

172-5754

621.311
Д 44

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
«Діагностика трансформаторів напруги 750 кВ»

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕС-22мз
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
освітня програма «Електричні станції»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)
Богдановський М.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор каф. ЕСС
Рубаненко О.Є.
(прізвище та ініціали)

« 04 » 06 2024 р.

Опонент: д.т.н., доц. каф. ЕССЕМ
Бабенко О.В.
(прізвище та ініціали)

« 04 » 06 2024 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., проф. Комар В. О.
(прізвище та ініціали)
« 07 » 06 2024 р.

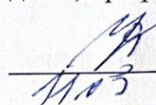
Вінниця ВНТУ - 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма – Електричні станції

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.



2024 року

З А В Д А Н Н Я **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Богдановського Мартіна Віталійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. Діагностика трансформаторів напруги 750 кВ
керівник роботи к.т.н., проф., професор каф. ЕСС Рубаненко
О.Є.

затверджена наказом вищого навчального закладу від 11.03.2024 року № 81

2. Строк подання студентом роботи 06 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи:

Перелік літературних джерел за тематикою роботи. Посилання на періодичні видання. Вихідні дані для проведення обчислювальних експериментів: результати діагностики трансформаторів напруги

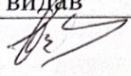
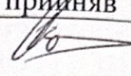
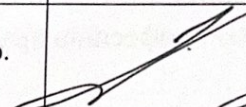
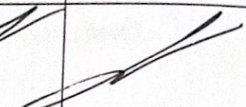
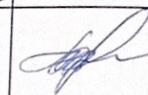
4. Зміст текстової частини:

Вступ. 1 Аналіз об'єкта діагностування; 2 Методи та засоби діагностування трансформаторів напруги; 3 Визначення залишкового ресурсу ТН; 4 Економічна частина; 5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Висновки Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Актуальність. Мета та задачі 2. Конструктивні особливості трансформаторів напруги. 3. Класифікація засобів діагностування ТН. 4. Класифікація методів діагностування ТН. 5. Характеристика пошкоджуваності ТН. 6. Етапи моделювання коефіцієнту загального залишкового ресурсу ТН. 7. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

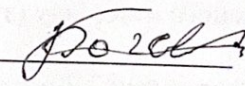
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Рубаненко О.О., д.т.н., доц., проф. кафедри ЕСС		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кобилянський О.О. д.п.н., проф., зав. каф. БЖДПБ		
Економічна частина	Остра Н. В., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		

7. Дата видачі завдання 16 січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи		Примітка
		початок	кінець	
1	Розроблення технічного завдання	17.01.24	22.01.24	вик
2	Аналіз об'єкта діагностування	23.01.24	20.02.24	вик
3	Методи та засоби діагностування трансформаторів напруги	20.02.24	18.03.24	вик
4	Визначення залишкового ресурсу ТН	19.03.24	17.04.24	вик
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	18.04.24	29.04.24	вик
6	Економічна частина	30.04.24	07.05.24	вик
7	Оформлення пояснювальної записки	08.05.24	30.06.24	вик
8	Виконання графічної частини та оформлення презентації	1.06.24	06.06.24	вик
9	Рецензування МКР	25.05.24	01.06.24	вик
10	Захист МКР	За графіком		

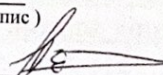
Студент



М. В. Богдановський

(підпис)

Керівник роботи, к.т.н., проф.



О.С. Рубаненко

АНОТАЦІЯ

УДК 621.311.1

Богдановський Мартін Віталійович «Діагностика трансформаторів напруги 750 кВ». Магістерська кваліфікаційна робота за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Вінниця : ВНТУ. 2024. 109 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 17 назв; рис.: 26; табл. 27.

В магістерській кваліфікаційній роботі було досліджено основні підходи та методи діагностики трансформаторів напруги 750 кВ. Розглянуто типові конструкції їх виконання, особливості роботи, причини та чинники що зумовлюють дефекти та пошкодження чи порушують нормальний стан роботи. Розглянуто сучасне діагностичне обладнання та принципи на яких будується його функціонування. Відзначено потреби та переваги інтелектуальних діагностичних систем та комплексів, зокрема для побудови системи підтримки прийняття рішень при оцінці залишкового ресурсу роботи обладнання.

Виконано аналіз статистичних даних що містять інформацію про дефекти та несправності роботи трансформаторів напруги. Розроблено математичну модель загального залишкового ресурсу трансформаторів напруги 750 кВ з використанням нечіткої логіки. Отримана нейро-нечітка модель дозволяє визначити значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу в залежності від значень типових вхідних параметрів у визначених діапазонах з отримання механізму висновку можливості подальшої експлуатації.

У розділі охорони праці було визначено умови безпеки при роботі з ТН 750 кВ та норми поведження у надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: трансформатор напруги, діагностування стану, нечітка логіка.

ABSTRACT

Bogdanovskyi Martin Vitaliyovych "Diagnostics of 750 kV transformers". Master's qualification work on specialty 141 - Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics. Vinnytsia: VNTU. 2024. XX p.

In Ukrainian language Bibliography: X titles; Fig.: X; table H.

The main approaches and methods of diagnosing 750 kV transformers were investigated in the master's qualification work. Typical constructions of their implementation, features of work, causes and factors causing defects and damage or disrupting the normal state of work are considered. Modern diagnostic equipment and the principles on which its functioning is based are considered. The needs and advantages of intelligent diagnostic systems and complexes were noted, in particular for building a decision support system for evaluating the residual resource of equipment.

An analysis of statistical data containing information on defects and malfunctions of voltage transformers was performed. A mathematical model of the total residual resource of voltage transformers of 750 kV was developed using fuzzy logic. The obtained neuro-fuzzy model allows you to determine the value of the coefficient of the total residual resource depending on the values of typical input parameters in the specified ranges to obtain a mechanism for concluding the possibility of further exploitation.

In the labor protection section, the safety conditions for working with transformers 750 kV and the norms of behavior in emergency situations were defined.

Key words: voltage transformer, state diagnostics, fuzzy logic.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ ОБ’ЄКТА ДІАГНОСТУВАННЯ.....	7
1.1. Загальна характеристика трансформаторів напруги.....	7
1.2. Методи діагностики трансформаторів напруги.....	19
1.2.1. Загальна характеристика методів діагностики.....	19
1.2.2 Діагностування дефектів і пошкоджень трансформаторів напруги.....	22
1.2.3 Діагностичне обладнання аналізу стану трансформаторів напруги.....	25
1.2.4 Використання інтелектуальних систем та нечіткої логіки до задач діагностики та прогнозування відмов трансформаторів напруги.....	27
Висновки до першого розділу.....	38
2 МОДЕЛЬ ДІАГНОСТУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ.....	39
2.1 Класифікація та параметризація факторів пошкоджуваності ТН.....	39
2.2. Статистика пошкоджуваності ТН.....	43
2.3. Прогнозування залишкового ресурсу ТН.....	45
2.4. Математична модель розрахунку коефіцієнта залишкового ресурсу ТН.....	54
Висновки до другого розділу.....	60
3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ.....	61
3.1. Нейро-нечітка модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТН.....	61
3.2. Реалізація моделі діагностування в середовищі Matlab/simulink.....	65
Висновки до третього розділу.....	73
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	74
4.1 Техніко-економічне обґрунтування.....	74
4.2 Визначення капіталовкладень.....	75
Висновок до четвертого розділу	80
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	81

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту.....	81
5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць.....	81
5.1.2 Електробезпека.....	83
5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії.....	86
5.2.1 Мікроклімат.....	86
5.2.2 Склад повітря робочої зони.....	87
5.2.3 Виробничий шум.....	88
5.2.4 Виробнича вібрація.....	89
5.2.5 Психофізіологічні фактори	90
5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Визначення області працездатності системи діагностики трансформаторів напруги в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.....	92
5.3.1 Визначення області працездатності системи діагностики трансформаторів напруги в умовах дії іонізуючого випромінювання.....	93
5.3.2 Визначення області працездатності системи діагностики трансформаторів напруги в умовах дії електромагнітного імпульсу.....	94
Висновок до п'ятого розділу	96
ВИСНОВКИ.....	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	99
ДОДАТКИ.....	101

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТН – трансформатор напруги

СТН – ємнісний трансформатор напруги

ВЧ – високовольтний записач

СДН – ємнісний дільник напруги

ЕМБ – електромагнітний блок

ЕВН – елемент відбору напруги

РПН – пристрій регулювання напруги під навантаженням

ІСМД – інтелектуальних систем безперервного контролю та діагностування

ANFIS – adaptive neuro-fuzzy inference system

ЕО – електрообладнання

ПК – персональний комп'ютер

БД – баз даних

СУБД – система управління базами даних

ЕС – експертна система

ФХА – фізико-хімічний аналіз

ХАГР – хроматографічний аналіз розчинених газів

ВСТУП

Щоб досягти технологічної здійсненності та економічної життєздатності енергетичної системи потрібно вдосконалювати системи діагностування трансформаторів напруги [20].

Трансформатори напруги — це такий вид трансформаторів, у якому в звичайних умовах вторинна напруга обмотки вимірювання є пропорційною до первинної напруги та зміщена відносно первинної напруги за фазою на кут, близький до нуля. Основні аспекти актуальності дослідження таких трансформаторів включають те що вони піддаються впливу внутрішніх та зовнішніх перенапруг. Дослідження їх ізоляції допомагає забезпечити надійну роботу та захист від високовольтних випромінювань. Вивчення трансформаторів дозволяє вдосконалити їх конструкцію, матеріали та технічні характеристики. Це сприяє підвищенню ефективності та зниженню втрат енергії. Дослідження допомагає виявити можливості покращення енергоефективності та забезпечити стабільну роботу трансформаторів на високих напругах. Своєчасна та якісна діагностика стану роботи трансформаторів напруги забезпечує захист низьковольтного та контрольно-вимірювального обладнання, системи підтримки прийняття рішень в процесі планових перевірок та у режимі реального часу, зокрема інтегровані в АСКОЕ, дозволяє налагодити безперервну та довготривалу роботу обладнання, здешевити обслуговування та покращити ефективність регламентованих робіт.

Метою роботи є вдосконалення процесу прийняття рішень при діагностуванні та оцінці залишкового ресурсу трансформаторів напруги 750 кВ шляхом розробки математичного та програмного забезпечення, що реалізує інтелектуальний підхід.

Згідно поставленої **мети** в роботі вирішено наступні **задачі**:

- досліджено конструктивні особливості трансформаторів напруги;

- виконано аналіз методів та алгоритмів діагностування трансформаторів напруги;

- розроблено математичну модель загального залишкового ресурсу ТН з використанням нейро - нечіткого моделювання;

Об'єктом дослідження є процеси зміни технічного стану трансформаторів напруги за основними показниками їх роботи.

Предметом досліджень є методи та засоби діагностики вимірювальних трансформаторів напруги, зокрема інформаційні системи підтримки прийняття рішень та експертної оцінки.

Методи досліджень. Теорія електричних кіл, методи статистичного аналізу, апарат теорії нечітких множин при формуванні математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу трансформаторів напруги.

Новизна отриманих результатів. Отримав подальший розвиток метод визначення залишкового ресурсу ТН на базі обмеженої групи діагностичних параметрів.

Практичне значення полягає у результатах розрахунків

- виконано розрахунок економічної ефективності вдосконалення системи планового та оперативного діагностування ТН.

Особистий внесок здобувача. Формування структури математичної моделі та програмна її реалізація є авторським доробком, що розповсюджується на усі зв'язані розділи роботи. Особисте бачення проблематики та рішень представлено в опублікованих тезах на конференції ВНТУ.

1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДІАГНОСТУВАННЯ

1.1. Загальна характеристика трансформаторів напруги

Вимірювальний трансформатор напруги, відомий як ТН, є пристроєм, який перетворює первинну напругу мережі на значення, зручне для вимірювання, та забезпечує електричну ізоляцію між первинним і вторинним колом. Використовується в ситуаціях, коли пряме підключення вимірювального приладу є незручним або неможливим, наприклад, при вимірюванні надзвичайно великих струмів або напруг. Також вони використовуються для забезпечення гальванічної ізоляції між первинним колом та вимірювальним або контрольним ланцюгом. Трансформатори напруги працюють у режимі, що наближений до холостого ходу, і їх розраховують так, щоб мінімізувати вплив на первинний ланцюг та спотворення форми сигналу та фази вимірюваного сигналу, що відображається в другорядному вимірювальному ланцюгу. Використання вимірювальних трансформаторів напруги сприяє безпеці працівників, які працюють із вимірювальними приладами та реле, а рівні первинної та вторинної напруги визначаються коефіцієнтом трансформації

Номінальний коефіцієнт трансформації визначається як:

$$K_{\text{ном}} = U_{1\text{ном}} / U_{2\text{ном}}. \quad (1.1)$$

На відміну від силових трансформаторів, номінальний коефіцієнт трансформації ТН визначається відношенням числа витків, а саме $n = w_1/w_2$. Номінальні первинні напруги трансформаторів напруги стандартизовані згідно з шкалою номінальних лінійних напруг і мають свої відповідні стандартні значення. Єдиними винятками є однофазні ТН, які використовуються для з'єднання у зірку з заземленою нейтраллю первинної обмотки, для яких номінальні первинні фазні напруги становлять $35000/\sqrt{3}$; $10000/\sqrt{3}$ та інші

Напруга U_1 що вимірюється за використанням ТН, визначається добутком вторинної напруги U_2 на номінальний коефіцієнт трансформації:

$$U_1 = U_2 \cdot K_{ном}. \quad (1.2)$$

Вимірювальні прилади, які є частиною системи трансформатора напруги з номінальним коефіцієнтом трансформації ($K_{ном}$), позначаються на шкалах в значеннях первинної напруги, тобто $U_2 K_{ном}$. Номінальні вторинні напруги основних вторинних обмоток встановлені на рівні 100 або $100/\sqrt{3}$ В. Вторинна напруга трансформатора, збільшена в $K_{ном}$ раз, трохи відрізняється від первинної як за модулем, так і за фазою через втрати потужності в самому трансформаторі. Розкіш цих напруг відносно первинної становить похибку за напругою:

$$f = [(U_2 \times K_{ном} - U_1) / U_1] \cdot 100 \% \quad (1.3)$$

Кут між векторами первинної і вторинної напруг δ є кутовою похибкою. Під номінальним вторинним навантаженням розуміють максимальне навантаження, при якому погрішності не виходять за межі, встановлені для трансформаторів даного класу. Відповідно до значення допустимої погрішності трансформатори напруги класифікуються за 4 класами точності: 0,2; 0,5; 1,0; 3,0. Трансформатори з рівнем точності 0,2 використовують як еталонні і лабораторні, трансформатори з рівнем точності 0,5 призначені для живлення лічильників електричної енергії. Для приєднання шафових вимірювальних приладів використовують трансформатори напруги з рівнем точності 0.1 і 3.0. Для живлення систем релейного захисту використовують трансформатори напруги з рівнем точності 0,5; 1,0; 3.0 – в залежності від типу захисту. Трансформатори напруги класифікуються за наступними критеріями: кількістю ступенів – одноступеневі, каскадні; кількістю обмоток – дво- та три обмоткові; кількістю фаз – одно та трифазні; способами охолодження – сухі та масляні; родом установки – внутрішня та зовнішня. Двообмоткові трансформатори мають первинну та вторинну обмотки. Початок первинної обмотки позначається великими літерами (наприклад А), кінець також виділено великими літерами (наприклад Х). Початок вторинної обмотки позначається малими літерами (наприклад а), кінець означено малими буквами (наприклад х).

На рисунку 1.1 показана схема заміщення три обмоткового трансформатора. При позначенні обмоток у таких трансформаторах, первинна та вторинна обмотки мають те ж позначення, що й у дво обмоткових трансформаторах, тоді як додаткова обмотка позначається починаючи з "А" і закінчуючи на "Д" (наприклад, ад та хд). З'єднання додаткової обмотки представлено у вигляді розімкненого трикутника. Помилки вимірювальних трансформаторів залежать від розмірів магнітопроводу, властивостей сталі, конструкції обмоток, площі провідника, підключеного навантаження і первинної напруги. Для зменшення похибок вимірювальних трансформаторів, застосовують меншу щільність струму в обмотці та меншу індукцію в осерді.

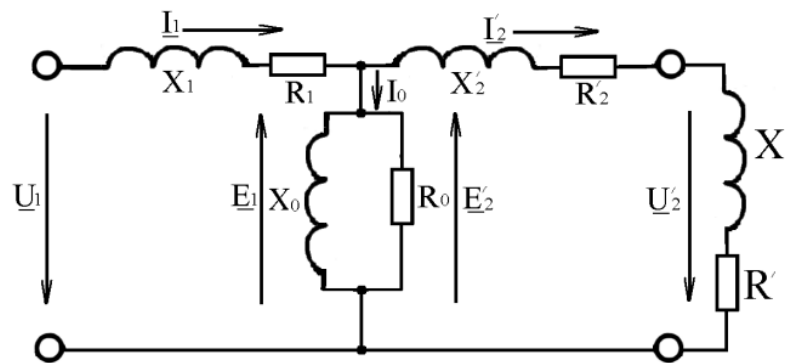


Рисунок 1.1 – Схема заміщення ТН.

Вторинні величини трансформатора напруги потрібно привести до первинних визначивши коефіцієнт трансформації $n = w_1/w_2$; $X_2^* = X_2 \cdot n^2$; $R_2^* = R_2 \cdot n^2$; $X^* = X \cdot n^2$; $R^* = R \cdot n^2$; $I_2^* = I_2/n$; $U_2^* = U_2/n$.

Похибки ТН можуть визначатися по значенням падіння напруги від струму I_2^* в опорі $Z_2^* = R_2^* + jX_2^*$ та від заданого струму $I_1 = I_0 + I_2^*$ в опорі $Z_1 = R_1 + jX_1$, тобто

$$U_1 - U_2^* = I_2^* \times Z_2^* + I_1 \times Z_1 = I_0 \times Z_1 + I_2^* \times (Z_2^* + Z_1), \quad (1.3)$$

де I_0 – струм намагнічування, який відповідає напрузі U_1 .

Після підстановок комплексних виразів опорів і струмів:

$$I_2^* = I_2^*a - jI_2^*p; I_0 = I_0a - jI_0p$$

будемо мати:

$$U_1 - U_2^* = [I_0a \cdot R_1 + I_0p \cdot X_1 + I_2^*a(R_1 + R_2^*) + I_2^*p(X_1 + X_2^*)] +$$

$$+ J[I_{0a} \cdot X_1 - I_{0p} \cdot R_1 + I_{2a}'(X_1 + X_2') - I_{2p}'(R_1 + R_2')] \quad (1.4)$$

Дійсна частина даного комплексного виразу, взята із протилежним знаком і співставлень до U_1 , дорівнює похибці за напругою, відповідно уявна частина визначена похибкою за кутом:

$$f = \frac{I_{0a}R_1 + I_{0p}X_1 + I_{20}'(R_1 + R_2') + I_{2p}'(X_1 + X_2')}{U_1};$$

$$\delta = \frac{I_{0a}X_1 + I_{0p}R_1 + I_{2a}'(X_1 + X_2') - I_{2p}'(R_1 + R_2')}{U_1}$$

(1.5)

Згідно з виразами 1.5., помилки вимірювальних трансформаторів складаються з двох частин. Перші два елементи відповідають похибці вимірювань при порожньому трансформаторі. Другий компонент визначається навантажувальним струмом. При збільшенні навантаження точність вимірювань трансформатора збільшується. Спадання напруги до значення нижче номінального впливає на похибку, оскільки вплив похибки від намагнічувального струму значно менший за вплив похибки від навантажувального струму. Отже, дрейф коефіцієнта трансформації через погіршення технічних параметрів призводить до значних похибок вимірювань. В практиці, вимірювальні трансформатори напруги можуть бути масляні, литі або елєгазові. Дизайн вимірювальних трансформаторів схожий на силові, але не потребує радіаторів для охолодження. Головна функція вимірювального трансформатора полягає в забезпеченні надійної ізоляції між вторинними та первинними мережами. Обмотки вимірювального трансформатора, так само, як у силових, часто знаходяться у маслі. Недавно використовується тверда ізоляція з полімерів (наприклад, у трансформаторах типу НОЛ, ЗНОЛ). Трансформатори напруги 110 кВ і вище виготовляються у вигляді каскаду (НКФ). Вони складаються з декількох ступенів, ізольованих один від одного. На кожен ступінь приводиться приблизно 50кВ.

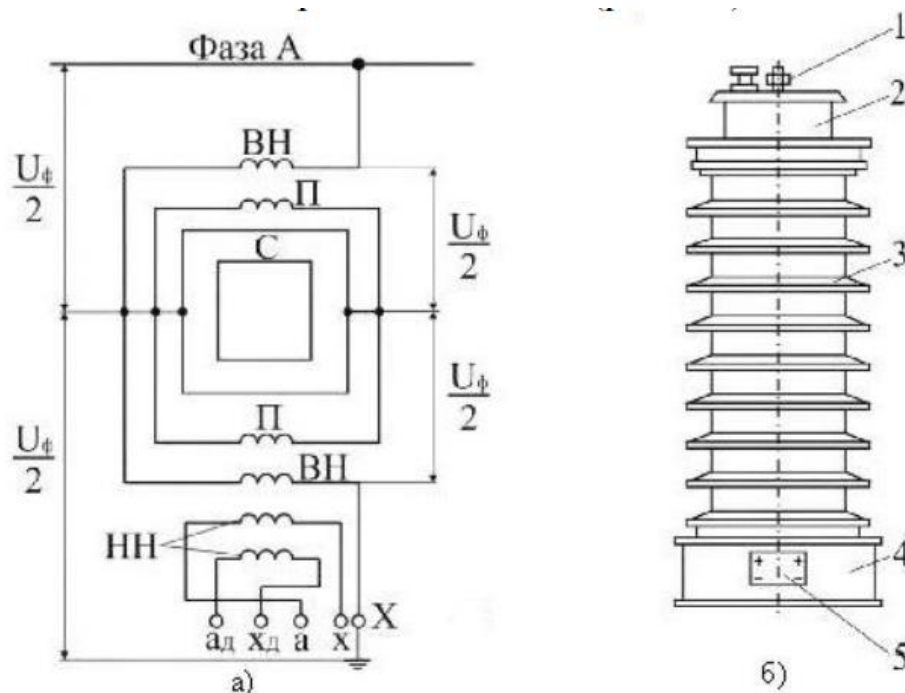


Рисунок 1.2 – Трансформатор напруги НКФ–110: а) – схема; б) – конструкція трансформатора: 1 – увід високої напруги; 2 – олива розширювач; 3 – порцеляновий корпус; 4 – основа ТН; 5 – коробка вводів.

Трансформатор каскадного типу ізольований таким чином, що кожен ступінь має $1/N$ частину фазної напруги електричної мережі, де N позначає число ступенів. Перші обмотки з'єднані входними напругами, ізольовані з одного кінця і послідовно з'єднані. Початок первинної обмотки верхнього ступеня приєднаний до проводу, напругу якого потрібно виміряти. Кінець первинної обмотки нижнього ступеня приєднаний до заземленої основи. Кінці первинних обмоток ступенів з'єднані з магнітопроводами. При такому виконанні напруга між сусідніми частинами трансформатора не перевищує $U_{\text{фази}} / N$. Для забезпечення рівномірного розподілу напруги між ступенями навантаженого каскаду використовуються додаткові обмотки зв'язку П; сусідні обмотки зв'язку включені протилежно. Ці обмотки беруть участь у передачі потужності від мережі до вторинної обмотки, що розташована на нижньому ступені. Одна з них ізольована, як і первинна, тоді як друга, ближче до магнітопроводу, має меншу ізоляцію. Каскадні трансформатори напруги характеризуються меншою масою та розмірами, але вони мають вищу похибку (клас точності 1 і 3).

Високовольтні трансформатори з напругою 750 кВ, як правило, виготовляються з використанням масла через їх технічні характеристики; управляючі трансформатори з напругою 10 та 500 кВ, що зазвичай присутні на ринку в Україні, обмежені зазначеними значеннями напруги. Крім того, напругу 750 кВ забезпечують конденсаторні трансформатори напруги (ЄТН). Конденсаторні трансформатори напруги призначені для вимірювання напруги в установках з напругою 110 кВ і вище. Їх структура включає подільник напруги та електромагнітний пристрій узгодження. Подільник складається з двох послідовно з'єднаних конденсаторів. Один кінець кожного конденсатора приєднаний до провідника, напругу на якому потрібно виміряти, а інший - до землі. Ємність конденсатора C2 значно більша, ніж у конденсатора C1, тому напруга на ньому становить невелику частину від напруги U1, близько 12 кВ. Пристрій узгодження складається з реактора LR та знижувального трансформатора T спеціальної конструкції. Діаграма конденсаторного трансформатора показана на рисунку 1.3.

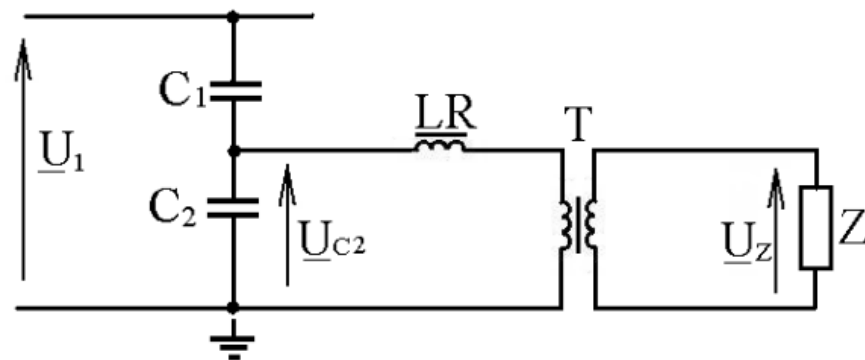


Рисунок 1.3 – Схема ємнісного трансформатора.

При відключеному погоджувальному пристрої, напруга на ємності C2 пропорційна U1. Номінальний коефіцієнт поділу складає:

$$k_d = (C_1 + C_2) / C_1 \quad (1.6)$$

При включеному погоджувальному пристрої, напруга U C2 не зовсім пропорційна U1, проте точність вимірювань забезпечується досить високою, коли сума індуктивних опорів реактора і обмотки ТН буде близько дорівнювати опору ємності конденсатора.

$$\Omega (L_p + L_1 + L^*2) \approx 1 / (\omega \cdot (C_1 + C_2)) \quad (1.7)$$

Прилади такого типу вимірювальних трансформаторів отримали назву настроєних пристроїв. Похибки ємнісних трансформаторів напруги (ЄТН) залежать від відхилення частоти, температури повітря, витоку по ізоляції, а також ферорезонансних коливань напруги, які мають бути виявлені шляхом діагностики. Номінальна потужність подільників становить від 300 до 600 ВА. Зазвичай одночасно використовуються як конденсатори зв'язку. Помітно, що серед виробників масляних ємнісних трансформаторів напруги на ринку України присутні наступні марки. Наприклад, вимірювальні трансформатори напруги ЕТН ТОВ "ЕЛІЗ" (виробництво Запорізького трансформаторного заводу) є ємнісними, однофазними, масляними, чотирьох обмотковими, антирезонансними, зовнішньої установки. Вони призначені для застосування в електричних ланцюгах змінного струму частотою 50 Гц з заземленою нейтраллю. Такий тип трансформаторів використовується для передачі сигналу вимірювальної інформації, захисту, автоматики, сигналізації і управління, а також для забезпечення високочастотного зв'язку. Трансформатори напруги серії ЕТН мають антиферорезонансні властивості та мають єдину конструкцію ємнісного модуля і електромагнітного пристрою. Вони виготовляються на класи напруги від 110 кВ до 750 кВ та мають герметичну конструкцію.

Таблиця 1.1 – Основні технічні та метрологічні характеристики ЕТН.

Типи трансформаторів	Номінальна напруга первинної обмотки, В	Номінальна напруга вторинної обмотки, В	Частота, Гц	Маса, кг
ЕТН-765 III УХЛ1, клас точності 0,2 (ЕТН-750 УХЛ1)	750000 /√3	осн.: №1 – 100/√3 №2 – 100/√3 доп. – 100	50	1112

Відомим дистриб'ютором електротехнічного обладнання є компанія ТОВ "Автоформула центр", офіційний представник в Україні таких всесвітньо відомих виробників як: Elektromotoren und Gerätebau Barleben GmbH, Німеччина; ELPROM (ex-HYUNDAI) Heavy Industries CO, Болгарія; HSP Hochspannungsgeräte GmbH, Німеччина; KONČAR Instrument Transformers, Хорватія; Končar Metal Structures Ltd., Хорватія; Qualitrol Company LLC, США. Зокрема компанія постачає високовольтні вимірювальні трансформатори серії VCU.

