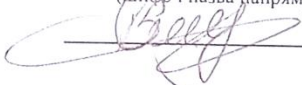


Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
«Вдосконалення методів діагностування шунтових реакторів 750 кВ»

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕС-21м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
освітня програма «Електричні станції»

(цифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

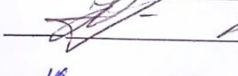

Сауляк В.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСС


Гуцько І.О.
(прізвище та ініціали)

« 14 »  2022 р.


Опонент: к.т.н., доц. каф. ЕССЕМ


(прізвище та ініціали)

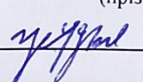
« 16 »  2022 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., проф. Комар В. О. 

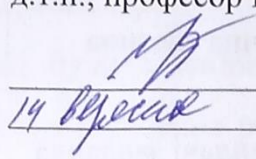
(прізвище та ініціали)

« 14 »  2022 р.

Вінниця ВНТУ - 2022 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.


14 вересня 2022 року

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

Сауляка Владислава Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. Вдосконалення методів діагностування шунтових реакторів 750 кВ

керівник роботи к.т.н., доц., доцента каф. ЕСС Гунько І.О.

затверджена наказом вищого навчального закладу від 14.09.2022 року № 203

2. Строк подання студентом роботи 30 листопада 2022 року

3. Вихідні дані до роботи:

Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Жук І.А. Випробування реакторів 750 кВ в умовах електричних станцій і підстанцій/ Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. – 2006. – № 3. – Ч. 2. – с. 68-72.; Bao, Yanyan & Liu, Kang & Yang, Junting & Zhang, Guangdong & Wen, Dinjun & Wang, Kun. (2020). A Fault Analysis of 750kV Shunt Reactor and Repair Program. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 782. 032015. 10.1088/1757-899X/782/3/032015. Вихідні дані для проведення обчислювальних експериментів: пошкоджуваність елементів шунтового реактора РОДЦ 110000/750

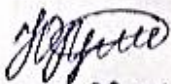


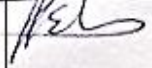


4. Зміст текстової частини:

Вступ. 1 Аналіз об'єкта діагностування; 2 Методи та засоби діагностування шунтових ректорів; 3 Визначення залишкового ресурсу ШР; 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 шунтових реакторів. 3. Класифікація засобів діагностування ШР. 4. Класифікація методів діагностування шунтових реакторів. 5. Пошкоджуваність ШР. 6. Етапи моделювання коефіцієнту загального залишкового ресурсу ШР. 7. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Гуцько І. О., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС	 14.09.22	 30.11.22
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Рубаненко О.С. к.т.н., проф., професор каф. ЕСС	 16.09.2022	 14.12.2022
Економічна частина	Остра Н. В., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС	 16.09.22	 15.12.22

7. Дата видачі завдання 24 вересня 2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи		Примітка
		початок	кінець	
1	Розроблення технічного завдання	02.09.22	06.09.22	виз
2	Аналіз об'єкта діагностування	07.09.22	12.09.22	виз
3	Методи та засоби діагностування шунтових ректорів	13.09.22	05.10.22	виз
4	Визначення залишкового ресурсу ШР	06.10.22	30.10.22	виз
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	01.11.22	10.11.22	виз
6	Економічна частина	11.11.22	16.11.22	виз
7	Оформлення пояснювальної записки	17.11.22	25.11.22	виз
8	Виконання графічної частини та оформлення презентації	26.12.22	30.11.22	виз

Студент


(підпис)

В.В. Сауляк

Керівник роботи


(підпис)

І. О. Гуцько

АНОТАЦІЯ

УДК 621.311.1

Сауляк Владислав Володимирович «Вдосконалення методів діагностування шунтових реакторів 750 кВ». Магістерська кваліфікаційна робота за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Вінниця : ВНТУ. 2022. 123 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 17 назв; рис.: 35; табл. 22.

В магістерській кваліфікаційній роботі було досліджено конструктивні особливості, умови експлуатації високовольтних шунтових реакторів. Виконано аналіз основних причин пошкоджень вузлів ШР.

Розроблено математичну модель загального залишкового ресурсу шунтового реактора з використанням нечіткого моделювання. Отримана нейро-нечітка модель дозволяє визначити значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу шунтового реактора в залежності від значень вхідних параметрів – коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному з контрольованих діагностичних параметрів.

Також в роботі виконано аналіз вітчизняних та іноземних літературних джерел в питанні методів та засобів діагностування шунтових реакторів. У розділі охорони праці було визначено умови безпеки при роботі з шунтових реакторів.

Ключові слова: шунтовий реактор, діагностування технічного стану, діагностичні параметри, залишковий ресурс

ABSTRACT

UDK 621.311.1

Saulyak Vladyslav Volodymyrovych "Improvement of diagnostic methods for 750 kV shunt reactors". Master's qualification thesis in the specialty 141 - Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics. Vinnytsia: VNTU. 2022. 123 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 17 titles; fig.: 35; tabl. 22.

In the master's qualification work, the design features and operating conditions of high-voltage shunt reactors were investigated. The analysis of the main causes of damage to the nodes of the SR was carried out.

A mathematical model of the total residual resource of the shunt reactor was developed using fuzzy modeling. The obtained neuro-fuzzy model allows you to determine the value of the coefficient of the total residual resource of the shunt reactor depending on the values of the input parameters - the coefficients of the residual resources for each of the controlled diagnostic parameters.

The work also includes an analysis of domestic and foreign literary sources on methods and means of diagnosing shunt reactors. In the labor protection section, the safety conditions for working with shunt reactors were determined.

Keywords: shunt reactor, diagnostics of technical condition, diagnostic parameters, residual resource

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ОБ’ЄКТА ДІАГНОСТУВАННЯ	11
1.1 Конструктивні особливості шунтових реакторів в ЕЕС	11
1.2 Особливості експлуатації шунтових реакторів в ЕЕС	14
1.2.1 Капітальний ремонт реактора	22
1.2.2 Поточний ремонт реактора	27
1.3 Результати аналізу пошкоджуваності шунтових реакторів в ЕЕС.....	29
Висновки до першого розділу.....	34
2 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ШУНТОВИХ РЕАКТОРІВ.....	35
2.1 Методи та засоби визначення технічного стану ШР за результатами періодичного контролю	38
2.1.1 Випробування в режимі резонансу напруг.....	40
2.1.2 Випробування в режимі резонансу струмів	46
2.2 Вимірювання індуктивності і втрат при робочій напрузі.....	49
2.3 Вимірювання індуктивності і втрат при малій напрузі.....	53
2.3 Вимірювання вібрації	59
Висновки до другого розділу	63
3 ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ШР	64
3.1 Ймовірнісна математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу шунтового реактора	64
3.2 Нейро-нечітка модель коефіцієнта залишкового ресурсу ШР	73
Висновки до третього розділу.....	98
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	99

4.1 Техніко-економічне обґрунтування	99
4.2 Визначення капіталовкладень.....	100
Висновок до четвертого розділу	105
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	106
5.1 Задачі розділу	106
5.2 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта.....	107
5.3 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	110
5.3.1 Мікроклімат	110
5.3.2 Склад повітря робочої зони.....	111
5.3.3 Вказівка заходів безпеки при роботі масляним обладнанням.....	111
5.4 Розрахунок параметрів заземлюючого пристрою підстанції 750кВ.....	114
Висновки до п'ятого розділу	120
ВИСНОВКИ	131
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	132
Додаток А Протокол перевірки кваліфікаційної роботи	124
Додаток Б Технічне завдання МКР.....	125
Додаток В. Безпека в надзвичайних ситуаціях.	129
Додаток Д. Графічний матеріал.....	138

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- БД – бази даних
- БЗ – база знань
- ЕЕС – електроенергетична система
- ЕО – електрообладнання
- ІС – інформаційну систему
- КЗ – коротке замикання
- ПК – персональний комп'ютер
- ФХА – фізико-хімічний аналіз
- ХАГР– хроматографічний аналіз розчинених газів

ВСТУП

На сьогоднішній день перед енергорозподільними компаніями України стоять складні завдання з модернізації та автоматизації мереж, впровадження найновіших технологій, перехід на нові моделі ринка та досягнення максимально високих показників ефективності та надійності.

Відомим фактом є те, що велика кількість обладнання електричних мереж пропрацювало понад 25 років, а тому відпрацювало свій паспортний ресурс.

Шунтуючі реактори використовуються як один із засобів компенсації реактивної потужності в споруджуваних, реконструйованих і експлуатованих електричних мережах напругою 110 -1150 кВ.

Діагностування силового електротехнічного устаткування, зокрема шунтуючих реакторів, сьогодні стає звичайним технічним заходом підвищення надійності і якості електропостачання [1-3]. Для цього є всі передумови: з одного боку це економічна необхідність і доцільність, а з іншого – технічні можливості. Перше обумовлене високою вартістю шунтуючих реакторів, складністю і значними витратами на їх транспортування і монтаж, а також збитками, викликаними порушенням технологічних процесів через обмеження електропостачання. Друге пояснюється потенційними можливостями сучасного апаратного і програмного забезпечення. В той же час актуальною є розробка методів діагностування, вимогам, що відповідають, які істотно зросли до систем діагностики, і повною мірою використовували б можливості комп'ютерного моделювання. Оскільки шунтуючі реактори є одними з найбільш складних і відповідальних видів електроустаткування електроенергетичних систем, то для оцінки їх технічного стану створені і розвиваються спеціальні системи контролю. Ефективними, в попередженні аварій шунтуючих реакторів, є мікропроцесорні системи безперервного контролю і діагностики, які використовують комплекс

датчиків. Високовольтні випробовування шунтувальних реакторів можуть проводитись з використанням індукованої напруги підвищеної частоти. Системи контролю шунтуючих реакторів, що існують на даний час використовують у своїх розрахунках існуючі математичні моделі реакторів, однак ці моделі мають досить суттєвий недолік – вони вимагають досить великого часу впливу на них вхідних сигналів. Тобто на реактор потрібно на протязі великого проміжку часу подавати сигнал для перевірки його стану. Для того, щоб визначити, які реактори потребують першочергової заміни або ремонту потрібно знати їх залишковий ресурс.

Так, зокрема, питання сучасних методів діагностики високовольтних реакторів розглянуто в наукових статтях авторів Турпан С.В., Попова Т.В., С. П., Сергієнко Є.С. та ін Активно питанням модернізації та продовження терміну експлуатації займаються в Інституті електродинаміки НАН України та ряді інших науково-дослідних інститутів та установ. Що підтверджує актуальність дослідження.

Метою роботи є вдосконалення методів діагностування шунтових реаторів

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

- досліджено конструктивні особливості шунтових реакторів;
- виконано аналіз методів та алгоритмів діагностування ШР;
- розроблено математичну модель загального залишкового ресурсу ШР з використанням нечіткого моделювання;
- виконано розрахунок економічної ефективності вдосконалення системи оперативного діагностування ШР.

Об'єктом дослідження є шунтові реактори 750 кВ.

Предметом дослідження є методи та засоби діагностування шунтових реакторів.

Методи дослідження. В роботі використані методи теорії залишкового

ресурсу ШР для визначення працездатності ШР.

Наукова новизна отриманих результатів. Отримав подальший розвиток метод визначення залишкового ресурсу ШР.

Практичне значення полягає у наведених прикладах розрахунку залишкового ресурсу ШР, який змінюється під час експлуатації

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які складають основний зміст магістерської роботи, отримані автором самостійно.

1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДІАГНОСТУВАННЯ

1.1 Конструктивні особливості шунтових реакторів в ЕЕС

В Україні і в країнах СНД застосовуються конструкції шунтових реакторів двох основних типів; з стрижньовою магнітною системою (класів напруги до 110 кВ і нижче) і з броньовим магнітопроводом (класів 500 і 750 кВ) [1, 2]. Однофазні реактори типів РОДЦ-60000/500 і РОДЦ-110000/750, конструкція яких показана на рисунку 1.1, не мають сталевих стрижнів.

Нижче наведений короткий опис згідно [2] конструкції цих реакторів. Кругла, циліндрова обмотка дискового або безперервного типу оточена електромагнітним екраном, що складається з окремих ярем («магнітних шунтів») С-подібної форми, що охоплюють обмотку зовні і розташовані симетрично її вісі. Кінці ярем виконані у формі сектора, який переходить в пряму частину. Для цього їх набирають з великої кількості пакетів, що складаються з пластин електротехнічної сталі різної довжини, і потім формують в спеціальному пристрої.

Обмотка з двох паралельних виток виконується по схемі «з введенням в середину». При цьому лінійний кінець знаходиться посередині висоти обмотки, а нейтральні кінці - по її кінцях. Через верхній отвір, утворений ярмами, усередині обмотки коаксіально з нею встановлюють нижню частину вводу високої напруги. Уводи розташовують по висоті так, що потенціали точок обмотки і кінців обкладок введів, які лежать в одній горизонтальній площині, приблизно однакові. Ізоляція між обмоткою і ярмами маслобар'єрного типу. Кінці ярем спираються на товстостінні фарфорові циліндри, що розташовані у середині, розділені по висоті і зв'язані по колу електроізоляційними кільцями. Ярма разом з фарфоровими циліндрами утворюють жорстку рамну систему. Активна частина встановлюється у круглому циліндричному баку на пружинних

амортизаторах.

Конструкція реактора забезпечує: рівномірний розподіл магнітного потоку між ярмами і, отже, найменші витрати сталі і втрати в ній, простоту конструкції головної і подовжньої ізоляції, відсутність заземленого стрижня, простоту установки вводу і підвищення його електричної міцності в наслідок сприятливого впливу електричного поля обмотки, високий коефіцієнт використання внутрішнього об'єму бака реактора, високу вібростійкість конструкції, невеликі додаткові втрати в деталях конструкції.

