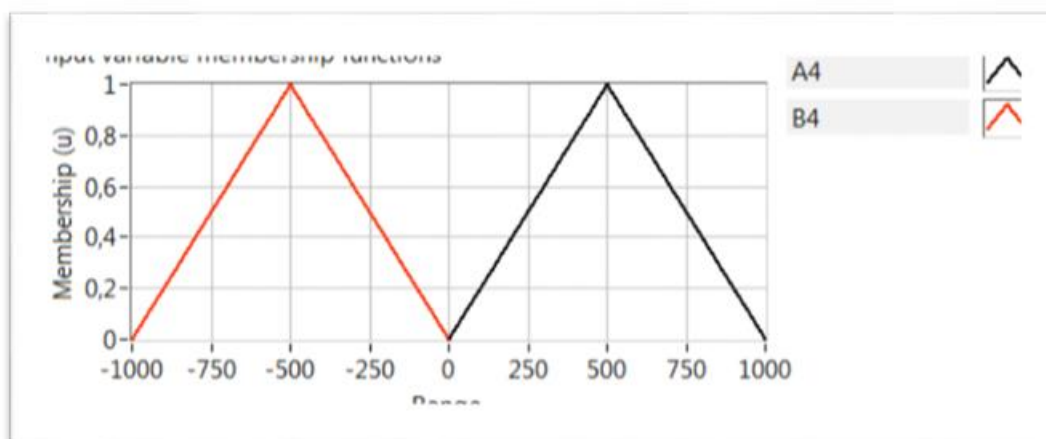


Рисунок 2.11 – Функції належності вхідних змінних нечіткої моделі Дорненбурга

Таблиця 2.4 – Класифікація дефектів СТ на основі кодів Дорненбурга

N	O1	O2	O3	O4	Характерна несправність
1	B1	-	A3	A4	Частковий розряд низької щільності енергії
2	C1	B2	B3	B4	Частковий розряд високої щільності енергії.
3	A1	A2	A3	A4	Термічний дефект

Вхідними даними для нечіткої моделі, що використовує інтерпретацію АРГ методом Дорненбурга, є чотири співвідношення газів: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$, $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$ (рисунок 2.11 а, b, c, d).

На рис. 2.12 показано, як формувати нечіткі виходи, що становлять дефекти в трансформаторі, згадані в таблиці 2.4, відповідно до інтерпретації Дорненбурга.

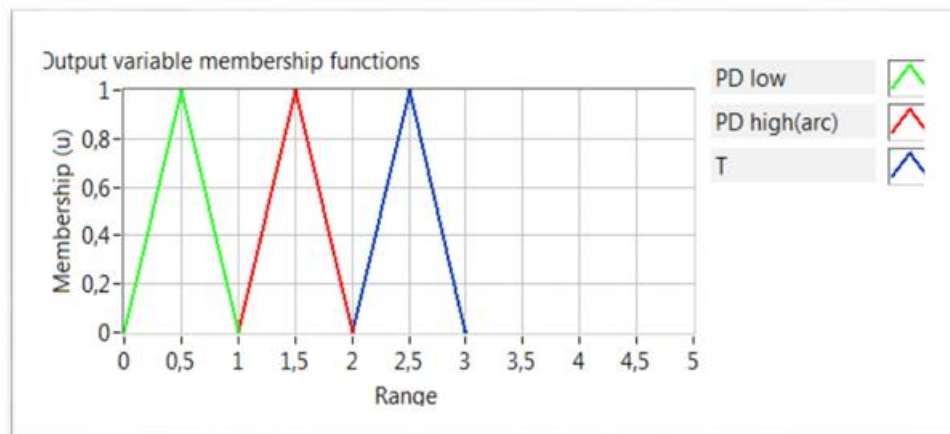


Рисунок 2.12 – Побудова функцій належності вихідної змінної у нечіткій моделі Дорненбурга

Нечіткий висновок і двох компонентів: антецедента (IF) і слідства (THEN). Тут правила нечіткого висновку ґрунтуються на інтерпретації

дефектів, як показано на рис. 2.13 (фрагмент побудованих нечітких правил за моделлю Дорненбурга).

1. IF 'CH4/H2' IS 'B1' AND 'C2H2/CH4' IS 'A3' AND 'C2H6/C2H2' IS 'A4' THEN 'defect' IS 'PD low'

2. IF 'CH4/H2' IS 'C1' AND 'C2H2/C2H4' IS 'B2' AND 'C2H2/CH4' IS 'B3' AND 'C2H6/C2H2' IS 'B4' THEN 'defect' IS 'PD low'

3. IF 'CH4/H2' IS 'A1' AND 'C2H2/C2H4' IS 'A2' AND 'C2H2/CH4' IS 'A3' AND 'C2H6/C2H2' IS 'A4' THEN 'defect' IS 'PD low'

4. IF 'CH4/H2' IS 'B1' THEN 'defect' IS 'PD low'

5. IF 'CH4/H2' IS 'A1' THEN 'defect' IS 'PD low'

Defuzzification method: Center of Area

Antecedents:

IF	THEN
CH4/H2 = B1	defect = PD low
C2H2/CH4 = A3	
C2H6/C2H2 = A4	

Рисунок 2.13 – Фрагмент нечітких правил для моделі Дорненбурга

Результат нечіткого висновку може бути отриманий з використанням техніки композиції Мах-Мін Мамдані. Тут логічне «AND» замінюється оператором мінімізації, а логічне «OR» - оператором максимізації. Розроблений набір нечітких правил пов'язує входні та вихідні змінні для методу відносин Дорненбурга (рис.. 2.14).