Трансформатори напруги ємнісного типу використовують як масштабні перетворювачі напруги, а також для подачі стандартних, придатних до використання напруг у різних установках для моніторингу, вимірювання та захисту та в той же час для ізоляції захисного та вимірювального обладнання від високої напруги системи. Їх використовують для забезпечення високочастотного зв'язку в електричних системах.

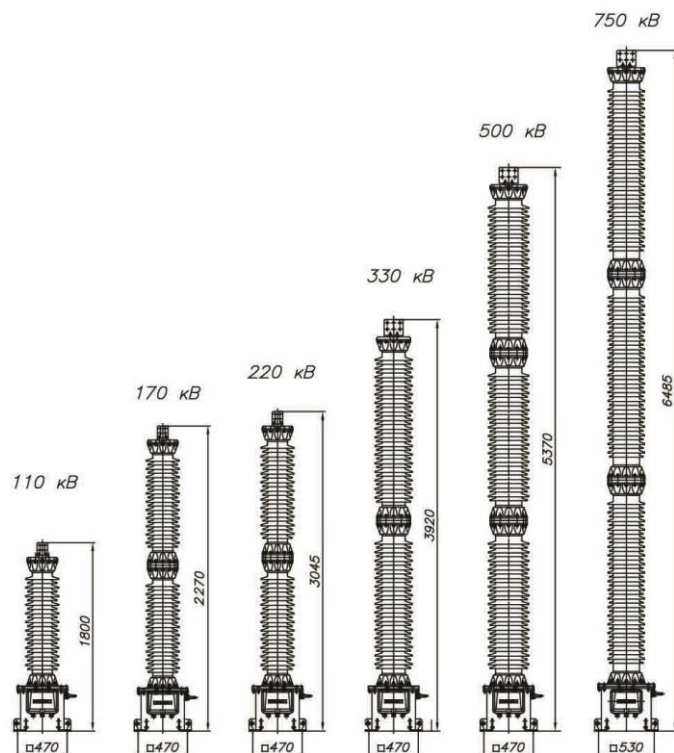


Рисунок 1.4 – Ємнісні трансформатори напруги.

Типове виконання трансформатора включає наступні характеристики:

- $U_{ном}$: від 110 до 750 кВ

- До 6 вторинних обмоток
- Усі вимірювальні та захисні класи точності з відмінною стійкістю до перехідних режимів мережі
- Герметична система компенсації розширення олії силфоном з нержавіючої сталі
- Оснащення для підтримування високочастотного зв'язку

Конструкція трансформатора. Паперова ізоляція електромагнітного пристрою проходить осушення у високому вакуумі і просочується високо інгібований, дегазованим та осушеним мінеральним маслом. Бак виготовлений з алюмінієвого сплаву або високоякісної сталі, яка захищається гарячим оцинкуванням та додатково перефарбовується для довготривалої стійкості до корозії. На корпусі електромагнітного пристрою встановлена коробка вторинних затискачів, разом з іншим приладдям, таким як масло показник, що позначають щитки, клапан для взяття проби масла, вушка для підйому, затискачі для заземлення.

Кожен трансформатор напруги ємнісного типу оснащений зовнішнім високочастотним затискачем (ВЧ), розташованим на прохідному ізоляторі на баку електромагнітного пристрою. Цей затискач дозволяє використовувати кожен ємнісний трансформатор напруги як конденсатор зв'язку на будь-якому етапі експлуатації. ВЧ затискач може бути розміщений і в коробці вторинних затискачів. Крім того, обладнання для ВЧ зв'язку (котушка виток, розрядник, ніж, що заземлює) також можна помістити в коробку вторинних затискачів.

Таблиця 1.1 – Основні технічні та метрологічні характеристики VCU

Характеристики	VCU-765
Найбільша робоча напруга, кВ	787
Клас напруги, кВ	750

Номинальна напруга первинної обмотки, кВ	750/ $\sqrt{3}$
Номинальна напруга основних вторинних обмоток,	100 / $\sqrt{3}$ або 110 / $\sqrt{3}$;
Номинальна напруга додаткової вторинної обмотки,	100 або 110 або 100/3 або 110/3
Кількість вторинних обмоток: основних	1 чи 2
додаткових	1
Клас точності основної вторинної обмотки для вимірювань /	у класі точності 1,0
Номинальне навантаження $a1 - x1$	100 або 200 або 300 ВА
Клас точності обмотки для захисту / Ном. Навантаження ад-хд	в класі точності 3Р 100 або 200 або 400 або 600 ВА
Клас точності обмотки для обліку електроенергії/Ном. навантаження $a2 - x2$	в класі точності 0,2 30 або 50 або 100 ВА або 200 ВА
Допустиме сумарне навантаження для основних обмоток із збереженням необхідних класів точності 0,2: 200 ВА	
Номинальна частота, Гц	50
Діапазон робочих значень температури, °С	від -60; -45; -35 до +40
Діапазон значень температури при транспортуванні, °С	від -45 до +50

Таблиця 1.2. Стандартні габаритно-установчі розміри

Тип	Клас напруги	Ном. ємність	Висота трансформатора	Маса трансформатора	Маса олії (ОД+ЕМУ)	Розміри для фіксації	Питома довжина шляху витікання мін.
	кВ	пФ	мм	кг	кг	мм	мм
VCU-765	750	3000	6485	1110	105+60	530x530	17710

Кінцеві розміри та маси трансформаторів залежать від конкретних електричних, механічних характеристик та параметрів навколишнього середовища.

Секційна конструкція обмоток трансформатора досить надійна як у електричному та тепловому плані. Ємнісний дільник напруги (ЄДН) складається з одного або декількох ємнісних елементів, встановлених один поверх іншого, кожен з яких містить необхідне число послідовно з'єднаних ємнісних елементів з масляною ізоляцією. Модулі заповнені синтетичною олією і знаходяться під невеликим надлишковим тиском, який створює розширювальна система у вигляді сильфонів з нержавіючої сталі. У конструкції використовуються кільцеві ущільнювальні прокладки. Низька напруженість електричного поля в ємнісних елементах забезпечує надійну роботу трансформатора в протязі усього терміну служби, що перевищує 30 років. Висока проміжна напруга і велика ємність забезпечують найкращі властивості в перехідних процесах. ЄТН мають високий коефіцієнт якості за рахунок відносно високої ємності та високої проміжної напруги. Коефіцієнт якості $= C_{\text{екв.}} \times U_{\text{проміжне}}^2$ характеризує стійкість та точнісні характеристик трансформатора та його відгук при перехідних процесах. Чим вищий цей коефіцієнт, тим краще точність трансформатора та сталість його параметрів роботи. Низька індукція у поєднанні з демпфуючим ланцюгом забезпечує безпечне та стабільне придушення ферорезонансу при всіх частотах і напругах аж до номінального коефіцієнта напруги.

Електромагнітний блок (ЕМБ). Ємнісний дільник напруги та електромагнітний блок з'єднані між собою за допомогою внутрішніх введів, що забезпечує високу точність вимірів. Електромагнітний блок поміщений у герметичний алюміній.

бак, заповнений мінеральним маслом. Електромагнітний блок складається з обмотки виготовленої з мідного дроту з двошаровою емалевою ізоляцією, намотаного на осердя, зібраний з високоякісних листів електротехнічної сталі. Первинна обмотка складається з основної та кількох урівнюючих обмоток, що використовуються для налаштування коефіцієнта трансформації. Номінальна проміжна напруженість становить приблизно $22 / \sqrt{3}$ кВ.

Електромагнітний блок включає компенсуючий реактор, послідовно з'єднаний між дільником напруги та високовольтним висновком первинної обмотки і призначений для компенсації зсуву фази, викликаного ємнісним дільником напруги. Налаштування індуктивного опору виконується індивідуально для кожного трансформатора для забезпечення необхідного класа точності. Будова та перелік елементів ЕТН наведена на рисунку 1.5. [3].

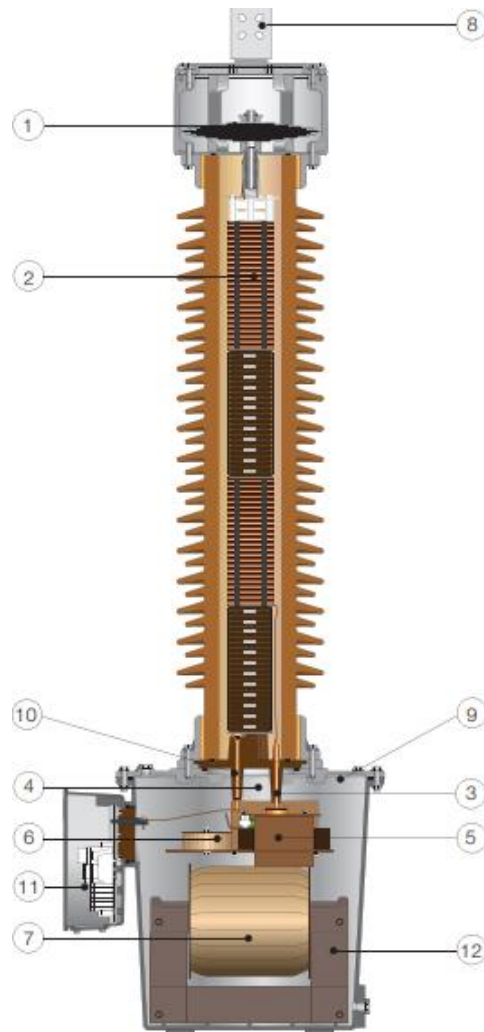


Рисунок 1.5 – Будова та перелік елементів ємнісного трансформатора напруги:

Ємнісний подільник напруги: 1 Розширювальна система; 2 Ємнісні елементи; 3 Введення проміжної напруги; 8 Плоский лінійний вивод, 4 Отвори 10 Виведення низької напруги (для підключення апаратури ВЧ-зв'язку) Електромагнітний блок: 4 Показчик рівня олії; 5 Компенсуючий реактор; 6 Антиферорезонансний демпфуючий ланцюг; 7 Первинна та вторинна обмотки; 9 Газова подушка; 11 Коробка вторинних висновків; 12 Осердя

Таким чином, зволоження являється основною причиною виникнення та розвитку пошкоджень ТН. В такому контексті можна виділити проблемні місця в роботі застарілих і деяких сучасних трансформаторів:

1. Зв'язок ТН із зовнішнім середовищем через силікагелеві патрон, що позначається тим, що гумові ущільнення ТН мають застарілу конструкцію та не ідеально взаємозамінні. З іншого боку недосконала конструкції самих силікагелевих патронів, через які волога може потрапити в ТН. Низька якість індикаторного силікагелю, що може завадити штатному заходу повітря та створити вакуум, що призведе до затягування повітря через гумові ущільнення кришки;

2. Строк експлуатації гумових ущільнень обмежується 25-30 роками навіть у сучасних ТН.

3. Зволоження прохідних ізоляторів обмоток ТН, як при довтривалому збереженні так і при експлуатації, не дає точно визначити опір обмоток.

Використання синтетичної олій та надлишкового тиску в сучасних трансформаторах, як зазначалось вище, покращує умови експлуатації, але повністю невілювати фактори зволоження не можуть, збільшуючи термін експлуатації проте ускладнюючи будову та потребуючи додаткових підсистем.

1.2. Методи діагностики трансформаторів напруги

1.2.1. Загальна характеристика методів діагностики

Діагностування ґрунтується на концепції обслуговування обладнання. Один із традиційних підходів передбачає періодичні випробування обладнання за встановленими проміжками часу. Інша стратегія визначає стан обладнання на основі експлуатаційного досвіду, що дозволяє використовувати найефективніші випробування, дотримуючись графіку роботи. Третій спосіб включає використання критеріїв надійності з урахуванням ризику відмов та їх можливих наслідків, що сприяє оптимальному використанню ресурсів. Четвертий підхід полягає в обслуговуванні на основі результатів функціонального діагностування з оцінкою працездатності окремих підсистем обладнання, враховуючи ймовірні дефекти та механізми їх розвитку. Серед компонентів трансформаторного обладнання, які підлягають випробуванням,

входять обмотки введення та ізоляції, пристрої регулювання напруги під навантаженням (РПН), ізоляційне масло та високовольтні вводи.

Система двоступеневих випробувань для оцінки стану обладнання стала досить популярною. На першому етапі проводяться регулярні перевірки устаткування щонайменше раз на рік, якщо воно працює нормально, застосовуючи методи, засвоєні на практиці, без відключення обладнання. Зазвичай це включає аналіз проб масла на вміст продуктів деградації матеріалів, вологи, домішок та продуктів старіння. На другому етапі, якщо виявляються аномалії та несправності, проводяться спеціальні випробування та перевірки для вироблення висновків щодо подальшої експлуатації устаткування. Під час довгострокової експлуатації згідно з даною моделлю, популярним є підхід функціонального діагностування, що розглядає діагностоване обладнання як сукупність функціональних систем, які забезпечують виконання основних функцій, таких як передача електромагнітної енергії, збереження електричної міцності ізоляції, механічної міцності обмоток і цілісності струмопередаючої системи.

Фундаментом системи контролю та діагностики є функціональна модель дефектів, яка встановлює можливі дефекти або чутливі зони в конструкції відповідно до умов експлуатації, шляхом аналізу конструкційних особливостей та причин відмови в експлуатації з урахуванням цілей та завдань діагностування. Оцінювання стану обладнання відбувається у формі системи запитів щодо стану його функціональних підсистем, враховуючи можливий сценарій переходу до дефектного стану перед відмовою. Програма технічного обстеження акцентується на виявленні ймовірних дефектів шляхом застосування групи методів, які характеризують певний дефект. Для підтвердження наявності дефекту та його кількісної оцінки потрібні принаймні дві діагностичні процедури.

Оцінка стану устаткування переважно проводиться в умовах роботи, особливо в екстремальних умовах відносно навантаження, температури та напруги. Цей підхід не вимагає обов'язкового надходження повної інформації

щодо попередніх характеристик, проте потребує розуміння структури та функцій устаткування і наявності даних про попередні критичні режими. Аналіз конструкції виступає початковою процедурою діагностики. Комплексне діагностичне обстеження проводиться з метою перевірки функціональної працездатності всіх підсистем обладнання та визначення необхідності проведення капітального ремонту устаткування.

Узагальнено, процедура діагностування включає такі методи:

1. Порівняння з початковими даними випробувань, зазвичай, бездефектного устаткування, в яке входять вимірювання за методом аналізу частотних характеристик: визначення перехідних функцій при введенні імпульсів струму, імпульсної напруги або напруги змінної частоти широкого спектру; аналіз вібраційних характеристик та спектральний аналіз високовольтного масла.

2. Вивчення тенденції зміни характеристик та параметрів у часі. Важливо підкреслити, що зміна не завжди означає ненормальний стан.

3. Використання статистичного методу та нормального розподілу, які визначають устаткування, де числові характеристики потрапляють у десяти або п'ятивідсотковий статистичний інтервал нормального розподілу. Відповідно, 90 або 95% вибірки вважаються нормальними.

4. Використання моделі дефекту для визначення характеристик, що притаманні лише певному дефекту. Це дозволяє здійснити якісну та у деяких випадках кількісну оцінку області дефекту. Формуються моделі дефектів та обмеження їх використання при оцінці впливу на обладнання.

5. Класифікація устаткування за станом для оцінки залишкового терміну служби групи обладнання після тривалої експлуатації. Це включає числову оцінку ознак можливого стану, визначених на основі експертних оцінок на основі аналізу конструкційних особливостей, умов та досвіду експлуатації, особливо видів та причин відмов, а також результатів випробувань.

6. Створення моделі дефектів полягає в складанні переліку можливих дефектів і пошкоджень в конкретному функціональному вузлі обладнання, а також уявленні імовірного сценарію розвитку дефекту до відмови устаткування. Цей процес може включати створення функціональної схеми, визначення можливих видів дефектів і пошкоджень на основі аналізу причин відмов і несправностей в схожому устаткуванні, оцінку найбільш вразливих зон у конструкції, та виявлення ймовірних дефектів і пошкоджень на основі аналізу умов експлуатації.

7. Проведення аналізу конструкції є ключовим для розуміння будови обладнання, оцінювання чутливості до погіршення стану в процесі експлуатації, та визначення моделі ймовірних дефектів з метою оптимізації діагностичних випробувань і вибору ефективних методів. Наприклад, встановлення заземленого електростатичного екрана між обмотками зменшує чутливість діелектричних характеристик до змін стану твердої ізоляції, а також наявність діелектричного матеріалу з підвищеними діелектричними втратами у структурі ізоляції може спричинити шунтування і маскування змін стану головної ізоляції. Ці фактори формують діагностичні зв'язки між механізмом пошкодження, видом дефекту та діагностичним параметром, що не завжди є однозначними та лінійними, що вимагає подальшого розвитку методів та засобів діагностики.

1.2.2 Діагностування дефектів і пошкоджень трансформаторів напруги.

Діагностування дефектів і пошкоджень у окремих випадках обумовлює зміну активного й індуктивного опорів обмоток ТН, а також струму і втрат в режимі холостого ходу, таким чином електромагнітні параметри обладнання можуть бути ефективними діагностичними характеристиками. Вони визначаються за допомогою визначення струму та втрат холостого ходу; струму, втрат та зміни опору короткого замикання, а також зміни опору обмоток кола постійному струму. За коефіцієнтом трансформації від паспортних відхилення мають бути не більше за 2%. У випадках, якщо напруга керованого ступеня є меншою за 2%, та для перевірки якості ремонту із

заміною обмоток, така точність вимірювання вважається недостатньою та допустиме відхилення становить не більше $\pm 0,5\%$. При оцінюванні втрат трифазного устаткування, значення втрат не має відрізнятися від паспортних даних більше ніж на 5%. Для однофазного обладнання різниця між отриманими значеннями та результуючими не повинна бути більше 10%. При оцінці зміни струмів холостого ходу за значеннями струмів у крайніх фазах або у порівнянні з попередніми визначеннями не має відрізнятися більш ніж на 10%. При оцінці опору короткого замикання граничне відхилення нормується на рівні 3%. При оцінці опору обмоток постійного струму початкове значення опору розімкнених контактів РПН складає зазвичай $40 \div 200$ мкОм. Збільшення перехідного опору контакту в 3÷4 рази може бути проявом дефектного, внаслідок чого можна очікувати лавиноподібного наростання опору. Вимірювання електричного опору ізоляції обмоток ТН виконують відповідно до схеми, наведеної на рисунку 1.6.

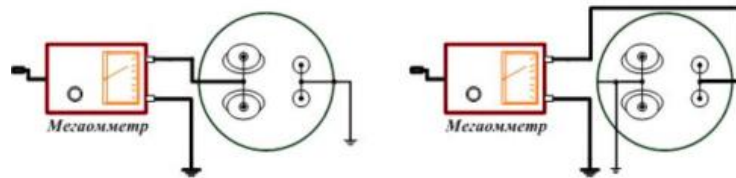


Рисунок 1.6 – Вимірювання електричного опору ізоляції обмоток ВН та НН трансформатора напруги.

Вимірюється опір ізоляції обмотки відносно корпусу, інша обмотка трансформатора повинна бути закорочена і заземлена. Відлік показів мегомметра здійснюється через 1 хвилину після початку вимірювання. Вимірювання виконується для первинної обмотки відносно бази та закорочених та заземлених вторинних обмоток. Після чого у вторинних обмотках виконується відносно закороченої та заземленої первинної обмотки. У трифазних ТН усі три фази первинної обмотки перед проведенням вимірювань закорочуються. Те ж саме виконують із вторинними обмотками.

Тангенс кута діелектричних втрат для маслобар'єрної ізоляції при мережевій частоті може бути виражений у вигляді суми з пари складових, одна

з яких залежить від тангенса кута втрат ізоляційного картону, а інша залежить від тангенса кута втрат трансформаторної оливи:

$$\operatorname{tg}(\delta) = K_0 \cdot \operatorname{tg}(\delta_k) + K_m \cdot \operatorname{tg}(\delta_m). \quad (1.8)$$

Зміни провідної здатності від часу, ємності від часу та частоти, а також тангенса кута діелектричних втрат від частоти відносять до характеристик абсорбції ізоляції. Вимірювання частотної залежності $\operatorname{tg}\delta$, особливо при надмірно низькій частоті (менше за 0,1 Гц), дає високу чутливість до зволоження. При цьому популярним є метод оцінки коефіцієнта абсорбції R_{60}/R_{15} , що залежить від значень температури, опору ізоляції, провідності масла, а також від конструкції ділянки. Нормою вважається значення $N_0 > 1,3$.

Особливо перспективним, глибоким та відносно складним є діагностування обладнання за розчиненими в маслі газами. Аномальні процеси, що викликають погіршення стану матеріалів і відповідні їм види дефектів, поділяються та кодуються наступним чином: - T1 – термічний, $T < 300^\circ\text{C}$; T2 – термічний, $300^\circ\text{C} < T < 700^\circ\text{C}$; T3 – термічний, $T > 700^\circ\text{C}$; D1 – розряди малої енергії; - D2 – розряди значної енергії; - PD – частинні розряди. Для оцінювання стану наповненого олією устаткування та ідентифікації аномального стану використовуються такі гази: - стандартні – C_2H_6 (етан), H_2 (водень), CH_4 (метан), C_2H_2 (ацетилен), C_2H_4 (етилен), 3 (окисел вуглецю), O_2 (кисень), CO_2 (двоокис вуглецю), C_3H_6 (бутилен), N_2 (азот); та додаткові – C_3H_8 (бутан), (ізомер бутан-1: $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}=\text{CH}_2$), C_4H_8 .

Швидкість утворення відповідно вказує на можливий дефект До прикладу,

утворення газів (мл/година) від абсолютної температури T модуть бути розраховані наступним чином:

- при локальному перегріві до 300°C : $\log K = 1.2 - 24600/T$;
- при перегріві від 300 to 500°C : $\log K = 5.5 - 4930/T$;
- при перегріві від 500 до 700°C : $\log K = 14.4 - 11800/T$.

Таблиця 1.3. Характеристика дефекту за присутністю газу в маслі.

Газовий склад	Характеристика стану оливи
H ₂	Часткові розряди слабкої енергії Особий газ при від температури
C ₄ H ₈	Ключовий газ при температурі до 300 °C;
C ₃ H ₆	Ключовий газ при розкладі оливи до 50 0° C
C ₂ H ₆	Перегрів вище 50 0°C
CH ₄	Перегрів вище 80 0°C
C ₂ H ₄	Бульбашковий стан
C ₂ H ₂	При потужних розрядах або дуги в оливі
C O	Розкладання паперу ізоляції
CO ₂	Окислювання оливи

Використовуючи найбільш сучасний метод хроматографічного аналізу до трансформаторів високої напруги 750 кВ, граничні значення газів, розчинених в маслі є на рівні: H₂ – 30; CO – 500; CO₂ – 4000; CH₄ – 20; C₂H₆ – 10; C₂H₄ – 20; C₂H₂ – 10;

1.2.3 Діагностичне обладнання аналізу стану трансформаторів напруги.

Сучасне цифрове діагностичне обладнання, таке як HYDROCAL 1008 дозволяє виконувати багатокритеріальний параметризований аналіз стану обладнання за цілим рядом показників його роботи. Крім вимірювання вольт-амперних характеристик вводів та температури масла, система КІА дозволяє здійснювати вимірювання вологи конкретного обладнання і ключових газів, таких як чадний газ (CO), водень (H₂), метан (CH₄), вуглекислий газ (CO₂), етилен (C₂H₄), ацетилен (C₂H₂), а також етан (C₂H₆), розчинених у трансформаторній оливі ТН або шунтуючих реакторів. Водень (H₂) викликає більшість неполадок ізоляційних конструкцій вимірювальних трансформаторів, чадний газ (CO) є проявом розвитку погіршення якості паперу чи целюлози, якщо наявний та підвищений з вмістом ацетилен (C₂H₂) та етилен (C₂H₄) то є ознакою прояву такого пошкодження, як перегрів, або часткові розряди чи утворення дуги надвисокої напруги. Зовнішній вигляд приладу наведено на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 – Зовнішні вигляд приладу HYDROCAL 1008.

Іншим прикладом засобу комплексної діагностики може бути OMICRON CPC 100. Прилад дозволяє виконувати оцінку стану та несправностей електричного обладнання широкого ряду, таких як генератори, силові та вимірювальні трансформатори високовольтного виконання зокрема за електричними характеристиками. У високовольтному та у надвисоковольтному обладнанні здійснюється моніторинг стану ізоляції з метою забезпечення великих значень діелектричних параметрів під час повного циклу експлуатації. Зовнішній вигляд приладу наведено на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Зовнішні вигляд приладу OMICRON CPC 100.

Нове покоління компактних міні-лабораторій для аналізу оливи, серії BALTECH - ОА « Oil Analyzer », дозволяють усунути потребу в небезпечних реактивах і спростити розуміння результатів аналізу оливи та значно зменшують вартість і час, потрібних для діагностування фактичного стану

силових трансформаторів. Основні елементи обладнання мінілабораторії "Oil Analyzer" представлено на рисунку 1.9.



Рисунок 1.9 – Портативна мінілабораторія BALTECH OA «Oil Analyzer»

Не дивлячись на широкі можливості діагностування сучасного обладнання за різними параметрами, створення єдиного комп'ютеризованого комплексу прогнозування, планування випробувань та підтримки прийняття рішень є доцільним до подальших розробок з технічної та економічної точок зору.

1.2.4 Використання інтелектуальних систем та нечіткої логіки до задач діагностики та прогнозування відмов трансформаторів напруги.

Застосування інтелектуальних систем безперервного контролю та діагностування (ІСМД) у більшості випадків обмежується лише діагностуванням окремого силового електрообладнання (такого як трансформатори, автотрансформатори, реактори) або впровадженням різних систем діагностики силового, вимірювального та захисного обладнання. Цей підхід до впровадження ІСМД не сприяє відповідності високим вимогам до достовірності діагностичної інформації через недостатню інформацію від первинних датчиків у системах і непотрібне збільшення вартості системи діагностування через необхідність подвійних первинних датчиків та засобів вимірювання. Інтелектуальна система моніторингу та діагностування електрообладнання ТН повинна проводити надійну, багатоаспектну оцінку технічного стану та передбачення відмов обладнання з використанням нових методів та критеріїв оцінки, що підвищують швидкість та якість проведення

ТО і Р електрообладнання. ІСМД має бути комплексом організаційних та технічних заходів з управління технологічними процесами на трансформаторних підстанціях, моніторингу та діагностування обладнання трансформаторних підстанцій.

Процес аналізу та прийняття рішення при побудові діагностичної системи характеризується розмірністю та складністю об'єкту управління а також наявністю детермінованої інформації про його стан. ТН є складним об'єктом, що має низку характеристик та показників експлуатації, що нелінійно пов'язані між собою. Крім того, в процесі експлуатації устаткування, однозначність та достовірність інформації про умови та перебіг у стані роботи не є повними та корелюються з наявними системи експертних знань та про роботу конкретного устаткування. Отже, за таких умов використання класичних, бінарних логічних систем стає ускладненим або формує значну помилку в оцінці стану роботи системи.

Ідея використання апарату нечіткої логіки полягає у тому, що параметри стану не обмежуються істинними чи хибними визначеннями. За нечіткою логікою сукупність функцій – термів, характеризують параметри стану об'єкту розташовуються по їх ступеню приналежності.

Узагальнено опис функцій приналежності формується наступним чином. Нехай X – універсальна множина. Тоді підмножина A в X є сукупність пар $A = \{x, \mu_A(x)\}$, де $\mu_A(x)$ – функція, що визначає ступінь належності елемента x до A ; область її значень лежить в інтервалі $(\mu_A(x)/X) [0,1]$ представлена формулою 1.9.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A, \\ 0, & x \notin A. \end{cases} \quad (1.9)$$

Визначення $\mu_A(x)$ – характеристична функція приналежності (функція приналежності) – функція вказує ступінь (рівень) приналежності елемента x підмножини A .