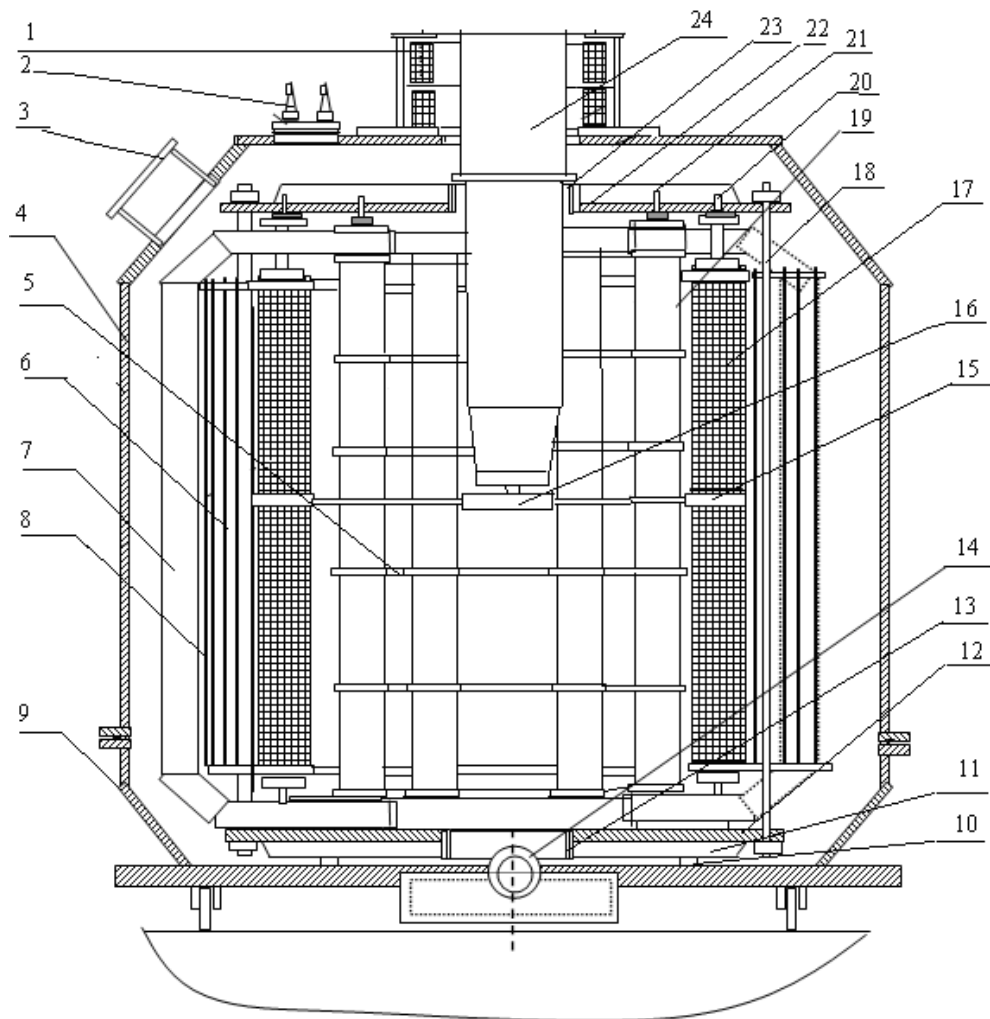


Рисунок 1.1 – Принципова схема конструкції реактора РОДЦ 110 000 / 750

На рисунку 1.1 показано: 1 — трансформатор струму; 2 — виводи 0,5 кВ; 3 – коробка виводів НН; 4 – бак («колокол») реактора; 5 – ізоляційні плити; 6 – головна ізоляція; 7 – магнітні шунти; 8 – електростатичні екрани; 9 – піддон реактора; 10 — амортизатори; 11 — опорна пластина (брусок); 12— нижня плита; 13—нижній електромагнітний екран; 14 – зливний патрубков; 15 – вивід ВН; 16 – екран ВН («павук»); 17 – обмотка реактора; 18; – стяжні шпильки; 19— фарфорові циліндри; 20 – нажимні болти обмотки; 21 – нажимні болти фарфорових циліндрів; 22 – верхня плита; 23 - верхній електромагнітний екран; 22 – ввід ВН.

Застосування броньової конструкції з С-подібними ярами і установкою вводу всередині обмотки в однофазному реакторі 110 МВА , 750 кВ замість двох стрижньової дозволило знизити: витрати електротехнічної сталі в 1,9 разів; масу активної частини в 1,5 разів; масу масла в 3 разів; повні втрати на 25%.

Однак така конструкція має і низку вад, найбільш суттєві з них:

- концентрація найбільших напруженостей електричного і магнітного полів у одному місці, що було причиною низки пошкоджень ізоляції реакторів;
- значні потоки розсіювання магнітної системи, що призводило до перегрівів конструктивних елементів.

Таблиця 1.1 – Характеристики реакторів 500 кВ і 750 кВ

Характеристики реакторів	Напруга, кВ	
	500	750
Маса активної частини, т	34	55
Маса масла, т	15	23
Повна маса, т	65	110

1.2 Особливості експлуатації шунтових реакторів в ЕЕС

Ознакою сьогодення є те, що більшість шунтуючих реакторів України та пост радянських країн пропрацювали понад 25 років і виробили свій паспортний ресурс [3]. Тому проаналізуємо існуючу систему обслуговування шунтувальних реакторів, яка має підтримувати їх у робоздатному стані.

При організації територіального електроремонтного виробництва необхідно враховувати розміри території, яка обслуговується, розміщення об'єктів, які обслуговуються і розмір їхнього ремонтного фонду, а також можливості постачання електроремонтних підприємств електроенергією, водою, паливом, робочою силою і т.д. При великих електроенергетичних системах і електричних станціях часто організують власні (електроремонтні виробництва, які мають, як правило, цільову структуру) [4].

Класифікація ремонтів трансформаторів та реакторів.

Найважливішою умовою правильної експлуатації трансформаторів та реакторів є своєчасне проведення планово-попереджувального ремонту (ППР) і періодичних профілактичних випробувань.

У зв'язку з повсякденним обходом і оглядом устаткування відповідно до правил експлуатації електроустановок споживачів через визначені проміжки часу проводяться планові міжремонтні випробування і виміри (профілактичні випробування, не зв'язані з виводом у ремонт) і інші види ремонту. За допомогою системи ППР устаткування підтримується в працездатному стані, що забезпечує виконання їм своїх технічних функцій, і частково запобігає відмови устаткування. В ході планового ремонту устаткування, в результаті модернізації, покращує свої технічні параметри [5].

При плануванні й організації ремонту варто мати на увазі, що трансформатори та реактори можуть мати ремонтпридатну і неремонтпридатну конструкцію. В останньому випадку замість ремонту

устаткування здійснюють його заміну.

По об'єму ремонтів підрозділяють на поточний ремонт, середній і капітальний. Поточний ремонт проводять під час перевірки устаткування для гарантованого забезпечення його працездатності. Поточний ремонт проводиться по місцю установки устаткування з його припиненням і відключенням.

Середній ремонт передбачає повне або часткове розбирання устаткування, ремонт і заміну зношених деталей і відновлення якості ізоляції. При цьому досягається відновлення основних технічних показників роботи трансформатора або реактора.

Капітальний ремонт передбачає повне розбирання трансформатора чи реактора з заміною або відновленням будь-яких деталей, включаючи обмотки. При цьому досягається повне (або часткове) відновлення ресурсу. В даний час, в основному, роблять поточний і капітальний ремонт, хоча в деяких випадках передбачений і середній ремонт.

За призначенням ремонт ділиться на відбудовний ремонт, реконструкцію і модернізацію. Відбудовний ремонт здійснюється без зміни конструкції окремих вузлів і всього пристрою в цілому. Технічні характеристики реактора залишаються незмінними. В ході реконструкції можуть змінюватися конструкції окремих вузлів і замінюватися матеріали, із яких вони виготовлені, при практично незмінних технічних характеристиках. Модернізація передбачає заміну й удосконалення існуючих і застосовуваних матеріалів, щоб істотно поліпшити електричні характеристики, наблизивши їх до характеристик сучасного устаткування.

За методом проведення ремонт ділиться на: примусовий ремонт і післяоглядовий. Примусовий ремонт застосовується в основному для відповідного устаткування. Суть його полягає в тому, що через визначені проміжки часу реактори та трансформатори в обов'язковому порядку піддають

капітальному ремонту. Також через визначені проміжки часу проводять поточний і середній ремонт відповідно до тривалості ремонтного циклу і його структури. При цьому ресурс устаткування між ремонтами може не дуже знизиться і в ремонт може потрапити справне устаткування. Тому даний вид ремонту є найбільш дорогим, чим післяоглядовий ремонт устаткування. Примусовий ремонт робиться в об'ємі капітального ремонту тільки після огляду і профілактичних випробовувань під час чергової ревізії або поточного ремонту. Ресурс устаткування відновлюється при цьому виді ремонту не повністю, тому вартість ремонту зменшується. Однак, імовірність позачергового незапланованого ремонту зростає. Може збільшитися тривалість ремонту.

По виду організації ремонт ділиться на централізований, децентралізований і змішаний.

При централізованому ремонті роботи здійснюють спеціалізовані ремонтно-налагоджувальні підприємства без використання місцевих ремонтно-експлуатаційних служб. До цієї форми ремонту відносяться і ремонти відповідного імпортного устаткування. Удосконалення цієї форми ремонту припускає створення центрального обмінного фонду устаткування і розширення його номенклатури, а також поширення сфери послуг ремонтних підприємств на проведення поточного ремонту і профілактичного обслуговування. Централізована форма ремонту забезпечує якість робіт. При централізованому ремонті роботи здійснюють відповідні служби підприємства, на яких встановлене обладнання, яке ремонтується.

По характеру виконуваних робіт, виділяють: відновний ремонт, реконструкцію і модернізацію трансформаторів та реакторів. При відновному ремонті параметри реакторів і конструкція вузлів не змінюються. При реконструкції параметри реакторів не змінюються, а конструкція ряду вузлів змінюється. В процесі модернізації змінюють як параметри реакторів так і окремі

частини конструкції.

За призначенням ремонт може бути планово-запобіжний, профілактичний і післяаварійний. Періодичність проведення цих ремонтів залежить від профілактичних випробувань і наявності дефектів, виявлених в процесі експлуатації і при зовнішньому огляді реактора. Розкриття проводять через вісім років після введення реакторів в експлуатацію незалежно від об'ємів ремонту. Реактор розкривають і оглядають також після тривалого транспортування до місця установки. Планово-запобіжний і післяаварійний ремонт виконують за порівняно нетривалий час.

Капітальний ремонт вимагає значних матеріальних та трудових витрат.

В складі комплексу обслуговування реакторів можна виділити три частини: оперативне обслуговування, технічне обслуговування, система планово-попереджувальних ремонтів.

Усі частини комплексу обслуговування реакторів є невід'ємною частиною виробничого процесу, виробітку, передачі і розподілу електричної енергії. Це визначається, насамперед, специфікою електроенергетики - безперервністю виробничого процесу. Тісний взаємозв'язок виробництва електроенергії і ремонтно-експлуатаційного обслуговування підвищує значимість, як організації, так і безпосереднього проведення заходів комплексу. Особливо важливо забезпечити сполучення безупинного характеру виробництва, передачі і розподілу електроенергії з циклічністю ремонту, тобто витримати мінімальну тривалість перерв у роботі реакторів, як внаслідок відмов, так і в зв'язку з проведенням планових ремонтів [6-8].

Заходи оперативного обслуговування - це, насамперед, ведення належного режиму роботи реактора, введення і виведення його з роботи при дотриманні припустимих температурних і навантажувальних режимів, а також обмежень за рівнем напруги. Сюди ж відносяться проведення періодичних і

позачергових оглядів, періодична фіксація фактичних значень параметрів, які характеризують режим реактора, і аналіз отриманих значень, виконання організаційно-технічних заходів щодо забезпечення безпечного технічного обслуговування і ремонту реактора.

До заходів технічного обслуговування відносяться профілактичний контроль стану ізоляції і контактної системи, а також пристроїв охолодження, регулювання і пожежогасіння, виконаний поза комплексом планово-попереджувального ремонту; роботи з підтримки належного стану ізоляційного масла в реакторі і у введеннях, у тому числі заходів щодо відновлення якості масла (сушіння, регенерація); змащування та надійний догляд за доступними обертовими і тертьовими вузлами, підшипниками пристроїв охолодження; періодичне випробування резервного допоміжного устаткування, настройка, перевірка і ремонти вторинних ланцюгів і пристроїв захисту, автоматики, сигналізації, керування. До заходів системи планово-попереджувального ремонту відносяться поточний і капітальний ремонт і зв'язані з цими роботами випробування та виміри.

Всі роботи, що входять у комплекс обслуговування реактора, можуть бути як плановими, так і позачерговими. Планові роботи - регулярно виконувані з заздалегідь визначеним об'ємом і термінами проведення; позапланові роботи можуть знадобитися в зв'язку з відмовою реактора або його елемента, при виявленні дефекту і т.д.