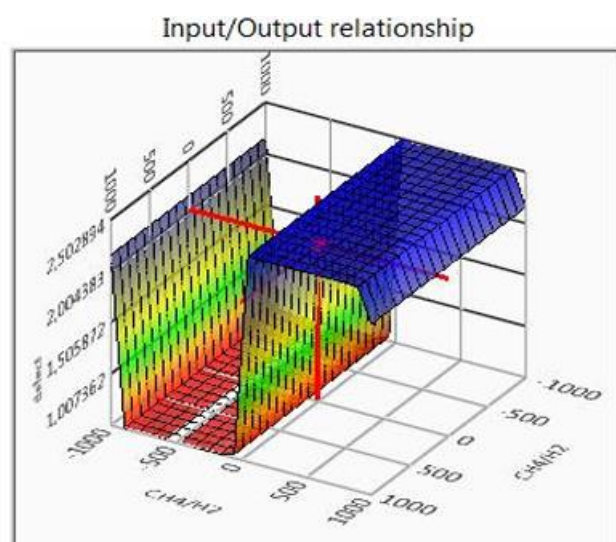


Рисунок 2.14 – Тривимірне зображення набору нечітких правил, що пов'язують входи та виходи нечіткої моделі Дорненбурга

Для верифікації розробленої нечіткої моделі інтерпретації результатів АРГ за методом Дорненбурга на платформі LabVIEW 2018 автором розроблено спеціальну програму, робочий інтерфейс якої показано на рис. 2.15, а алгоритм роботи на рис. 2.16.

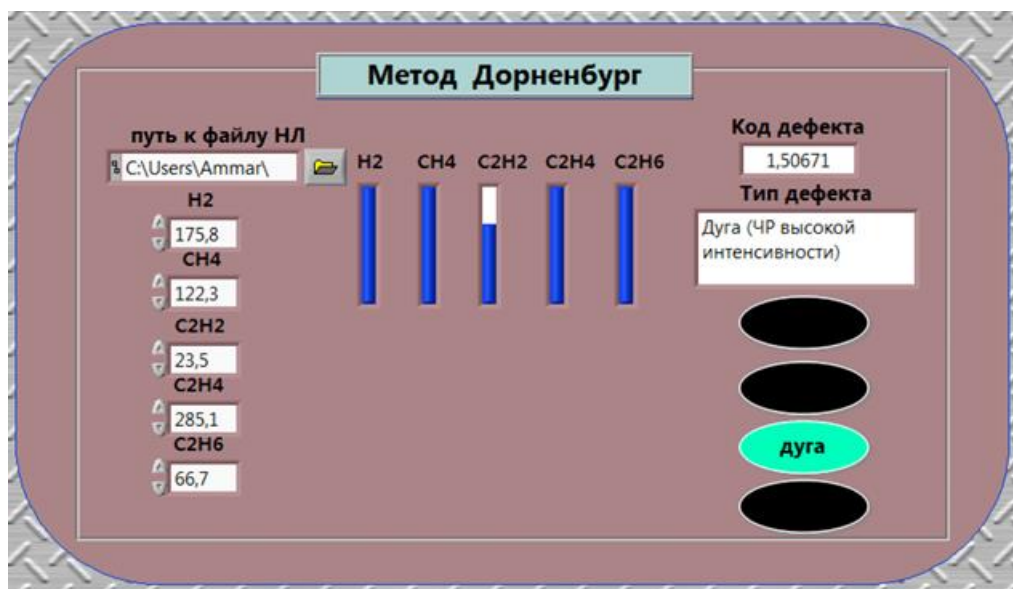


Рисунок 2.15 – Робочий інтерфейс програми, що реалізує нечітку модель прогнозування дефектів СТ методом Дорненбурга

– Нечітка модель прогнозування дефектів СТ методом трикутника Дюваля.

Підхід до конструювання моделі нечіткої логіки, який використовується для прогнозування виду дефектів силового трансформатора з входами та виходами за методом трикутника Дюваля, зображено на рис. 2.17.

Для прогнозування дефектів силових трансформаторів методом трикутника Дюваля використовуються такі кроки:

1) багатокутні координати для числових меж зон семи ключових видів дефектів методу трикутника Дюваля використовуються у відсотках від 0% до 100% для газів CH₄, C₂H₄ та C₂H₂ (таблиця 2.5);