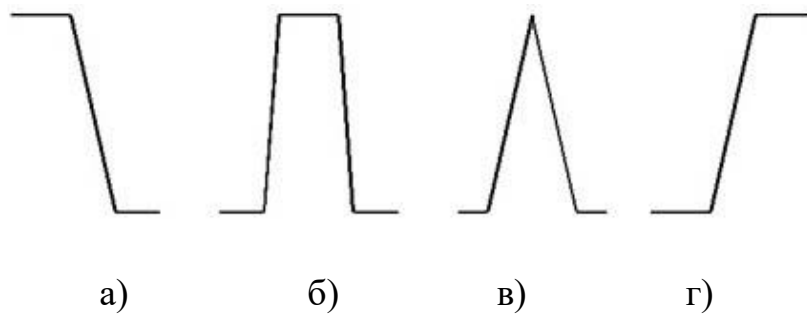


Рисунок 1.10 – Основні види функції приналежності: а) Z; б) П; в) Л; г) S.

Наприклад, низка значень температури може визначатися за допомогою набору з пари варіантів такі як «прийнятна» чи «не прийнятна». Відповідно, конкретна температура, приналежна до набору «допустима», буде являтися носієм множини «допустима». Для цього треба встановити деяку граничну величину, при досягненні неї температура буде вважатися «не прийнятною», та інша температура менше даної буде належати до категорії «прийнятна» (виключення). Наприклад, якщо значення, відносно якого ми визначаємо, до якої саме категорії віднести температуру, дорівнює $+90^{\circ}\text{C}$ (допустима температура трансформаторної оливи при звичайному охолодженні ТН), тоді не так важливо, якою саме буде температура ($+5^{\circ}\text{C}$ чи $+89^{\circ}\text{C}$). Обидва параметри будуть належати до категорії «допустима». Якщо б в цій ситуації використовувався нечіткий набір термів, кожен член набору, або кожна температура мали би ступінь приналежності до набору температури. Представлення параметру стану системи – температури та відповідна до неї лінгвістична змінна «температура», два терма – «допустима» та «не допустима» із z та s подібними функціями приналежності відповідно предсталено на рисунку 1.11.

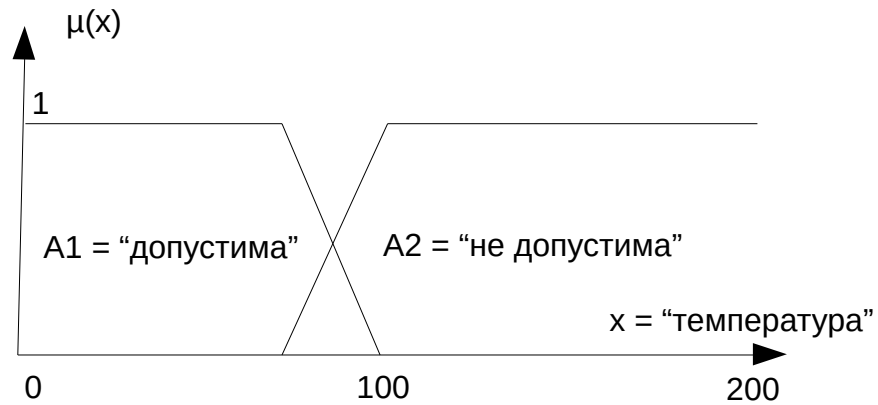


Рисунок 1.11. Представлення нечітких множин визначення допустимої температури

Перерахуємо основні операції над носіями множини згідно з математичним апаратом нечіткої логіки [4].

Включення. Нечітка множина A включається в нечітку множину B , $A \subseteq B$ тоді і тільки тоді, коли функції приналежності:

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x), \quad \forall x \in X. \quad (1.10)$$

Об'єднання, або диз'юнкція $A \cup B$, двох нечітких множин, відповідає логічній операції "АБО" і визначається як найменше нечітка множина, що містить обидві множини A та B . Функція приналежності для означеної множини знаходиться за допомогою операції взяття максимуму:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad \forall x \in X. \quad (1.11)$$

Перетин, чи кон'юнкція $A \cap B$, реалізує логічну операцію "ТА" і визначається як найбільша з двох нечітких множин, що належить одночасно до обох множин.

Функція приналежності множин визначається за допомогою нечіткої операції знаходження мінімуму:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad \forall x \in X \quad (1.12)$$

Графічна інтерпретація агрегування функцій приналежності операцій об'єднання та перетину представлена на рисунку 1.12.

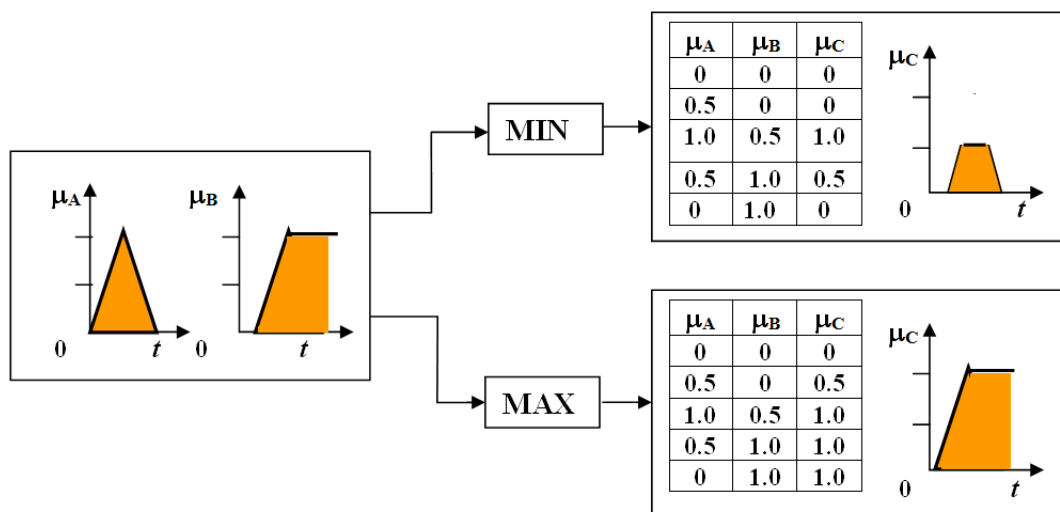


Рисунок 1.12 – Агрегування функцій приналежності операцій об'єднання та перетину

Доповнення нечіткої множини A , що має позначення через $\overline{A}$, відповідає логічній операції "НІ" і визначається формулою:

$$\mu_{\overline{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \quad \forall x \in X \quad (1.13)$$

Легко бачити, що чітким множинам, чії функції приналежності приймають тільки пару значень: 0 або 1, дані вирази визначають булеві операції чіткої логіки "АБО", "ТА", "НІ".

Приведемо записи двох також досить поширених операцій над нечіткими множинами - алгебраїчного добутку і алгебраїчної суми нечітких множин.

Алгебраїчний добуток AB над нечіткими множинами A і B визначається наступним чином:

$$\mu_{AB}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x), \quad \forall x \in X \quad (1.14)$$

Алгебраїчна сума $A \oplus B$:

$$\mu_{A \oplus B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x), \quad \forall x \in X \quad (1.15)$$

Крім перерахованих є і інші операції, які виявляються корисними при роботі з лінгвістичними змінними.

Операція **концентрації** $CON(A)$ може бути виражена як алгебраїчний добуток множини A на себе саму: $CON(A) = A^2$ тобто

$$\mu_{CON(A)}(x) = \mu_A^2(x), \quad \forall x \in X \quad (1.16)$$

В результаті застосування цієї операції до множини A зменшуються ступеня приналежності елементів x цій множині, треба зазначити, якщо це зменшення помірно мале, а для елементів з малим ступенем приналежності воно є помірно великим. У звичайній мові застосування даної операції до обраних значень лінгвістичної змінної A відповідає використанню підсилює терма "дуже" (наприклад, "дуже гарячий", "дуже малий" і т.д.

Операція **розрядження** $DIL(A)$ визначається як:

$$\mu_{DIL(A)}(x) = \sqrt{\mu_A(x)}, \quad \forall x \in X \quad (1.17)$$

Суть цієї операції протилежна дії операції концентрації та відповідає невизначеному терму "вдосталь", що виконує операцію послаблення наступного за ним (основного) терма A : "досить гарячий", "досить малий" і т.п.

Принципи роботи з нечіткою логікою здебільше ґрунтуються на наступних трьох етапах: Фазифікація вхідних та вихідних величин, розробка нечітких правил та дефазифікація. Фазифікація – співставлення безлічі значень x її функції власності $\mu(x)$, тобто переведення значень x у нечіткий формат Дефазифікація – процес, обернений до фазифікації. Нечіткі правила будуються за наступними принципами:

- Складається з передпосилок та висновків (продукційний механізм).
- Можлива наявність кількох передпосилок у правилі, що об'єднуються у за допомогою операторів логічного зв'язку ТА, АБО.
- Продукційне правило записується у вигляді:
«ЯКЩО (посилання) (зв'язок) (посилання) ... (посилання) ТО (висновок)».

Алгоритм формалізації завдання в термінах нечіткої логіки містить наступні кроки:

Крок 1. Для кожного терму обраної лінгвістичної змінної віднайти таке числове значення чи діапазон, які найкраще характеризують даний терм.

Крок 2. Після визначення значень із одиничною приналежністю необхідно визначити значення параметра із приналежністю «0» до даного терму.

Крок 3. Для визначення проміжних значень вибираються П- або Л-функції серед стандартних функцій приналежності.

Для значень, що відповідають межевим значенням параметра, застосовуються S або Z функції приналежності.

Серед інших алгоритмів нечіткого висновку, мабуть, найбільш відомими та популярними є алгоритми Мамдані та Сугено .

Відзначимо, що використовуваний у різних експертних та керуючих системах, механізм нечітких висновків по суті має містити базу знань, що утворюється спеціалістами з предметної галузі у вигляді сукупності нечітких предикатних правил. Відповідно до алгоритму Мамдані продукційні правила, що зв'язують вхідні та вихідні множини формується безпосередньо експертом в наступній формі:

Правило 1: якщо $x \in A_1$, тоді $z \in B_1$,

Правило 2: якщо $x \in A_2$, тоді $z \in B_2$,

.....

Правило n: якщо $x \in A_n$, тоді $z \in B_n$,

де x - вхідна змінна (найменування відомих значень оцінюваних даних), z - змінна виводу (ім'я значення даних, яке буде обчислено); A_i і B_i - нечіткі множини.

Відповідно до алгоритму Сугено між вхідною та вихідною множинами встановлюється алгебраїчний зв'язок, що притаманний зазвичай добре вивченим системам із відомими законами розподілу випадкових величин та причинно-наслідкових зв'язків

Вихідний набір правил подається у вигляді:

P_i : якщо $x \in A_i$ тоді $z \in z_i$, $i = 1, 2, \dots, n$,

де $z_i = Z(x_i)$ – алгебраїчна функція.

Наведемо приклад двох правил:

Правило 1: якщо $x \in A1$ та $y \in Y1$ то $z1 = a1 x + b1 y$,

Правило 2: якщо $x \in A2$ і $y \in Y2$ то $z2 = a2 x + b2 y$.

Як наслідок, головна відмінність між логікою агрегування Мамдані та Сугено полягає в різних в іншій організації формування значень вихідної змінної за правилами, що утворюють базу знань. У системах Мамдані значення вихідних змінних задаються у вигляді нечітких термів, у системах Сугено вони задаються як лінійна комбінація визначених вхідних змінних. З обчислювальної точки зору алгоритм Сугено реалізується значно простіше, ніж алгоритм Мамдані, в той же час, час та ресурси для рахунку для нього менші, ніж для алгоритму Мамдані, інколи до 100 разів. Якщо немає виражених аргументів чому варто вибрати алгоритму Мамдані, краще вибрати алгоритм Сугено.

Останнім етапом реалізації нечіткої логіки є процедура дефазифікації, що полягає у визначенні конкретного (чіткого) рішення серед множини, отриманої в наслідку агрегування логічних операцій згідно до визначених продукційних правил. Для багатоекстремальних функцій приналежності належності знайшли поширення наступні методи дефазифікації:

1. LOM – метод вибору найбільшого з максимумів;
2. SOM – метод вибору найменшого з максимумів;
3. Mom метод вибору середини між максимумів;
4. Centroid – метод визначення центру ваги;
5. Bisector – метод розрахунку медіана.

Дані методи є інваріантними до множин, визначених функціями приналежності та обираються від потреби інтерпретацій отриманого результату за поставленим завданням. Наприклад, для більшості задач, типовою зв'язкою є алгоритм Мамдані та метод центроїда що найбільш типово реалізують нормальний закон розподілу у прийнятті рішень.

При побудові експертних систем та систем управління є варто згадати нечіткі нейронні мережі, які в світовій літературі має назву ANFIS (адаптивна

нейро-нечітка мережа). ANFIS має структуру, яка за своїми функціями еквівалентна нечіткій системі логічного висновку, побудованій за допомогою нечітких базових правил типу Сугено. ANFIS є методом налаштування сформульованих базових правил, точніше параметрів відповідних цим правилам функцій належності, за допомогою алгоритмів навчання, заснованих на комплекті навчальних (зразкових) даних. Такі алгоритми дозволяють адаптувати базові правила до навчальних даних. Структура ANFIS при агрегуванні правил використовує алгоритм Такаги-Сугено, які можна описати наступним чином:

Якщо $u_1 \in A_1$ і $u_2 \in B_1$, то $y_1 = c_{11}u_1 + c_{12}u_2 + c_{10}$, (правило 1)

Якщо $u_1 \in A_2$ і $u_2 \in B_2$, то $y_2 = c_{21}u_1 + c_{22}u_2 + c_{20}$. (правило 2)

Крім того, нечіткий контролер із такими правилами використовується для інтерполяції виходів двох лінійних контролерів. Якщо величина істини (збуджуюча сила) правил дорівнює α_1 і α_2 для заданих значень входів u_1 і u_2 , то вихід обчислюється як середньозважене значення:

$$y = \frac{\alpha_1 y_1 + \alpha_2 y_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = \bar{\alpha}_1 y_1 + \bar{\alpha}_2 y_2$$

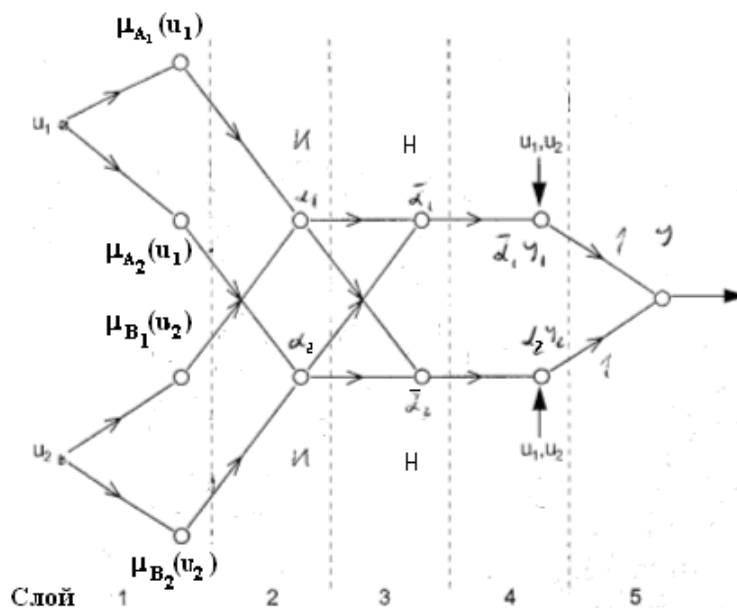


Рисунок 1.13 – Структура мережі ANFIS.

Кожен нейрон у шарі з номером 1 адаптується з параметричною активаційною функцією, роль якої виконує відповідна функція приналежності. Вихід цього нейрона є ступенем, з якою даний вхід задовольняє функції приналежності, тобто $\mu A1(u1)$, $\mu A2(u1)$, $\mu B1(u2)$ чи $\mu B2(u2)$. Прикладом функції приналежності є П-подібна функція.

$$\mu(u) = \frac{1}{1 + |(u - c)/a|^{2b}}$$

де $\{a, b, c\}$ є множина параметрів. При зміні значень цих параметрів змінюється форма П-подібної функції приналежності. Параметри цього шару називають параметрами передумов (умов).

Кожен нейрон у шарі 2 є фіксованим, значення виходу якого дорівнює добутку всіх сигналів, що на нього надходять. У загальному випадку може бути використана будь-яка інша нечітка операція ТА, наприклад, мінімум. Вихід кожного вузла є ступенем істинності і-го правила.

$$\alpha_i = \mu_{A_i}(u_1) \mu_{B_i}(u_2), \quad i = 1, 2.$$

Кожен нейрон у шарі 3 є фіксованим, значення якого обчислює відношення ступеня істинності і-го правила та суми ступенів істинності всіх правил

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_1 + \alpha_2},$$

де $i=1,2$.

Таким шляхом здійснюється нормалізація ступеня істинності.

Кожен вузол у шарі 4 є адаптивним шаром з вихідним сигналом

$$\bar{\alpha}_i y_i = \bar{\alpha}_i (c_{i1} u_1 + c_{i2} u_2 + c_{i0})$$

де $\bar{\alpha}_i$ є нормалізована ступінь істинності, одержувана з виходу шару 3 і $\{c_{i1}, c_{i2}, c_{i0}\}$ є множина параметрів цього вузла. Параметри шару називаються параметрами виводу.

Кожен вузол у шарі 5 є фіксований вузол, який підсумовує всі сигнали, що надходять на нього.

Алгоритм навчання ANFIS. Якщо параметри передумов фіксовані, вихід всієї мережі є лінійною комбінацією параметрів висновків. У символах цей вихід може бути записаний у вигляді:

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} y_1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} y_2 \\
 &= \bar{\alpha}_1 (c_{11}u_1 + c_{12}u_2 + c_{10}) + \bar{\alpha}_2 (c_{21}u_1 + c_{22}u_2 + c_{20}) \\
 &= (\bar{\alpha}_1 u_1) c_{11} + (\bar{\alpha}_1 u_2) c_{12} + \bar{\alpha}_1 c_{10} + (\bar{\alpha}_2 u_1) c_{21} + (\bar{\alpha}_2 u_2) c_{22} + \bar{\alpha}_2 c_{20}
 \end{aligned}$$

Він представляє лінійну комбінацію параметрів висновків c_{ij} ($i=1,2$; $j=0,1,2$). Гібридний алгоритм налаштовує параметри виводів при прямому поширенні сигналу та параметри передумов $\{a_i, b_i, c_i\}$ при зворотному розповсюдженні сигналу. При прямому поширенні мережа передає вхідні сигнали в прямому напрямку до шару 4, в якому параметри висновків ідентифікуються методом найменших квадратів або шляхом псевдо інверсії матриці. При зворотному розповсюдженні сигнал помилки передається у зворотному напрямку і параметри передумов оновлюються за допомогою методу зворотного поширення помилки. У зв'язку з тим, що оновлення параметрів передумов і висновків відбуваються окремо, у гібридних алгоритмах навчання можна прискорити процес обчислень шляхом використання різних варіантів градієнтних методів або інших методів оптимізації для налаштування параметрів передумов. Процес налаштування зображено на рисунку 1.14.

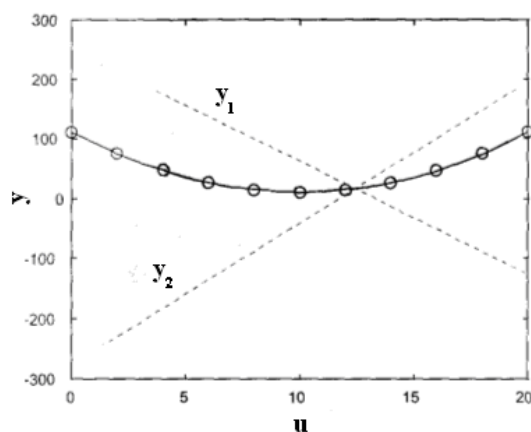


Рисунок 1.14 – Налаштування мережі ANFIS

Використання сучасних комп'ютерних технологій розширює можливості дослідження нових методів теорії нечітких множин та нечіткої логіки таких як MATLAB інструменти налаштування дозволяють швидко виконувати дослідження моделей для різних типів систем прийняття рішень та управління в умовах невідомості.

Інтеграція всіх засобів в єдиному програмному продукті забезпечують гнучкість та масштабованість використання вбудованих функцій, що реалізують математичні процедури та алгоритми [5,6].

Нечітке моделювання та налаштування в середовищі Matlab робиться в пакеті Fuzzy Logic Toolbox, в якому реалізовані. Має високий рівень та інтерактивне середовище для чисельних обчислень, візуалізації та програмування. Мова та інструменти вбудованих математичних функцій дозволяють перевідати багато підходів і досягти рішення продуктивніше та масштабованіше ніж більшість аналогів, таких як C++/C тощо.

Висновки до першого розділу

Трансформаторів напруги 750 кВ здебільше представлені на ринку ємнісного виконання. ЕБН та ємнісні елементи трансформатора мають ізольовану конструкцію, тому методи діагностування в основному мають бути направлені на вимірювання діагностичних показників на зовнішніх елементах та виводах. Серед найбільш поширених показників та обладнання, що здатно їх якісно оцінити є температура, опір ізоляції, ємність, коефіцієнт трансформації та $\text{tg}(\delta)$. У регламентовано невинправному випадку для подальшої кореляції з «зовнішніми» або трансформаторів іншого типу, методи оцінки стану оливи дозволяють деталізувати діагностичний стан. Тому варто врахувати комплекс діагностичних параметрів при розробці моделі. Математичний апарат нечітких множин для формування системи підтримки прийняття рішень, що може включати експертні знання з експлуатації широкої номенклатури ТН доцільний до використання.

2. МОДЕЛЬ ДАГНОСТУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

2.1 Класифікація та параметризація факторів пошкоджуваності ТН.

Термін служби трансформатора залежить від його залишкового ресурсу. У понятті ресурсу трансформатора слід виділити дві складові: перша - це поновлюваний ресурс, основною частиною якого є ресурс ізоляційної системи. Поновлюваний ресурс також включає ремонт або заміну окремих компонентів трансформатора, таких як вводи, перемикаючі пристрої, насоси та вентилятори системи охолодження. Друга складова ресурсу - це ресурс целюлозної ізоляції, який не може бути відновлений, і, на підсумок, визначає загальний залишковий ресурс трансформатора. Звітність експлуатації трансформаторних підстанцій показує, що аналіз масла має ключове значення для діагностики технічного стану. У світовій практиці цей підхід розглядається як досить ефективний, оскільки дефекти трансформаторів, виявлені при аналізі масла, підтверджуються при розборці масло наповненого обладнання у 95% випадків. Також важливо зауважити, що стан та ресурс обладнання залежать від стану масла більш ніж на 60 - 70%. Таким чином, аналіз масла дозволяє отримати достовірну інформацію про технічний стан масло наповненого обладнання. Цей підхід має декілька переваг: - не вимагає зупинки експлуатації обладнання; - не потребує розбирання обладнання; - дозволяє виявлення несправностей на ранній стадії; - надає можливість заміни масла за його фактичним станом, а не за пройденим часом експлуатації; - вимагає невеликих економічних витрат на діагностику та аналіз результатів. Зі старінням трансформаторної оливи погіршуються її ізоляційні властивості, відбувається накопичення осаду на активних деталях трансформатора (обмотках, магнітопроводах), що ускладнює відведення тепла. Старіння олії швидшає при підвищеній температурі, контакті з киснем, сильному електричному полі тощо через окислювальні процеси, продукти яких входять у склад масла. Ці фактори зумовлюють погіршення всіх властивостей олії: зростання кислотності, залишковість, температура спалаху, в'язкість, ізоляційні характеристики (пробивна напруга та $\tan \delta$). Ці причини старіння

дозволяють виявити основні показники діагностики ізоляції силових трансформаторів. Показники приведено на рисунку 2.2.

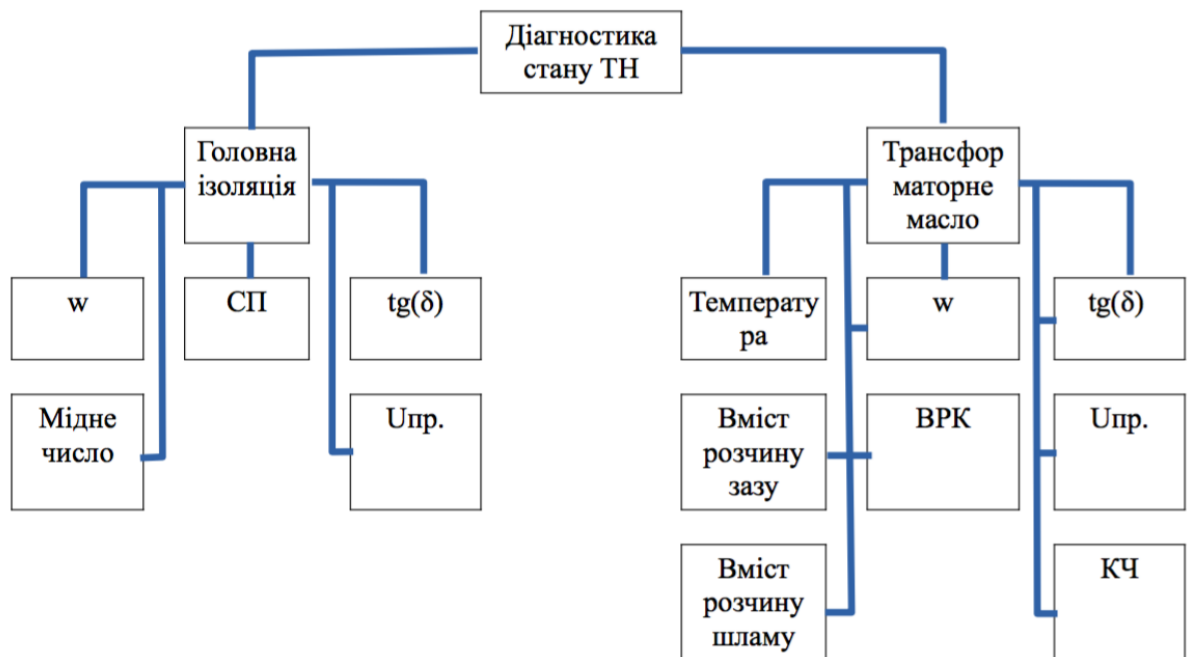


Рисунок 2.2 – Класифікація показників діагностування паперово-масляної ізоляції силових трансформаторів

Тут $\text{tg}\delta$ - тангенс кута діелектричних втрат; Упр - пробивна напруга; КЧ - кислотне число; W - вологовміст; СП - ступінь полімеризації ізоляції; ВРК - водорозчинні кислоти у олії.

Широкий спектр показників, які використовуються для діагностування стану силових трансформаторів, ускладнює об'єктивну та надійну оцінку цих показників. На сьогоднішній день для аналізу масла у лабораторіях підприємств переважно використовуються лабораторні методи, так звані "мокрі хімічні" методи, які є тривалими, вимагають значної кількості реагентів та розчинників, а також кваліфікованих лаборантів з допуском до роботи з небезпечними хімічними реактивами. Зменшення використання реактивів у лабораторних умовах може бути досягнуте за допомогою нових підходів та сучасних методів діагностування, а також використання нового лабораторного обладнання. Дослідження, проведені фахівцями України, включаючи НДЦ "ЗТЗ - Сервіс" в місті Запоріжжі, дозволили виявити основні дефекти силових трансформаторів, які представлено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Обладнання та вид дефекту	Кількість випадків	Частка, %
Система охолодження	146	23,1
Високовольтні уводи	92	14,5
Виділення газів в олію	58	9,2
Старіння олії	48	7,6
Дефекти в пристрої Р ПН	46	7,3
Витік по ущільненням обладнання ТН	44	7
Розжаття обмоток	42	6,6
Забруднення тв ізоляції	34	5,4
Зволоження тв ізоляції	26	4,1
Розжаття магнітопроводу	26	4,1
Забруднення олії	14	2,2
Викривлення обмоток	10	1,6
Пошкодження в шафі управління оходження	8	1,3
Вібрація	8	1,3
Пошкодження відводів	7	1,1
Пошкодження магнітн. шунтів	6	0,9
Пошкодження пристроїв перемикання без збудження	6	0,9
Окислювання олії	4	0,6
Перегрів роз'єму комутатора	4	0,6
Порушення герметичності	4	0,6

Відповідно до вимог експлуатації, регулярно проводиться перевірка мегометром опору ізоляції первинної та вторинних обмоток, а також виконується фізико-хімічний аналіз масла для скороченої версії аналізу та $\text{tg } \delta$. Контроль ізоляції вторинних обмоток (а-х та ад-хд) виконується релейним персоналом, але спільно з контрольними кабелями, які, при нормі 0,5 МОм, не надають достовірної інформації про стан їхньої ізоляції. Норма для ізоляції первинної обмотки А-Х ТН становить 300 МОм, повинна відображати загальний стан ізоляції ТН. Однак, поява проблеми виникає через ослаблену ізоляцію кінця обмотки Х. Різні конструктивні модифікації цього виводу (карболітові плити, гетинаксові та порцелянові виводи) не дали очікуваного

результату через низький опір ізоляції проміжної ізоляції виводу Х, що ускладнює об'єктивну оцінку опору обмотки А-Х під час експлуатації. Таким чином, виміри опору ізоляції обмоток не відображають реального стану ізоляції ТН. Також, передбачено періодичний (один раз за 3 роки) збір проб трансформаторного масла з каскадів ТН для подальших аналізів, де встановлені лімітні значення, які зведено до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Граничні величини при контролі відбору масла.