Система планово-попереджувальних ремонтів. Необхідність у системі планово-попереджувальних ремонтів (ППР) викликана неминучим зносом устаткування в ході його експлуатації, що супроводжується поступовою витратою початкових ресурсів електричної і механічної стійкості і, як наслідок воно приводить до наростання імовірності відмови. Своєчасний ремонт, тобто відновлення стійкості агрегату або деталі знижує імовірність відмови і тим

самим підвищує надійність роботи устаткування. Таким чином, мета ППР - забезпечення надійної експлуатації устаткування з підтримкою основних характеристик устаткування на рівні нормативних значень.

Якщо знехтувати підвищеною імовірністю відмови в початковий період експлуатації і відразу після ремонту (початкові і випадкові відмови внаслідок дефектів виготовлення, ненадійного ремонту), то характер зміни в часі імовірності безвідмовної роботи устаткування при застосуванні системи ППР в ідеалізованому вигляді постає так, як показано на рис. 1.2.

У початковий період часу T_0 , тобто в інтервалі від 0 до t_0 , відмови зношуваності майже не виявляються, і імовірність безвідмовної роботи практично відповідає початковому значенню R_0 . Після того як устаткування пропрацювало протягом часу T_0 , вплив зносу починає помітно виявлятися й імовірність безвідмовної роботи знижується від R_1 до моменту часу t_1 . Якщо в момент t_1 вивести устаткування в ремонт, то можна відновити початкове значення імовірності безвідмовної роботи R_0 . Припускаючи, що характер зносу устаткування в наступний період експлуатації не зміниться, очікується, що до моменту t_2 (інтервал $t_2 - t_1$ дорівнює інтервалу $0 - t_1$) імовірність безвідмовної роботи знову знизиться до R_1 . Повторюючи подібні відбудовні ремонти через рівні проміжки часу T (міжремонтний період), можна в такий спосіб забезпечити підтримку імовірності безвідмовної роботи устаткування в межах від R_1 до R_0 .

Якщо тривалість міжремонтного періоду буде збільшена і ремонт зроблений не в момент t_1 , а в момент t_2 , імовірність безвідмовної роботи знизиться до значення $R_1' < R_1$. З іншого боку, якщо при ремонті не буде цілком відновлена початкова надійність устаткування (тільки до значення $R_0' < R_0$), то при зберіганні колишньої тривалості міжремонтного періоду T , тобто до моменту t_1 , надійність устаткування буде нижче зазначеної межі

($R''_1 < R_1$), і, якщо потрібно як і раніше, імовірність безвідмовної роботи буде не менше R_u і термін експлуатації в міжремонтний період повинен бути скорочений до $T' < T$.

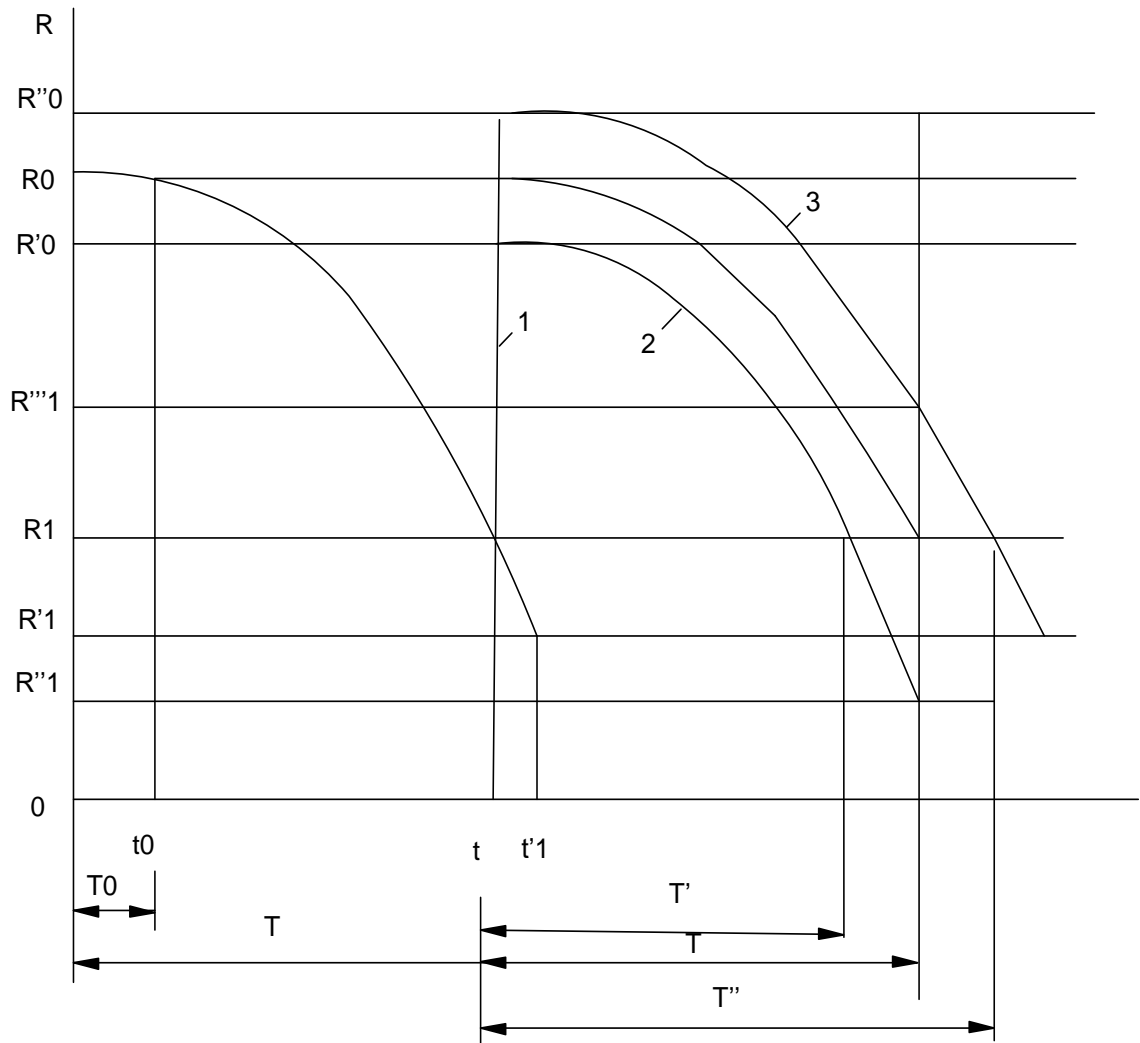


Рисунок 1.2 – Залежність імовірності безвідмовної роботи устаткування R від тривалості експлуатації t з урахуванням проведення ППР: 1 – основний варіант стратегії ремонту; 2 – випадок перевищення нормативного міжремонтного періоду або зниженої надійності після ремонту; 3 – ремонт із збільшенням ресурсу надійності.

Реальна залежність безвідмовності роботи від тривалості експлуатації буде відрізнятися від наведеної на рисунку 1.2 не тільки через прояв раптових відмов, імовірність виникнення яких не залежить від періодичності ремонтів, але також через змінність умов експлуатації, внаслідок чого зношувальність устаткування в інтервалах між черговими ремонтами відбувається з різною швидкістю [9,10].

Наведений на рис. 1.2 графік відповідає одному з варіантів системи ППР - системі періодичних ремонтів, коли міжремонтний період $T_3 > T_0$, і, отже, допускається істотне зниження безвідмовності роботи, тобто є велика ймовірність зношувальної відмови.

Вибір варіанта системи ППР - ремонти стандартні або періодичні - робиться на основі техніко-економічних розрахунків, шляхом зіставлення очікуваного збитку внаслідок можливого виходу з ладу устаткування (при допущенні зношувальних відмов у випадку використання системи періодичних ремонтів) із додатковими витратами на прискорені ремонти (при стандартних ремонтах, коли зношувальні відмови виключаються). Аналогічним способом влаштовується і оптимальний міжремонтний період при системі періодичних ремонтів. Обов'язковою передумовою подібних розрахунків є досить обґрунтовані дані про тривалість роботи устаткування до прояву зношувальних відмов T_0 , а також про характер зміни імовірності безвідмовної роботи при тривалості експлуатації більшої, ніж T_0 (ця залежність визначається, зокрема, умовами експлуатації устаткування). Очевидно, що дані можуть бути отримані, головним чином, із досвіду експлуатації аналогічного устаткуванню в подібних умовах. Зміна конструкції устаткування, а також умов експлуатації приводить до необхідності час від часу переглядати нормовані міжремонтні терміни.

Мета і періодичність робіт із капітального і поточного ремонту

трансформаторів та реакторів. У вітчизняній практиці ремонтно-експлуатаційного обслуговування трансформаторів та реакторів прийнята стратегія ППР, що сполучає періодичні ремонти з післявипробувальною системою: структура ремонтного циклу містить у собі дві основні категорії ремонту - поточний і капітальний. Для поточних ремонтів установлена жорстка періодичність, а капітальні ремонти в основному проводяться в міру необхідності, у залежності від результатів періодичних дослідів і фактичного стану трансформатора або реактора.

1.2.1 Капітальний ремонт реактора

Специфікою капітального ремонту реактора в загальному випадку є мінімальний об'єм його розбирання, у ряді варіантів який наближається до нуля. При цьому основою капітального ремонту є перевірка кріплення обмоток в осьовому напрямку: як було показано, динамічна стійкість обмоток при наскрізних КЗ, у кінцевому рахунку, що визначає надійність і термін служби реактора, значною мірою визначається витривалістю при стиску обмоток; у той же час існуючі конструкції пресування недостатньо ідеальні і виникає необхідність підпресування обмоток реактора [1, 2, 13].

Друга з основних робіт капітального ремонту реактора - це очищення активної частини і бака від забруднень, що утворюються в результаті старіння масла, а також забруднень, залишених заводом-виготовлювачем. Ці забруднення становлять небезпеку, у першу чергу, через можливе погіршення умов охолодження активної частини.

Третя з робіт капітального ремонту - це перевірка стану магнітопроводу, яка виконується для запобігання замикання окремих листів, що приводить до підвищеного нагрівання сталі, а також зовнішній огляд ізоляції обмоток для виявлення її старіння або видимих дефектів.

Типовий капітальний ремонт, тобто ремонт без модернізації і без усунення великих дефектів реактора, не передбачає розбирання активної частини і демонтажу обмоток. Якщо потрібен ремонт реактора з розбиранням активної частини, то такий ремонт виконується по особливих технологічних інструкціях і вказівкам.

Якщо, як це буває частіше усього, капітальний ремонт реактора робиться не на місці його установки, то попередньо здійснюються демонтажні роботи: від'єднання ошинування, ланцюгів вторинної комутації, демонтаж систем пожежогасіння й охолодження.

Власне ремонт починається з розкриття активної частини реактора, здійснюваного або підйомом її з бака разом із кришкою, або підйомом знімного бака (дзвона); потім активна частина промивається струменем трансформаторного масла для видалення шламу та інших забруднень.

Далі робиться огляд і очищення магнітопроводу з перевіркою, як затягування доступних стяжних шпильок, так і ізоляції шпильок і ярмових балок. При необхідності відновлюється порушена ізоляція, і підтягуються шпильки. Перевіряється справність системи заземлення елементів активної частини.

Оглядаються й очищаються обмотки і відводи, а при необхідності робиться розклинівка шин і відновлення розрахункових зусиль в опресовці обмоток; перевіряються і ремонтуються ізоляція і кріплення відводів, перевіряється справність доступних паянь. Варто мати на увазі, що на трансформаторах напругою 150 кВ і вище встановлені поверх обмоток зовнішні ізоляційні бар'єри.

загальному баку з активною частиною виборця пристрою переключення під навантаженням: чищення (при необхідності заміна) і підтяжка контактів; перевірка паянь, перемичок і всіх механізмів перемикача. Оглядається й очищається кришка бака, розширник з вбудованою в нього плівкою (якщо трансформатор оснащений плівковим захистом), захисними

трубами і мембранами (перевіряється їхня цілість і справність ущільнення). Ревізуються термосифонні й адсорбційні фільтри і повітроосушувачі зі зміною сорбенту та масла в масляних затворах, а також крани і засувки.



Рисунок 1.3 – Ремонт реактора та РПН автотрансформатора



а



б

Рисунок 1.4 – Обладнання для ремонту шунтуючих реакторів: а- цеолітова установка для обробки масла; б – вакуумний блок для сушки ізоляції

Робляться огляд і ремонт перемикача відгалужень і розміщеного в Робиться огляд, чищення і ремонт вводів, при необхідності в них замінюється масло або робиться повне розбирання вводів. Окремо від реактора виконуються випробовування вводів. Бак реактора ретельно оглядається для виявлення тріщин або неприпустимих деформацій, чиститься й офарбовується.

Виконується ремонт системи охолодження [9, 10]: радіаторів або маслоохолоджувачів, насосів, вентиляторів і електродвигунів, маслопроводів і арматури; радіатори (маслоохолоджувачі) ретельно очищаються і промиваються усередині. Робляться випробовування трансформаторного масла з бака; при необхідності виконується сушіння, регенерація або зміна масла. Ревізуються системи азотного захисту і пожежегасіння при їхній наявності. При необхідності, обумовленій результатами попередніх випробовувань, виконується сушіння ізоляції активної частини та убудованих трансформаторів струму.

Перевіряються пристрої захисту та автоматики реактора, контрольно-вимірювальні прилади і пристрої сигналізації, у тому числі ті які відносяться до систем охолодження, регулювання, пожежегасіння: силові кабелі , а також кабелі вторинної комутації; газові і струмові реле, реле тиску і рівня масла.

Робиться складання реактора з заміною ущільнень, і виконуються випробовування на ремонтній площадці (ремонтній базі), після чого реактор доставляється на місце установки і монтується на своєму фундаменті. Після повного складання реактора він піддається заключним випробовуванням, ошиновується і включається спершу на холостий хід, а потім, після фазування - у роботу під навантаженням [11, 12].