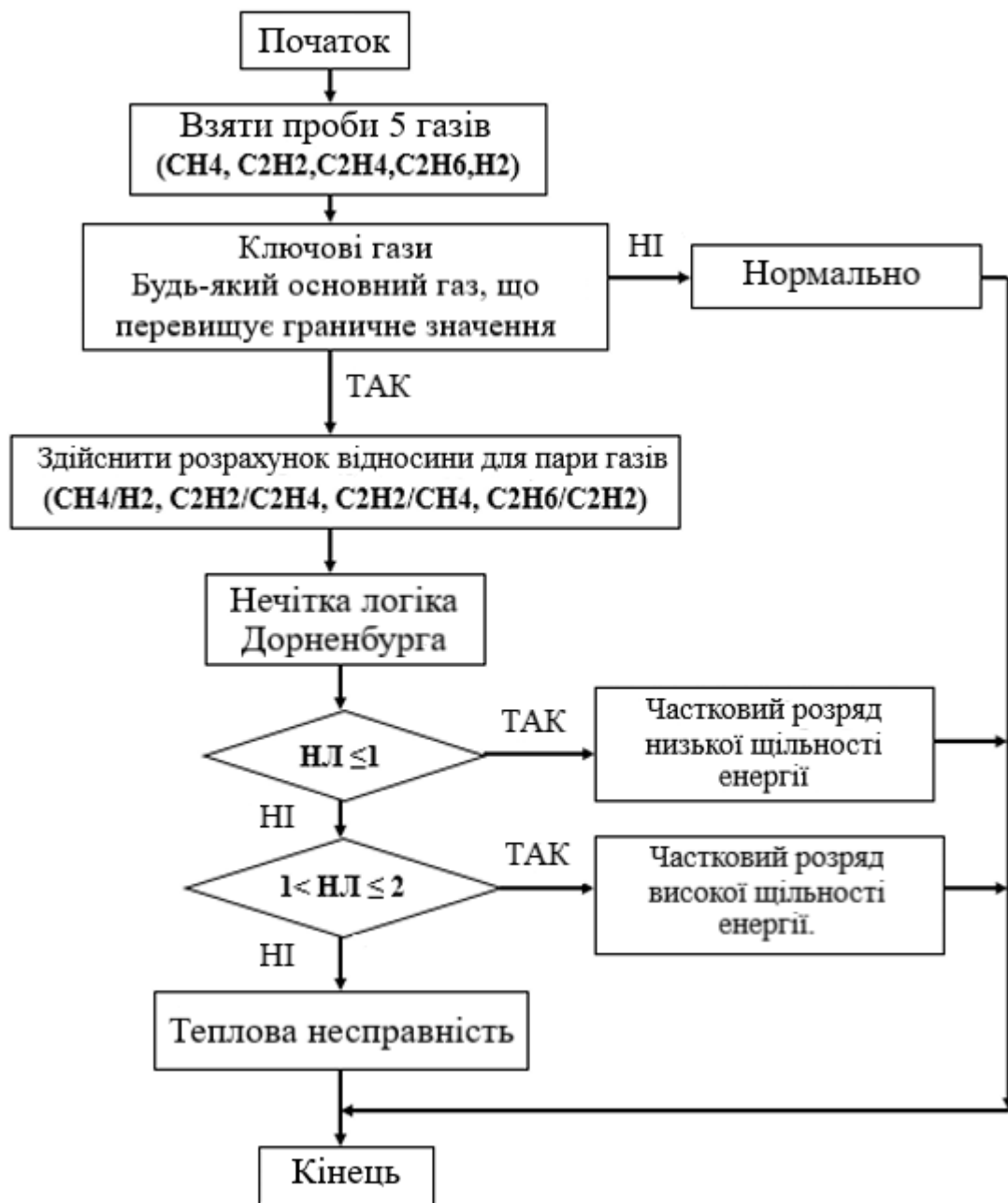


Рисунок 2.16 – Алгоритм програми нечіткого прогнозування дефектів СТ за методом Дорненбурга

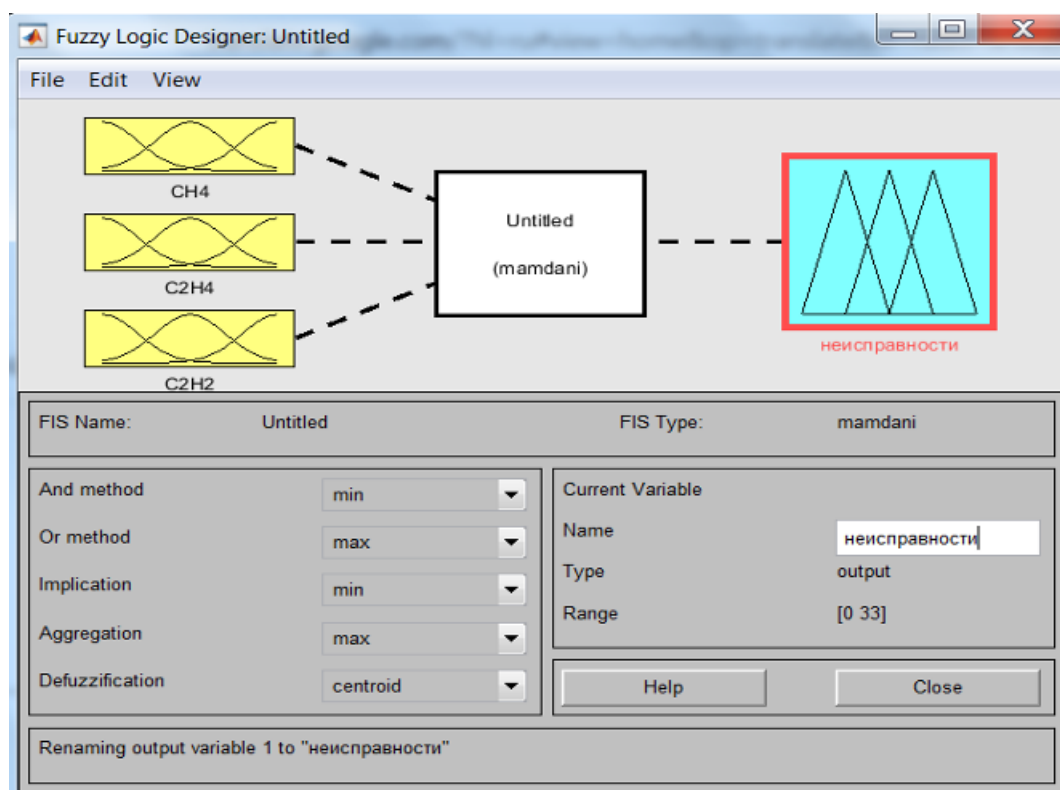


Рисунок 2.17 – Підхід до конструювання нечіткої моделі прогнозування дефектів СТ з МТД

Таблиця 2.5 – Координати для зон нечіткої моделі МТД

N	Код дефекту	Тип дефекту	Діапазони розміщення зон дефектів		
			CH4%	C2H2%	C2H4%
1	0-1	PD	98-100	0-2	0-2
2	1-2	T1	96-97.9	0-4	0-4
			80-96	0-20	0-4
			76-80	0-20	0-4
3	2-3	T2	46-79.9	20.1-50	0-4
4	3-4	T3	35-49.9	50.1-65	0-14.9
			0-35	50.1-100	0-14.9
5	4-5	DT	47-95.9	0-40.1	4.1-12.9
			21-55.8	40.1-50	4.1-29
			0-35	50-85	15-29

6	5-6	D2	30.9-63.5	23.1-40	13.4-29.1
			0-47.8	23.1-70.9	29.1-76.9
7	6-7	D1	0-86.9	0-23	13-100

2) кожне чітке значення відсоткового вмісту газу (CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2) з таблиці 2.5 ставиться у відповідність до зон дефектів трикутної нечіткої функції (A1 A13, B1 B12 і C1 C9) та наведено в таблиці 2.6. Функції приладдя для вхідних газів, отримані із застосуванням інструменту нечіткої логіки MATLAB.Toolbox, показано на рис. 2.18 а, б, с.