Аналіз	Граничні величини	Примітка
величина прибивної напруги, кВ	не менше 35 кВ	Для каскаду, як для 330 кВ так 750 кВ
величина $\text{tg } \delta$ при 90°C, %	не більше 10 %	Величина завелика, так як при цьому олива вже чорного кольору, вважається за критичну величину 5-6 %, по досягненню якої потрібно масло замінити.
температура спалаху, °C	зниження не більше як на 5 °C	Для ТН не значущий параметр.
кислотне число, мг К О Н	0,1 мг КОН	Потрібен при $\text{tg } \delta$ масла 5-6 % та більше.
Волого вміст, г/т	Не більше 30 г/т	Аналіз, що не визначається нормами, і доцільний як діагностичний назагал

Аналіз трансформаторної оливи з каскадів ТН дозволяє досить точно визначити та провести діагностику стану внутрішньої ізоляції ТН, тобто виявити, чи потрапляє волога в ТН чи ні. Конструктивно обмотки ТН-330-750 кВ (в подальшому просто ТН, оскільки конструктивно вони однакові) розташовані досить вдало, оскільки вони розміщені достатньо далеко від дна. Навіть при випадковому потраплянні води в каскад, якщо вода проникає вздовж внутрішніх стінок, обмотки досить довго не зволожуються, навіть якщо під час відбору проб масла виходить певна кількість води. Конструкція обмоток є надійною як у електричному, так і в тепловому відношенні.

Зволоження є основною причиною виникнення та розвитку пошкоджень ТН, за винятком явища ферорезонансу.

2.2. Статистика пошкоджуваності ТН

За результатами хроматографічного аналізу та фахового опрацювання даних щодо типових проявів ушкоджень в наслідок зміни стану газів в маслі ряду ТН мають бути враховані наступні особливості:

1. В більшості штатно працюючих ТН концентрація означених газів, як водень, етан, метан, етилен дуже низькі, не перевищують 5-10 р р м.
2. При заборі аналізів відбувались порушення щодо тари та термінів виконання, що в частині випадків зробило дані не та не рекомендуються для обробки.

Результати газовмісту випробовуваних трансформаторів наведені в таблиці 2.3.

Таблиці 2.3. Газовміст трансформаторів напруги за хроматоргафією.

	Кас - кад	Дата	Газовміст, ррм							Примітка
			H2	C O	CO 2	CH 4	C2H4	C2H2	C2H6	
А	в	13.04.2005	1	14	935	1,8	0,3	0	1,3	
	с	13.04.2005	5	79	1558	1,2	1,9	0	1,7	
	н	13.04.2005	5	40	1321	2,4	0,5	0,1	3,2	
В	в	13.04.2005	1	16	771	0,7	0,1	0	0,4	Заміна фази Встановлено нову фазу
	в	15.04.2005	0	14	735	0,7	0	0	0,3	
	в	30.05.2005	7	40	956	1,3	0	0	1	
	в	06.06.2005	12	20	833	0,9	0	0	0,7	
	в	17.06.2005	9	24	982	0,8	0,1	0	0,8	
	в	24.06.2005	9	31	847	0,5	0,1	0	0,7	
	в	07.07.2005	9	20	922	1,6	0	0	0,6	
	в	22.07.2005	9	66	972	2,3	0	0	1	

В	01.08.2005	9	49	1034	2,6	0	0	0,7	Заміна фази
В	25.08.2005	0	16	544	0,5	0	0	0	Встановлено нову фазу
В	04.11.2005	0	24	589	0,7	0	0	0,1	
с	13.04.2005	157	19	700	40	0,1	0	27	Заміна фази
с	15.04.2005	0	14	734,8	0,7	0	0	0,3	Встановлено нову фазу
с	30.05.2005	324	47	1008	38	0	0	9	
с	06.06.2005	753	31	956	47	0	0	11	КОНТРОЛЬ
с	17.06.2005	719	28	965	60	0	0	13	
с	24.06.2005	710	40	981	62	0	0	14	
с	07.07.2005	747	29	976	71	0	0,2	19	
с	22.07.2005	713	59	903	90	0	0	23	
с	01.08.2005	665	54	1069	100	0	1,3	24	Заміна фази
с	25.08.2005	0	18	429	0,7	0	0	0,2	Встановлено нову фазу
с	04.11.2005	1	24	572	0,7	0	0	0	
Н	13.04.2005	276	18	753	83	0,7	0,1	45	Заміна фази
Н	15.04.2005	0	10	761	0,7	0,3	0	0,6	Встановлено нову фазу
Н	30.05.2005	74	30	864	6,5	0,6	0	2,3	
Н	06.06.2005	257	37	852	9,3	0,9	0	3,6	
Н	17.06.2005	221	24	722	11	0,8	0	4	
Н	24.06.2005	291	61	865	15	1,4	0	5,3	
Н	07.07.2005	268	32	840	17	1,7	0,2	5,2	
Н	22.07.2005	264	53	588	20	1,9	0	6,4	
Н	01.08.2005	270	49	755	25	0,9	0	6,3	Заміна фази
Н	25.08.2005	0	21	551	1,5	0	0	0,7	Встановлено нову фазу
Н	04.11.2005	1	24	572	0,7	0	0	0	

За результатом аналізу таблиці видно, що 13.04.05. фаза випробовуваного ТН була відбракована та замінена по результатах хроматографії. За 4 місяці концентрації газу зросли за водем майже до 750 р р м, етану до 24 р р м, метану до 100 р р м, та ацетилену до 1.3 р р м. Коли з'явився ацетилен рекомендацією є заміна фази.

Специфіка газів: ацетилен до 6 р р м; та етилен до 34 р р м, метану та етану небагато. Пошкодження було породжено короткочасним (20 хв.) включенням ТН з неправильно приєднаними кінцями з'єднувальної обмотки на старшому каскаді, і при цьому він працював ще певний період часу.

На думку експертів, в хроматографії ТН орієнтирами можуть служити концентрації газів зведених до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. Граничні значення газовмісту для регламентованих робіт,

Стан ТН	Газовміст ррм				
	H2	CH4	C2H4	C2H2	C2H6
Нормальний стан	200	20	10	0	10
Повторний контроль, та контроль з проміжком 2-3 неділі, а також в/.в виміри та ф.х.а. масла.	40 0	40	20	1	20
Вимикання та заміна	70 0	80	40	2	40

2.3. Прогнозування залишкового ресурсу ТН

Проведення оперативного діагностування ТН в умовах не повних даних на момент визначення поточного стану ТН пов'язано з необхідністю продовження експлуатації зношеного електрообладнання (ЕО) енергопідприємств.

Огляд зовнішнього стану (перший етап оцінювання технічного стану ТН) забезпечує спрощене, поверхнєве оцінювання, що дозволяє виявити протікання масла, суттєві пошкодження фарфорової покритишки елементів трансформатора та інші зовнішні дефекти.

На другому етапі здійснюється контроль технічного стану не лише зовнішніх елементів конструкції ТН, а і внутрішніх складових, їх вузлів і

елементів (наприклад, шляхом дослідження проб масла), коефіцієнта трансформації ЕМБ, опору ізоляції кожного елемента відносно фланця та землі, а також шляхом визначення технічного стану ТН в обсязі міжремонтних випробувань. Другий етап потребує високої кваліфікації персоналу і володіння значними обсягами спеціальної інформації. На даному етапі ставиться мета уточнити результати першого етапу на предмет оцінки фізичного і морального зношування ТН та обґрунтування можливостей подальшої експлуатації, фіксації наявних внутрішніх дефектів, як на первинній стадії їх розвитку, так розвинених до аварійного стану. Дане діагностування здійснюється представниками експлуатуючих підприємств або залученими фахівцями спеціалізованих установ. Для підвищення ефективності виконуваних робіт використовують інформаційно-обчислювальну систему, організовану на базі персонального комп'ютера (ПК) що має в своєму складі реляційну базу даних (БД), базу знань і експертну систему (ЕС).

Діагностування ТН, спираючись на концепцію функціонального діагностування, передбачає три етапи досліджень:

1. Лабораторний, що реалізує фізико-хімічний аналіз (ФХА) трансформаторного масла ТН; аналіз розчинених у маслі газів та хроматографічний аналіз розчинених у трансформаторному маслі ЕМП (ХАРГ) [2].

2. Випробовування ТН і контроль параметрів з відключенням (ємність кожного окремого елемента) і без відключення напруги (Температуру та ємність елементів ТН, коефіцієнт трансформації).

3. Статистичний, що включає діагностування ТН за результатами досліджень і експертних оцінок стану ТН з використанням БД і БЗ.

На лабораторному етапі виконується зовнішній огляд; відбираються проби масла; обробляються результати ФХА та ХАРГ, заповнюються відповідні форми та протоколи для збереження цих результатів в БД. Аналіз проб виконується з метою визначення параметрів масла, які характеризують:

а) трансформаторне масло як елемент ізоляції і охолоджуючого середовища ТН;

б) технічний стан інших внутрішніх складових ТН.

Аналіз проб масла як елемента ізоляції виконується згідно з вимогами [2]. Результати лабораторних досліджень дозволяють виділити такі лінгвістичні стани масла, як «нормальний стан масла» та «область ризику».

Перший стан відповідає інтервалу від значень після заливання в ТН до значень, які обмежують область нормального стану масла в експлуатації (з урахуванням значень гранично допустимих параметрів масла, яке заливається в ТН, визначених діючими нормативними документами [2]). На цьому інтервалі можна гарантувати надійну роботу при контролі діагностичних параметрів, наприклад: напруги пробою, кислотного числа та температури спалаху в закритому об'ємі.

Експертні системи на основі записаних в БЗ структурованих знань – продукційних правил, які забезпечують необхідну інформаційну підтримку прийняття рішень, що базується на досвіді висококваліфікованих експертів і необхідних даних із БД.

Приклад 1. ЯКІЩО температура спалаху старого масла знижується,

ТО є локальні внутрішні перегріву.

Пояснення: під дією високої температури масло розкладається без доступу кисню.

Приклад 2. ЯКІЩО понизилась електрична міцність масла,

ТО при перегріві твердої ізоляції підвищеної вологості, волога переходить з твердої ізоляції в масло.

Пояснення: лінгвістична змінна “область небезпеки” відповідає заданому інтервалу від вказаних значень в області нормального стану масла до гранично допустимих значень показників якості масла в експлуатації. Погіршення навіть одного з багатьох показників призводить до зниження надійності ТН. В цьому випадку потрібен більш частий і розширений контроль для прогнозування терміну служби і прийняття спеціальних заходів із відновлення

експлуатаційних властивостей масла. Таким способом можна відвернути заміну ТН і не виводити ТН в ремонт.

Зниження стабільності масла як охолоджувального середовища, в результаті окислення призводить до потемніння і помутніння, з'являються низькомолекулярні кислоти, які негативно впливають на ізоляцію, виникає корозія металу, випадає осад і підвищується в'язкість, що погіршує умови охолодження ТН.

Ще один приклад правила з БЗ: аналіз проб масла як джерела інформації про стан ВУ заснований на двох стадіях діагностування ВУ з метою виявлення дефектів, що розвиваються за результатами ХАРГ.

Перша стадія передбачає визначення методом хроматографії концентрації розчинених діагностичних газів. Такими газами можуть бути: водень, метан, етан, етилен, ацетилен, оксид вуглецю, вуглекислий газ, азот. Отримані в результаті аналізу дані про концентрацію газів вводяться до БД. В ній знаходяться значення верхніх меж концентрації діагностичних газів – норми, взяті із нормативних документів, опублікованих досліджень і наукових робіт. Порівняння отриманих результатів з нормами є діагностичним оцінюванням на другій стадії дослідження.

Вихід параметрів масла за гранично допустимі межі відповідає певним видам дефектів ТН, наприклад: локальні нагріви, часткові розряди, іскріння контактів, зволоження, забруднення і старіння масла та твердої ізоляції [7].

Діагностування високовольтних ТН здійснюється з урахуванням критеріїв діагностування дефектів, що накопичуються в них (критерій швидкості наростання концентрації газів в маслі, критерій ключових газів); експлуатаційних факторів, що визначають результати аналізу розчинених газів (ХАРГ), на додачу, дефектів, які виявляються в трансформаторах за допомогою методу АРГ. Періодичність АРГ для ТН з різними дефектами, що накопичуються, визначається процесом зміни концентрації газів та часом розвивання означених дефектів. Під час аналізу вмісту газів розчинених у трансформаторній оливі для діагностування поточного стану вимірювальних

ТН необхідно враховувати умови в яких вони експлуатуються за попередній період а також фактори, які призвели до зміни визначеного складу газів.

Граничні значення концентрації газів і відносної швидкості її наростання наведені в таблицях 2.5 та 2.6.

Таблиця 2.5 – Граничні значення концентрацій розчинених у маслі газів

Обладнання	Концентрація газів, % об'єму						
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Трансформатори напругою 110—500 кВ	0,01	0,01	0,0 1	0,01	0,00 5	0,05/ 0,06	0,6(0,2)/0,8(0,4)
Трансформатори напругою 750 кВ	0,003	0,002	0,001	0,002	0,001	0,05	0,4

Таблиця 2.6. Граничні значення відносної швидкості наростання концентрації розчинених у маслі газів.

Швидкості наростання концентрації газів, % в міс.						
H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
10						

Так, наприклад, для CO в чисельнику наведено значення для силових трансформаторів із азотним або плівковим захистом трансформаторної оливи, в знаменнику наведено для ТН із вільним диханням; для CO₂ наведено в чисельнику значення для ТН із вільним диханням для строку експлуатації до 1 0 років, в знаменнику наведено для більше 1 0 років, в дужках наведені ті самі дані трансформаторів із плівковим та азотним захистами трансформаторного масла.

Із розвитком дефекту концентрація розчинених у маслі газів зростає. Оскільки норми визначалися емпірично й мають статистично-імовірнісну згладженість, а результати аналізу проб масла залежать від багатьох факторів (особливостей роботи уводу, засобу відбору масла, обсягу й способу зберігання проб масла, виду газу-носія, особливостей конструкції газоаналізатора (хроматографа), виду опису отриманих даних, тривалості

дослідження, кваліфікації персоналу й ін.), то результат порівняння з нормою є умовно правильним. Тому для компенсації впливу перерахованих факторів невизначеності та спрощення порівняння різних форм подання результатів контролю та вимірювань діагностичних параметрів, дані норми й результати аналізу за допомогою розрахунків у системі управління базами даних (СУБД) подані у вигляді лінгвістичних змінних та згруповані в нечіткі множини так, що кожен результат вимірювань чи контролю належить до тієї чи іншої множини зі своїм значенням функції належності до цієї множини. Діапазон зміни концентрації характерних газів, що виділяються з появою дефектів, подано у вигляді лінгвістичної змінної (1.8), представлений графічно в термах на рисунку 2.3.

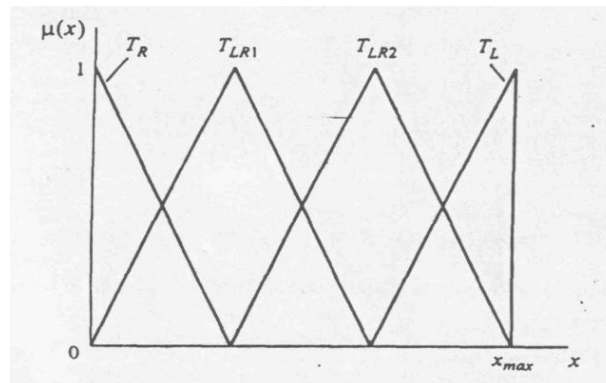


Рисунок 2.3 – Графіки функцій приналежності термів досліджуваного газу

Термам T_i присвоєні лінгвістичні значення, які ідентифікують концентрацію газу: T_R – нехарактерний газ [1]; T_{LR1} – мала концентрація газу; T_{LR2} – висока концентрація газу; T_L — основний газ[1].

$$G^i = \langle \{T'_R, T'_{LR1}, T'_{LR2}, T'_L\} \rangle, \quad (2.1)$$

де i – номер газу: 1 позначено водень (H_2), 2 позначено метан (CH_4), 3 позначено етан (C_2H_6), 4 позначено етилен (C_2H_4), 5 позначено ацетилен (C_2H_2), 6 позначено оксид вуглецю (CO), 7 позначено вуглекислий газ (CO_2) і т. д.; $T = \mu(x)$ – терм, що характеризується прийнятою лінгвістичною змінною та значенням функції приналежності μ за виразом (2.2) до визначеної нечіткої множини концентрацій газів (x), а значення функції належності ($\mu(x)$) результату вимірювань досліджуваного газу у відношенні відповідної нечіткої множини

концентрацій цього газу, який в свою чергу залежить від концентрації газу x ; $R = f(\beta)$, $L = f(\alpha)$, $LR = f(\alpha, \beta)$ – види нечітких множин з функціями приналежності (2.2), графіки яких мають трикутну форму, представлену на рисунку 2.4. [5] і описуються рівняннями (2.2).

Дані графіки мають відповідно праву або ліву спадну частини (визначається параметрами α або β), а також мають дві спадні частини (характеризуються параметрами α та β) [5].

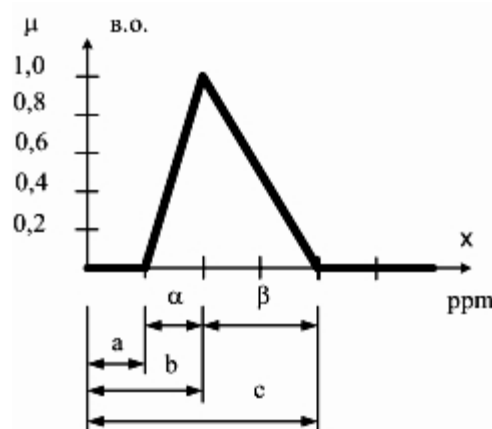


Рисунок 2.4 – Графік функції приналежності трикутної форми

$$\mu = f_{\Delta}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases} \quad (2.2)$$

Віднесення означених результатів ХАРГ до конкретних нечітких множин з найбільшими значеннями функцій приналежності, продовження порівняння отриманих результатів із нормою дозволяє отримати висновки про наявність або відсутність внутрішніх пошкоджень в ТН.

На основі нормативних даних складено таблиці терм-множин норм газів, що виділяються при різних внутрішніх дефектах у ТН (таблиця 2.7), і дефектів, які визначаються по сполученнях цих терм-множин (таблиця 2.8). Дефекти ідентифікуються класом k і номером j .

Таблиця 2.7 – Терми норм газів, що утворюються при різних внутрішніх дефектах

H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	CO	CO_2	Терм- множина дефектів $D^{(j)}_k$
1	2	3	4	5	6	7	8
Руйнування олії електричними розрядами $D^{(1)}_k$							
T^1_L	T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_{LR2}	T^5_L	T^8_R	T^9_R	$D^{(1)}_1$
T^1_L	T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_R	T^5_{LR2}	T^8_R	T^9_R	$D^{(1)}_2$
Руйнування просоченої олією паперу електричними розрядами $D^{(2)}_k$							
T^1_L	T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_{LR2}	T^5_L	T^8_{LR2}	T^9_{LR2}	$D^{(2)}_1$
T^1_L	T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_R	T^5_{LR2}	T^8_{LR2}	T^9_{LR2}	$D^{(2)}_2$
Локальні перегріву в олії $D^{(3)}_k$							
T^1_R	T^2_{LR1}	T^3_L	T^4_{LR2}	-	T^8_R	T^9_R	$D^{(3)}_1$
T^1_{LR2}	$T^2_{LR1},$ T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_L	T^5_R	T^8_R	T^9_R	$D^{(3)}_2$
T^1_{LR2}	$T^2_{LR1},$ T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_L	$T^5_{LR1},$ T^5_{LR2}	T^8_R	T^9_R	$D^{(3)}_3$
T^1_R	T^2_{LR1}	T^3_L	T^4_{LR2}	—	$T^8_{LR1},$ T^8_{LR2}	T^9_L	$D^{(3)}_4$

Таблиця 2.8 – Дефекти ТН що виявлено по сполученнях термів газів у трансформаторній олії

Руйнування олії електричними розрядами ($D^{(1)}_j$)	
$D^{(1)}_1$	Іскровими
$D^{(1)}_2$	Частковими
Руйнування просоченої олією паперу електричними розрядами ($D^{(2)}_j$)	
$D^{(2)}_1$	Іскровими
$D^{(2)}_2$	Частковими
Локальні перегріву олії ($D^{(3)}_j$)	
$D^{(3)}_1$	до 300 °C
$D^{(3)}_2$	від 300 до 700 °C

$D^{(3)}_3$	понад 700 °С
$D^{(3)}_4$	Локальний перегрів просоченого маслом паперу при температурі 300 °С

Дефекти ідентифікуються СУБД за поточними (таблиця 2.9) та нормативними значеннями діагностичних параметрів (таблиця 2.10).

Таблиця 2.9 – Індксація критеріїв за ключовим полем діагностичних критеріїв

Терм-множина дефекту $D^{(4)}_j$	Дефект
$D^{(4)}_1$	Норма
$D^{(4)}_2$	Часткові розряди з низькою густиною енергії
$D^{(4)}_3$	Часткові розряди з високою густиною енергії
$D^{(4)}_4$	Розряди малої потужності
$D^{(4)}_5$	Розряди великої потужності
$D^{(4)}_6$	Термічний дефект низької температури до 150 °С
$D^{(4)}_7$	Термічний дефект низької температури в діапазоні 150 – 300 °С
$D^{(4)}_8$	Термічний дефект в діапазоні середній температур 300 – 700 °С
$D^{(4)}_9$	Термічний дефект високої температури (>700°С)

Таблиця 2.10 – Діагностичні нормативні критерії пошкоджень високовольтних уводів

CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	Терм-множина дефекту $D^{(4)}_j$
0,1-1	≤ 1	<0,1	$D^{(4)}_1$
< 0,1	≤ 1	< 0,1	$D^{(4)}_2$
< 0,1	≤ 1	0,1-3	$D^{(4)}_3$
0,1-1	≥ 1	< 0,1	$D^{(4)}_4$
0,1-1	$\geq 3,0$	0,1-3	$D^{(4)}_5$
0,1-1	1,0÷3,0	< 0,1	$D^{(4)}_6$
$\geq 1,0$	≤ 1	<0,1	$D^{(4)}_7$
$\geq 1,0$	1,0÷3,0	<0,1	$D^{(4)}_8$
$\geq 1,0$	$\geq 3,0$	<0,1	$D^{(4)}_9$

Для прогнозування можливості подальшого прояву дефектів та можливості експлуатації ТН необхідно оцінити прогрес та швидкість зміни концентрації розчинених газів.

2.4. Математична модель розрахунку коефіцієнта залишкового ресурсу ТН

Системи контролю трансформаторів напруги використовують у своїх розрахунках відомі математичні моделі. Недоліком існуючих систем є те, що вони не можуть визначити і врахувати усі наявні функціональні зв'язки між багатьма з їх контрольованих діагностичних параметрів прямо одночасно, в одній математичній моделі. Задача стає складною в умовах неповноти визначення початкових даних, коли лише частина параметрів відома на початок розрахунків, наприклад, через необхідність організації додаткових досліджень. Для визначення таких зв'язків, як відзначалося раніше, дуже конструктивною технологією є нечітке моделювання. Таке моделювання дозволяє одержувати більш точні та комплексні результати порівняно із іншими системами діагностування.

За результатами аналізу даних, наданих представниками цеху ремонтів ТН, з літературних джерел та за даними служби контролю ізоляції тощо може бути отримана інформація щодо деяких причини виведення в ремонт трансформаторів напруги (з паперово-масляною ізоляцією конденсаторного типу) трансформаторів, то такі дані можна упорядкувати.

Під контрольованим діагностичним параметром розуміється такий параметр, відхилення якого від норми призвело до виведення з експлуатації ТН чи передбачало планово виникнення такої ситуації. У якості діагностичних параметрів в таблиці 2.11 зазначено: параметри, що характеризують стан герметизуючих деталей ТН, стан паперово-масляної ізоляції, пошкодження конденсаторів елементів дільників напруги.

Перелічимо контрольовані діагностичні параметри, що мають увійти до діагностичної моделі ТН – 750 кВ. Елемент відбору напруги (ЕВН) (останній

конденсатор) до якого підключена обмотка високої напруги нижнього елемента трансформатора та пристрій ЕМБ характеризується температурою баку ЕМБ – $T_{емб}$, коефіцієнтом трансформації – K_T , опором основної ізоляції – $R_{осн}$. Ємнісні елементи для типового ТН типу НДЄ (трансформатор напруги з ємнісними дільниками) варіюються в кількості від 3 до 5 одиниць. Для зменшення розмірності моделі візьмемо до розгляду ТН фірми АВВ СРВ 72-800 на базі 3-х елементів, кожен з яких характеризується надлишковою температурою апаратного виводу дільника напруги – $T_{над}$, дрейфом ємності паперово-масляної ізоляції – ΔC_X , тангенсом кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції – $tg(\delta)$, активним опором ізоляції ємнісного елемента – $R_{сл}$. Ємність паперово-масляної ізоляції оцінюється напругою, що у нормальному стані складає 15 кВ. Збільшення напруги свідчить про тенденцію до ушкодження ємнісного елемента. В результаті настання обставин ремонту перевірки та діагностуванню підлягають ХАРГ, кислотне число – $K_{он}$, та температура спалаху – T_c . Граничне відхилення температури контрольованого апаратного виводу дільника напруги $T_{над}$ оцінюється відносно апаратного виводу сусідньої фази та становить 2°C .

На підставі проведеного аналізу літературних джерел була створена схема, яка показує залежний або незалежний вплив діагностичних параметрів на коефіцієнт загального залишкового ресурсу ЕТН, зображена на рисунку 2.5.

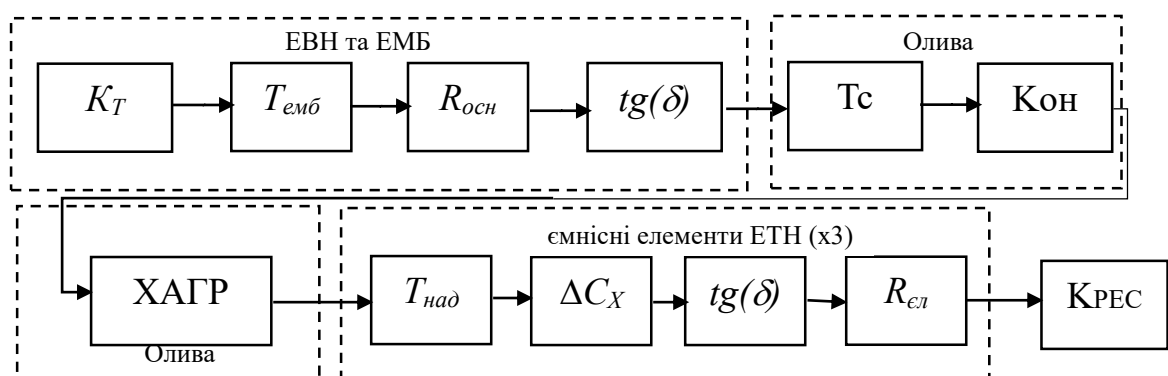


Рисунок 2.5 – Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ТН.

Результати аналізу пошкодження ТН наведених в [2,7] при експлуатації що призвели до , зведені до таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Причини виведення в ремонт ємнісних ТН.