Зауважимо, що приведений перелік охоплює роботи, проведені в умовах спеціалізованого заводу. При ремонті на місці установки реактора об'єм робіт може бути декілька скорочений виходячи з реальних можливостей, забезпечуваних оснащенням використовуваної ремонтної бази (виконуваний

без його переміщення, тобто безпосередньо на фундаменті. Цей вид капітального ремонту, як і типовий, може виконуватися з підйомом рухомої частини або дзвона, і тоді його об'єм практично збігається з типовим. Необхідно лише прийняти додаткові заходи по запобіганню зволоження розкритої активної частини.

На практиці використовується також і такий метод капітального ремонту реактора, що знаходиться на власному фундаменті, як внутрішній огляд без демонтажу рухомої частини або дзвона. При цьому ремонтний персонал влізати усередину бака через розкриті оглядові люки (попередньо масло з реактора повинна бути цілком злите, а внутрішній простір бака досить ефективно провітрений). Цей метод ремонту практично здійснюють тільки при наявності достатнього вільного простору усередині бака, тобто лише на потужних реакторах високої напруги. Доцільність такої технології впливає з відзначеного вище основного утримання капітального ремонту реактора - підпресовки обмоток, перевірки стану обмоток і магнітопровода, очищення (промивання) рухомої частини. Оскільки всі ці операції при відомих обмеженнях можуть бути виконані без розбирання реактора, відмова від трудомістких робіт із демонтажу і переміщення реактора може бути виправдана.

При ревізії реактора усередині бака об'єм виконуваних робіт і перевірок істотно обмежений, тому що значна частина поверхні навіть зовнішніх обмоток, а також магнітопровода виявляється недоступною не тільки для ремонту, але і для огляду. У зв'язку з цим існує ризик пропустити наявний дефект реактора; крім того, при виявленні в ході огляду через оглядовий люк серйозного дефекту все рівно буде потрібно демонтаж реактора з доставкою його на ремонтну площадку (у вежу) або на завод.

Підпресовка обмоток без підйому виймальної частини або демонтажу дзвона в більшості випадків здійсненна тільки при використанні спеціальних

малогабаритних гідравлічних домкратів через обмеженість вільного простору усередині бака [2]. Домкрати по черзі встановлюються на кожну обмотку поруч із наявними в пристрої реактора, що пресує, гвинтовими домкратами. Після того, як за допомогою гідравлічного домкрата буде створене зусилля пресовки, що відповідає заводським даним, положення натисних кілець фіксується гайками гвинтових домкратів. Після завершення підпресовки гідравлічні домкрати переставляються на наступну обмотку.

Ремонт реакторів на власному фундаменті більш поширений у ПЕС, ніж на електростанціях. У них є ремонтні площадки, максимально наближені до реакторів. На трансформаторних підстанціях (в баштах) ремонтуються в основному реактори 500-750 кВ [6].

1.2.2 Поточний ремонт реактора

Поточні ремонти виконуються в період між двома наступними капітальними ремонтами і мають на меті перевірити стан обмеженого числа найбільше швидкозношуваних, і щодо нескладних у ремонті вузлів і деталей з усуненням виявлених дефектів, із тим, щоб забезпечити безвідмовну роботу агрегату до наступного планового ремонту (поточного або капітального). При поточному ремонті робляться, вводяться огляд і чищення вузлів і деталей (як правило, щодо легкодоступних), а також ліквідація невеликих дефектів, заміна неосновних вузлів і деталей. Доцільність уведення категорії поточного ремонту влаштовується нерівномірним зносом (старінням) окремих вузлів і деталей реакторів. Саме ця нерівномірність приводить до виходу з ладу окремих вузлів і до настання терміна чергового капітального ремонту, у той же час скорочувати міжремонтний період, визначений по ресурсах основної маси вузлів реактора, до значення, обумовленого ресурсом декількох найменш надійних вузлів, безперечно економічно нецілеспрямовано. У загальному

випадку в міжремонтний період може бути декілька поточних ремонтів.

При поточному ремонті, що передує капітальному, додатково проводяться виміри, випробовування й огляди з метою виявлення та уточнення робіт, підметів виконання в ході цього капітального ремонту.

Поточний ремонт реактора містить у собі, насамперед такі роботи, як зовнішній огляд з усуненням виявлених дефектів, що піддаються ліквідації на місці, у тому числі очищення забрудненої зовнішньої ізоляції як одного зі слабких і водночас доступних вузлів.

Проводиться комплекс робіт із догляду за трансформаторним маслом, що включає в себе спуск бруду і конденсату з розширника, перевірку маслопоказчика (зокрема, відповідність рівня масла в розширнику) із доливанням масла, при необхідності, перевірку і зміну сорбента в термосифонному (адсорбційному) фільтрі і повітроосушнику. Аналогічна робота виконується і на маслonaповнених вводах: доливання масла, зміна масла в масляному затворі і сорбента у повітроосушнику, добір проб масла.

Робиться очищення зовнішніх поверхонь бака і кришки, перевіряються спускні крани та ущільнення, цілість мембрани вихлопної труби, захисного клапанна. Оглядаються охолоджувальні пристрої, виконується очищення їхніх зовнішніх поверхонь (особлива увага звертається на відсутність забруднень двохребрих трубок маслоохолоджувачів системи ДЦ, ефективність роботи яких при забрудненні різко знижується).

Перевіряються і змазуються підшипники вентиляторів, електродвигунів, насосів, виконується перевірка надлишковим тиском герметичності маслководяних охолоджувачів. На безсальниковому маслonaсосі може знадобитися заміна підшипників і каблучок, що ущільнюються, тому що їхній ресурс складає 10 000 год.

Робляться огляд і перевірка пристрою регулювання під навантаженням

(привід, контактор), а також переведення перемикача регулювання без порушення в не менше 10 разів з одного крайнього положення в інше (для видалення оксидної плівки). Перевіряються газове і струминне реле, реле рівня і тиску масла, відсічний клапан, прилади контролю температури і тиску масла, система азотного захисту.

З поточним ремонтом реактора супроводжуються перевірки і випробування пристроїв його захисту та автоматики, у тому числі автоматики та сигналізації систем охолодження, пожежогасіння. У ході поточного ремонту виконуються також випробування ізоляції і контактних з'єднань, у тому числі перевіряється опір контактів перемикачів відгалужень (у всіх положеннях).

Одна з найбільше складних проблем при поточному ремонті потужних високовольтних реакторів - це підйом на введення ВН для обтирання їхньої ізоляції, розшинювання або ошинювання в зв'язку з випробуваннями, для зміни масла в затворах і т.п. Справа в тому, що безпосереднє підіймання по порцеляні незручне і небезпечне. Будь-яких полегшуючих піднімання пристосувань у заводському виконанні реактора не передбачено, а використання автовишки для цієї мети не завжди можливо за умов розміщення реактора.

1.3 Результати аналізу пошкоджуваності шунтових реакторів в ЕЕС

Реактори РОДЦ-110000/750 – самий ненадійний елемент силового електрообладнання у мережі 750 кВ. На передачі 750 кВ «Донбас – Альбертірша» на кожній підстанції вони пошкоджувалися по декілька раз [5,6] Пошкодження супроводжувалися вибухом, пожежею і повною руйнацією реакторів, після чого вони вже не підлягали відновленню.

На рисунку 1.5 зображено вигляд реактора після його відмови.

Розглянемо основні види пошкоджень реакторів та прийняті міри з їх попередження:

1. Застосування маслонасосів, у яких обмотка охолоджувалася потоком масла реактора, призводила до того, що при пошкодженні механічної частини маслонасосу, металевий пил попадав у середину бака реактора і осідав у місцях концентрація найбільших напруженостей електричного і магнітного полів – на прошивних рейках у районі виводу з середини обмотки. Через невдалу конструкцію цих рейок (вони були виконані суцільними) створювалися сприятливі умови для розвитку так званих «повзучих» розрядів по поверхні рейок.

Для попередження таких пошкоджень виконана реконструкція усіх реакторів першої партії випуску реакторів:

- заміна маслонасосів на маслонасоси герметичної конструкції;
- монтаж фільтрів у систему циркуляції масла;
- заміна суцільних рейок на розрізні.

Ці заходи дозволили значно зменшити ймовірність розвитку «повзучих» розрядів по поверхні рейок.

2. Низька якість виконання пайки елементарних проводів обмотки приводила до виникнення виткових замкнень у обмотці повздовжній диференційний захист не реагував на ці пошкодження, до тих пір, поки не виникало замкнення на землю, а це призводило до виникнення газового пузиря і значного руйнування реактора.

Для попередження обсягу таких пошкоджень виконана на заводі реконструкція реакторів останньої партії випуску і реконструкція попередніх партій випуску у експлуатації. При цій реконструкції виконано:

- розділення нейтралей півобмоток реактору, встановлення на кожній з них трансформаторів струму;

- монтаж поперечного захисту реактора.

Слід також зазначити, що існуюча система профілактичних випробувань реакторів у експлуатації фактично не дозволяє оцінювати стан як головної ізоляції, так і виткової. Вимір опору ізоляції мегомметром 2500 В та вимір діелектричних втрат при напрузі 10 кВ дозволяють оцінити лише загальне зволоження ізоляції і масла. Контроль стану головної ізоляції у деякій мірі поліпшується при виведенні на зовнішній бік баку реактора заземлення електростатичних екранів, особливо, якщо організувати вимір струму цих екранів при робочій напрузі.

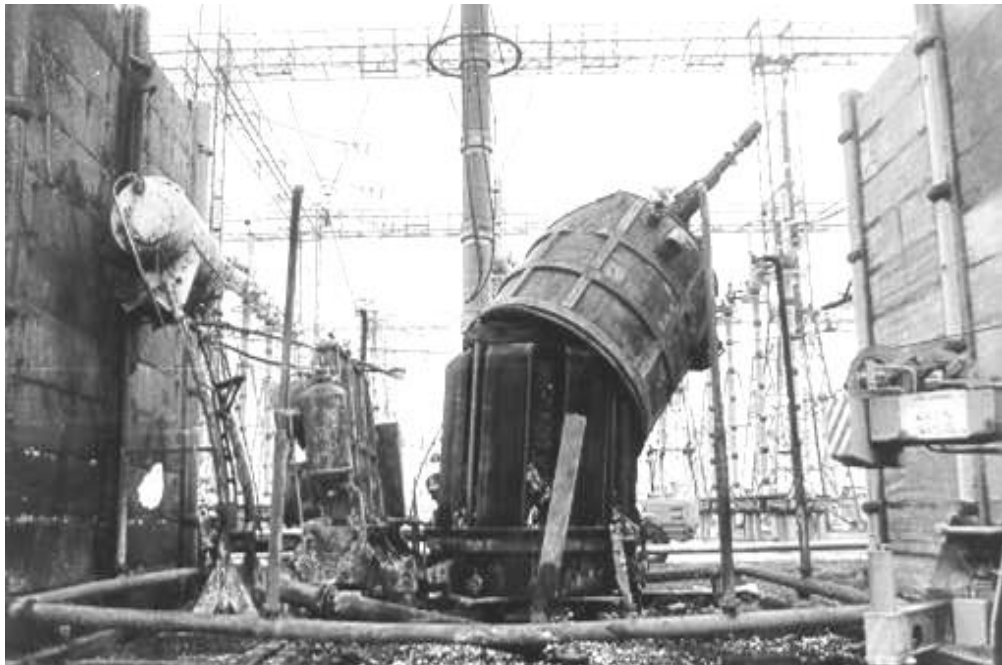


Рисунок 1.5 – Пошкоджений реактор 750 кВ

Найбільш ефективними, в попередженні аварій шунтуючих реакторів, є мікропроцесорні системи безперервного контролю і діагностики, які використовують комплекс сенсорів [7]. Але більш доцільно організувати випробування головної та виткової ізоляції напругою, що у декілька разів

перевищує робочу. Роботи у цьому напрямку ведуться на стадії дослідницьких працівниками ВНТУ та ПЗЕС [12]. Слід звернути увагу на економічні та психологічні аспекти проблеми:

- такі випробування можуть дозволити уникнути значних пошкоджень у роботі [8];
- при випробуваннях можливе пошкодження головної або виткової ізоляції, що потребує виводу у тривалий ремонт реактора, який міг ще працювати;
- при ремонті можливо виникне необхідність повного розбирання реактора з демонтажем шунтів та обмотки, що в умовах експлуатації важко зробити.

3. Потужні магнітні поля розсіяння викликають значні струми у короткозамкнених контурах, що призводить до перегрівів елементів конструкції, розкладання органічної ізоляції і утворення вуглеводних газів, що розчинюються у маслі.

Низка реакторів була виведена з роботи за результатами хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів.

Такі контури утворювалися з причин:

- активна частина реактора встановлена на металевих амортизаторах, що розміщені на піддоні реактора;
- відсутній контроль ланцюгів заземлення магнітопроводів;
- відсутній контроль замкнення між собою електростатичних екранів;
- електромагнітні екрани замикалися на плити;
- стяжні шпильки торкалися «колоколу».

На рис. 1.3 – 1.5 показані сліди перегрівів від протікання струмів по короткозамкненим контурам у реакторах 750 кВ.

Реконструкції, що проводяться на підстанціях 750 кВ, одним з завдань

мають усунення причин утворювання короткозамкнених контурів. Деталі цих реконструкцій наведені нижче.