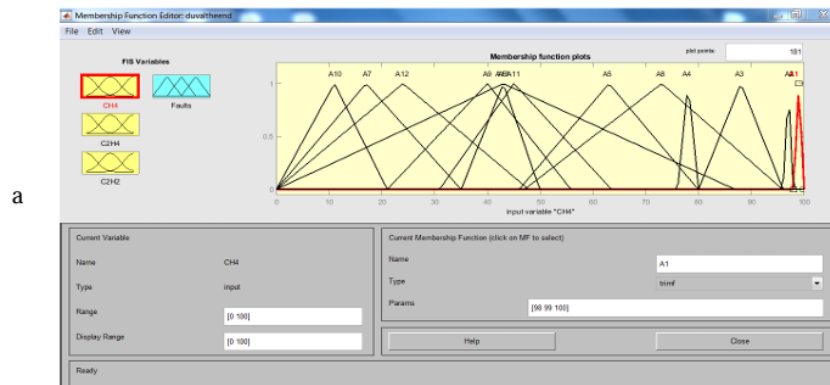
Таблиця 2.6 – Діапазони приладдя для трьох вхідних газів

N	$\text{CH}_4\%$		$\text{C}_2\text{H}_2\%$		$\text{C}_2\text{H}_4\%$	
1	A1	98-100	B1	0-2	C1	0-2
2	A2	96-97.9	B2	0-4	C2	0-4
3	A3	80-96	B3	0-20	C3	0-14.9
4	A4	76-80	B4	20.1-50	C4	4.1-12.9
5	A5	46-79.9	B5	50.1-65	C5	4.1-29
6	A6	35-49.9	B6	50.1-100	C6	15-29
7	A7	0-35	B7	0-40.1	C7	13.4-29.1
8	A8	47-95.9	B8	40.1-50	C8	29.1-76.9
9	A9	21-55.8	B9	50-85	C9	13-100
10	A10	0-35	B10	23.1-40		
11	A11	30.9-63.5	B11	23.1-70.9		
12	A12	0-47.8	B12	0-23		
13	A13	0-86.9				

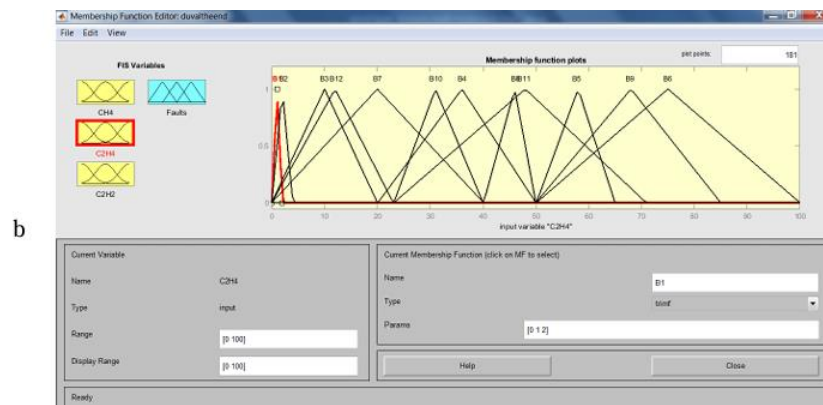
3) нечіткі виходи – типи дефектів СТ, показані у таблиці 2.7 і змінено вихідну функцію нечіткої належності у вигляді трапеції на 7

дефектів. Функція нечіткої приналежності для типів дефектів СТ методом МТД отримана і проілюстрована на рис.. 2.19.

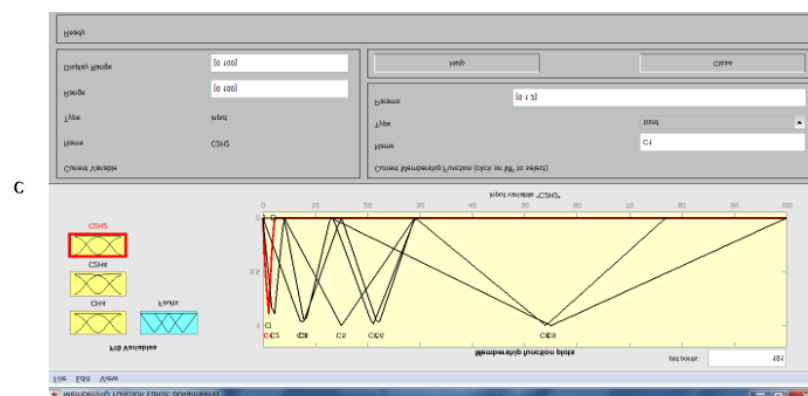
4) формування основи нечітких правил. Набір нечітких входів трьох газів, яким присвоєно чіткі значення % з відповідною функцією приналежності, є невід'ємною частиною нечіткої діагностичної моделі прогнозування типу дефекту в СТ.