Клас напруги, кВ	Елемент ТН	Діагностичний параметр		Кількість ремонтованих ТН, що мають понаднормове значення діагностичного параметра	
		Позначення	Назва параметра	одиниці	%
750 герметичні	Електромагнітний блок та елемент відбору напруги	T_{emb}	Температура верхньої частини баку	1	1
		K_T	Коефіцієнт трансформації між виводами елементів	3	3
		$R_{осн}$	активний опір ізоляції ТН	2	2
		$tg(\delta)$	тангенс кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції в навантаженому режимі	11	12
	Трансформаторна олива	$K_{он}$	Кислотне число	1	1
		T_c	температура спалаху, °С	1	1
		$XAPГ$	за результатами хімічного аналізу розчинених в трансформаторному маслі газів	8	9
	Ємнісні елементи ЄТН	$T_{над}$	надлишкова температура апаратного виводу дільника напруги	12	13
		ΔC_X	дрейфом ємності паперово-масляної ізоляції	42	45
		$tg(\delta)$	тангенс кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції в розвантаженому режимі	7	7
		$R_{ел}$	активний опір ізоляції ємнісного елемента	6	6
	Разом				94

На рисунку 2.5 не показано взаємний вплив одного оцінюваного діагностичного параметра на обраний інший, а лише показано у взаємозалежний чи протилежний спосіб ці параметри впливають на коефіцієнт загального залишкового ресурсу ТН. Послідовні позначені блоки з

параметрами, відхилення яких від норми сприяло виведенню ТН в ремонт. Оскільки усі діагностичні параметри сприяють виведенню ТН в ремонт, паралельні блоки в схемі відсутні.

З метою отримання узагальненого показника залишкового ресурсу ТН, що вираховує значення усіх діагностичних параметрів та їх вплив, в роботі запропоновано від відомих значень діагностичних параметрів перейти до відповідних заданим значенням коефіцієнтів залишкових ресурсів відносно кожного діагностичного параметру. Коефіцієнти визначаються у відносних одиницях за виразом (2.2) і тому характеризують сумарне напрацювання ТН від моменту контролю його заданого технічного стану до переміщення у граничний стан, коли діагностичний параметр досягає свого граничного значення, формує залишковий технічний ресурс [8]. Коефіцієнт залишкового ресурсу k_i за i -м діагностичним параметром:

$$k_{i_1} = \left| \frac{x_{i_1, \text{гран}} - x_{i_1, \text{пот}}}{x_{i_1, \text{гран}} - x_{i_1, \text{поч}}} \right|, \quad (2.2)$$

де $x_{i_1, \text{гран}}$ – нормативне граничне значення i_1 -го діагностичного параметра, $x_{i_1, \text{ном}}$ – значення i_1 -го діагностичного параметра на момент виконання контролю, $x_{i_1, \text{поч}}$ – початкове значення i_1 -го діагностичного параметру (на момент введення в експлуатацію вже нового обладнання або після виконаного планового ремонту), i_1 – діагностичний параметр.

Так, для досліджуваного ТН на клас напруги 750 кВ параметр $\text{tg}(\delta)$ паперово – масляної ізоляції ємнісного елемента дільника напруги перед введенням в експлуатацію дорівнював 0,22 %, а на момент контролю дорівнював 0,41 %, граничне значення цього параметра – 0,81 %. Тому коефіцієнт залишкового ресурсу $k_{\text{tg}(\delta)}$ за діагностичним параметром $\text{tg}(\delta)$ визначається за виразом (Д.4):

$$k_{\text{tg}(\delta)} = \left| \frac{0.81 - 0.41}{0.81 - 0.22} \right| = 0.66 (\text{в. о.}). \quad (2.3)$$

Виконаємо розрахунок коефіцієнтів залишкового ресурсу за кожним діагностичним параметром в Excel та зведемо результати до таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Коефіцієнти залишкового ресурсу за обраними діагностичними параметрами.

Виміри в абсолютних величинах									
Діагностичний параметр	Одиниці випадків	% траплення	Початкове значення	Граничне значення	Випробовуване значення				
$T_{емб}$	1	1	22	24	22	22	23	23	23
K_T	3	3	0,13	0,112	0,128	0,122	0,121	0,125	0,124
$R_{осн}$	2	2	500	300	480	420	400	370	320
$tg(\delta)$	11	12	0,2	0,8	0,3	0,4	0,6	0,6	0,7
$K_{он}$	1	1	0,01	0,1	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09
T_c	1	1	160	135	155	151	142	137	137
$XAPГ$	8	9	0,1	1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9
Тнад	12	13	21	24	22	22	23	23	21
ДСХ	42	45	15	22	16	16	17	19	20
$tg(\delta)$	7	7	0,13	0,112	0,128	0,122	0,121	0,125	0,124
Рел	6	6	700	300	680	520	400	360	330
Всього	94	100							
Виміри у відносних величинах									
Діагностичний параметр	Одиниці випадків	% траплення	Початкове значення	Граничне значення	Випробовуване значення				
$T_{емб}$	1	1	1,000	0,000	1,000	1,000	0,500	0,500	0,500
K_T	3	3	1,000	0,000	0,889	0,556	0,500	0,722	0,667
$R_{осн}$	2	2	1,000	0,000	0,900	0,600	0,500	0,350	0,100
$tg(\delta)$	11	12	1,000	0,000	0,833	0,667	0,333	0,333	0,167
$K_{он}$	1	1	1,000	0,000	0,667	0,556	0,444	0,333	0,111
T_c	1	1	1,000	0,000	0,800	0,640	0,280	0,080	0,080
$XAPГ$	8	9	1,000	0,000	0,778	0,667	0,556	0,444	0,111
Тнад	12	13	1,000	0,000	0,667	0,667	0,333	0,333	1,000
ДСХ	42	45	1,000	0,000	0,857	0,857	0,714	0,429	0,286
$tg(\delta)$	7	7	1,000	0,000	0,889	0,556	0,500	0,722	0,667
Рел	6	6	1,000	0,000	0,950	0,550	0,250	0,150	0,075
Всього	94	100							

Враховуючи той факт, що кожний із розглянутих діагностичних параметрів призводить до виникнення ремонтного стану коефіцієнт загального залишкового ресурсу буде визначатись на підставі коефіцієнтів

залишкового ресурсу окремих елементів обладнання наступним за моделлю, структура якої зображена на рисунку 2.6.

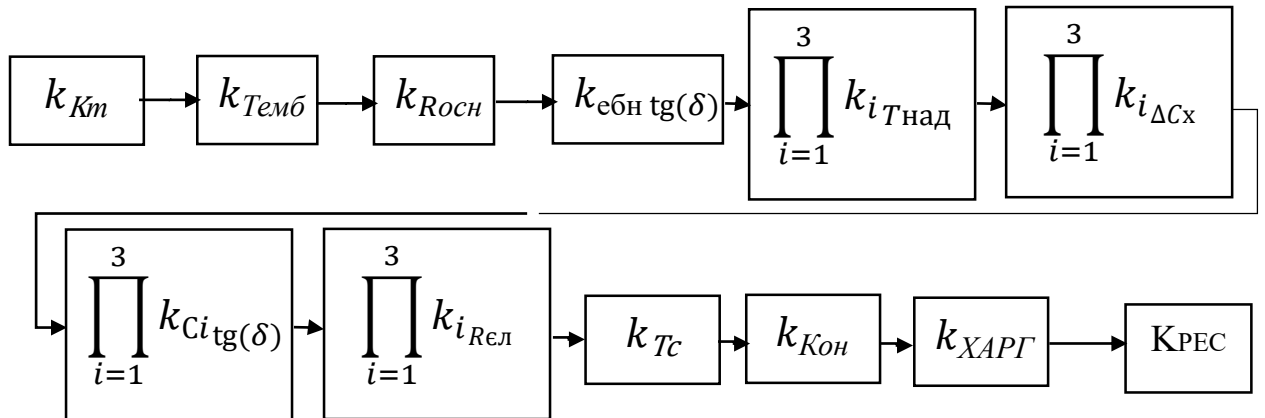


Рисунок 2.5 – Загальна структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу обладнання.

Відповідно до рисунку 2.5 коефіцієнт загального залишкового ресурсу обладнання визначається за виразом (2.4):

$$k_{\text{ЗАГ.РЕС}} = \prod_{j=1}^{11} (k_j^{p_j}) . \quad (2.4.)$$

де j – порядковий номер блока в послідовній схемі, k_j – коефіцієнт залишкового ресурсу за контрольованим j -им параметром; p_j – ймовірність відхилення j -го контрольованого параметра від норми у ТН, який виведений в ремонт.

$$p_j = \frac{y_j}{m_a}, \quad (2.5)$$

де y_j – кількість відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра, які були виявлені шляхом контролю j -го діагностичного параметра з загальної кількості виявлених відхилень контрольованих параметрів від гранично допустимого нормованого значення, m_a – загальна кількість виявлених відхилень контрольованих діагностичних параметрів від їх гранично допустимих нормованих значень.

Відповідно до виразів (2.4) та (2.5) коефіцієнт загального залишкового ресурсу ТН визначається за виразом (2.6):

$$\begin{aligned}
k_{заг.рес} &= \cdot k_{Km}^{p_{Km}} \cdot k_{T_{емб}}^{p_{T_{емб}}} \cdot k_{ебн\ tg(\delta)}^{p_{ебн\ tg(\delta)}} \cdot k_{Rocн}^{p_{Rocн}} \cdot k_{1\ Tнад}^{p_{1\ Tнад}} \cdot k_{2\ Tнад}^{p_{2\ Tнад}} \cdot k_{3\ Tнад}^{p_{3\ Tнад}} = \\
&= \cdot k_{1\ \Delta Cx}^{p_{\Delta Cx}} \cdot k_{2\ \Delta Cx}^{p_{\Delta Cx}} \cdot k_{3\ \Delta Cx}^{p_{\Delta Cx}} \cdot k_{1\ ctg(\delta)}^{p_{ctg(\delta)}} \cdot k_{2\ ctg(\delta)}^{p_{ctg(\delta)}} \cdot k_{3\ ctg(\delta)}^{p_{ctg(\delta)}} \cdot k_{1\ Рел}^{p_{Рел}} = \\
&= \cdot k_{2\ Рел}^{p_{Рел}} \cdot k_{3\ Рел}^{p_{Рел}} \cdot k_{Tc}^{p_{Tc}} \cdot k_{Кон}^{p_{Кон}} \cdot k_{ХАПГ}^{p_{ХАПГ}}, \quad (2.6)
\end{aligned}$$

Де k – відомі на момент розрахунку значення коефіцієнтів залишкового ресурсу відповідно до діагностичних параметрів; p – ймовірності відхилень значень діагностичних параметрів від гранично допустимих нормованих значень з урахуванням загальної кількості відхилень всіх діагностичних параметрів. Ймовірності відхилень значень діагностичних параметрів наведено в останньому стовпці таблиці 2.9. Загальна ймовірність виникнення ремонтної ситуації визначається $p_{узаг} = 1 - (П(1-p))$ та складає добутком $p_{узаг} = 0,69$, де $П$ – операція добутку над елементами стовпця

Висновки до другого розділу

Отримана модель розрахунку загального коефіцієнту залишкового ресурсу враховує специфіку об'єкту діагностування та покликана полегшити процес діагностування враховуючи причинно-наслідковий характер впливу розглянутих факторів. Можливість вносити корекцію збоку експертів не переопрацьовуючи добре вивчені закономірності за прийнятою методикою розрахунку загального залишкового коефіцієнту дозволяє уніфікувати використання та накопичувати статистику виникнення ремонтних та передремонтних ситуацій для удосконалення моделі.

3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ

3.1. Нейро-нечітка модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТН.

Для створення математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ТН було використано параметри, за кожним з яких можна робити висновок про стан ТН. Але жоден з даних параметрів не в повній мірі характеризує технічний стан, а лише вказує на певні зміни технічного стану ТН. Якщо один з цих технічних параметрів виходить за нормовані межі, це не означає що ТН повністю втратив свою працездатність.

Задача полягає у знаходженні нечітких взаємовпливів між технічними параметрами на загальний технічний стан ТН і якомога точнішому прогнозуванні розвитку пошкоджень.

На даному етапі розвитку сучасного комп'ютерного забезпечення використання для вирішення поставленої задачі, методів теорії нечітких множин є не складним завданням [9]. Це дає нам змогу врахувати значення різних діагностичних параметрів при діагностуванні ТН і створити базу правил їх взаємодії, не знаючи математичного зв'язку між ними. За допомогою системи комп'ютерної математики – системи MATLAB – є можливість створити математичну модель коефіцієнта залишкового ресурсу ВУ, використовуючи яку відредагувати раніше створену ймовірнісну вибірку навчальних даних, за якими далі можна отримати аналітичну залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ТН від діагностичних параметрів у вигляді поліному. Ця залежність може бути використана у програмному забезпеченні сучасних мікропроцесорних пристроїв діагностування. Для навчання нейро-нечіткої моделі було сформовано масив початкових даних. Для 19 вхідних параметрів моделі, що змінювались випадковим чином від 0 до 1, було визначено коефіцієнт загального залишкового ресурсу ТН за виразом 2.6. Для зручності використання даних та спрощення поточних розрахунків у програмному середовищі MATLAB вхідні параметри моделі зводились до відносних одиниць їх відхилення від норми.

19 вхідних параметрів моделі – коефіцієнти залишкового ресурсу ТН, які відповідають 19 діагностичним параметрам. Треба зазначити, що кількість параметрів може бути більшою.

Фрагмент результатів розрахунків наведено в таблиці 2.11., повний набір для 1928 значень параметрів наведено у додатку Г

Таблиця 2.11 – Результати розрахунків коефіцієнта залишкового ресурсу ТН.

$k(Km)$	$k(Temb)$	$k_{\text{етб}}(tg(\delta))$	$k(Rocn)$	$k1(T_{\text{над}})$	$k2(T_{\text{над}})$	$k2(T_{\text{над}})$	$k1(\Delta CX)$	$k2(\Delta CX)$	$k3(\Delta CX)$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.97	0.96	0.97	0.96	0.96	1	0.96	1	0.98	0.96
0.98	0.95	0.97	0.96	0.96	0.97	1	0.96	0.99	0.99
0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	1	0.98	0.97	1
0.9	0.77	0.82	0.84	0.78	0.93	0.85	0.8	0.79	0.88
0.94	0.92	0.82	0.92	0.91	0.82	0.78	0.81	0.86	0.9
0.77	0.83	0.84	0.88	0.76	0.82	0.76	0.91	0.77	0.82
0.75	0.95	0.91	0.92	0.95	0.75	0.77	0.92	0.77	0.91
0.95	0.87	0.78	0.84	0.93	0.76	0.86	0.94	0.81	0.95
0.78	0.89	0.87	0.76	0.8	0.9	0.94	0.82	0.9	0.92
0.74	0.77	0.74	0.72	0.51	0.68	0.52	0.51	0.67	0.51
0.67	0.69	0.78	0.73	0.62	0.58	0.79	0.56	0.73	0.59
0.78	0.63	0.69	0.68	0.76	0.79	0.73	0.65	0.62	0.72
0.51	0.68	0.53	0.73	0.7	0.59	0.51	0.77	0.71	0.57
0.53	0.71	0.69	0.55	0.66	0.56	0.63	0.62	0.5	0.58
0.67	0.78	0.76	0.57	0.71	0.6	0.66	0.51	0.71	0.68
0.59	0.56	0.76	0.59	0.68	0.52	0.61	0.53	0.7	0.53
0.75	0.53	0.71	0.75	0.66	0.6	0.6	0.7	0.54	0.71
0.76	0.8	0.64	0.75	0.62	0.76	0.72	0.7	0.67	0.56
0.58	0.51	0.56	0.58	0.8	0.55	0.67	0.75	0.67	0.78

Продовження таблиці 2.11.

$k1(Ctg(\delta))$	$k2(Ctg(\delta))$	$k3(Ctg(\delta))$	$k1(R_{\epsilon l})$	$k2(R_{\epsilon l})$	$k3(R_{\epsilon l})$	$k(T_c)$	$k(K_{OH})$	$k(XAPG)$	Коефіцієнт залишкового ресурсу ТН
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.0000000000
0.96	0.96	0.99	0.97	0.96	0.96	0.95	0.96	0.97	0.5424805142
0.99	0.96	0.95	0.98	1	0.96	0.97	0.98	0.98	0.6010747232
0.98	0.96	0.97	0.96	0.95	1	0.99	0.98	0.97	0.6330438359
0.79	0.93	0.84	0.79	0.94	0.92	0.85	0.94	0.93	0.0512842993
0.94	0.76	0.85	0.82	0.84	0.84	0.92	0.81	0.85	0.0529807078
0.82	0.8	0.91	0.84	0.8	0.8	0.89	0.87	0.83	0.0265160986
0.91	0.87	0.82	0.92	0.77	0.89	0.78	0.76	0.79	0.0404378419
0.9	0.79	0.84	0.86	0.78	0.94	0.88	0.89	0.84	0.0589888563
0.82	0.89	0.89	0.9	0.88	0.77	0.9	0.88	0.78	0.0516121024
0.56	0.67	0.78	0.7	0.6	0.66	0.58	0.66	0.74	0.0002192495
0.67	0.67	0.6	0.72	0.65	0.66	0.63	0.78	0.66	0.0004866545
0.72	0.56	0.79	0.73	0.78	0.69	0.67	0.7	0.67	0.001153071
0.66	0.72	0.7	0.7	0.62	0.69	0.6	0.58	0.58	0.000177069
0.68	0.79	0.8	0.55	0.74	0.56	0.56	0.63	0.71	0.000146691
0.65	0.5	0.64	0.52	0.7	0.68	0.74	0.5	0.77	0.0002298873
0.52	0.5	0.7	0.65	0.72	0.54	0.67	0.67	0.64	0.0000830306
0.54	0.74	0.67	0.76	0.76	0.7	0.69	0.68	0.68	0.0004661715
0.5	0.54	0.7	0.51	0.56	0.51	0.65	0.69	0.75	0.0002408005
0.59	0.57	0.69	0.56	0.6	0.59	0.65	0.72	0.68	0.0001625153

Кількість рядків має відповідати щонайменше кількості сполучень сполучень, Через неможливість обрахувати в межах прийнятного для навчальних цілей часу, вибірку буде скорочено о 100 експериментів, розуміючи при цьому, що відповідність еталонній моделі буде не достатньою для

справжньої експертної системи. Шляхом опитування експертів у 32 рядках таблиці 2.11 були скореговані значення коефіцієнту залишкового ресурсу ТН через опитування незалежних експертів: кваліфікованих представників служби ремонтів високовольтного обладнання, та інших профільних організації. Результати зведено та фрагментарно проілюстровано останнім стовпцем таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Результати корекції коефіцієнта залишкового ресурсу ТН.

$k1(Ctg(\delta))$	$k2(Ctg(\delta))$	$k3(Ctg(\delta))$	$k1(R_{\epsilon l})$	$k2(R_{\epsilon l})$	$k3(R_{\epsilon l})$	$k(T_c)$	$k(K_{on})$	$k(XAPF)$	Коефіцієнт залишкового ресурсу ТН
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.0000000000
0.96	0.96	0.99	0.97	0.96	0.96	0.95	0.96	0.97	0.7424805142
0.99	0.96	0.95	0.98	1	0.96	0.97	0.98	0.98	0.6510747232
0.98	0.96	0.97	0.96	0.95	1	0.99	0.98	0.97	0.6230438359
0.79	0.93	0.84	0.79	0.94	0.92	0.85	0.94	0.93	0.1512842993
0.94	0.76	0.85	0.82	0.84	0.84	0.92	0.81	0.85	0.0829807078
0.82	0.8	0.91	0.84	0.8	0.8	0.89	0.87	0.83	0.0665160986
0.91	0.87	0.82	0.92	0.77	0.89	0.78	0.76	0.79	0.0604378419
0.9	0.79	0.84	0.86	0.78	0.94	0.88	0.89	0.84	0.0689888563
0.82	0.89	0.89	0.9	0.88	0.77	0.9	0.88	0.78	0.0556121024
0.56	0.67	0.78	0.7	0.6	0.66	0.58	0.66	0.74	0.0031192495
0.67	0.67	0.6	0.72	0.65	0.66	0.63	0.78	0.66	0.0007866545
0.72	0.56	0.79	0.73	0.78	0.69	0.67	0.7	0.67	0.003453071
0.66	0.72	0.7	0.7	0.62	0.69	0.6	0.58	0.58	0.002177069
0.68	0.79	0.8	0.55	0.74	0.56	0.56	0.63	0.71	0.001246691
0.65	0.5	0.64	0.52	0.7	0.68	0.74	0.5	0.77	0.0015298873
0.52	0.5	0.7	0.65	0.72	0.54	0.67	0.67	0.64	0.0001330306
0.54	0.74	0.67	0.76	0.76	0.7	0.69	0.68	0.68	0.0005661715
0.5	0.54	0.7	0.51	0.56	0.51	0.65	0.69	0.75	0.0002408005
0.59	0.57	0.69	0.56	0.6	0.59	0.65	0.72	0.68	0.0001625153

3.2. Реалізація моделі діагностування в середовищі Matlab/simulink

Відкориговані дані потребуються як навчальні при моделюванні в системі програмному середовищі MATLAB. Для цього використаємо пакет Fuzzy Logic Toolbox. За допомогою редактора адаптивної нейронної мережі налаштування нечіткого висновку, що позначається на підборі параметрів форми та розташування функцій приналежності визначеної кількості термів – ANFIS з використанням гібридного навчального алгоритму, як такого що, що поєднуючи в собі ряд чисельних методів та механізм адаптації статистично демонструє кращу інтерполяцію результатів. В якості алгоритму агрегації нечіткого висновку ANFIS використовує Сугено [9]. В результаті проектування було сформовано нейро-нечітку модель коефіцієнта залишкового ресурсу герметичного ТН. Структура моделі для останніх за таблицею 2.11 6 параметрів показана на риунку. 2.6.

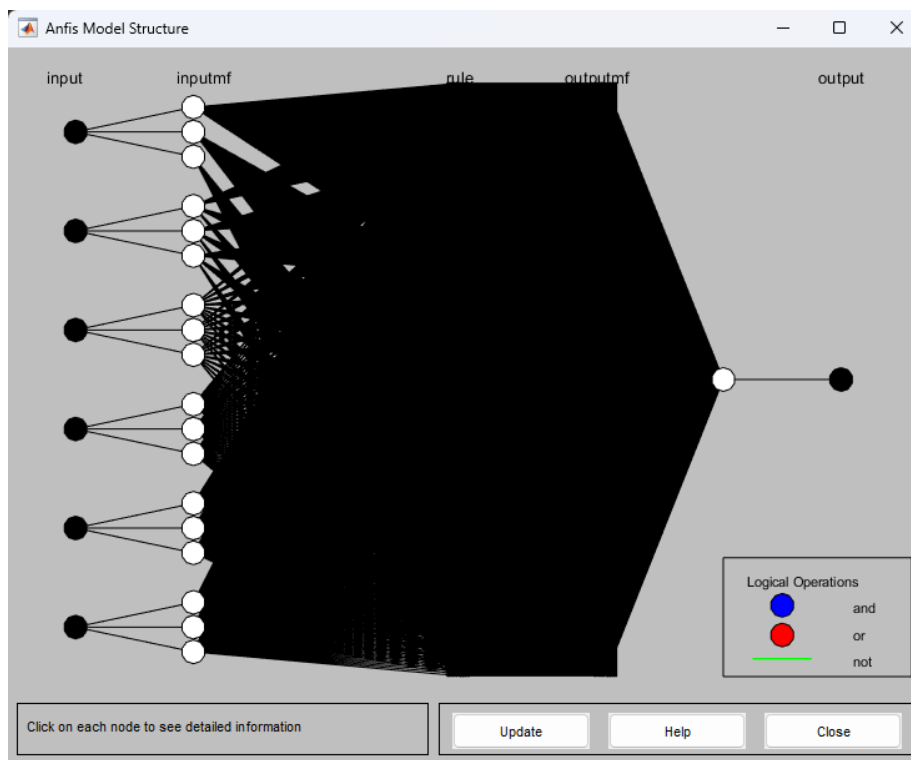


Рисунок 2.6 – Структура моделі ANFIS для 6 параметрів.

Для кожної вхідної змінної використовувались по три терми з гаусовими функціями належності, визначеними за виразом (2.7).

$$k_{pec.il} = f(x_{il}; \sigma_{il}; c_{il}) = e^{\frac{-(x_{il}-c_{il})^2}{2 \cdot \sigma_{il}^2}}. \quad (2.7)$$

тут σ_{il} та c_{il} – числові параметри, σ_{il}^2 дисперсія розподілу, c_{il} – математичне очікування, i_l – вхідний параметр нейро-нечіткої моделі, що відповідає діагностичному параметру, x_{il} – значення i_l -го вхідного параметра моделі.

З терми, в яких розглянуто кожний з параметрів обрано обмежено у зв'язку із обмеженою продуктивність конкретної обчислювальної системи: Включає в себе «нормальні» значення діагностичного параметра, «наявність відхилення» та «аварійний» значення діагностичного параметра. Для знаходження значення коефіцієнта загальнозалишкового ресурсу використовуємо нечітку нелінійну авторегресійну модель коефіцієнта загальнозалишкового ресурсу ТН.

Основна екранна форма редактора, з якої починається робота з налаштуваннями моделі ANFIS представлена на рисунку 2.7.

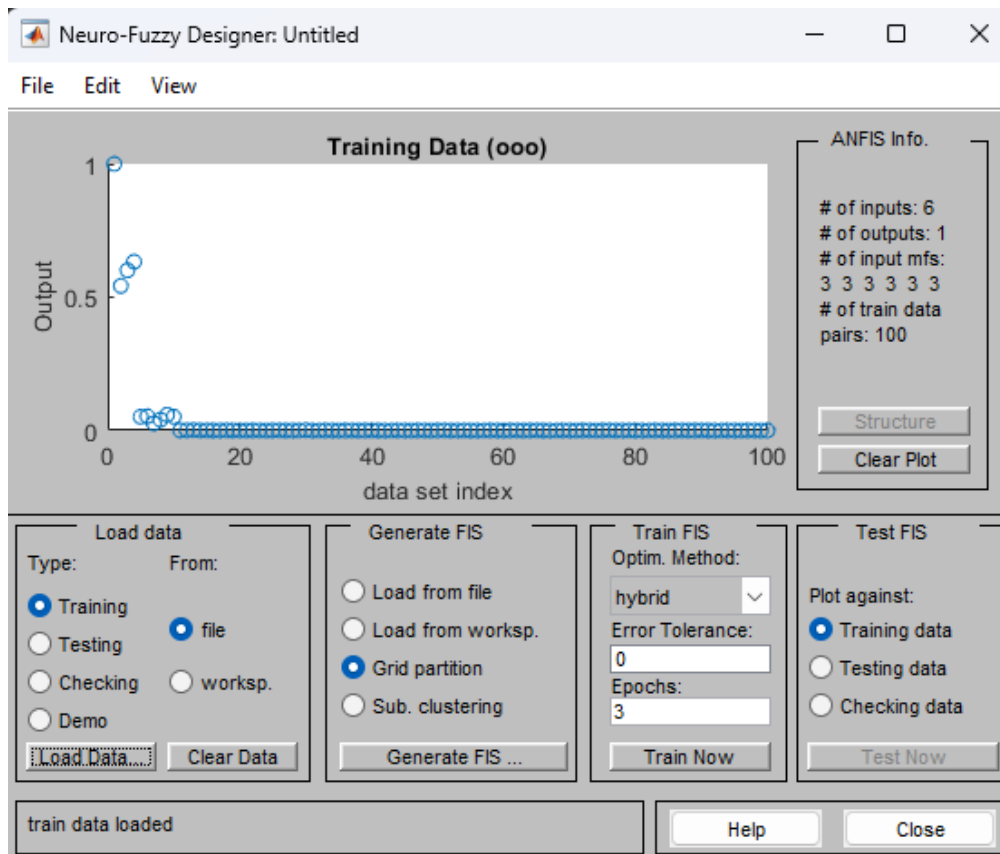


Рисунок 2.7 – Головна екранна форма редактора ANFIS.

Результати розрахунків коефіцієнта залишкового ресурсу за таблицею 2.11 завантажуються в редактор через файл даних ASCII формату, табульований пробілами від стовпцями за допомогою кнопки Load Data. Данні для контролю, скориговані експертами завантажуються у той же спосіб. Після цього обирається структура мережі, що може вже бути створеною за логікою Сугено наперед (наприклад у FIS редакторі MATLAB) або згенерована за реляційним принципом «один до всіх» між шарами inputmf та rule в структурі мережі. Такий підхід і було обрано, користуючись методом Grid partition. При ініціалізації даного методу потрібно визначити кількість термів для кожної вхідної змінної та функцію їх приналежності, а також в якому вигляді буде повернуто вихідне значення. Налаштування форми зображено на рисунку 2.8.