Рисунок 1.6 – Перегрів внаслідок замкнень електромагнітного екрану на пресуючу плиту

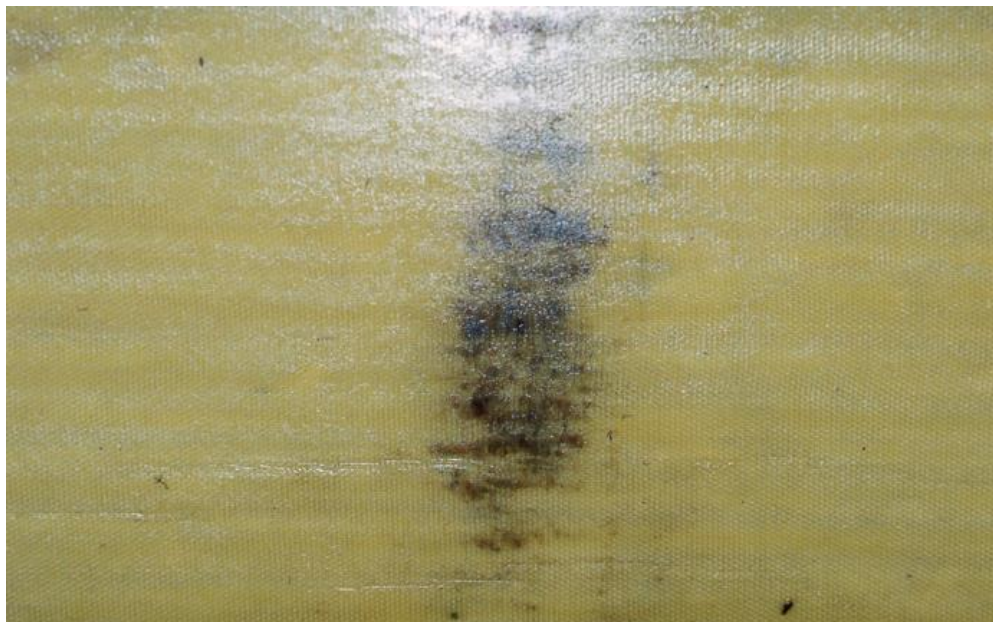


Рисунок 1.7 – Сліди перегріву на текстолітовому кільці внаслідок замкнення магнітного шунта на пресуючу плиту

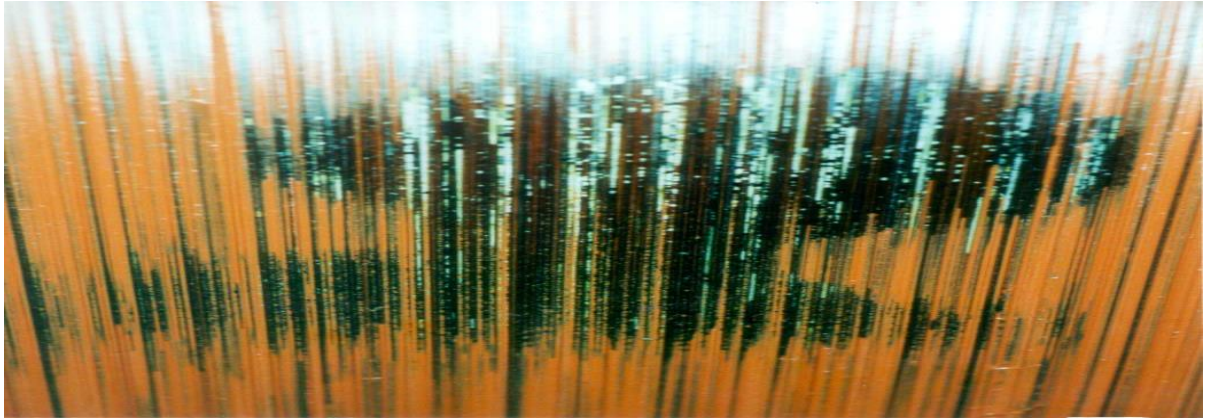


Рисунок 1.8 – Сліди перегріву на С-подібному магнітному шунті

Висновки до першого розділу

1. Чимало шунтуючих реакторів, які знаходяться в експлуатації на енергетичних підприємствах України, відпрацювали свій паспортний ресурс.
2. Для запобігання їх пошкоджень в Україні діє чітко налагоджена система планово-попереджувальних ремонтів.
3. Незважаючи на різні види ремонтів в Україні мають місце пошкодження шунтуючих реакторів.
4. Актуальною на сьогодні є задача переходу від ППР до ремонтів за станом реактора.
5. Серед багатьох видів ППР найбільш об'ємним і вартісним залишається капітальний ремонт.

2 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ШУНТОВИХ РЕАКТОРІВ

Сучасний стан технічної бази вітчизняної електроенергетики вимагає значних зусиль для забезпечення надійної і безпечної експлуатації устаткування, яке пропрацювало багато років і яке частково фізично зношене і застаріле.

Існуючий науково-технічний потенціал галузі дозволяє підтримувати працездатний стан електроустаткування і продовжувати життєвий цикл електроенергетичних установок (ЕУ) за рахунок ремонтів, часткового відновлення і за умови удосконалювання методів і засобів діагностування обладнання ЕУ

Задачі діагностування

- Оцінка функціональної справності;
- Оцінка ступеня зношення устаткування;
- Визначення можливості продовження експлуатації без ремонту;
- Визначення об'єму ремонту ;
- Оцінювання можливості і умови продовження роботи устаткування, яке має дефекти;
- Оцінка залишкового терміну служби;
- Розробка заходів, які забезпечують реалізацію ресурсу, що залишився.

При випробуванні шунтових реакторів виникають серйозні труднощі. Для збудження реактора до номінальної напруги в умовах заводу необхідно мати джерело цієї напруги потужністю не менше повної потужності реактора і проміжний трансформатор, розрахований на цю потужність і напругу реактора [13]. Можна створити спеціальну конденсаторну батарею (КБ), розраховану на номінальні струм і напругу реактора. В цьому випадку джерело живлення — (синхронний) генератор 50 Гц, і підвищуючий проміжний трансформатор,

повинні мати однофазну потужність, рівну 5—10% повної потужності випробовуваного реактора.

Проводити вимірювання втрат в реакторі досить складно, оскільки коефіцієнт потужності при цьому вельми малий (звичайно менше 0,004). Тому ватметровий метод вимірювання втрат малоприматний. Необхідний спеціальний мостовий метод вимірювання.

Особливо важко проводити випробування ізоляції реактора нормованим ГОСТ 1516.1-76 випробувальною напругою промислової частоти. Для цього необхідна спеціальна конденсаторна батарея на повну випробувальну напругу реактора при підвищеній частоті, що не реально в заводських умовах. Краще замінити це випробування дією грозових і комутаційних імпульсів (ГОСТ 1516.1-76) [10, 14].

Шунтові реактори, як і силові трансформатори відповідної потужності і класу напруги, проходять на заводі операційні випробування в процесі збирання, а також кваліфікаційні і приймально-здавальні випробування в повністю зібраному вигляді.

В програму операційних випробувань в процесі, збирання реактора входять випробування, аналогічні випробуванням трансформатора, як: а) випробування магнітопровода або бічних ярм; б) вимірювання перенапруг в обмотці реактора при дії грозових і комутаційних імпульсів (при зниженій напрузі) після першого збирання; в) вимірювання електричного опору обмоток постійному струму г) вимірювання індуктивності і втрат при малій напрузі після другого збирання [13].

Згідно ГОСТ в програму кваліфікаційних і приймально-здавальних випробувань повністю зібраного шунтового реактора класу напруги 110 кВ і вище входять:

- 1) зовнішній огляд (візуально);
- 2) перевірка електричного опору обмоток постійному струму;

- 3) вимірювання параметрів ізоляції (R_{60} , C і $\text{tg}\delta$);
- 4) випробування проби масла з визначенням пробивної напруги і $\text{tg}\delta$ по ГОСТ 6681-75;
- 5) випробування бака реактора на маслощільність ;
- 6) перевірка потужності реактора при номінальній напрузі методом падіння напруги із застосуванням приладів класу точності для вимірювання потужності;
- 7) вимірювання втрат в реакторі мостовим методом при додаванні між лінійним і нейтральним вводами реактора номінальної напруги (допускається вимірювання втрат при зниженій напрузі);
- 8) випробування ізоляції нейтралі реактора напругою промислової частоти по ГОСТ 1516.1-76;
- 9) випробування ізоляції реактора повним грозовим імпульсом по ГОСТ 1516.1-76;
- 10) випробування ізоляції реактора зрізаними імпульсам по ГОСТ 1516.1-76;
- 11) випробування на нагрів при номінальній напрузі на вводах реактора з вимірюванням температур;
- 12) випробування бака реактора на механічну міцність при вакуумі по ГОСТ 11677-75;
- 13) те ж, як по розділу 12, але при підвищеному внутрішньому тиску по ГОСТ 11677-75;
- 14) вимірювання вібрацій ГОСТ 19469-74;
- 15) вимірювання рівня шуму по ГОСТ 19469-74;
- 16) вимірювання часткових розрядів (ЧР) в ізоляції реактора для класів напруги 220 кВ і вище (метод вимірювання ще не нормований стандартом).

Вимірювання ЧР на МЕЗ проводять при тривалому (10 годин) збудженні реактора до максимальної робочої напруги з періодичним підйомом напруги до

1,1—1,15 найбільшої напруги тривалістю 20 хвилин. Протягом цього випробування здійснюють контроль ЧР, які вимірюють також при короткочасному підйомі напруги до 1,3 найбільшого можливого значення [13, 14].

2.1 Методи та засоби визначення технічного стану ШР за результатами періодичного контролю

Для випробування, шунтових реакторів великої потужності високої напруги застосовується наступне устаткування:

Конденсаторна батарея сумарною потужністю 135000 кВ·А, що містить 2700 конденсаторів типа КПМ1-50-1, кожен на 50 кВар, 1 кВ. Конденсатори розміщені по 5 в 40 касетах, встановлених на 6 поверхах, ізольованих від землі. Касети можна з'єднувати в групи або послідовно для включення в однофазну або трифазну схему випробування.

Трифазний синхронний генератор типу ГСІ-15000-11, потужністю 15000 кВА з напругою обмотки статора 11 кВ при з'єднанні в зірку або 6,35 кВ при з'єднанні в трикутник.

Реактивні опори генератора у відносних одиницях: $x_d=2.17$; $x_2=x_d=0,213$; $x_q=1,35$; $x_d'=0,36$.

3. Проміжний випробувальний трансформатор типа ТДЦТЙ-31500/35 з нормальними напругами обмоток: генераторна 6,3 кВ; понижуюча 2х1.9 кВ на фазу; підвищуюча 2х11 кВ, Цей трансформатор застосовують при випробуванні шунтових реакторів класу 750 кВ по схемі резонансу напруги (рис. 2.1).

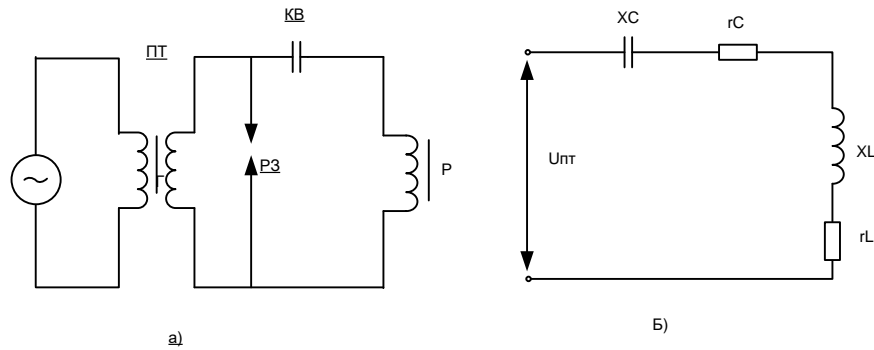


Рисунок 2.1 – Схема випробування в режимі резонансу напруг.

а - схема з'єднань випробовуваного реактора і КБ з джерелом живлення;
б — еквівалентна схема заміщення.

Випробувальний трансформатор типу ІОМ-500/500 допускає тривалу роботу при струмі 22 А і напрузі 350 кВ на стороні ВН. Його застосовують на МЕЗ при випробуванні шунтових реакторів класу напруги 500 кВ і нижче по схемі резонансу струмів (рисунок 3.2).

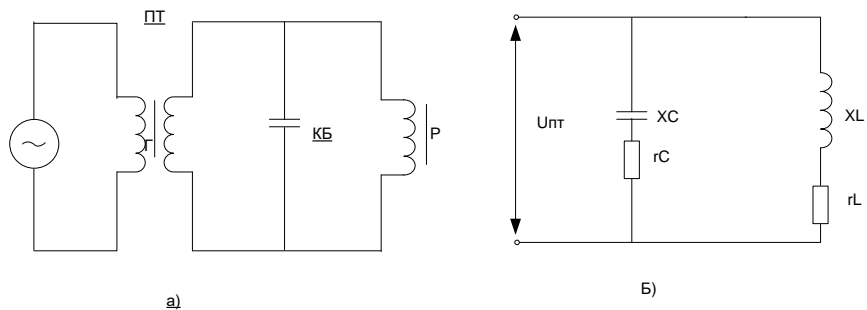


Рисунок 2.2 – Схема випробування в режимі резонансу струмів.

а — схема з'єднання випробовуваного реактора і КБ з джерелом живлення; б — еквівалентна схема заміщення.

В даний час при випробуванні шунтових реакторів 500 кВ і вище на МЕЗ застосовують тільки схему резонансу напруг.