Функція приналежності входної змінної CH4%



Функція приналежності входної змінної C2H4%



Функція приналежності входної змінної C2H2%

Рисунок 2.18 – Функції приладдя для входних газів нечіткої моделі

Таблиця 2.7 – Типи дефектів трансформатора, виходи МТД

N	Тип дефектів у трансформаторі
1	PD
2	T1
3	T2
4	T3
5	DT
6	D2
7	D1

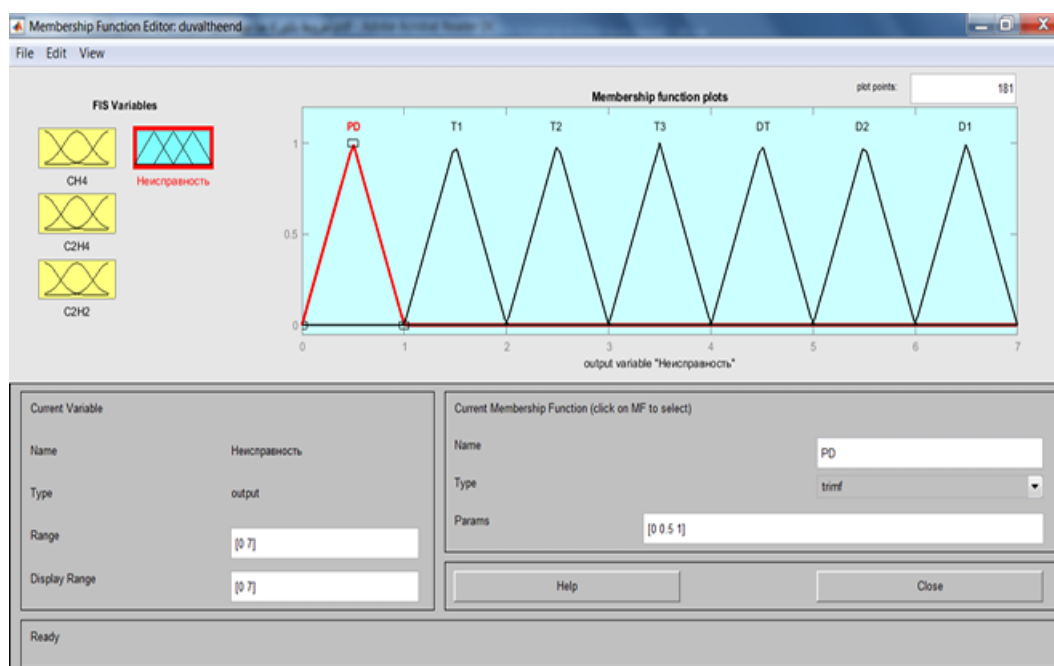


Рисунок 2.19 – Функція приналежності до типів дефектів МТД

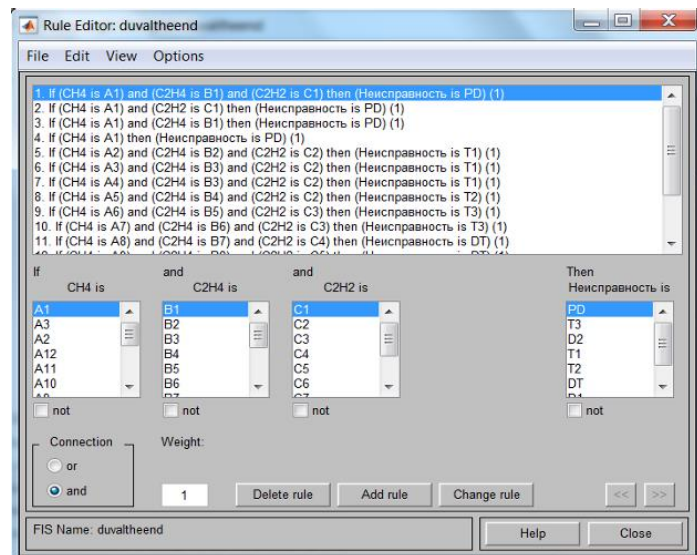
Набір нечітких правил (лінгвістичні оператори IF-THEN) з оператором AND для мінімуму та оператором OR для умов максимуму потім використовується у формі «судження» на нечітких входах [12, 16, 17],

отриманих із трьох процентних часток газу, сума яких завжди дорівнює 100%.

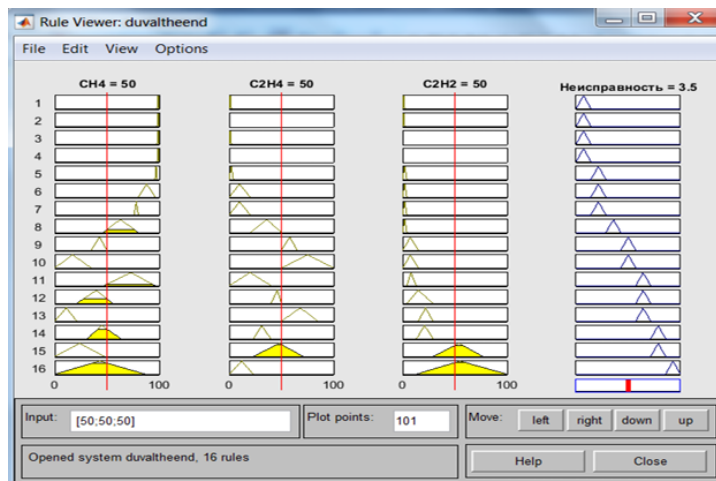
Усі нечіткі правила, щойно виведені для прогнозування типів можливих дефектів у СТ на основі нечіткої моделі за методом трикутника Дюваля, показано в таблиці 2.8. Слід зазначити, що тапи дефектів визначені строго для відсотків меж зон семи несправності координатах методу трикутника Дюваля.

Таблиця 2.8 – Нечіткі правила для предиктивної моделі МТД

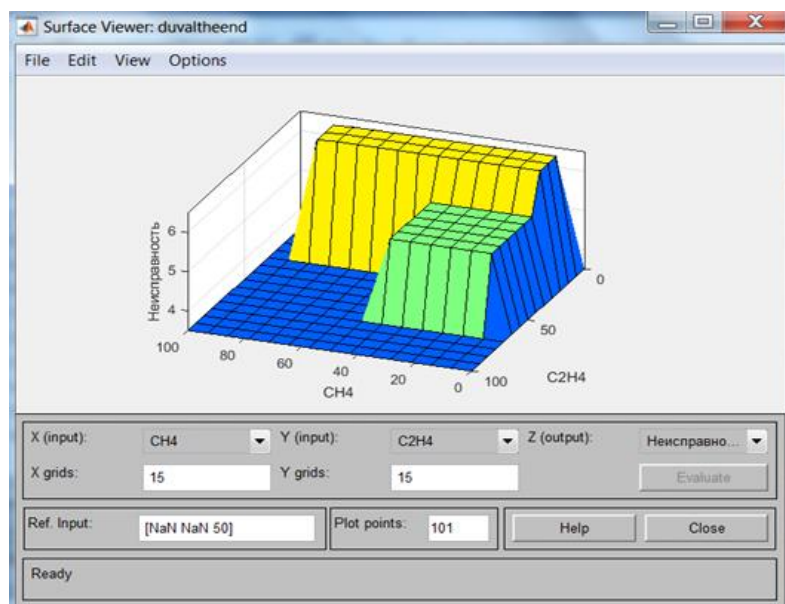
N	CH ₄ %	C ₂ H ₂ %	C ₂ H ₄ %	Тип дефекту
1	A1	B1	C1	PD
2	A2	B2	C2	T1
3	A3	B3	C2	T1
4	A4	B3	C2	T1
5	A5	B4	C2	T2
6	A6	B5	C3	T3
7	A7	B6	C3	T3
8	A8	B7	C4	DT
9	A9	B8	C5	DT
10	A10	B9	C6	DT
11	A11	B10	C7	D2
12	A12	B11	C8	D2
13	A13	B12	C9	D1



а – Редактор нечітких правил.



б – Візуалізатор нечітких правил.



с – Візуалізатор зон дефектів СТ

Рисунок 2.20 – Система нечіткого виведення методом трикутника Дюваля

5) система нечіткого виведення (FIS) включає операцію між нечіткими вхідними наборами, як показано на малюнку 2.20 а, б, с, відому як тип Мамдані. Це виводить нечіткі набори вихідних даних, оцінюючи всі можливі нечіткі правила, знаходячи належність для типів помилок, представлених 13 нечіткими вихідними правилами. Рішення досягається шляхом середньозваженого значення нечітких входів. Піки графіків малюнку 2.20 а, що позначають ступеня належності між 0 і 1, є виходами з кожного нечіткого правила, яке позначає тип дефекту СТ. Таким чином, кожне правило є рядом графіків, а кожен стовпець є змінним.