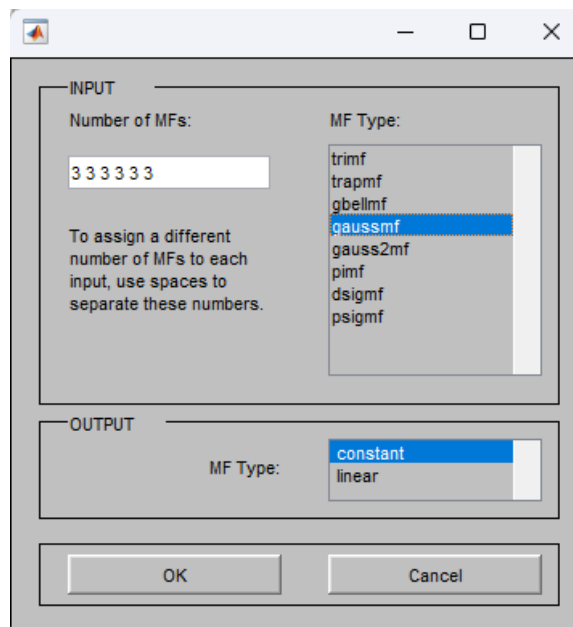


Рисунок 2.8 – Екранна форма редактора генератора FIS.

Вхідна вибірка для на прикладі перших 100 значень коефіцієнтів залишкового ресурсу продемонстрована на центральному графіку форми. Навчання мережи виконувалось за гібридним методом оптимізації протягом 10 епох. Параметри та характеристики навчання продемонстровано на рисунку 2.9.

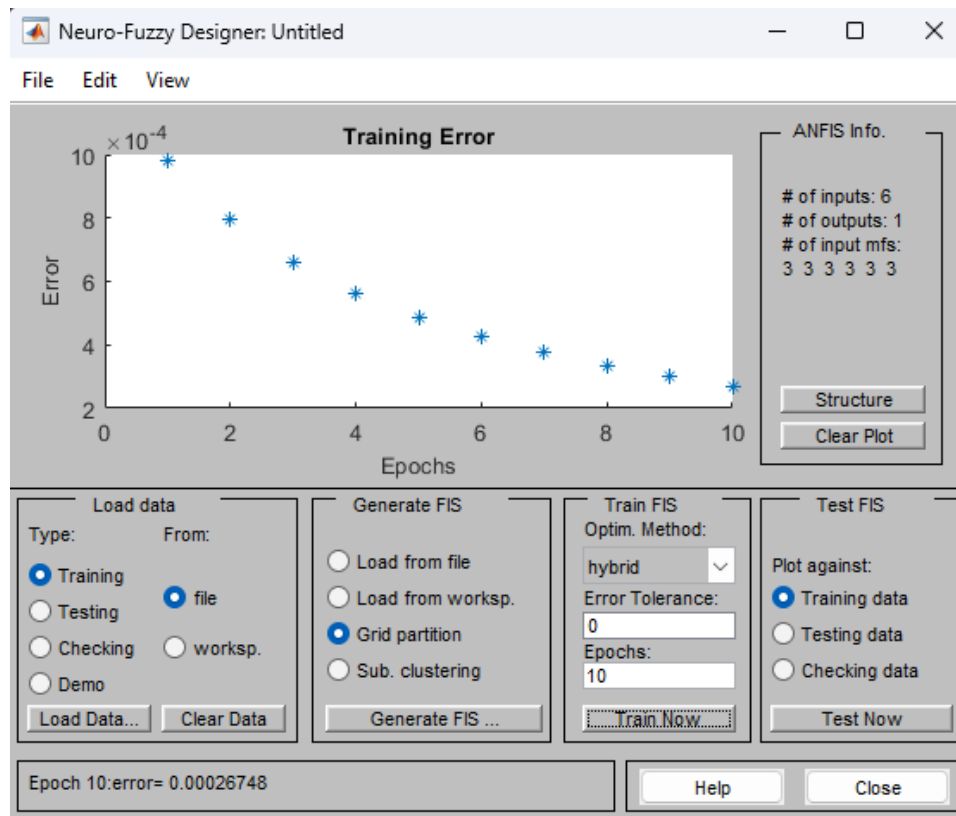


Рисунок 2.9 – результати тренування мережі ANFIS.

На екранній формі приведено поетапний, рекурсивний процес навчання мережі шляхом підстроювання форми та положення функцій приналежності кожного з трьох термів, та оцінки наприкінці ітерації середньоквадратичної помилки для оцінки навчання. Як видно з центрального графіку форми, процес спрямований на зменшення помилки що на 10 циклі ітерації сягнула заокруглено значення 0,00027. Лістінг процесу навчання ANFIS та перевірки із скорегованими вихідними даними в MATLAB command window наведено в додатку В.

Налаштування функцій приналежності виконується по кожній змінній – коефіцієнту залишкового ресурсу обраного діагностичного параметру. Як було сказано раніше, в роботі було обрано 3 терми із гаусовими функціями приналежності, зображені на рисунку 2.10.

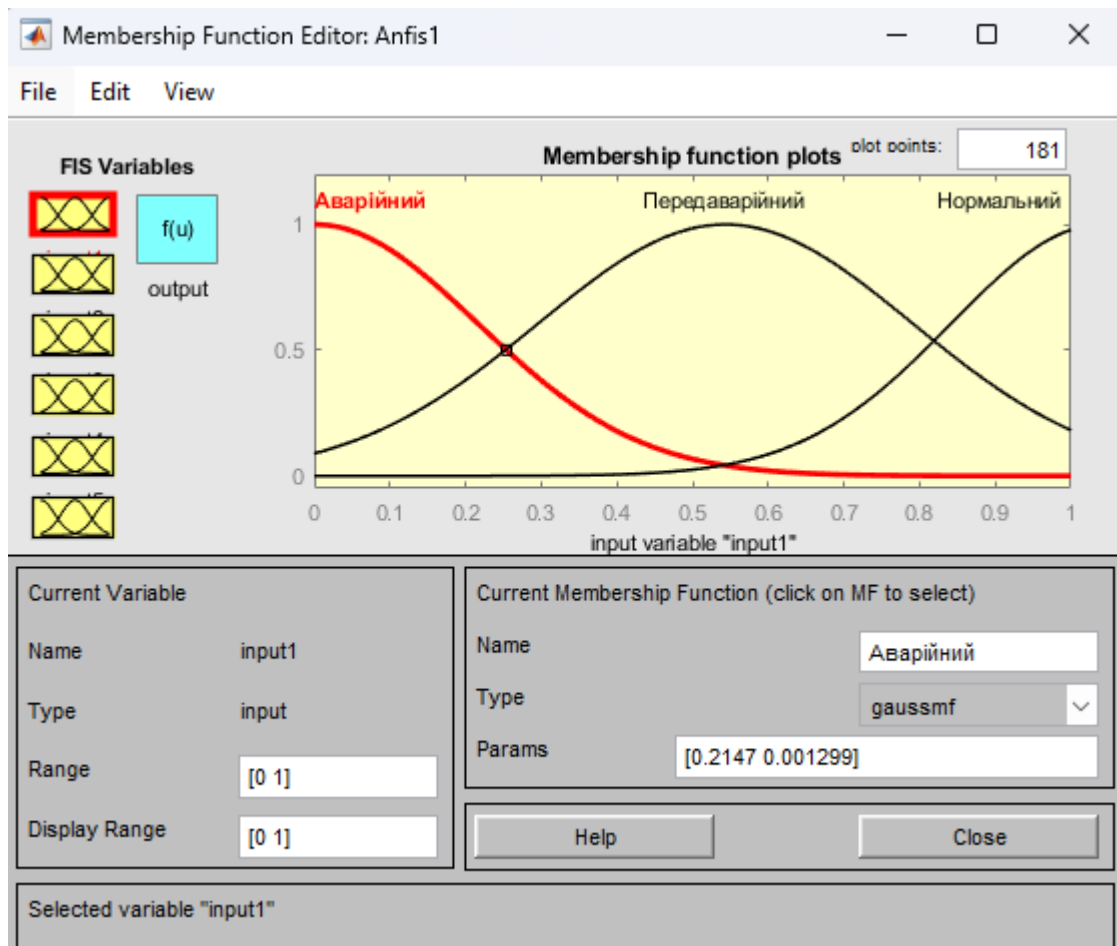


Рисунок 2.10 – Екрана форма перевірки та налаштування функцій приналежності обраних термів.

Структура механізму виводу за алгоритмом Сугено із можливістю редагування вхідних параметрів та способу агрегування, зокрема для позначення коефіцієнтів залишкового ресурсу за обраним діагностичним параметром зображена на рисунку 2.11.

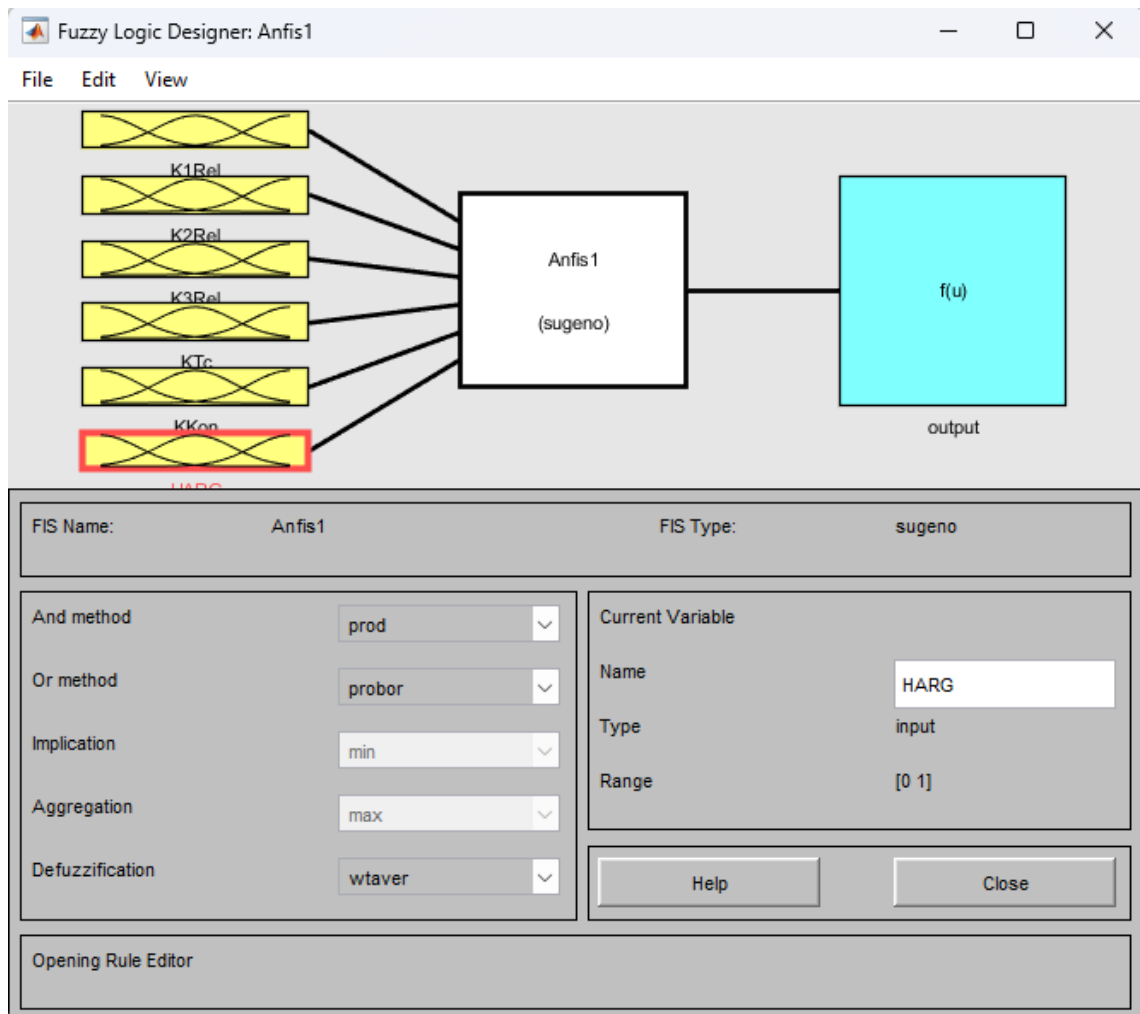


Рисунок 2.11 – Екрана форма редактора механізму виводу нечітких правил.

Також важливим інструментом для аналізу залежності між вхідними параметрами моделі та виходом є Surface. За його використання можна перевірити “охопленість” правилами (чи термами з їх функціями приналежності) діапазону прийняття рішення, оцінити складність залежності (ступінь крутизни) вихідної величини та потенційні проблеми з явищем перенавчання для досвідченого фахівця щодо досконалості структури мережі чи навіть можливості її адекватного застосування для поставленої задачі. Зображення екранних форм Surface для комбінацій вхідних параметрів 1-2 та 1-5 з виходом наведено на рисунку 2.12.

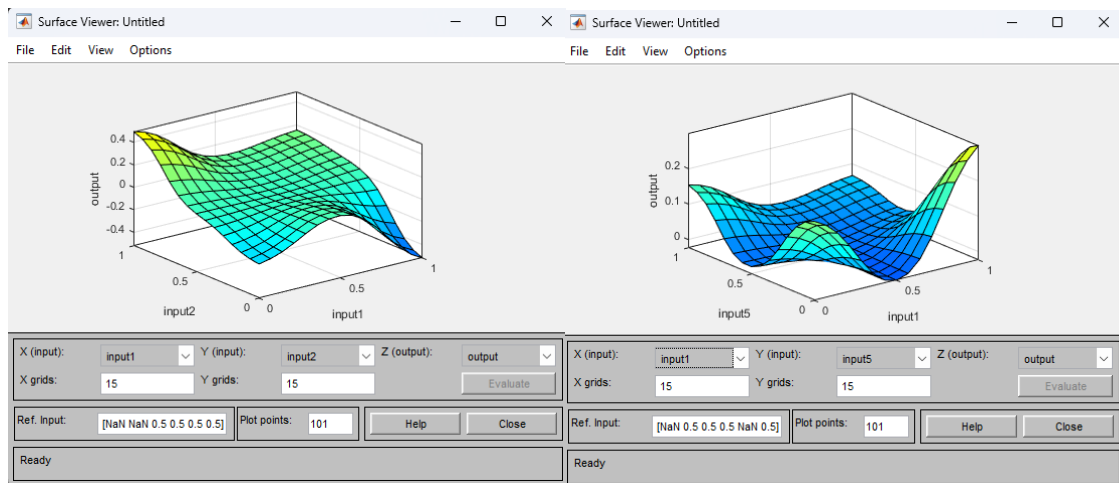


Рисунок 2.12 – Відображення обраних залежностей між вхідними параметрами 1-2-вихід та 1-5-вихід

Практичний зиск використання нейронної мережи фактично зводиться до задачі інтерполяції можливих значень коефіцієнтами залишкового ресурсу за прийнятою моделлю в процесі прийняття рішення за про придатність ТН для подальшої експлуатації. Досить наочним інструментом для оцінки гіпотетичних ситуацій виступає компонент ANFIS редактора – rule viewer. На рисунку 2.13 продемонстровано формування нечіткої множини та механізму виводу для третього рядка даних вхідної початкової вибірки.

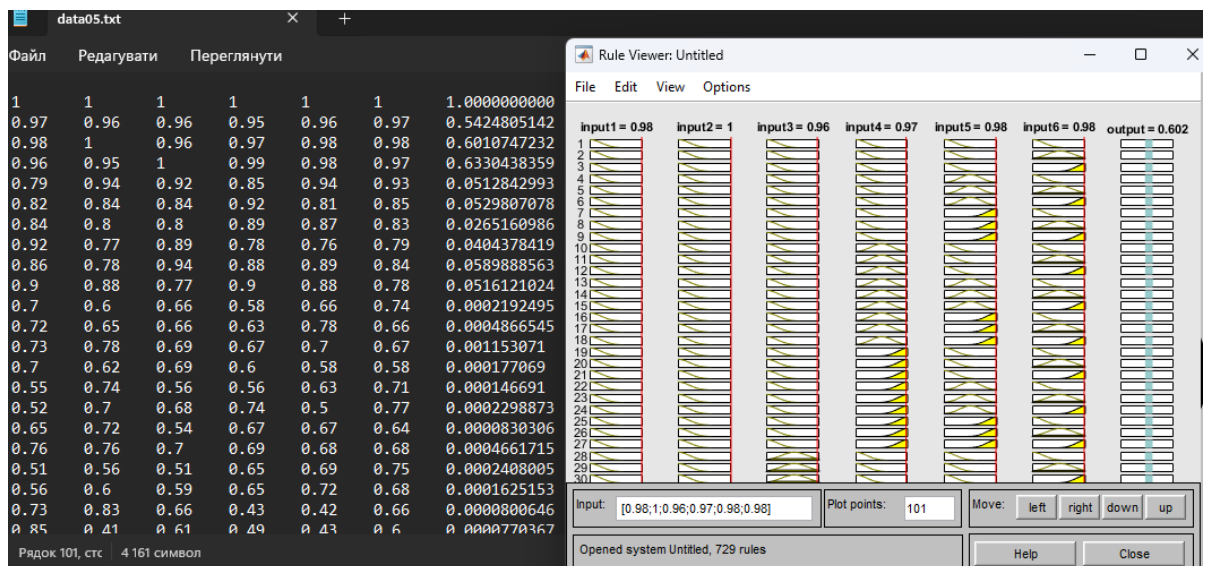


Рисунок 2.13 –Перевірка довільних значень за допомогою Rule Viewer

Як видно на рисунку 2.12, при вузлових даних, відтворених для початкової вибірки за рядком 3, результат інтерполяції дуже близький до

оригінального загального коефіцієнта залишкового ресурсу: 0,60107 проти заокругленого в редакторі 0,602.

За потреби використання розробленого механізму прийняття рішення ситуативно чи у режимі реального часу, програмна модель може бути експортована та відтворена з використанням різних мов програмування, зокрема C/C++. Ще одним інтегрованим інструментом MATLAB для реалізації є пакет Simulink. Наведемо розроблену модель обробки даних з використанням Simulink на рисунку 2.14, для описаної ситуації в попередньому абзаці.

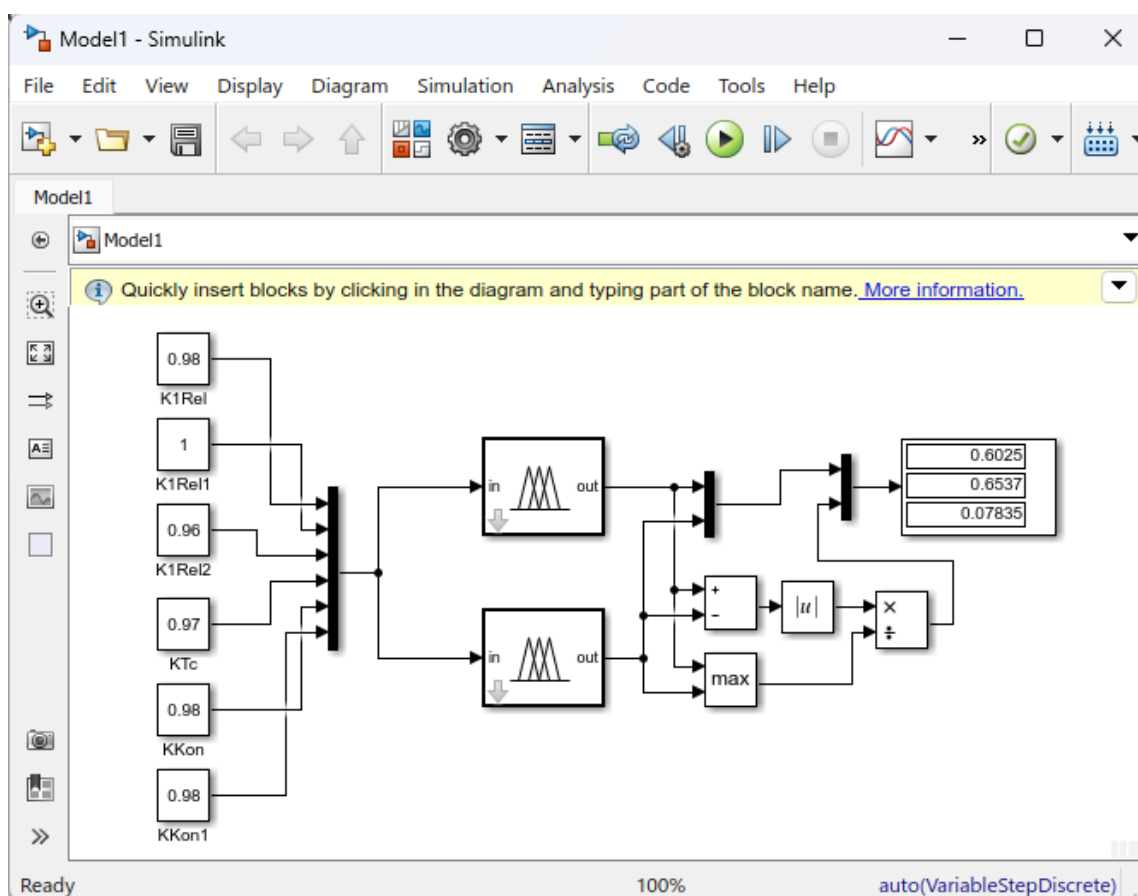


Рисунок 2.14 – Програмна модель обробки даних Simulink

В дану модель включено нейро-нечіткі моделі, отримані шляхом навчання на початковій та скорегованій експертами виборці даних. Для демонстрації було реалізовано спрощене оцінювання відносної похибки двох моделей, яка округлено сягає 8%. Треба зазначити, що така похибка спричинена фактором розрахунку загального коефіцієнту залишкового ресурсу ТН за прийнятою моделлю на базі 19-ти коефіцієнтів окремих діагностичних параметрів, а інтерполяція за нейро-нечіткою моделлю виконувалась лише за 6-ма через

обмеженість часового та апаратного ресурсу MATLAB для повного процесу навчання

Висновки до третього розділу

Створена нейро-нечітка модель може бути використана, як складова експертної системи прийняття рішення щодо виводу трансформатора в ремонт а також прогнозування проблем із окремими його елементами. Використовуючі інструменти програмного комплексу MATLAB можна в короткий та зручний спосіб виконувати удосконалення моделі та масштабувати до номенклатури. Кросплатформена архітектура та підтримка популярних мов програмування дозволяють сформувати бібліотеки та модулі для інтеграції в існуючі ІСМД. Треба зазначити, що кількість діагностичних параметрів призводить затрат часу в геометричній прогресії, тому рекомендується комбінувати параметр за групами. Дослідження кореляційних зв'язків між групами параметрів діагностування може бути предметом подальшого наукового дослідження.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Техніко-економічне обґрунтування

Поняття економічної ефективності передбачає коректне співставлення понесених витрат з отриманими результатами. Основною метою економічних розрахунків в будь-яких інвестиційних проектах є обґрунтування рішень на основі оцінки їх економічної ефективності.

Міжнародна економічна практика використовує методи оцінки інвестиційних проектів, що враховують можливі умови реалізації і мають властивість універсальності, що дозволяє використовувати їх для визначення ефективності майже будь-якого проекту з достатньою точністю та прогнозованістю результату.

Впровадження методів діагностики трансформаторних системи (ТС) потребують економічного обґрунтування. Допускається, що здійснення рішень вимагає конкретних капіталовкладень і тому завдання зводиться до оцінки їх ефективності. Для цього необхідна якісна і кількісна оцінка множини факторів і економічних показників. Наприклад, яких затрат потребує капіталовкладення, які доходи воно принесе, як ці витрати і доходи будуть розподіляться в часі і за яких умов.

Порівняння різних варіантів інвестиційних проектів і вибір кращого з них здійснюється з використанням системи показників, що враховують фактор часу за допомогою дисконтування, базовими з яких вважається два:

- чиста приведена вартість – Net Present Value (NPV) ,
- термін окупності ($T_{ок}$) .

Дисконтні методи засновані на приведенні різночасових платежів і надходжень до деякого фіксованого моменту часу. Інструментом приведення є норма дисконту (E), що називається також належним рівнем або нормою прибутковості, ставкою порівняння або «бар'єрною» ставкою. Вона уособлює собою прийнятний для інвестора відсоток повернення на інвестований капітал за певний період нарахування.

4.2 Визначення капіталовкладень

У випадках власних не залучених фінансових ресурсів орієнтиром необхідної норми прибутковості є середній банківський відсоток за банківськими вкладками з урахуванням їх оподаткування, який на даний час складає 18%.

Чиста приведена вартість відноситься до показників ефекту капіталовкладень і характеризує чистий абсолютний результат або віддачу від реалізації інвестиційного проекту, і визначається за формулою (4.1). Від'ємне значення приведення вартості свідчить про неефективність інвестиційного проекту при даній нормі дисконту. Прийнятність того чи іншого варіанту деякого інвестиційного проекту оцінюється за величиною $NPV > 0$, чим він більше, тим відповідний варіант кращий.

$$NPV = -K + \sum_t^T \frac{D_t}{(1+E)^t}, \quad (4.1)$$

де K - капітальні затрати (інвестиційні затрати), D_t - чистий результат (ефект) від вкладень на t -му кроці, E - норма дисконту.

Термін окупності, без врахування фактору часу при однаковому покроковому надходженні прибутку і розмірі інвестицій K рівний

$$T_{ок} = \frac{K}{D_t}. \quad (4.2)$$

В загальному випадку, під терміном окупності розуміють мінімальну тривалість періоду, протягом якого сума дисконтованих чистих надходжень покриває суму приведених інвестиційних затрат і в подальшому чистий інтегральний ефект залишається не від'ємним.

Економічна ефективність системи технічної діагностики трансформаторів визначається зниженням витрат на експлуатацію та ремонти і зниженням збитку від аварійних відмов устаткування, вартістю заміни чи ремонту

пошкодженого обладнання, а також зменшенням збитку від недовідпуску електроенергії.

Розглянемо розрахунок економічної ефективності вдосконалення системи діагностування ОПН на прикладі ВРП підстанції, в якій знаходяться 22 трансформаторів напруги ЄТН 750 кВ. Тоді формулу (4.1) можна записати

$$NPV = -K_{обл} + \sum_t \frac{(\Delta Z_t - Z_D)}{(1 + E)^t}, \quad (4.3)$$

де $K_{обл}$ – капітальні затрати на придбання обладнання для діагностики;

ΔZ_t – зменшення річних затрат на трансформатори (технічне обслуговування і ремонти);

Z_D - річні затрати на проведення діагностування;

T - період часу, що розглядається.

Капітальні затрати на придбання обладнання для діагностування приведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Капітальні затрати на придбання обладнання для діагностування

Вид обладнання	Вартість обладнання, тис. грн..
Обладнання для on-line моніторингу розчинених газів у маслі високовольтних вводів за допомогою приладу HYDROCAL1008	1380
Обладнання для on-line моніторингу комплексної провідності високовольтних вводів КІН-750	1160

Обладнання FRAnalyzer – аналізатор частотних характеристик для діагностування обмоток трансформаторів.	1320
Обладнання для проведення тепловізійного обстеження	450
Обладнання для on-line моніторингу $\text{tg}\delta$ трансформаторного масла в баку трансформатора	380
Разом	4690

Затрати на поточні і розширені поточні ремонти трансформатора за попередніх вісім років наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 4.2 – Затрати на проведення ремонтів, тис. грн.

Вид ремонту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поточні	105	108	102	95	110	114	98	118	124	127
Розширені поточні	1080	560	1740	5500	2100	1080	1875	1100	840	750
Разом	1185	668	1842	5595	2210	1194	1973	1218	964	877
Разом	17726									

Значні затрати на 4 році викликані аварією, що призвела до необхідності заміни конденсаторних елементів на 2 трансформаторах. На 7 році внаслідок аварії довелось замінити демпферний реактор.

Є очікування, що запропоноване вдосконалення системи діагностики дозволить зменшити кількість ремонтів а також уникнути раптових тяжких аварій, таких як пробої та перегрів дільників напруги, які в подальшому вимагають їх повної заміни. Очікувані затрати на ремонти в наступні 10 років подані у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Затрати на проведення ремонтів, тис. грн.