Випробування шунтових реакторів по резонансних схемах, вимагає обґрунтованого вибору параметрів випробувального устаткування, зокрема

конденсаторної батарея (КБ) і врахування умов самозбудження випробувального генератора.

2.1.1 Випробування в режимі резонансу напруг

Схема включення випробовуваного реактора і КБ показана на рисунку 2.1,а. По цій схемі конденсаторна батарея КБ з'єднується послідовно з реактором Р. Живлення подається від синхронного генератора Г через проміжний трансформатор. ПТ, обмотка ВН, якого захищається розрядником РЗ від перенапружень при відключеннях.

При випробуванні по схемі послідовного включення не вимагається дорогого випробувального трансформатора, розрахованого на повну потужність і повну випробувальну напругу реактора, що є основною перевагою цієї схеми. Крім того, при випробуванні по цій схемі (в порівнянні з схемою резонансу струмів (рисунок 2.2) полегшується реєстрація ЧР, оскільки відсутні ЧР, що заважають, на стороні ВН випробувального трансформатора. Недоліком схеми є те, що зміна частоти мережевої напруги приводить до різких коливань випробувальної напруги.

На рис. 2.3 показані: $k_H = U_p$ — напруга на реакторі; $U_{пт}$ — напруга проміжного трансформатора; x_L/x_c — відношення реактивних опорів реактора. При випробуванні по схемі на рисунку 3.1,а коефіцієнтів посилення k_H (тобто відношення напруги на реакторі до напруги живлення згідно схемі заміщення на рисунок 2.1) рівні.

$$k_H = \left| \frac{z_p}{z_p + z_{KB}} \right| = \frac{n^2}{\sqrt{(n^2 - 1)^2 + (tg \delta + 1/q)^2}}. \quad (2.1)$$

З рисунка .3 виходить, що при настройці схеми точно в резонанс

($\pi^2 = x_L/x_C = 1$) напруга на реакторі більш ніж в 150 разів перевищує напругу, підведену від джерела живлення. Так, при випробуванні реактора РОДЦ-110000/750 з номінальною напругою $787,5/\sqrt{3}=455$ кВ напруга живлення, рівна 3 кВ. Проте можливе коливання частоти мережі живлення за час випробування приводить до деякого розладу схеми, оскільки відношення $x_L/x_C = \omega^2 LC$ залежить від квадрата частоти.

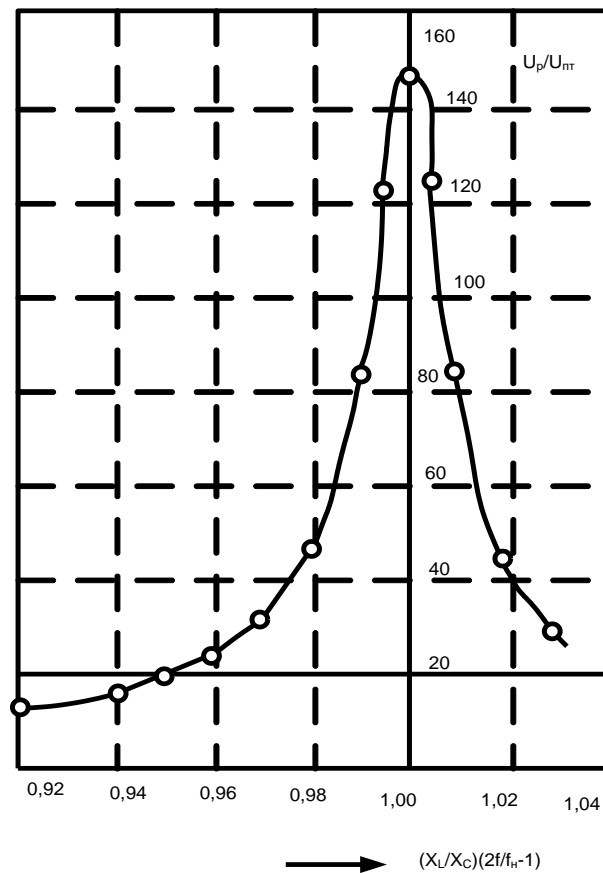


Рисунок 2.3 – Резонансна крива коефіцієнта підсилення

При тих змінах частоти, які можливі в мережі ($50 \pm 0,2 \div 0,3$ Гц), квадратичну залежність частоти зручніше замінити наближеним виразом:

$$f^2 / f_n^2 = 2f / f^2 - 1. \quad (2.2)$$

де f —частота при випробуванні, Гц; f_n — номінальна частота живлячої мережі, Гц.

Наприклад, при зниженні частоти на 0,3 Гц відношення

$$\frac{x_L}{x_C} = \frac{x_{LH}}{x_{CH}} \cdot \left(\frac{2f}{f_H} - 1 \right) = \frac{x_{LH}}{x_{CH}} \cdot \left(\frac{2 \cdot 49,7}{50} - 1 \right) = 0,988 \frac{x_{LH}}{x_{CH}}. \quad (2.3)$$

Ступеню небалансу $x_L/x_C=0.988$ згідно кривої на рисунку 3.3 відповідає коефіцієнт підсилення:

$$k_n U_p / U_{ПТ} = 72. \quad (2.4)$$

а отже, необхідна напруга ВН проміжного трансформатора (ПТ) рівна $787,5/\sqrt{3} \cdot 72 = 6,3$ кВ.

Таким чином, для підтримки незмінної напруги на реакторі потрібна зміна напруги більш ніж в 2 рази через коливання частоти. Це є основним недоліком схеми резонансу напруг.

При виборі коефіцієнта трансформації ПТ враховують також необхідність підвищення напруги випробовуваного реактора понад нормальну, наприклад до $1,3U_H$ при вимірюванні часткових розрядів.

При роботі синхронного генератора на навантаження, що має характер ємності, за певних умов можливе синхронне (монотонне) самозбудження або асинхронне (коливальне) самозбудження [15]. Межа зони синхронного самозбудження визначається виразом:

$$(x_{C_3} - x_d)(x_{C_3} - x_q) + r_s^2 = 0, \quad (2.5)$$

а межа зони асинхронного самозбудження:

$$(x_{C_3} - x_q)(x_{C_3} - x_d') + r_s^2 = 0, \quad (2.6)$$

де x_{C_3} і r_s —еквівалентне ємнісний і активний опори кола; x_d , x_q x_d' індуктивні опори генератора.

Самозбудження не виникає, якщо виконуються нерівності:

$$\left. \begin{aligned} (x_{C_3} - x_d)(x_{C_3} - x_q) + r_s^2 > 0 \\ (x_{C_3} - x_q)(x_{C_3} - x_d') + r_s^2 > 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Достатніми умовами відсутності самозбудження являється виконання однієї з наступних вимог:

$$\left. \begin{aligned} (x_d - x_q)/2 < r_s < (x_q - x_d')/2 = 0; \\ x_{C_3} > x_d; \quad x_{C_3} < x_d'. \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Найнадійнішим критерієм відсутності самозбудження генератора є умова $x_{C_3} > x_d$. При однофазному режимі роботи (випробування однофазних реакторів) необхідно додати опір зворотної послідовності генератора x_2 . Тоді умова відсутності самозбудження прийме вигляд:

$$x_{C_3} = x_C - x_L > x_d + x_2. \quad (2.9)$$

Оскільки реактивні опори генератора задані у відносних одиницях, їх необхідно помножити на базисний опір генератора U_G/S і привести до сторони ВН проміжного трансформатора множенням на k^2 тоді:

$$x_C - x_L > (x_d + x_2)U_G^2 / Sk_{III}^2. \quad (2.10)$$

або

$$\frac{x_L}{x_C} < \frac{x_L}{\left[x_L + (x_d + x_2)U_G^2 / Sk_{III}^2 \right]} \quad (2.11)$$

Приклад: Визначити максимально допустиме значення x_L/x_C для реактора типу РОДЦ-110000/750 ($x_L=1880$ Ом) при випробуванні по схемі на рис. 2.1 з живленням від генератора типа ГСІ-15000/11, 15 000 кВА, 6,35 кВ на фазу через проміжний трансформатор типу ТДЦТН-31500/35 з коефіцієнтом трансформації $k=11/6,3=1,75$

Згідно (2.5) маємо:

$$\frac{x_L}{x_C} = \frac{1880}{1880 + (2.17 + 0.213) \frac{6.35^2}{15} 1.75^2} = \frac{1880}{1880 + 19.5} = 0.99 \quad (2.12)$$

У табл. 2.1 приведені (з урахуванням умов можливого самозбудження генератора і коливань частоти) допустимі значення x_L/x_C при випробуванні шунтових реакторів на 750, 500 і 400 кВ.

Необхідне число N послідовно включених касет КБ рівне:

$$N = x_c n / x_k \quad (2.13)$$

де x_c — необхідний реактивний опір КБ, Ом; n — число паралельно включених конденсаторів в касеті; x_k — реактивний опір одного конденсатора рівне 20 Ом.

У табл. 322 вказано число касет КБ при випробуванні реакторів по схемі резонансу напруг (враховане можливе відхилення потужності реактора від номінальної в межах $\pm 5\%$).

Таблиця 2.1 – Максимально допустимі відношення x_L/x_C

Тип реактора	x_L/x_C при частоті, Гц		
	49,7	50	50,2
РОДЦ-110000/750	0,97	0,982	0,99
РОДЦ-60000/500	0,968	0,98	0,988
РОДЦ-55000/400	0,962	0,974	0,982

Таблиця 2.2 – Визначення оптимальної кількості касет конденсаторів

Оптимальна кількість касет конденсаторів при випробуванні реактора типу РОДЦ-110000/750					
Потужність реактора	X_L , Ом	Число		X_C , Ом	X_L/X_C
		Касет	Конденсаторів		
1,05·110	1789,3	456	2280	1826,6	0,98
1,04·110	1807,4	460	2300	1844,6	0,98
1,03·110	1824,5	464	2320	1860,5	0,981
1,02·110	1842,4	468	2340	1876,7	0,982

Продовження таблиці 2.2

Оптимальна кількість касет конденсаторів при випробуванні реактора типу РОДЦ-110000/750					
Потужність реактора	X_L , Ом	Число		X_C , Ом	X_L/X_C
		Касет	Конденсаторів		
1,01·110	1860,7	472	2360	1892,7	0,983
110	1879,3	478	2390	1916,8	0,98
0,99·110	1898,2	482	2410	1932,8	0,982
0,98·110	1917,6	488	2440	1956,9	0,98
0,97·110	1937,4	492	2460	1972,9	0,982
0,96·110	1957,6	498	2490	1997	0,98

2.1.2 Випробування в режимі резонансу струмів

З'єднання випробовуваного реактора Р з конденсаторною батареєю показано на рисунку 2.2. При випробувань по цій схемі зміна частоти напруги мережі не приводить до різких коливань випробувальної напруги, що є основною її гідністю. При випробуванні по цій схемі потрібен високовольтний випробувальний трансформатор, що є її істотним недоліком.

Коефіцієнт посилення k_T (відношення струму в реакторі до струму у випробувальному трансформаторі ПТ) у разі випробування по схемі резонансу струмів (див. рисунок 2.2) можна визначити аналогічно (2.1):

$$k_T = \left| \frac{z_{KB}}{z_P + z_{KB}} \right| \approx \frac{1}{(n^2 - 1)^2 + (tg \delta + 1/q)^2} \quad (2.14)$$

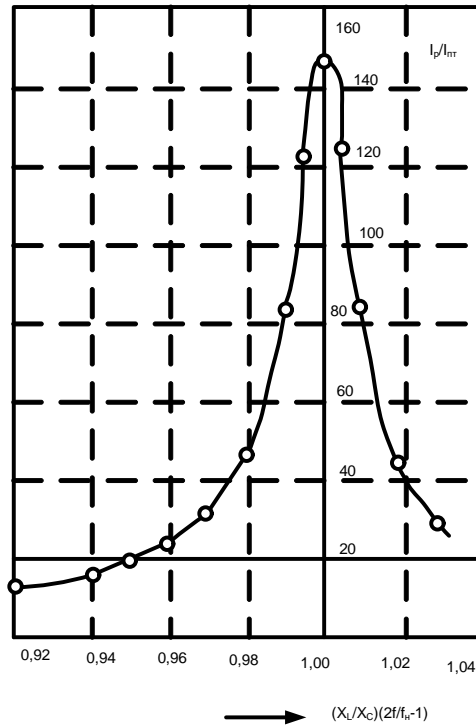


Рисунок 2.4 – Резонансна крива коефіцієнта посилення $k_T = I_p / I_{PT} - I_p$ струм реактора; I_{PT} — струм випробувального трансформатора; xL/x_c - відношення реактивних опорів реактора і КБ.

Крива, побудована по (2.7) з урахуванням реальних втрат в реакторі і КБ, дана на рисунку 2.4, з якого виходить, що при настройці схеми точно в резонанс ($\omega^2 = xL/x_c = 1$) струм у випробувальному трансформаторі складає всього близько 1/150 струму у випробовуваному реакторі. Це дозволяє при випробуванні однофазних реакторів класів напруги 500 і 400 кВ використовувати як трансформатор ВН випробувальний трансформатор типу ЮМ-500/500, розрахований на тривалу роботу при струмі 2 А і напрузі 350 кВ. Очевидно, що через малу потужність випробувального трансформатора потрібна настройка схеми точно в резонанс, тобто необхідно дотримувати рівність $x_L = x_C$. Необхідне число N послідовно включених касет КБ визначають по (2.5).