Обчислювальна платформа LabVIEW 2018 використана у роботі для створення цифрової нечіткої передиктивної моделі визначення типу дефектів у СТ за методом трикутника Дюваля та верифікації її застосування на тестових прикладах. На рисунку 2.21 показаний робочий інтерфейс програми, але в рис. 2.22 алгоритм її роботи.



Рисунок 2.21 – Робочий інтерфейс програми, що реалізує нечітку передиктивну модель за методом трикутника Дюваля



Рисунок 2.22 – Алгоритм програми за методом трикутника Дюваля

2.3 Верифікація розроблених нечітких предикативних моделей інтерпретації типу дефектів у силових трансформаторах

Верифікація розроблених нечітких предикативних цифрових моделей здійснюється з метою тестування та порівняльної оцінки достовірності, одержуваних з їх допомогою результатів по відношенню один до одного та певного еталонного незалежного результату.

В даному випадку тестування піддаються моделі, що реалізують різні алгоритми та критерії інтерпретації даних АРГ в маслі силових трансформаторів за методами ІЕС, Дорненбурга та трикутника Дюваля, відомим як найбільш стабільні методи розпізнавання типу несправностей.

Розроблені моделі в їхній програмній реалізації на єдиній цифровій платформі LabVIEW були протестовані на даних із практики експлуатації блочного СТ типу ТДН-250000/220 кВ ТЕЦ-5.

Відібрані для дослідження та верифікації моделей зразки АРГ олії були взяті з ретроспективи випадковим чином, а їхня кількість склала 20 одиниць. Отримані результати продемонстрували різний ступінь збігу між висновками експертів на основі багатоаспектного діагностичного аналізу та протоколів розтину СТ та інтерпретацією за різними моделями (таблиця 2.9).

Так, наприклад, нечітка модель за методом ІЕС продемонструвала розбіжність із еталоном у зразках 6 та 8 (таблиця 2.9), де модель за методом ІЕС не змогла визначити тип несправності. Нечітка модель методом трикутника Дюваля показав високотемпературний термічний дефект, а модель методом Дорненбурга показала електричний дефект (дуга). Під час перегляду таблиці 2.9 у зразках 6 та 8 спостерігається перевищення граничних концентрацій етилену C_2H_4 , що вказує на високотемпературний термічний дефект згідно з критеріями ключового газу [16] та висновками експертів.

Таблиця 2.9 – Результати тестування розроблених моделей

N	Дата відбору	H2	CH4	C2H4	C2H6	C2H 2	ІЕС	Метод трикут. Дюваля	Метод Дорнен.
1	26.10.1994	47,2	27,4	28,5	0,1	0,01	норма	норма	норма
2	17.05.1995	42,4	15	21,8	5,7	0,3	норма	норма	норма
3	13.11.1995	32,8	12,6	22,4	6,1	0,5	норма	норма	норма
4	20.05.1996	9,8	10,4	21,5	0,9	0,2	норма	норма	норма
5	01.04.1997	2,4	31,9	15,6	1,8	0,5	норма	норма	норма
6	18.09.2006	36,6	10,9	215,8	40,2	14,4	-	T3	D2
7	19.09.2006	33,7	115,6	223,3	59,3	18,5	T4	T3	T
8	21.09.2006	175,8	122,3	285,1	66,7	23,5	-	T3	D2
9	25.09.2006	107,1	139,5	320,8	70,9	31,9	T4	T3	T
10	28.09.2006	88,5	166,3	409,2	77	34,1	T4	T3	T
11	05.10.2006	172,8	190,7	435,2	73,7	35,7	T4	T3	T
12	12.10.2006	203,5	285,6	827,8	109,5	35,2	T4	T3	T
13	16.10.2006	272,7	439,3	1111	135,6	35,6	T4	T3	T
14	19.10.2006	235,8	443,9	1140	159,9	36,2	T4	T3	T
15	23.10.2006	265,4	507,7	1236	164,9	37,9	T4	T3	T
16	06.03.2008	70	252,1	506,4	94,6	24,3	T4	T3	T
17	17.03.2008	112	231,1	492,2	91,1	21,1	T4	T3	T
18	10.04.2008	105,5	313,9	619,9	119,2	23,1	T4	T3	T
19	25.04.2008	81,5	210,4	486,7	95,8	18,6	T4	T3	T
20	01.09.2008	34	147,9	397,5	55,9	4,5	T4	T3	T

Таблиця 2.10 – Верифікація розроблених моделей за даними [17]

(Д: дуга, Т: термічний, І: іскра, Н: норма, ДТ: електричні та термічний)

N	H ₂	C ₂ H ₄	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	Дослідження [77]	ІЕ С	трикутника Дюваля	Дорнен- бург
1	19.3	19	103	0.6	159	Т	Т	Т	Т
2	497	151	230	122	51	Д	И	Д	Д
3	615	102	200	68	42	Д	И	Д	Д
4	594	130	230	102	44	Д	И	Д	Д
5	4	4.2	99	0.1	82	Т	Т	Т	Т
6	56	928	286	7	96	Т	Т	Т	Т
7	78	353	161	10	86	Т	Т	Т	Т
8	21	47	34	62	5	Д	Д	Д	Д
9	50	305	100	9	51	Т	Т	Т	
10	172	812	335	37.8	171	Т	Т	Т	Т
11	181	28	262	0.1	41	Т	Т	Т	Т
12	27	63	90	0.2	42	Т	Т	Т	Т
13	160	96	130	0.1	33	Т	Т	Т	Д
14	180	50	175	4	75	Т	-	Т	Д
15	<5	11	42	<0.5	38	Т	Н	Н	Н
16	7	65	25	62	8	Д	Д	Д	-
17	41	110	45	147	11	Д	Д	Д	Д
18	505	817	256	881	82	Д	Д	Д	Д
19	5	10	87	<0.5	351	Т	Т	Т	Т
20	<5	12	18	<0.5	16	Т	Н	Н	Н

Таблиця 2.11 – Верифікація розроблених моделей за даними [18]