Вид ремонту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поточні	102	106	100	95	96	98	102	105	98	95
Розширені поточні	950	610	670	850	1100	1000	940	860	800	850
Разом	1052	716	770	945	1196	1098	1042	965	898	945
Разом	9627									

Отже, очікуване зменшення затрат на ремонти трансформаторів (в тому числі на обладнання, комплектуючі вироби та матеріали) за 10 років складає

$$\Delta Z = 17726 - 9627 = 8099 \text{ (тис. грн.)}. \quad (5.4)$$

Тому за рік в середньому зменшення витрат складе

$$\Delta Z_t = \frac{8099}{10} = 809.9 \text{ (тис. грн.)}. \quad (5.5)$$

Затрати на проведення діагностування визначаємо із таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Вартість проведення діагностування

Вид робіт	Вартість для одного трансформатора, грн.	Вартість для 22 трансформаторів, грн.
Хроматографічний аналіз масла	380	8360
Свіп-аналіз частотних характеристик	650	14300
Контроль комплексної провідності високовольтних вводів	320	7040
Контроль ємності основної ізоляції силового трансформатора	380	8360
Визначення tgδ масла в баку РПН	400	8800
Контроль температури верхніх шарів масла баку трансформатора	440	9680
Разом	2570	56540

Підставимо відомі значення у формулу (4.3):

$$NPV = -4690000 + \sum_{t=1}^{10} \frac{(8099000-56540)}{(1+0,18)^t} = 31450000 \text{ (грн.)}. \quad (4.6)$$

Термін окупності за формулою (4.2):

$$T_{ок} = \frac{4690000}{8099000-56540} = \frac{4690000}{8042000} \approx 0.58 \text{ (року)}. \quad (4.7)$$

З приведених розрахунків видно, що прибуток від реалізації проекту почне надходити на кінець п'ятого року і до кінця 10-го року складе 314500 грн.

Висновок до четвертого розділу

Спираючись на проведені розрахунки можна зробити висновок про економічну ефективність впровадження системи діагностування вимірювальних трансформаторів напруги. Впровадження методів та засобів прогнозування та оперативного контролю технічного стану вимірювальних трансформаторів напруги дає можливість персоналу не тільки спростити процедуру діагностування але і знизити сумарні витрати на обслуговування електричного обладнання.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У цьому розділі магістерської роботи розроблені заходи з охорони праці та цивільного захисту діагностики трансформаторів напруги 750 кВ. На електротехнічний оперативно-ремонтний персонал, який здійснює обслуговування обладнання напругою 750 кВ, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [10, 11]:

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); електричні та магнітні поля промислової частоти (50 Гц), виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо).

Хімічні фактори: речовини хімічного походження, переважно аерозолі фіброгенної дії (металевий і будівельний пил).

Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні та емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

У цьому розділі будуть досліджені такі питання як технічні рішення щодо безпечної організації робочих місць, електробезпека, мікроклімат, склад повітря робочої зони, виробниче освітлення, виробничий шум, виробничі вібрації, безпеки в надзвичайних ситуаціях для працівників в цілому та для об'єкта проектування під час його експлуатації.

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

У ВРУ 110 кВ і вище та на ПЛ 330 кВ і вище у разі виконання робіт у зоні впливу електричного поля напруженістю понад 5 кВ/м необхідно обмежувати тривалість перебування людей або застосовувати засоби захисту

від впливу електричного поля. У разі напруженості електричного поля до 5 кВ/м тривалість перебування в ньому не обмежується. Тривалість роботи в електричному полі напруженістю від 20 до 25 кВ/м не повинна перевищувати 10 хв. У разі напруженості понад 25 кВ/м слід застосовувати засоби захисту, що дозволяють працювати повністю робочий день.

Допустима тривалість перебування в електричному полі T , годин, напруженістю в інтервалі понад 5 до 20 кВ/м включно обчислюється за формулою:

$$T = (50 / E) - 2 \text{ год.}$$

де E – напруженість діючого електричного поля в зоні, що контролюється, кВ/м.

Вимоги цього пункту дійсні за умови виключення можливості дії на працівників електричних розрядів. Допустиму тривалість перебування в зоні впливу електричного поля без засобів захисту може бути реалізовано одноразово або з перервами протягом робочого дня. Протягом іншого часу слід застосовувати засоби захисту або перебувати в електричному полі напруженістю до 5 кВ/м.

Тривалість перебування людини в зоні, що контролюється, встановлюється з урахуванням найбільшого значення вимірної напруженості. В усіх випадках напруженість неспотвореного електричного поля слід вимірювати по всій зоні, де може знаходитись працівник під час виконання роботи.

Основними засобами колективного захисту від дії електричного поля промислової частоти є стаціонарні та переносні різновиди екрануючих пристроїв.

В заземлених кабінах і кузовах машин, механізмів, пересувних майстерень та лабораторій, у будівлях із залізобетону, у цегляних будівлях із залізобетонним перекриттям, металевим каркасом або заземленою металевою покрівлею електричне поле відсутнє і застосування засобів захисту не вимагається. Переносні та пересувні екрануючі пристрої слід заземлювати на

місці їхньої установки за допомогою приєднання до заземлювального пристрою або металевих конструкцій, які з'єднані із заземлювальним пристроєм, гнучким мідним провідником перерізом не менше ніж 4 мм².

Знімні екрануючі пристрої повинні мати гальванічне з'єднання з машинами та механізмами, на яких вони встановлені. Для заземлення машин та механізмів додаткового заземлення знімних екрануючих пристроїв не вимагається.

Заземлення індивідуальних екрануючих комплектів здійснюється за допомогою спеціального взуття зі струмопровідною підошвою. У разі виконання робіт в положенні навстоячки на ізолювальній основі (дерев'яний настил, ізолятор, пофарбований метал) або робіт, пов'язаних з дотиком до заземлених конструкцій незахищеною рукою (при знятих рукавичках або рукавицях), екрануючий одяг слід додатково заземлити шляхом приєднання його спеціальним гнучким провідником перерізом 4 мм² до заземленої конструкції або до заземлювального пристрою.

Забороняється застосування індивідуальних екрануючих комплектів під час роботи, якщо не виключена можливість дотику до струмовідних частин, що перебувають під напругою до 1000 В, а також під час випробування обладнання (для працівників, які безпосередньо проводять випробування підвищеною напругою) та електрозварювальних робіт. Захист працівників у цьому разі повинен здійснюватись із застосуванням екрануючих пристроїв.

У разі виконання робіт на ділянках вимкнених струмовідних частин, що перебувають в зоні впливу електричного поля, для знімання наведеного потенціалу їх слід заземлювати. Забороняється доторкатись до вимкнених, але не заземлених струмовідних частин без засобів захисту.

5.1.2 Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

- 1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
- 2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.

1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:

- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;

- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмовідні частини слід огороджувати;

- приєднати до "землі" переносні заземлення;

- перевірити відсутність напруги на струмовідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмовідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;

- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмовідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;

- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмовідні частини, що залишились під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. Залежно від місцевих умов струмовідні частини огорожують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які повинні застосовуватись в електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірювальні кліщі, показчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (показчики напруги для фазування, показчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні

рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

До засобів захисту від дії електричних полів напруженістю, що перевищує допустиму для перебування працівників в електричному полі без засобів захисту, згідно з вимогами нормативних документів, належать індивідуальні екранувальні комплекти, які необхідно застосовувати під час виконання робіт на потенціалі проводу ПЛ і на потенціалі землі у ВРУ і на ПЛ, а також знімні і переносні екранувальні пристрої та плакати безпеки.

Крім наведених вище засобів захисту в електроустановках повинні застосовуватись такі ЗІЗ: захисні каски – для захисту голови; захисні окуляри і щитки – для захисту очей і обличчя; протигази і респіратори – для захисту органів дихання; рукавиці – для захисту рук; запобіжні пояси та страхувальні канати.

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [12], а також іншими відповідними нормативними документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

За безпечність конструкції, правильність вибору матеріалів, якість виготовлення, а також за відповідність засобів захисту чинним в Україні нормативним документам повинні нести відповідальність керівники підприємств, установ, організацій (незалежно від форми власності), що виготовляють ці засоби захисту, орган, який видав сертифікат на виробництво

та на реалізацію захисних засобів, в тому числі і засобів захисту зарубіжного виробництва.

Керівники підприємств, установ, організацій та інші посадові особи несуть персональну відповідальність за виконання вимог цих Правил у межах покладених на них завдань та функціональних обов'язків згідно з чинним законодавством. Працівників, які обслуговують електроустановки, необхідно забезпечити усіма необхідними засобами захисту, навчити правилам користування цими засобами і зобов'язати застосовувати їх для створення безпечних умов праці.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні [15] встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення. Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Па.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний	Па	17-23	До 75%	не більше 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [16]:

1. Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні допустимих параметрів мікроклімату не повинна перевищувати 2°C.

2. Якщо температура поверхонь вище або нижче допустимої температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1 м.

3. Для забезпечення нормованих значень швидкості руху повітря проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Робочою зоною вважається простір, який обмежений огорожуючими конструкціями виробничих приміщень, що мають висоту 2 м над рівнем підлоги або площини, на яких знаходяться місця постійного або непостійного перебування працюючих. Склад повітря робочої зони залежить від складу атмосферного повітря і впливу на нього ряду шкідливих виробничих факторів, утворених в процесі трудової діяльності людини. Склад повітря залишається постійним. Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [15]. Нормовані параметри забруднення повітря в робочій зоні наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпеки
	Максимальна	Середньодобова	
	разова		
Оксид вуглецю	20	20	4
Пил нетоксичний	4	4	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця [16]. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів з очищення забруднених поверхонь. Потрібно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (менша зернистість), тим вище небезпека.

Тому необхідно здійснювати наступні заходи: очищувати металевий пил якнайчастіше, щодня протирати гарячі поверхні, при високих концентраціях пилу обробляти запилені поверхні по частинам. Низька вологість збільшує потенційну небезпеку, це повинне прийматися в увагу під час прибирання.

Планувати прибирання потрібно на час, коли устаткування вимкнене, зокрема в другу половину дня п'ятниці або на вихідні.

Характеристика зорових робіт – середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Допустимі рівні виробничого освітлення наведені в таблиці 5.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	малий середній великий	світлий середній темний	400	200	4	2,4

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості.

5.2.3 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки».

Нормовані параметри виробничого шуму в робочій зоні наведено в таблиці 5.4.

Шум порушує нормальну роботу шлунка, особливо впливає на центральну нервову систему. Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Таблиця 5.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно: безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі; для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

5.2.4 Виробнича вібрація

Вібрація відноситься до факторів, які мають велику біологічну активність. Як загальна, так і локальна вібрація несприятливо впливає на організм людини, викликає зміну у функціональному стані вестибулярного апарату, центральної нервової, серцево-судинної систем, погіршує самопочуття та може призвести до розвитку професійних захворювань.

У нашому цеху присутня вібрація типу – За. Тобто технологічна вібрація, яка діє на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання. Нормовані параметри виробничої вібрації в робочій зоні наведено в таблиці 5.5.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: динамічне погашення вібрації – приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи; зміна конструктивних елементів машин; застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	$\frac{1,3^*}{108}$	$\frac{0,45}{99}$	$\frac{0,22}{93}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	-	-	-	-
Локальна вібрація	-	-	$\frac{2,8}{115}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$

* В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, $\text{м/с} \cdot 10^{-2}$, в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

5.2.5 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні фактори визначаються відповідно до Гігієнічної класифікації праці [1]. Робота монтажника технологічного обладнання системи забезпечення мікроклімату потребує великих фізичних зусиль за важкістю та напруженістю праці.

1. Клас умов праці за показниками важкості праці – допустимий (середньої важкості): загальні енергозатрати організму (кг/м) – до 290; зовнішнє фізичне динамічне навантаження, виражене в одиницях механічної

роботи за зміну, кг/(Вт): при регіональному навантаженні (для чоловіків) – 13000; при загальному навантаженні (за участю м'язів рук, тулуба, ніг) – до 44000; маса вантажу, що постійно підіймається та переміщується вручну, кг – до 30 кг; стереотипні робочі рухи: при локальному навантаженні (участь м'язів кистей та пальців рук) – до 40000; при регіональному навантаженні(участь рук та плечового суглоба) – до 20000; статичне навантаження (кг/с): двома руками (чоловіки) – до 70000; за участю м'язів тулуба та ніг – до 100 000; робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаємного розташування різних частин тіла відносно одна одної) до 25% часу зміни; перебування у вимушеній позі до 10%, в позі «стоячи» – до 60% часу зміни; нахил тулуба: вимушені нахили протягом зміни – 51-100 разів; переміщення у просторі (переходи через виконання технологічного процесу) – по горизонталі більше 8, вертикалі – 4 км.

2. Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження: зміст роботи – рішення складних завдань з вибором за алгоритмом; сприймання інформації та їх оцінка – сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій; розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, контроль, перевірка завдання; характер виконуваної роботи – робота за встановленим графіком з можливим його коригуванням під час діяльності. Сенсорні навантаження: зосередження (%за зміну) – більше 75; щільність сигналів (звукові за 1 год) – більше 300; навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 20 до 25. Емоційне навантаження: ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; ступінь ризику для власного життя – вірогідний; ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – є відповідальним за безпеку інших. Режим праці: тривалість робочого дня – 8 год; змінність роботи – одностійна (без нічної зміни).

5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Визначення області працездатності системи діагностики трансформаторів напруги в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.

Система діагностики трансформаторів напруги може використовуватися як на підприємствах виробництва, так і в експлуатаційних умовах енергетичними компаніями у різних частинах України, тому існує ймовірність впливу на пристрій електромагнітних та іонізуючих випромінювань. Вплив іонізуючого випромінювання на радіоелементи викликає зворотні та незворотні процеси, внаслідок яких може бути порушена робота елементів схеми, що призводить до виходу з ладу пристрою.

Надзвичайні ситуації, які можуть виникати на території України і здійснювати негативний вплив на функціонування об'єктів енергетичного комплексу. Надзвичайні ситуації особливого періоду бувають з впливом і дією іонізуючих випромінювань, або електромагнітного імпульсу.

При проходженні потоку гамма-опромінення через елементи РЕА, в них виникають вільні носії електричних зарядів, внаслідок переміщення яких виникає хибний імпульс, який може призвести до збою в роботі комп'ютерної системи. Особливо чутливими до радіації елементами є елементи з високим вмістом металів, яким в свою чергу властива висока концентрація вільних носіїв зарядів.

Таким чином радіація в РЕА викликає зворотні і незворотні процеси, внаслідок яких можлива зміна майже всіх електричних та експлуатаційних характеристик, що залежать від проходження процесів іонізації, порушення структури матеріалів, що призводить до пошкодження апаратури [18].

Під час дії електромагнітного імпульсу (ЕМІ) у тілах, що проводять електричний струм на частку секунди (час дії ЕМІ) виникає імпульс електричного струму і з'являється різниця потенціалів відносно землі. Під дією цих напруг може відбутись пошкодження провідників, елементів, ліній зв'язку, вихід з ладу запобіжників і т.д.

5.3.1 Визначення області працездатності системи діагностики трансформаторів напруги в умовах дії іонізуючого випромінювання

В приладі використовуються елементи, до складу яких входять матеріали: метали, неорганічні матеріали, напівпровідники та різні органічні сполуки (діелектрики, смоли та інші). Серед цих матеріалів метали найбільш чутливі до радіації, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв.

Визначаємо потужність експозиційної дози для кожного елемента і знаходимо елемент, який найбільш чуттєвий до дії іонізуючого випромінювання.

Таблиця 1- Стійкість елементів системи діагностики до радіації.

№	Блоки елементів	Елементи системи діагностики	Найменування	Ргр,і, р/год	Ргр, р/год
1	Основний пристрій	Конденсатори	плівкові	10^5	10^4
		Резистори	металоплівкові	10^6	
		Транзистори	КТ3102А	10^5	
		Мікросхеми	FT232RL, АТ24С512	10^4	
2	Перетворювач	Діоди	АЛ307	10^5	10^5
		Конденсатор	електролітичний	10^5	

Аналізуючи дані таблиці 1, визначаємо, що найбільшого впливу зазнають мікросхеми та діелектричні матеріали. В них незворотні дії виникають при рівні p_i , яка для пристрою в цілому є граничною, отже, $p_{гран}=10^4$ Рад/с.

В якості критерію стійкості роботи системи діагностики трансформаторів напруги використовують значення рівня радіації гамма-випромінювання, яке розраховується за формулою [20]:

$$p'_{гран} = p_{гран} \cdot K_H \cdot K_{носл} [Rad / год], \quad (5.1)$$

де $p_{гран}$ – межа стійкості роботи пристрою, Рад/с;

K_H – коефіцієнт надійності елементної бази, $K_H = 0,9 \dots 0,95$,

приймаємо $K_H = 0,945$;

$K_{носл}$ – коефіцієнт послаблення радіації, із завдання: $K_{носл} = 4$.

Тоді:

$$p'_{\text{гран}} = 10^4 \cdot 0,945 \cdot 4 = 3,78 \cdot 10^4 \text{ (P / год)}.$$

Визначимо допустимий час роботи РЕА в заданих умовах:

$$t_{\text{доп}} = \frac{D_{\text{зр}} \cdot K_{\text{посл}} + 2P_1 \cdot \sqrt{t_n}}{2P_1} \quad (5.2)$$

$$t_{\text{доп}} = \frac{10^4 \cdot 4 + 2 \cdot 4,82 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 4,82} = 4150,37 \text{ год}$$

Отже, область працездатності системи діагностики трансформаторів напруги в умовах дії іонізуючих випромінювань, при яких пристрій буде ще працювати лежить в межах від 0 до $3,78 \cdot 10^4$ Р/год. Втім при дії на пристрій ІВ 4,82 Р/год надійно він працюватиме близько півроку. Тому робота пристрою в умовах впливу іонізуючих випромінювань не стійка і вимагає застосування протирадіаційного екранування з $K_{\text{осл}} \geq 2$.

5.3.2 Визначення області працездатності системи діагностики трансформаторів напруги в умовах дії електромагнітного імпульсу.

За критерій стійкості роботи системи діагностики трансформаторів напруги в умовах дії електромагнітного імпульсу можна прийняти коефіцієнт безпеки [20], який визначається за формулою:

$$K_B = 20 \cdot \lg \frac{U_d}{U_\Gamma} \geq 40 \text{ дБ}, \quad (5.3)$$

де U_Γ – напруга наведення за рахунок електромагнітного імпульсу горизонтальних струмопровідних частин плати, В;
 U_d – допустиме коливання напруги живлення, В.

Визначаємо допустиме коливання напруги живлення

$$U = U_n + \frac{U_n}{100} \cdot D \quad (5.4)$$

де U_n – напруга живлення пристрою ($U_n = 30 \text{ В}$);

N - допустиме коливання напруги живлення ($N = \pm 5\%$).

$$U_d = 30 + \frac{30}{100} \cdot 5 = 31,5 \text{ (В)}.$$

Плата системи розташована в горизонтальній площині. Визначимо максимальну очікувану напругу в горизонтальних лініях з рівності:

$$20 \cdot \lg \frac{U_d}{U_r} = 40 \quad (5.5)$$

$$U_r = \frac{U_d}{100} [B], \quad (5.6)$$

$$U_r = \frac{3150}{100} = 315 \text{ (В)}.$$

Вертикальна складова напруженості електричного поля визначається як:

$$U_r = E_B \cdot l_r, \quad (5.7)$$

звідки

$$E_B = \frac{U_r}{l_r} [B / m], \quad (5.8)$$

де l_r – максимальна довжина горизонтального контуру електричної схеми, м ($l_r = 3,25$ м).

$$E_B = \frac{315}{3,25} = 96,9 \text{ (В / м)}.$$

Згідно з розрахунками системи діагностики трансформаторів напруги здатні працювати в умовах дії електромагнітного імпульсу при напруженості вертикальної складової електричного поля $E_B \leq 96,9 \text{ В / м}$.

На підставі виконаних розрахунків можна зробити висновок про те, що дана пристрій стійко працюватиме в середині будівлі, яка має коефіцієнт послаблення радіації не менше 4, в умовах дії іонізуючого випромінювання при потужності дози випромінювання в межах від 0 до $3,78 \cdot 10^4 \text{ Р/год}$.

Висновок до п'ятого розділу 5

Отже, в розділі розроблені заходи з охорони праці та цивільного захисту діагностики трансформаторів напруги 750 кВ. Враховані наявні фізичні та хімічні фактори безпеки, мікроклімату, рівню шуму та психофізичні чинники. Також в даному розділі було визначено область працездатності системи діагностики трансформаторів напруги в умовах дії загрозливих чинників НС та в умовах дії іонізуючого випромінювання. Визначено потужність експозиційної дози для кожного елементу, яка в цілому для пристрою є граничною і складає: $p_{гран}=3,78 \cdot 10^4 \text{ Р/год.}$

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто питання вдосконалення методів діагностування шунтових реакторів 750 кВ.

Трансформаторів напруги 750 кВ здебільше представлені на ринку ємнісного виконання. ЕБН та ємнісні елементи трансформатора мають ізольовану конструкцію, тому методи діагностування дефектів мають бути направлені на вимірювання діагностичних показників на зовнішніх елементах та виводах, такі як температура, опір ізоляції, ємність, коефіцієнт трансформації та $\text{tg}(\delta)$. У регламентовано невинному випадку для подальшої кореляції з «зовнішніми» або трансформаторів іншого типу, методи оцінки стану оливи дозволяють деталізувати діагностичний стан. Комплексне оцінювання діагностичних параметрів та використання математичного апарату нечітких множин спонукають до удосконалення системи підтримки прийняття рішень.

Отримана модель розрахунку загального коефіцієнту залишкового ресурсу враховує специфіку об'єкту діагностування та покликана полегшити процес діагностування враховуючи причинно-наслідковий характер впливу розглянутих факторів. Можливість вносити корекцію збоку експертів не переопрацьовуючи добре вивчені закономірності за прийнятою методикою розрахунку загального залишкового коефіцієнту дозволяє уніфікувати використання та накопичувати статистику виникнення ремонтних та передремонтних ситуацій для удосконалення моделі.

Використовуючі інструменти програмного комплексу MATLAB була розроблена програмна реалізація з використання апарату нечітких множин, що дозволяє в простий та зручний спосіб виконувати удосконалення моделі та масштабувати до номенклатури ТН. Кросплатформена архітектура та підтримка популярних мов програмування дозволяють сформувати бібліотеки та модулі для інтеграції в існуючі ІСМД. Треба зазначити, що кількість діагностичних параметрів призводить затрат часу в геометричній прогресії,

тому рекомендується комбінувати параметри за групами. Дослідження кореляційних зв'язків між групами параметрів діагностування може бути предметом подальшого наукового дослідження.

Спираючись на проведені економічні розрахунки можна зробити висновок про ефективність впровадження системи діагностування вимірювальних трансформаторів напруги. Впровадження методів та засобів прогнозування та оперативного контролю технічного стану вимірювальних трансформаторів напруги дає можливість персоналу не тільки спростити процедуру діагностування але і знизити сумарні витрати на обслуговування електричного обладнання.

Розроблені заходи з охорони праці та цивільного захисту діагностики трансформаторів напруги 750 кВ враховують наявні фізичні та хімічні фактори безпеки, мікроклімату, рівню шуму та психофізичні чинники. Визначено область працездатності системи діагностики трансформаторів напруги в умовах дії загрозливих чинників НС та в умовах дії іонізуючого випромінювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Матвійчук В. А. Діагностування електрообладнання. Навч. посіб. / В. А. Матвійчук, О. Є.Рубаненко, І.О. Гунько – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 138 с.
2. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020 «НОРМИ ВИПРОБУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ» затверджений наказом Міністерства палива та енергетики України № 22 від 23.03.2020
3. Високовольтне обладнання зовнішнього встановлення. Вимірювальні трансформатори 72,5 – 750 кВ. Каталог компанії АВВ. — Режим доступу: <https://drive.google.com/file/d/1AbWqUR5e8gOIZgRl4ckD-tvPyTSBgfiy/view>
4. Пономарьов О.С. Нечеткі множини в задачах автоматизованого управління та прийняття рішення: Навчальний посібник. – Харків: НТУ "ХПІ", 2005.-232 с.
5. Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide. The MathWorks, Inc., 1999. – 134 p.
6. Get Started with MATLAB. — Режим доступу : <https://nl.mathworks.com/help/matlab/getting-started-with-matlab.html>
7. Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі: СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. – Офіц. Вид. – К. : ГРІФРЕ. М-во палива та енергетики України, ДП Друкарня Державного управління справами, 2007. – 124 с. – (Нормативний документ мінпаливенерго України. Методичні вказівки).
8. «Надійність систем енергетики» (збірник рекомендованих термінів). – М. : ИАЦ «Енергія», 2007. – 192 с.
9. Jang J.S.R. and Sun C.T. ANFIS - Adaptive network of fuzzy inference of the systems // IEEE Trans of Systems, Man and Cyber tics. – May 1993. – 23(05) – P. 665-685.
10. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

11. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. — Режим доступу : <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

12. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. — Режим доступу : https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.

13. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

14. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок (Правила устройства электроустановок. Электрооборудование специальных установок). — Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

15. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень — Режим доступу : <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

16. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

17. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. — Режим доступу : http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

18. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. — Режим доступу : <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

19. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. — Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

20. Богдановський М.В. Порівняння гнучких систем передачі змінного струму Тези доповідей ВНТКП ВНТУ, 20 березня 2024 року. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2024/paper/view/20997/17428>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Діагностика трансформаторів напруги 750 кВ

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра електричних станій та систем, факультет
електроенергетики та
електромеханіки

(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 92,8% Схожість 7,02 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ☐ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- ☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку _____
(підпис)

Вишневський С.Я.
(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи _____
(підпис)

Богдановський М.В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____

Рубаненко О.Є.

ДОДАТОК Б

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ МКР
Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В.О.
(наук. ст., вч. зв., ініц. та прізви.)

(підпис)
" ____ " _____ 2024 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
ДІАГНОСТИКА ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ 750 КВ
08-21.МКР.006.00.003 ТЗ

Науковий керівник: к.т.н., проф.,
професор кафедри ЕСС
_____ Рубаненко О.Є.

Студентка групи ЕС-22мз
_____ Богдановський М.В.

Вінниця 2024 р.

1. Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)

а) Основні аспекти актуальності дослідження трансформаторів напруг включають той факт, що вони піддаються впливу внутрішніх та зовнішніх перенапруг. Дослідження їх ізоляції допомагає забезпечити надійну роботу та захист від високовольтних випромінювань. Вивчення трансформаторів дозволяє вдосконалити їх конструкцію, матеріали та технічні характеристики. Це сприяє підвищенню ефективності та зниженню втрат енергії. Дослідження допомагає виявити можливості покращення енергоефективності та забезпечити стабільну роботу трансформаторів на високих напругах. Своєчасна та якісна діагностика стану роботи трансформаторів напруги забезпечує захист низьковольтного та контрольно-вимірювального обладнання, системи підтримки прийняття рішень в процесі планових перевірок та у режимі реального часу, зокрема інтегровані в АСКОЕ, дозволяє налагодити безперервну та довготривалу роботу обладнання, здешевити обслуговування та покращити ефективність регламентованих робіт.

б) наказ № 81 від 11 березня 2024 про затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи.

2. Мета і призначення МКР

а) Метою роботи є вдосконалення процесу прийняття рішень при діагностуванні та оцінці залишкового ресурсу трансформаторів напруги 750 кВ шляхом розробки математичного та програмного забезпечення, що реалізує інтелектуальний підхід.

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

3. Вихідні дані для виконання МКР

Перелік літературних джерел за тематикою роботи. Посилання на періодичні видання. Вихідні дані для проведення обчислювальних експериментів.

4. Вимоги до виконання МКР

Високовольтні трансформатори напруги 750 кВ серед інших захистів мають бути захищені: мікропроцесорними та електромеханічними захистами від міжфазних замкнень, однофазних замкнень та ін. При обслуговуванні ємнісних елементів потрібно особливо уважно перевіряти цілісність апаратних виводів та порцелянової ізоляції. Допустима різниця перепаду температури між фазними виводами має складати не більше 2 градусів. Для уникання ситуації з пробоем низьковольтного обладнання необхідно строго дотримуватись регламенту

діагностичних робіт, спрямованих на перевірку ємності ділників з максимальною напругою 35 кВ.

Технічне обслуговування і ремонт: експлуатація обладнання буде здійснювати оперативний та ремонтний персонал спеціалізованих підприємств та електричної станції, а також бригади електромонтерів у відповідності з вимогами ПТЕ, ПТБ і технологічних карт.