Таблиця 2.3 – Оптимальна кількість касет конденсаторів при випробуванні реакторів типу РОДЦ-60000/500

Потужність реактора МВ·А	x_L , Ом	Кількість		x_c , Ом	x_L/x_C	$I_{ит}$, А
		касет	конденсаторів			
1,05·60	1458,3	364	1820	1559,6	0,999	1,35- 3,02
1,04·60	1472,4	368	1840	1475,7	0,998	1,34- 3,24
1,03·60	1486,6	370	1850	1483,7	1,002	1,32- 2,54
1,08·60	1501,2	374	1870	1499,8	1,001	1,31- 2,57
1,01·60	1561,1	378	1890	1515,8	1,000	1,30- 2,73
1,00·60	1531,2	382	1910	1531,8	1,000	1,29-2,7
0,99·60	1546,7	386	1930	1547,9	0,999	1,27- 2,84
0,98·60	1562,5	390	1950	1563,9	0,999	1,26- 2,81
0,97·60	1518,6	394	1970	1519,9	0,999	1,25- 2,78
0,96·60	1595,0	398	1990	1596,0	0,999	1,32- 2,75
0,95·60	1611,8	402	2010	1612,0	1,000	1,22- 2,56

У табл. 2.3 даний попередній розрахунок числа касет КБ при випробуваннях реакторів по схемі резонансу струмів. Таблиця 2.3 складена з врахуванням можливого відхилення потужності реактора від номінальної в межах $\pm 5\%$, в таблиці вказані також межі зміни струму у випробувальному трансформаторі, викликані коливаннями мережевої частоти, напруги. Умови відсутності самозбудження генератора в режимі резонансу струмів визначаються розрахунком по методу.

2.2 Вимірювання індуктивності і втрат при робочій напрузі

Приклад: Вимірювання індуктивності і втрат в шунтовому реакторі типу РОДЦ-60000/500. Розрахункові дані реактора: $P_H=60\ 000$ кВА;

$U_H = 525/\sqrt{3}=303$ кВ $I_H=198$ А, втрати в _ стали $P_{ст}=45,4$ кВт, повні втрати $R_p = 200$ кВт.

Схема показана на рисунку 3.5. Параметри КБ вибрані по індуктивному опорі реактора:

$$x_L = U_H^2 / P_H = 303^2 / 60 = 1531 \text{ (Ом)} \quad . \quad (2.15)$$

При випробуванні в режимі резонансу струмів при $x_L = 1531$ Ом КБ згідно табл. 2.3 мала 382 послідовно з'єднаних касети по 5 паралельно з'єднаних конденсаторів типу КПМ-50-1 в кожній. Живили КБ від синхронного генератора типу ГСИ-15000-11 через випробувальний трансформатор ВТ типу ИОМ-500/500. Напругу вимірювали через ТН1 типу НКФ-500 вольтметром V типу Э59.

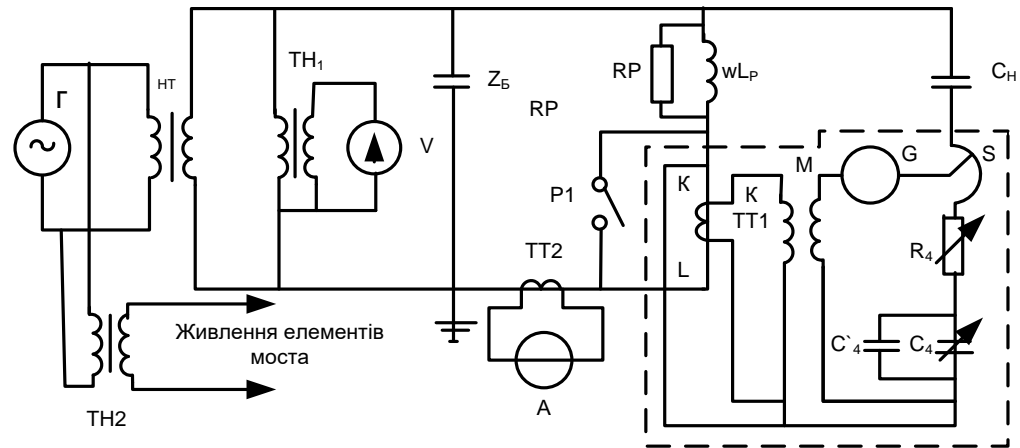


Рисунок 2.5 – Схема вимірювання індуктивності і втрат реактора при робочій напрузі. (Схема з'єднань при випробуваннях)

Струм в реакторі вимірювали через ТТ2 типу И56 класу 0,1 амперметр А, типу Д533 класу 0,2. Роз'єднувач Р1 служив для закорочення ТТ1 при випробуванні реактора на нагрів.,

Для вимірювання індуктивності і втрат був використаний міст Шерінга типу 2801 в комплекті з:

- 1) точний трансформатор струму ТТ1 типу 4731 на обмеженнях 30/5 і 150/5 А, з кутковою похибкою 0,5 – 1 мін;
- 2) індуктивна приставка типу 3480 з котушкою взаємної індукції М на 1 мГ;
- 3) додатковий набір вимірювальних. конденсаторів з ємністю 1×10 мкФ типу 1201 для розширення меж вимірювання моста;
- 4) електронний нуль-індикатор G типу 5501;
- 5) регулятор потенціалу екрану моста типу 2901;
- 6) зразковий конденсатор CN ємністю 67,35 пФ, 800 кВ;
- 7) трансформатор напруги TH2 для живлення моста від

генератора Р.

При вимірюванні індуктивності L_ϕ і кута втрат $\text{tg}\delta$ набір вимірювальних резисторів R_4 і набір конденсаторів C_4 моста з'єднані послідовно. По цій схемі вимірюють паралельне з'єднання індуктивного ωL і активного опорів реактора R_p .

Попередню установку рукояток декад C_4 і R_4 моста визначили по (2.16) і (3.17) для розрахункових значень:

$$U_n^2 / \omega P_n = 303^2 / 314 + 60 = 4.82 \quad (\Gamma) . \quad (2.16)$$

$$\text{tg}\delta = \sum P / P_n = 200 \cdot 10^{-3} = 3.33 \cdot 10^{-3} . \quad (2.17)$$

де U_n номінальна фазна напруга реактора, кВ; P_n - номінальна потужність реактора, МВ·А. Отже, згідно формули:

$$4,82 = \frac{1}{150/5} 10^{-5} \frac{C_4}{67,35 \cdot 10^{-12}} \approx 0,5 \cdot 10^6 C_4 \quad (2.18)$$

або

$$C_4 = 4,82 \cdot 10^{-6} / 0,5 = 9,64 \text{ (мкФ)} \quad (2.19)$$

Згідно

$$R_4 + S = \text{tg}\delta / \omega C_4 = 3.33 \cdot 10^{-3} / 314 \cdot 9.64 \cdot 10^{-6} = 1.1 \text{ (Ом)} \quad (2.20)$$

У табл. 2.4 дані формули, вживані на МЕЗ для розрахунку потужності і втрат в номінальних умовах реакторів типу РОДЦ класів напруги 400 -500 і 750 кВ при

вимірюваннях мостом типу 2801. Початковими даними для розрахунку служать:

- 1) номінальна фазна напруга реактора, кВ;
- 2) виміряні мостом значення C_4 , мкФ, і R_4+S , Ом;
- 3) розрахункові втрати в сталі реактора $P_{от}$, кВт;
- 4) температура реактора $\theta^\circ\text{C}$, рівна температурі навколишнього середовища, якщо реактор холодний;
- 5) температура обмотки не нагрітого реактора $\theta_{обм}$;
- 6) електричний опір обмотки $r_{обм}$ при температурі $\theta_{обм}$;
- 7) коефіцієнт трансформації $k_{тт}$ трансформатора струму типу 4731.

У табл. 2.4 дані результати типового випробування реактора РОДЦ-60000/500, при напругах 11,3-109,2% номінального в холодному стані реактора. Електричний опір обмотки реактора при $\theta=25^\circ\text{P}$ складає $r_s=2,92$ Ом.

Індуктивність L_p і $\text{tg}\delta$ визначали в змозі, рівноваги моста по положеннях рукояток декад C_4 і R_4 і реохорда S .

При напрузі, на реакторі $(U_{из}/U_n) \cdot 100=11,3\%$ було зафіксовано: $C_4=1,976$ мкФ (R_4+S) = 5,715 Ом. Отже, по рядку 8, табл.2.4 маємо:

$$\text{tg}\delta_p=0,314(R_4+S)C_4 \cdot 10^{-3}=0,314 \cdot 5,715 \cdot 1,976 \cdot 10^{-3}=3,54 \cdot 10^{-3} \quad (2.21)$$

а по рядку 9 табл. 2.4.

$$L_p = 14.82C_4 / u = 14.82 \cdot 1.976 / 30 / 5 = 4.89 \quad (\Gamma) \quad (2.22)$$

Реактивний опір x_L по графі 10.

$$x_L = 4664.7 \cdot 1.976 / 30 / 5 = 1536 \quad (\text{Ом}) \quad (2.23)$$

Виміряні втрати при 34,1 кВ по 12 рядку табл. 2.6.

$$P_{uz} = 22,2^2 \cdot 1536 \cdot 3,54 \cdot 10^{-6} - 2,68 \quad (\text{кВт}) \quad (2.24)$$

$$P_e = 6,188 \cdot 30 / 5 \cdot 5,715 = 212 \quad \text{кВт} \quad (2.25)$$

Втрати в реакторі при розрахункові температурі 75 °С визначені згідно 8 рядку табл. 2.4 по формулі.

$$P_{75} = I^2 r_{\theta} k 10^{-3} + P_{\text{дод}\theta} / k + P_{cm} \quad (2.26)$$

$$P_{\text{дод}\theta} = P_{\theta} - P_{cm} - I^2 r_{\theta} 10^{-3} \quad (2.27)$$

$$P_{\text{дод}\theta} = 212 - 45,4 - 113,7 = 52,9 \quad (\text{кВт}) \quad (2.28)$$

$$P_{75} = 113,7 \cdot 1,192 + 52,9 / 1,192 + 45,4 = 225,3 \quad (\text{кВт}) \quad (2.29)$$

Аналогічно визначені значення індуктивності і втрат, приведені табл. 2.4 при інших значеннях випробувальної напруги.

Струм і втрати в реакторі показані на рисунку 2.6 (при напрузі на його затискачах в межах 11,3—109% номінального). Ці графіки (у логарифмічному масштабі) показують, що струм в реакторі змінюється практично пропорційно першому ступеню, а втрати — пропорційно квадрату напруги. Така залежність

дозволяє вимірювати з достатньою точністю індуктивності.

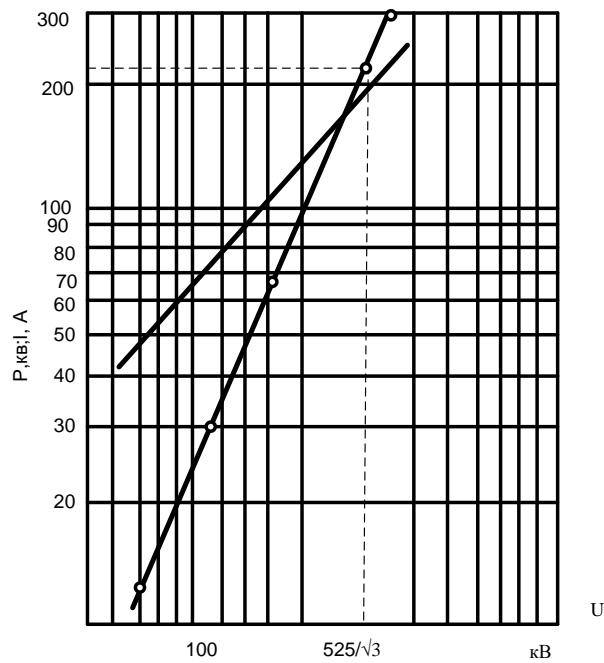


Рисунок 2.6 – Залежності втрат і струму від напруги в реакторі РОДЦ-60000/500. R_{θ} — втрати при $\theta=26^{\circ}\text{C}$; I_1 - струм в реакторі, P - втрати в шунтових реакторах вітчизняної конструкції при малих напругах з приведенням результатів вимірювання втрат, до номінальних умов пропорційно квадрату напруги

Таблиця 2.4 - Формули для розрахунку потужності і втрат в реакторі

№ пп	Параметри	Тип реактора		
		РОДЦ- 55000/400	РОДЦ- 60000/500	РОДЦ- 110000/750
1	Потужність реактора P_n , мВ·А	$126.06k_{TT} / C_4$	$196.96k_{TT} / C_4$	$443.1k_{TT} / C_4$
2	Реактивний опір x_L , оМ	$4664.7C_4 / k_{TT}$		

продовження таблиці 2.4

3	Втрати, приведені до номінальної напруги P_{θ} , кВт	$3.96k_{TT}(R_4 + S)$	$6.188k_{TT}(R_4 + S)$	$13.92k_{TT}(R_4 + S)$
4	Сумарні втрати ΣP_{θ} , кВт	$\Sigma P_{\theta} = (I^2 r_{\theta} + P_{\text{дод}})10^{-2} + P_{cm}$		
5	Втрати в сталі (розрахункові), $P_{ст}$, кВт	17,2	45,4	67,5
6	Добавочні втрати $P_{\text{дод}}$, кВт	$P_{\text{дод}} = P_{\theta} - P_{cm} - I^2 r_{\theta} \cdot 10^{-2}$		
7	Температурний коефіцієнт для приведення втрат до розрахункової температури 75°C	$k = (235 + 75)/(2359 + \theta)$		
8	Втрати, приведені до розрахункової температури P_{75} , кВт	$P_{75} = I^2 r_{\theta} k \cdot 10^{-2} + P_{\text{дод}}/k + P_{cm}$		

2.3 Вимірювання індуктивності і втрат при малій напрузі

Вимірювання при малій напрузі методом ватметра проводять при операційних випробуваннях реактора після другої збірки з метою перевірки якості збірки і відсутності дефектів в реакторі. Для цього результати вимірювання порівнюють з даними вимірювань на свідомо справних реакторах, що успішно пройшли кваліфікаційне і приймально-здавальне випробування.