N	H ₂	C ₂ H ₄	CN ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	фактичний	ІЕС	Дюваля	Дорненбург
1	2	7	0	0	0	Н	Н	Н	Н
2	54	0	0	4	0	Н	Н	Н	Н
3	47	12	0	8	0	Н	Н	Н	Н
4	80	629	0	2480	326	Т	Т	Т	Т
5	213	3997	0	5584	1726	Т	Т	Т	Т
6	507	1053	17	1440	297	Т	Т	Т	Т
7	127	24	81	32	0	Д	Д	Д	Д
8	441	207	261	224	43	Д	Д	Д	Д
9	217	286	884	458	14	Д	Д	Д	Д
10	160	10	1	1	3	И	-	DT	Д
11	240	20	96	28	5	Д	-	DT	Д
12	2587	7,88	0	1,4	4,7	И	И	И	Д
13	23	6	31	23	172	Д	-	Д	Д
14	103	74	0	9	80	Т	-	Т	Д
15	124	166	0	59	87	Т	Т	Т	Т

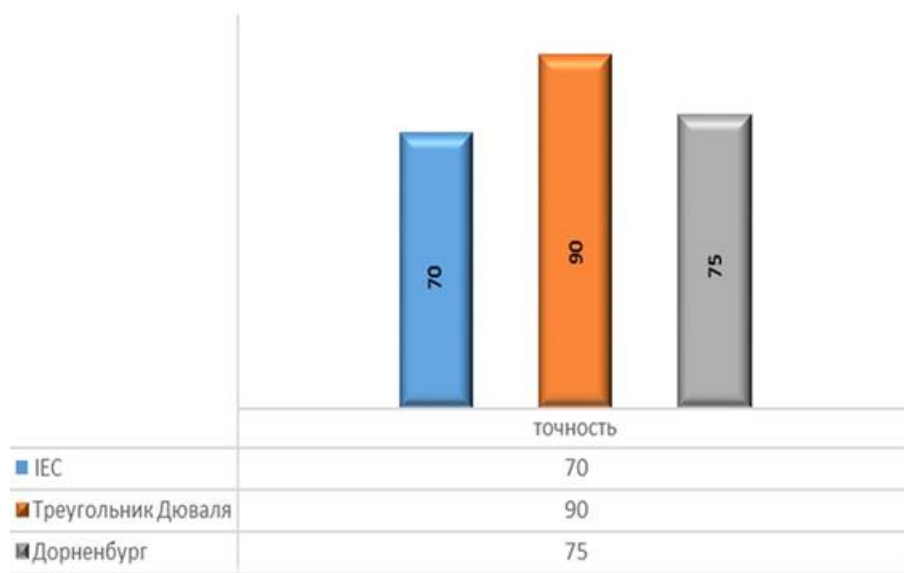


Рисунок 2.23 – Достовірність моделей за даними [17]

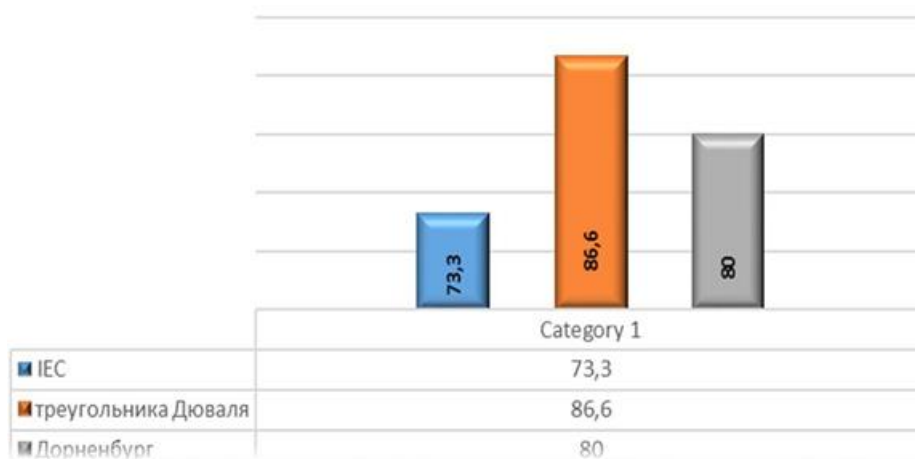


Рисунок 2.24 – Достовірність моделей за даними [78]

Результати, верифікації, наведені у таблицях 2.9 – 2.11 та проілюстровані на малюнках 2.23 та 2.24, вказують на те, що найбільша достовірність діагностичних оцінок прогнозування типу дефектів у СТ забезпечується нечітким моделюванням з використанням методу трикутника Дюваля в машинному навчанні для визначення технічного стану силових трансформаторів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

Машинне навчання є область штучного інтелекту, що займається розробкою моделей та алгоритмів, призначених для «навчання» вирішенню ключових завдань технічної діагностики обладнання, таких як апроксимація, класифікація та розпізнавання образів при варіації вихідних умов і параметрів управління. До відомих методів штучного інтелекту, які знайшли широке застосування в діагностуванні електрообладнання (включаючи маслонаповнене трансформаторне обладнання) слід віднести штучні нейронні мережі, статистичну класифікацію та розпізнавання образів, а також теорію нечітких множин та нечіткої логіки. Нечіткі моделі за наявності навчальних вибірок дозволяють апроксимувати функції або виміряні дані з будь-якою необхідною точністю і в цьому сенсі є універсальними апроксиматорами. Статистичне розпізнавання на основі Байєсовського рішення апіорі забезпечує створення класифікатора з мінімальною помилкою діагностування. Синтез моделей та алгоритмів, що мають переваги зазначених методів штучного інтелекту, є перспективним напрямом подальших досліджень. Розроблені математичні моделі на основі апарату теорії нечітких множин та нечіткої логіки розкривають усі переваги та недоліки найбільш відомих та ефективних інструментів інтерпретації результатів аналізу розчинених у маслі СТ газів, таких як методи ІЕС, відносин Дорненбурга, трикутника Дюваля. Програмна реалізація зазначених нечітких передиктивних моделей на єдиній універсальній цифровій платформі створює ідеальні умови для взаємного порівняння точності методів інтерпретації АРГ, достовірності нечітких моделей діагностичної оцінки відповідно до їх внутрішніх властивостей.