5. Етапи МКР та очікувані результати

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи		Примітка
		початок	кінець	
1	Розроблення технічного завдання	17.01.24	22.01.24	
2	Аналіз об'єкта діагностування	23.01.24	20.02.24	
3	Методи та засоби діагностування трансформаторів напруги	20.02.24	18.03.24	
4	Визначення залишкового ресурсу ТН	19.03.24	17.04.24	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	18.04.24	29.04.24	
6	Економічна частина	30.04.24	07.05.24	
7	Оформлення пояснювальної записки	08.05.24	30.06.24	
8	Виконання графічної частини та оформлення презентації	1.06.24	06.06.24	
9	Рецензування МКР	25.05.24	01.06.24	
10	Захист МКР	За графіком		

6. Матеріали, що подаються до захисту МКР

Пояснювальна записка МКР, ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту МКР на кафедрі, відгук наукового керівника, відгук опонента, анотації до МКР українською та іноземною мовами, довідка про відповідність оформлення МКР діючим вимогам.

7. Порядок контролю виконання та захисту МКР

Виконання етапів розрахункової документації МКР контролюється науковим керівником згідно зі встановленими термінами. Захист МКР відбувається на засіданні Державної екзаменаційної комісії, затвердженою наказом ректора.

8. Вимоги до оформлення МКР

Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти. СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:21 / уклад.: А. О. Семенов, Л. П. Громова, О. В. Сердюк, Т. В. Макарова. Вінниця: ВНТУ, 2021. 60 с.

9. Вимоги щодо технічного захисту інформації в МКР з обмеженим доступом

Відсутні.

ДОДАТОК В

Лістинг процесу навчання ANFIS та перевірки із скорегованими вихідними даними в MATLAB command window

ANFIS info:

Number of nodes: 1503
Number of linear parameters: 729
Number of nonlinear parameters: 36
Total number of parameters: 765
Number of training data pairs: 100
Number of checking data pairs: 100
Number of fuzzy rules: 729

Warning: number of data is smaller than number of modifiable parameters

Start training ANFIS ...

1	0.000485227	0.000485227
2	0.000444114	0.000444114

Designated epoch number reached --> ANFIS training completed at epoch 2.

Minimal training RMSE = 0.000444

Minimal checking RMSE = 0.000444114

ANFIS info:

Number of nodes: 1503
Number of linear parameters: 729
Number of nonlinear parameters: 36
Total number of parameters: 765
Number of training data pairs: 100
Number of checking data pairs: 100
Number of fuzzy rules: 729

Warning: number of data is smaller than number of modifiable parameters

Start training ANFIS ...

1	0.000444114	0.000444114
2	0.000407384	0.000407384

Designated epoch number reached --> ANFIS training completed at epoch 2.

Minimal training RMSE = 0.000407

Minimal checking RMSE = 0.000407384

ДОДАТОК Г

Коефіцієнти залишкових ресурсів обладнання для обраних діагностичних параметрів

$k(K_m)$	$k(Te_{mb})$	$k_{\text{емб}}(t_{g(\delta)})$	$k(Ro_{\text{сн}})$	$k1(T_{\text{над}})$	$k2(T_{\text{над}})$	$k2(T_{\text{над}})$	$k1(\Delta_{CX})$	$k2(\Delta_{CX})$	$k3(\Delta_{CX})$	$k1(Ctg(\delta))$	$k2(Ctg(\delta))$	$k3(Ctg(\delta))$	$k1(R_{\text{ел}})$	$k2(R_{\text{ел}})$	$k3(R_{\text{ел}})$	$k(T_c)$	$k(K_{\text{он}})$	$k(XA_{PI})$	КЗР ТН розрахований	КЗР ТН скорегований
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.0000000000	1.0000000000
0.97	0.96	0.97	0.96	0.96	1	0.96	1	0.98	0.96	0.96	0.96	0.99	0.97	0.96	0.96	0.95	0.96	0.97	0.5424805142	0.7424805142
0.98	0.95	0.97	0.96	0.96	0.97	1	0.96	0.99	0.99	0.99	0.96	0.95	0.98	1	0.96	0.97	0.98	0.98	0.6010747232	0.6510747232
0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	1	0.98	0.97	1	0.98	0.96	0.97	0.96	0.95	1	0.99	0.98	0.97	0.6330438359	0.6230438359
0.9	0.77	0.82	0.84	0.78	0.93	0.85	0.8	0.79	0.88	0.79	0.93	0.84	0.79	0.94	0.92	0.85	0.94	0.93	0.0512842993	0.1512842993
0.94	0.92	0.82	0.92	0.91	0.82	0.78	0.81	0.86	0.9	0.94	0.76	0.85	0.82	0.84	0.84	0.92	0.81	0.85	0.0529807078	0.0829807078
0.77	0.83	0.84	0.88	0.76	0.82	0.76	0.91	0.77	0.82	0.82	0.8	0.91	0.84	0.8	0.8	0.89	0.87	0.83	0.0265160986	0.0665160986
0.75	0.95	0.91	0.92	0.95	0.75	0.77	0.92	0.77	0.91	0.91	0.87	0.82	0.92	0.77	0.89	0.78	0.76	0.79	0.0404378419	0.0604378419
0.95	0.87	0.78	0.84	0.93	0.76	0.86	0.94	0.81	0.95	0.9	0.79	0.84	0.86	0.78	0.94	0.88	0.89	0.84	0.0589888563	0.0689888563
0.78	0.89	0.87	0.76	0.8	0.9	0.94	0.82	0.9	0.92	0.82	0.89	0.89	0.9	0.88	0.77	0.9	0.88	0.78	0.0516121024	0.0556121024
0.74	0.77	0.74	0.72	0.51	0.68	0.52	0.51	0.67	0.51	0.56	0.67	0.78	0.7	0.6	0.66	0.58	0.66	0.74	0.0002192495	0.0031192495
0.67	0.69	0.78	0.73	0.62	0.58	0.79	0.56	0.73	0.59	0.67	0.67	0.6	0.72	0.65	0.66	0.63	0.78	0.66	0.0004866545	0.0007866545
0.78	0.63	0.69	0.68	0.76	0.79	0.73	0.65	0.62	0.72	0.72	0.56	0.79	0.73	0.78	0.69	0.67	0.7	0.67	0.001153071	0.003453071
0.51	0.68	0.53	0.73	0.7	0.59	0.51	0.77	0.71	0.57	0.66	0.72	0.7	0.7	0.62	0.69	0.6	0.58	0.58	0.000177069	0.002177069
0.53	0.71	0.69	0.55	0.66	0.56	0.63	0.62	0.5	0.58	0.68	0.79	0.8	0.55	0.74	0.56	0.56	0.63	0.71	0.000146691	0.001246691

Додаток Б (продовження)

$k(K_m)$	$k(T_{emb})$	$k_{emb}(t_{g(\delta)})$	$k(R_{ocn})$	$k1(T_{над})$	$k2(T_{над})$	$k2(T_{над})$	$k1(\Delta_{CX})$	$k2(\Delta_{CX})$	$k3(\Delta_{CX})$	$k1(Ctg(\delta))$	$k2(Ctg(\delta))$	$k3(Ctg(\delta))$	$k1(R_{ел})$	$k2(R_{ел})$	$k3(R_{ел})$	$k(T_c)$	$k(K_{он})$	$k(XA_{PI})$	КЗР ТН розрахований	КЗР ТН скорегований
0.67	0.78	0.76	0.57	0.71	0.6	0.66	0.51	0.71	0.68	0.65	0.5	0.64	0.52	0.7	0.68	0.74	0.5	0.77	0.0002298873	0.0015298873
0.59	0.56	0.76	0.59	0.68	0.52	0.61	0.53	0.7	0.53	0.52	0.5	0.7	0.65	0.72	0.54	0.67	0.67	0.64	0.0000830306	0.0001330306
0.75	0.53	0.71	0.75	0.66	0.6	0.6	0.7	0.54	0.71	0.54	0.74	0.67	0.76	0.76	0.7	0.69	0.68	0.68	0.0004661715	0.0005661715
0.76	0.8	0.64	0.75	0.62	0.76	0.72	0.7	0.67	0.56	0.5	0.54	0.7	0.51	0.56	0.51	0.65	0.69	0.75	0.0002408005	0.0002408005
0.58	0.51	0.56	0.58	0.8	0.55	0.67	0.75	0.67	0.78	0.59	0.57	0.69	0.56	0.6	0.59	0.65	0.72	0.68	0.0001625153	0.0001625153
0.49	0.89	0.79	0.49	0.46	0.48	0.61	0.81	0.66	0.73	0.81	0.57	0.41	0.73	0.83	0.66	0.43	0.42	0.66	0.0000800646	0.0000830646
0.72	0.81	0.43	0.7	0.81	0.88	0.64	0.58	0.76	0.47	0.49	0.41	0.86	0.85	0.41	0.61	0.49	0.43	0.6	0.0000770367	0.0001270367
0.9	0.55	0.78	0.41	0.7	0.49	0.41	0.67	0.71	0.6	0.85	0.74	0.79	0.61	0.57	0.7	0.81	0.58	0.7	0.0002527188	0.0011427188
0.41	0.44	0.84	0.86	0.55	0.6	0.47	0.66	0.76	0.82	0.56	0.76	0.73	0.59	0.51	0.44	0.86	0.5	0.74	0.0001088171	0.0001088171
0.71	0.72	0.49	0.82	0.76	0.49	0.83	0.41	0.86	0.79	0.76	0.69	0.81	0.49	0.78	0.57	0.5	0.65	0.56	0.0002978397	0.0003278397
0.83	0.56	0.85	0.48	0.49	0.88	0.6	0.61	0.59	0.51	0.45	0.76	0.68	0.51	0.84	0.5	0.62	0.61	0.68	0.0001153701	0.0001653701
0.69	0.44	0.4	0.52	0.46	0.66	0.52	0.89	0.81	0.87	0.55	0.41	0.71	0.63	0.58	0.56	0.67	0.74	0.4	0.0000406249	0.0001416249
0.85	0.47	0.49	0.4	0.87	0.83	0.42	0.64	0.88	0.51	0.4	0.66	0.8	0.87	0.45	0.51	0.64	0.67	0.65	0.0000801708	0.0001301708
0.56	0.85	0.52	0.76	0.64	0.77	0.76	0.45	0.52	0.66	0.79	0.41	0.52	0.42	0.77	0.51	0.43	0.69	0.59	0.000052913	0.000122913
0.85	0.74	0.73	0.54	0.81	0.72	0.46	0.67	0.54	0.88	0.82	0.62	0.7	0.73	0.82	0.76	0.9	0.44	0.78	0.0010591014	0.0010591014
0.52	0.57	0.53	0.7	0.37	0.49	0.4	0.42	0.69	0.34	0.64	0.63	0.34	0.66	0.68	0.59	0.61	0.63	0.7	0.0000076729	0.0000076729
0.55	0.47	0.42	0.33	0.31	0.69	0.41	0.5	0.33	0.32	0.56	0.56	0.52	0.67	0.47	0.64	0.6	0.63	0.4	0.0000009068	0.000001968

Додаток Б (продовження)

$k(K_m)$	$k(T_{mb})$	$k_{\text{емб}}(t_{g(\delta)})$	$k(R_{\text{оч}})$	$k1(T_{\text{над}})$	$k2(T_{\text{над}})$	$k2(T_{\text{над}})$	$k1(\Delta_{CX})$	$k2(\Delta_{CX})$	$k3(\Delta_{CX})$	$k1(Ctg(\delta))$	$k2(Ctg(\delta))$	$k3(Ctg(\delta))$	$k1(R_{\text{ел}})$	$k2(R_{\text{ел}})$	$k3(R_{\text{ел}})$	$k(T_c)$	$k(K_{\text{он}})$	$k(XA_{PI})$	КЗР ТН розрахований	КЗР ТН скорегований
0.49	0.32	0.6	0.61	0.43	0.49	0.6	0.33	0.44	0.59	0.34	0.5	0.44	0.58	0.38	0.64	0.36	0.66	0.56	0.0000008725	0.0000009725
0.57	0.47	0.36	0.39	0.49	0.57	0.47	0.33	0.58	0.53	0.52	0.47	0.52	0.61	0.67	0.59	0.53	0.42	0.5	0.0000017084	0.0000017084
0.32	0.65	0.41	0.41	0.68	0.54	0.69	0.39	0.57	0.57	0.41	0.47	0.4	0.57	0.5	0.6	0.46	0.42	0.64	0.0000018295	0.0000018295
0.54	0.48	0.58	0.35	0.45	0.44	0.56	0.62	0.64	0.6	0.59	0.65	0.65	0.6	0.49	0.6	0.54	0.31	0.53	0.000005419	0.000005419
0.42	0.58	0.42	0.39	0.68	0.52	0.68	0.35	0.57	0.65	0.31	0.38	0.62	0.6	0.47	0.51	0.41	0.47	0.55	0.0000013851	0.0000013851
0.57	0.44	0.69	0.63	0.32	0.61	0.59	0.47	0.42	0.59	0.63	0.65	0.53	0.69	0.41	0.39	0.5	0.36	0.67	0.000004223	0.000004223
0.47	0.57	0.51	0.36	0.69	0.37	0.52	0.54	0.32	0.38	0.42	0.56	0.46	0.57	0.69	0.35	0.65	0.41	0.46	0.0000007828	0.0000007828
0.33	0.47	0.63	0.66	0.5	0.3	0.45	0.4	0.59	0.68	0.4	0.43	0.32	0.63	0.51	0.38	0.38	0.59	0.45	0.0000004736	0.0000004736
0.53	0.43	0.24	0.21	0.49	0.51	0.33	0.58	0.45	0.42	0.68	0.45	0.25	0.58	0.46	0.49	0.33	0.62	0.44	0.0000000935	0.0000000935
0.32	0.67	0.41	0.3	0.67	0.6	0.61	0.32	0.25	0.45	0.68	0.37	0.36	0.26	0.34	0.64	0.43	0.32	0.44	0.0000000722	0.0000000722
0.66	0.49	0.5	0.69	0.33	0.31	0.58	0.47	0.32	0.63	0.49	0.52	0.21	0.23	0.28	0.62	0.22	0.37	0.43	0.0000000469	0.0000000469
0.68	0.3	0.45	0.44	0.27	0.66	0.55	0.42	0.51	0.3	0.68	0.27	0.58	0.34	0.24	0.42	0.48	0.39	0.53	0.0000000921	0.0000000921
0.3	0.21	0.62	0.46	0.45	0.28	0.34	0.54	0.68	0.24	0.33	0.46	0.67	0.45	0.57	0.65	0.41	0.46	0.66	0.0000001432	0.0000001432
0.36	0.57	0.47	0.31	0.28	0.34	0.66	0.27	0.41	0.62	0.42	0.44	0.22	0.56	0.48	0.68	0.23	0.54	0.61	0.0000000726	0.0000000726
0.68	0.55	0.62	0.35	0.3	0.24	0.64	0.47	0.52	0.69	0.31	0.47	0.42	0.56	0.63	0.55	0.67	0.42	0.26	0.0000005479	0.0000005479
0.54	0.23	0.65	0.32	0.69	0.44	0.42	0.3	0.22	0.33	0.63	0.44	0.53	0.35	0.52	0.68	0.21	0.55	0.34	0.0000000512	0.0000000512
0.64	0.45	0.29	0.31	0.36	0.49	0.49	0.39	0.56	0.66	0.7	0.38	0.63	0.54	0.34	0.69	0.58	0.3	0.27	0.0000003217	0.0000003217

Додаток Б (продовження)

$k(K_m)$	$k(T_{mb})$	$k_{\text{еб}}(t_{g(\delta)})$	$k(R_{\text{сн}})$	$k1(T_{\text{над}})$	$k2(T_{\text{над}})$	$k2(T_{\text{над}})$	$k1(\Delta_{CX})$	$k2(\Delta_{CX})$	$k3(\Delta_{CX})$	$k1(Ctg(\delta))$	$k2(Ctg(\delta))$	$k3(Ctg(\delta))$	$k1(R_{\text{ел}})$	$k2(R_{\text{ел}})$	$k3(R_{\text{ел}})$	$k(T_c)$	$k(K_{\text{он}})$	$k(XA_{PI})$	КЗР ТН розрахований	КЗР ТН скорегований
0.3	0.21	0.41	0.61	0.63	0.63	0.33	0.42	0.35	0.41	0.65	0.23	0.45	0.49	0.44	0.58	0.53	0.23	0.67	0.0000000855	0.0000000855
0.85	0.9	0.58	0.73	0.71	0.79	0.9	0.53	0.72	0.49	0.12	0.18	0.78	0.98	0.38	0.88	0.71	0.45	0.29	0.0000156406	0.0000156406
0.17	0.11	0.38	0.11	0.21	0.4	0.75	0.18	0.41	0.8	0.52	0.96	0.31	0.19	0.1	0.86	0.64	0.79	0.83	0.0000000031	0.0000000031
0.36	0.49	0.4	0.72	0.23	0.9	0.27	0.21	0.55	0.14	0.85	0.5	0.21	0.28	0.6	0.66	0.37	0.87	0.4	0.0000000585	0.0000000585
0.32	0.82	0.7	0.49	0.35	0.54	0.46	0.86	0.76	0.36	0.64	0.58	0.85	0.35	0.36	0.67	0.15	0.57	0.74	0.0000031029	0.0000031029
0.18	0.95	0.18	0.3	0.43	0.64	0.64	0.73	0.27	0.66	0.14	0.42	0.53	0.31	0.34	0.44	0.19	0.19	0.86	0.0000000095	0.0000000095
0.82	0.41	0.83	0.25	0.11	0.52	0.75	0.68	0.14	0.46	0.13	0.7	0.99	0.8	0.15	0.53	0.93	0.78	0.7	0.0000003813	0.0000003813
0.94	0.86	0.95	0.88	0.23	0.5	0.84	0.13	0.52	0.48	0.43	0.55	0.83	0.38	0.96	0.46	0.93	0.88	0.11	0.0000062817	0.0000062817
0.69	0.75	0.12	0.77	0.71	0.49	0.44	0.83	0.41	0.96	0.44	0.56	0.54	0.88	0.45	0.71	0.43	0.74	0.19	0.0000054083	0.0000054083
0.45	0.25	0.77	0.61	0.34	0.81	0.48	0.72	0.33	0.1	0.88	0.63	0.93	0.9	0.9	0.28	0.99	0.58	0.96	0.0000106981	0.0000106981
0.86	0.62	0.41	0.27	0.11	0.47	0.49	0.78	0.12	0.2	0.64	0.65	0.69	0.95	0.4	0.35	0.49	0.52	0.12	0.0000000327	0.0000000327
0.82	0.76	0.52	0.73	0.52	0.64	0.84	0.67	0.76	0.86	0.58	0.75	0.32	0.35	0.4	0.51	0.87	0.52	0.83	0.000108079	0.000108079
0.59	0.51	0.65	0.38	0.89	0.58	0.31	0.39	0.38	0.42	0.39	0.77	0.73	0.8	0.44	0.6	0.7	0.76	0.7	0.0000127637	0.0000127637
0.78	0.44	0.64	0.51	0.63	0.47	0.41	0.43	0.66	0.78	0.54	0.45	0.45	0.77	0.76	0.66	0.81	0.37	0.43	0.0000163851	0.0000163851
0.7	0.33	0.84	0.51	0.81	0.53	0.68	0.55	0.65	0.88	0.77	0.82	0.53	0.6	0.43	0.73	0.44	0.51	0.7	0.0000899775	0.0000899775
0.65	0.86	0.69	0.36	0.75	0.43	0.4	0.85	0.79	0.7	0.87	0.47	0.88	0.67	0.63	0.71	0.5	0.46	0.66	0.0001378296	0.0001378296
0.84	0.84	0.76	0.47	0.39	0.69	0.66	0.84	0.61	0.71	0.33	0.84	0.36	0.57	0.48	0.55	0.79	0.86	0.37	0.0000614748	0.0000614748

Додаток Б (продовження)

$k(K_m)$	$k(T_{mb})$	$k_{\text{еб}}(t_{g(\delta)})$	$k(R_{\text{сн}})$	$k1(T_{\text{над}})$	$k2(T_{\text{над}})$	$k2(T_{\text{над}})$	$k1(\Delta_{CX})$	$k2(\Delta_{CX})$	$k3(\Delta_{CX})$	$k1(Ctg(\delta))$	$k2(Ctg(\delta))$	$k3(Ctg(\delta))$	$k1(R_{\text{ел}})$	$k2(R_{\text{ел}})$	$k3(R_{\text{ел}})$	$k(T_c)$	$k(K_{\text{он}})$	$k(XA_{PI})$	КЗР ТН розрахований	КЗР ТН скорегований
0.58	0.34	0.68	0.42	0.34	0.52	0.36	0.58	0.4	0.59	0.62	0.46	0.46	0.34	0.47	0.71	0.61	0.89	0.34	0.0000013481	0.0000013481
0.72	0.75	0.43	0.31	0.89	0.49	0.41	0.77	0.42	0.57	0.62	0.37	0.56	0.74	0.77	0.42	0.71	0.49	0.67	0.0000170017	0.0000170017
0.4	0.57	0.56	0.54	0.64	0.61	0.76	0.73	0.46	0.53	0.53	0.77	0.32	0.53	0.41	0.85	0.37	0.43	0.8	0.0000111777	0.0000111777
0.89	0.47	0.76	0.7	0.51	0.65	0.6	0.58	0.85	0.41	0.45	0.35	0.86	0.6	0.62	0.38	0.43	0.76	0.4	0.000022393	0.000022393
0.41	0.53	0.47	0.8	0.72	0.44	0.83	0.43	0.57	0.64	0.62	0.54	0.39	0.57	0.31	0.48	0.4	0.45	0.35	0.0000023513	0.0000023513
0.45	0.35	0.33	0.33	0.79	0.31	0.45	0.84	0.36	0.39	0.52	0.75	0.61	0.44	0.55	0.32	0.46	0.47	0.64	0.0000005683	0.0000005683
0.61	0.83	0.74	0.85	0.66	0.55	0.36	0.36	0.68	0.75	0.85	0.71	0.4	0.71	0.38	0.82	0.45	0.48	0.67	0.0000590557	0.0000590557
0.47	0.52	0.8	0.85	0.62	0.48	0.65	0.88	0.81	0.57	0.31	0.71	0.61	0.8	0.6	0.38	0.86	0.89	0.36	0.0000881383	0.0000881383
0.43	0.85	0.44	0.56	0.75	0.61	0.71	0.58	0.52	0.75	0.79	0.31	0.72	0.71	0.52	0.31	0.8	0.52	0.48	0.0000266655	0.0000266655
0.37	0.83	0.6	0.32	0.32	0.56	0.47	0.81	0.46	0.68	0.48	0.36	0.71	0.41	0.43	0.87	0.86	0.73	0.4	0.000005946	0.000005946
0.51	0.89	0.67	0.38	0.32	0.64	0.54	0.76	0.41	0.36	0.85	0.42	0.84	0.34	0.41	0.7	0.84	0.69	0.61	0.0000148323	0.0000148323
0.46	0.31	0.79	0.41	0.74	0.74	0.63	0.73	0.71	0.87	0.78	0.32	0.37	0.36	0.32	0.7	0.63	0.41	0.89	0.0000123012	0.0000123012
0.6	0.58	0.43	0.73	0.69	0.89	0.66	0.4	0.46	0.7	0.67	0.32	0.37	0.47	0.68	0.7	0.41	0.6	0.73	0.0000181743	0.0000181743
0.78	0.36	0.7	0.8	0.56	0.65	0.8	0.38	0.88	0.34	0.39	0.65	0.66	0.57	0.58	0.66	0.65	0.87	0.69	0.0000741604	0.0000741604
0.11	0.17	0.18	0.17	0.31	0.2	0.13	0.39	0.1	0.21	0.39	0.14	0.4	0.23	0.37	0.15	0.17	0.2	0.28	0.0000000000	0.0000000000
0.22	0.21	0.21	0.38	0.12	0.25	0.15	0.18	0.37	0.12	0.13	0.21	0.32	0.3	0.39	0.32	0.23	0.38	0.31	0.0000000000	0.0000000000
0.22	0.29	0.4	0.32	0.31	0.37	0.29	0.19	0.3	0.38	0.32	0.22	0.19	0.11	0.28	0.26	0.12	0.18	0.13	0.0000000000	0.0000000000

Додаток Б (закінчення)

$k(K_m)$	$k(Te_{mb})$	$k(e_{\delta}(t_{g(\delta)}))$	$k(Ro_{сн})$	$k1(T_{над})$	$k2(T_{над})$	$k2(T_{над})$	$k1(\Delta_{CX})$	$k2(\Delta_{CX})$	$k3(\Delta_{CX})$	$k1(Ctg(\delta))$	$k2(Ctg(\delta))$	$k3(Ctg(\delta))$	$k1(R_{ел})$	$k2(R_{ел})$	$k3(R_{ел})$	$k(T_c)$	$k(K_{он})$	$k(XA_{PI})$	КЗР ТН розрахований	КЗР ТН скорегований
0.31	0.24	0.32	0.15	0.29	0.38	0.12	0.32	0.24	0.14	0.38	0.39	0.28	0.16	0.23	0.17	0.17	0.28	0.23	0.0000000000	0.0000000000
0.3	0.19	0.24	0.36	0.27	0.11	0.4	0.21	0.15	0.12	0.24	0.33	0.26	0.12	0.27	0.4	0.3	0.27	0.23	0.0000000000	0.0000000000
0.15	0.3	0.23	0.14	0.16	0.35	0.31	0.15	0.27	0.12	0.35	0.34	0.1	0.12	0.33	0.29	0.2	0.34	0.35	0.0000000000	0.0000000000
0.38	0.37	0.28	0.3	0.36	0.3	0.22	0.23	0.24	0.12	0.11	0.1	0.11	0.21	0.12	0.16	0.1	0.4	0.15	0.0000000000	0.0000000000
0.32	0.27	0.17	0.2	0.26	0.2	0.27	0.24	0.35	0.28	0.14	0.15	0.2	0.18	0.4	0.11	0.1	0.26	0.11	0.0000000000	0.0000000000
0.32	0.28	0.26	0.18	0.25	0.13	0.3	0.38	0.13	0.13	0.36	0.32	0.32	0.1	0.26	0.23	0.2	0.33	0.2	0.0000000000	0.0000000000
0.13	0.25	0.14	0.27	0.11	0.29	0.34	0.17	0.35	0.37	0.23	0.26	0.27	0.19	0.18	0.33	0.1	0.21	0.38	0.0000000000	0.0000000000
0.27	0.15	0.08	0.21	0.25	0.21	0.1	0.19	0.02	0.06	0.05	0.14	0.18	0.08	0.07	0.19	0.2	0.12	0.18	0.0000000000	0.0000000000
0.3	0.16	0.24	0.01	0.01	0.22	0.17	0.24	0.07	0.06	0.29	0.05	0.3	0.27	0.28	0.29	0.2	0.03	0	0.0000000000	0.0000000000
0.17	0.13	0.11	0.23	0.13	0.23	0.22	0.23	0.01	0.19	0.27	0.15	0.08	0.06	0.05	0.1	0.0	0.07	0.13	0.0000000000	0.0000000000
0.16	0.28	0.06	0.28	0.1	0.28	0.06	0.23	0.09	0.24	0.13	0.25	0.05	0.1	0.23	0.3	0.2	0.18	0.23	0.0000000000	0.0000000000
0.25	0.09	0	0.28	0.19	0.25	0.13	0.01	0.17	0.27	0.05	0.25	0.08	0.3	0.1	0.19	0.1	0.2	0.06	0.0000000000	0.0000000000
0.09	0.19	0.29	0.14	0.27	0.02	0.27	0.11	0.21	0.25	0.21	0.05	0.22	0.18	0.3	0.19	0.2	0.1	0.09	0.0000000000	0.0000000000
0.05	0.04	0.09	0.09	0.05	0.09	0.07	0.09	0.07	0.09	0.06	0.05	0.09	0	0.08	0.1	0.0	0	0.07	0.0000000000	0.0000000000
0.01	0.06	0.09	0.07	0.05	0.08	0.06	0.05	0.06	0.09	0.07	0.07	0.06	0.03	0.06	0.04	0.1	0.06	0.04	0.0000000000	0.0000000000
0.08	0.07	0.01	0.09	0.04	0.01	0.08	0.09	0.03	0	0.02	0.04	0.06	0	0.01	0.05	0.0	0.03	0.05	0.0000000000	0.0000000000
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0000000000	0.0000000000