ВИСНОВКИ

1. Сучасні завдання ефективної діагностики маслонаповненого трансформаторного обладнання не обмежуються: вибором комплексу інформативних контрольованих параметрів, якісним їх виміром в умовах експлуатації та достовірною інтерпретацією отриманих результатів. Завдяки цифровій трансформації електроенергетики ці завдання набувають значного розширення у напрямку: раціонального поєднання методів on-line та off-line моніторингу СТ енергооб'єктів, включаючи технології віддаленого моніторингу, інтегральної оцінки стану та прогнозування відмови та залишкового експлуатаційного ресурсу СТ, формування математичних моделей предикативної аналітики на основі методів штучного інтелекту та машинного навчання, розробки систем прийняття рішень та вибору ефективних експлуатаційних впливів.

2. Існуючі об'єктивні обмеження при формулюванні та вирішенні перелічених завдань, зокрема відсутність технічної можливості застосування багатокомпонентного діагностування в режимі on-line моніторингу, з одного боку ускладнюють розробку моделей оперативної та предикативної оцінки технічного стану СТ і вимагає додаткових досліджень, а з іншого, підкреслюють неочевидність підходів щодо створення універсальних багатокомпонентних моделей на єдиній апаратно-алгоритмічній платформі. Дисертаційне дослідження спрямоване на усунення зазначеного обмеження за допомогою розвитку адаптаційних властивостей однокомпонентних діагностичних моделей трансформаторного обладнання ЕЕС та їхньої інтеграції з моделями оцінки їх залишкового експлуатаційного ресурсу.

3. На основі аналітичного огляду відкритих джерел інформації виконано порівняльний аналіз сучасних методів та моделей для оцінки технічного стану та залишкового експлуатаційного ресурсу маслонаповненого трансформаторного обладнання. В результаті проведеного аналізу обґрунтовано доцільність та сформульовано завдання розробки та

вдосконалення однокомпонентних моделей локальної функціональної спрямованості. Так для завдань оперативної оцінки технічного стану СТ з можливістю адаптації до зміни значущих експлуатаційних факторів найкращі «повільні» моделі статистичної класифікації та розпізнавання образів на основі Байєсівських рішень. Для предикативної оцінки залишкового експлуатаційного ресурсу найкращі «швидкі» обчислювальні моделі з урахуванням лінійної чи поліноміальної апроксимації.

4. Розроблено цифрові моделі та алгоритми предикативної аналітики типу дефектів, що розвиваються в СТ по АРГ, засновані на теорії нечітких множин, нечіткої логіки та нечіткого логічного висновку. Розроблені моделі та алгоритми реалізують можливість підвищення достовірності діагностичних оцінок за рахунок варіативності найпрогресивніших методів інтерпретації результатів АРГ (ІЕС, відносин Дорненбурга, трикутника Дюваля), а також їх комплексного застосування. Проведені дослідження з тестування моделей на ряді контрольних прикладів підтвердили високий рівень достовірності отриманих діагностичних оцінок.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Потапенко, М. В., Шаршонь, В. Л. (2022). Оцінка стану силових трансформаторів за поточними параметрами. *Editorial board*, 660.
2. Сахно, О. А., Шило, С. І., Одіяка, К. В. (2023). Визначення цінності діагностичних параметрів масла для систем неперервного контролю трансформаторного обладнання. *Редакційна колегія*, 174.
3. Адамова, С. В. (2018). Оцінка технічного стану силових трансформаторів за результатами ХАРГ. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 8(2).
4. Проценко, О. Р., Троценко, Є. О. (2013). Оцінка можливості використання електроізоляційного паперу як чутливого елемента датчика вологості трансформаторного масла. *Наукові вісті Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут*, (2), 34-38.
5. Рубаненко, О. О., Рубаненко, О. Є. (2013). Використання методів нечіткого моделювання в прогнозуванні стану високовольтних вводів. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2, 202-209.
6. Матусевич, О. О. (2014). Удосконалення системи діагностування силових трансформаторів тягових підстанцій електрифікованих залізниць. *Гірничо електромеханіка та автоматика*, (92), 31-36.
7. Пецков, Р. О. (2014). Математичні моделі організації комп'ютерних систем моніторингу трансформаторів на основі нечіткої логіки. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, (2), 38.
8. Денисюк, С. П., Притискач, І. В. (2014). Оцінювання стану в системах моніторингу силових трансформаторів тягових підстанцій. *Електрифікація транспорту*, (7), 13-20.
9. Денисюк, С. П., Притискач, І. В. (2014). Общие подходы к построению систем мониторинга силовых трансформаторов с использованием стохастических моделей. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, (37), 62-67.

10. Притискач, І. В. (2014). Методы оценки технического состояния в системах мониторинга силовых трансформаторов. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 66-71.
11. Bardyk, E. I., Kosterev, N. V., Bolotnyi, N. P. (2017). Підвищення достовірності ідентифікації дефектів у силових трансформаторах електростанцій настроюванням параметрів нечіткої моделі. *Research Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnic Institute"*, (6), 27-37.
12. Грищук, М. О., Рубаненко, О. О., Рубаненко, О. Є. Планування технічного обслуговування силових трансформаторів за результатами контролю їх частотних характеристик. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2019. Т. 3, № 56.-С. 92-98.
13. Карпов, Е. А., Лежнюк, П. Д., Рубаненко, А. Е., Пирожок, М. И. (2007). Прогнозирование качества функционирования устройств регулирования под напряжением трансформаторов в условиях нечетких результатов испытаний. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, (2), 61-65.
14. Бялобржеський О. В., Рева І. В., Тодоров О. В., Беззуб М. А. Огляд електричних методів та систем моніторингу силових трансформаторів в середовищі SMART GRID //«Електротехніка та електроенергетика» № 1 (2022).
15. Рассальский А.Н. Система мониторинга и управления силовых трансформаторов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2005. – № 2. – С. 46–50.
16. Поляков М.А. Определение и использование показателя режима нагрузки силового трансформатора в системе мониторинга и управления трансформатором // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – № 2. – С. 43–46.
17. Щокін В.П., Кузьменко А.С., Щокіна О.В. Метод короткотривалого нейронечіткого прогнозу електроспоживання підрозділами

ВАТ “ПІВНІГЗК” // Праці ЛВ МАІ. – 2007. – № 1 (14). – С. 84–89.

18. ДСТУ 3270-95 Трансформатори силові. Терміни та визначення

19. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення

20. Адамова С. В. Оцінка технічного стану силових трансформаторів за результатами ХАРГ// Том 8 № 2 (2018): Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету / Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.