У разі потреби вимірювання втрат ватметром з приведенням результатів до номінальної напруги (наприклад, для запису в паспорт реактора) слід враховувати похибки вимірювання і вносити поправки в результати

вимірювання. При $\text{tg}\delta=\cos\varphi=0,0035$ і при кутовій похибці ватметра всього, що не враховується $+0,5$ мінут відносна похибка

Таблиця 2.6 – Результати вимірювання індуктивності

Результати вимірювання індуктивності і втрат реактора 750 кВ при частоті 49.8 Гц								
Умови вимірювання на реакторі РОДЦ-110000/750	Вимірювання ватметром при малій напрузі							
	U, В	I, А	X _L , Ом	X _{Лер} , Ом	Втрати			
					W, Вт	$\frac{U^2}{R_w + R_d}, \text{Вт}$	P _{из} , Вт	P _{при} , кВт
В холодному стані $\theta_{\text{обм}}=26^{\circ}\text{C}$	2540	1,49	1815		61,2	49,1	11,8	377
	2680	1,48	1810	1815	68,2	55,0	19,2	379
	3030	1,67	1820		86,5	70,2	16,3	366
В нагрітому стані $\theta_{\text{обм}}=80,1^{\circ}\text{C}$	2790	1,54	1835		75,0	59,8	15,2	405
	3000	1,65	1840	1835	86,2	69,0	17,2	396
	3135	1,74	1830		95,0	75,5	19,5	412

Димірювання ватметра згідно формули складе:

$$\beta=0,0291 \delta \text{ tg}\varphi=0,0291 \cdot 0,5 \cdot 1 / 0,0035=4,2 \% \quad (2.30)$$

Поправка на результати вимірювання методом ватметра повинна бути наперед визначена порівняльними, вимірюваннями методами ватметра і мостовим при типовому випробуванні реактора.

Щоб підвищити коефіцієнт потужності при вимірюванні втрат в реакторі ватметром, рекомендується використовувати іншу схему. По цій схемі власне

споживання ланцюга напруги ватметра легко визначається додатковим вимірюванням при відключеному об'єкті або розрахунком по сумарному опорі ланцюга напруги ватметра.

У табл. 3.6 дані результати порівняльних вимірювань при кваліфікаційному випробуванні реактора методом ватметра по схемі на рисунок 3.7 при напругах менше $0,01 U_H$ і мостовим методом по схемі на рисунок 3.5, але в режимі резонансу напруг (див. рисунок 3.1).

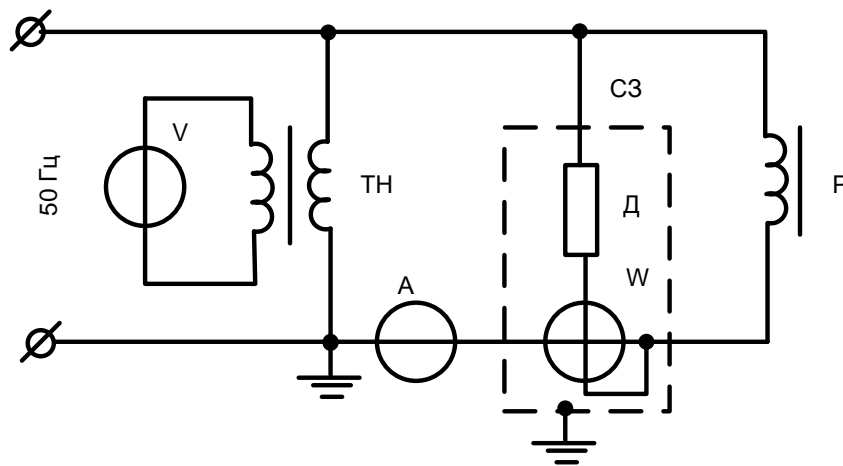


Рисунок 2.7 – Схема вимірювання індуктивності і втрат реактора РОДЦ-60000/500 при малій напрузі методом ватметра

На рисунку 2.7 показано: Р – реактор; ТН – трансформатор напруги класу 0,2 на 3000/100 В; W – ваттметр типу СLM-0,5 на 0,5 А, 150 В $\cos\varphi_H = 0,1$, $R_W = 10000$ Ом; Д – додатковий резистор класу 0,05, $R_D = 120\ 000$ Ом; А – амперметр типу Э59 на 2,5 А; V — вольтметр типу Э59 на 150 В; СЗ – стіл металевий, заземлений.

Таблиця 2.7 – Результати вимірювання індуктивності

Результати вимірювання індуктивності і втрат реактора 750 кВ при частоті 49.8 Гц			Виміряно мостом Шерінга при частоті 50 Гц				
Вимірювання ватметром при малій напрузі							
$P_{cm} \left[\left(\frac{U_u}{U} \right)^{0.1} - 1 \right], кВт$, кВт	, кВт	U%/U _н	x _L , Ом	x _{Lср} , Ом	Втрати, кВт	
						P _θ	P _{θср}
29,0	348,3		87,0	1832		330,0	
28,3	350,7	345,3	91,8	1830	1828	332,0	332,5
27,8	338,2		100	1832		335,6	
31,4	373,6		91,0		363		
28,0	368,0	385,2	99,2	1828	363	364	
27,8	384,0		103,8		366		

При напругах 87—103,8%. При вимірюванні по схемі на рисунку 3.7 застосовували малокосинусний ватметр типу GLM-0,5 класу 0,5 для $\cos\varphi_n=0,1$ з номінальними межами вимірювання 0,5 А, 150 В і з додатковим резистором до нього класу 0,05 для розширення меж вимірювання ватметра по напрузі від 225 до 1950 В. Цей ватметр допускає тривале чотирикратне перевантаження по струму і двократне перевантаження по напрузі; він може дати повне відхилення світлового променя за шкалою при $\cos\varphi=0,0125$. Для усунення впливу паразитних ємностей на результати вимірювання ватметр і додатковий резистор до нього були встановлені на заземленому металевому столі з огорожею випробувача від випадкового дотику до струмоведучих частин високої напруги.

Зміряні ватметром втрати (при напругах менше 0,01) приводилися до

номінальної напруги по формулі.

$$P_{\theta} = (P_{из} - U^2 / R_W)(U_H / U_{из})^2 - P_{ст} [(U_H / U_{из})^{0.1} - 1] \quad (2.31)$$

Ця формула припускає, що при зміні напруги в межах $U_{из} < 0,01 U_H$ до U_H втрати в сталі реактора $P_{ст}$ змінюються не пропорційно квадрату, а пропорційно ступені 1,9 відношення $U_H^2 / U_{из}^2$. Приведення зміряних ватметром втрат до розрахункової температури 75°C проводиться так само, як і при вимірюванні втрат методом моста, тобто згідно формулам в рядках 4—8 табл. 3.4. Результати цього приведення в цілях спрощення не включені табл. 3.4. З табл. 3.4 витікає, що середнє значення втрат при 26°C , приведених до номінальної напруги і зміряних ватметром, відрізняється від зміряних мостовим методом на $+3,7\%$. Різниця в середньому значенні втрат, зміряних при 80°C , не перевищує $+3\%$.

Таким чином, результати порівняльних вимірювань втрат методами, ватметра і моста показують, що метод ватметра можна застосовувати для вимірювання втрат в шунтових реакторах при операційних і приймально-здавальних випробуваннях за умови строгого дотримання всіх вимог.

2.4 Вимірювання вібрації

Згідно стандарту на реактори ефективне значення вібраційного зсуву зовнішніх частин реактора і системи охолодження не повинне перевищувати для класів напруги.

6-300 кВ включно.....	180 мкм
500 кВ.....	65 мкм (без стержневої конструкція)

750 кВ 85 мкм (без стержневої
конструкція)

При типовому випробуванні для отримання вібраційних характеристик активна частина реактора згідно його робочому положенню поміщається у власний бак з маслом і реактор в повністю зібраному вигляді з охолоджувальним пристроєм встановлюється на катках так само, як в умовах експлуатації.

При кваліфікаційному випробуванні вібрація бака вимірюється в різних точках стінки і кришки бака, а також охолоджувальної системи при номінальній частоті і номінальному напруга. При прийнятно-здавальних випробуваннях вібрація вимірюється без установки охолоджувальної системи при номінальній напрузі в найбільш характерних точках бака, виявлених при типовому випробуванні.

На МЕЗ при вимірюванні вібрації застосовують наступні прилади:

1. Віброметр типу VP-102, що стоїть з вбудованого в прилад датчика типу DGA-10 і зібраних на транзисторах і незалежних від мережі блоків посилення і індикації. Межі вимірювання (при повному відхиленні стрілки): швидкості коливання 1; 3; 10; 30 і 100 мм/с; шляхи коливання 10; 30; 100; 300 і 1000 мкм. Цим приладом на МЕЗ вимірюють вібрації в точках, віддалених на безпечну відстань від струмоведучих частин ВН.

2. Два триканальні віброметри типу SDM-132 з комплектом з трьох п'єзоелектричних приймачів (сенсорів) кожен. Прилад має внутрішній вольтметр на транзисторах і осцилограф. Межі вимірювання віброметра SDM-132: прискорення коливання 0,03, 0,1 до 1000 м·с⁻²; швидкості коливання 3 м·с⁻¹; 10-3 до 3 м·с⁻¹; шляхи коливання 3·10⁻³, 10⁻² до 10 мм.

3. Приставка типу SDM -162 до приладу SDM -132 забезпечена шістьма п'єзоелектричними датчиками для вимірювання в дев'яти точках.

Таким чином, два прилади типу SDM -132 і шестиканальна приставка SDM-162 дозволяють використовувати для вимірювання вібрації 12 сенсорів. Оскільки при кваліфікаційному випробуванні реактора точок вимірювання більше 12; то в процесі вимірювання датчики (з магнітними присосами) переставляють з одного місця на інше. Датчики калібрують до і після вимірювання вібрації.

Значення вібрації, зміряні в 48 точках бака, змінювалися від 1 до 50 мкм (рисунок 2.8). Найбільше значення мають вібрації у верхній частині бака на скошеній площині (50 мкм), але це значення все ж таки менше допускається за стандартом (85 мкм).

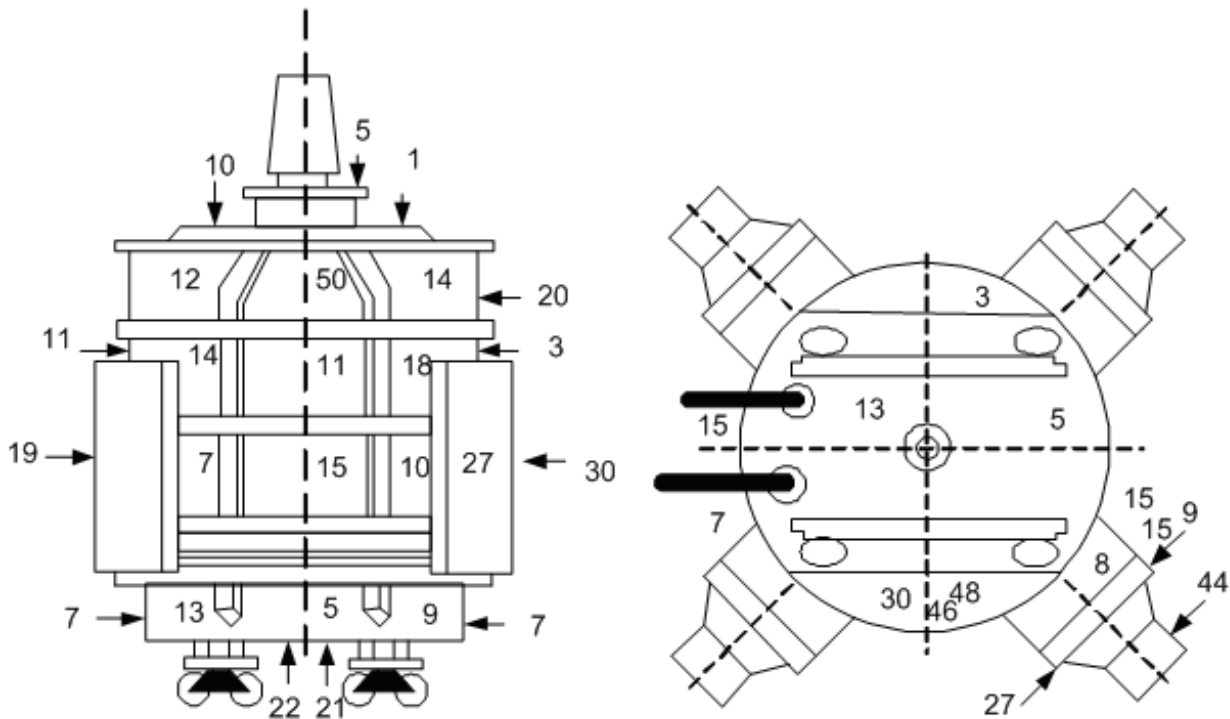


Рисунок 2.8 – Результати вимірювання вібрації бака при кваліфікаційному випробуванні реактора РОДЦ – 110000/750

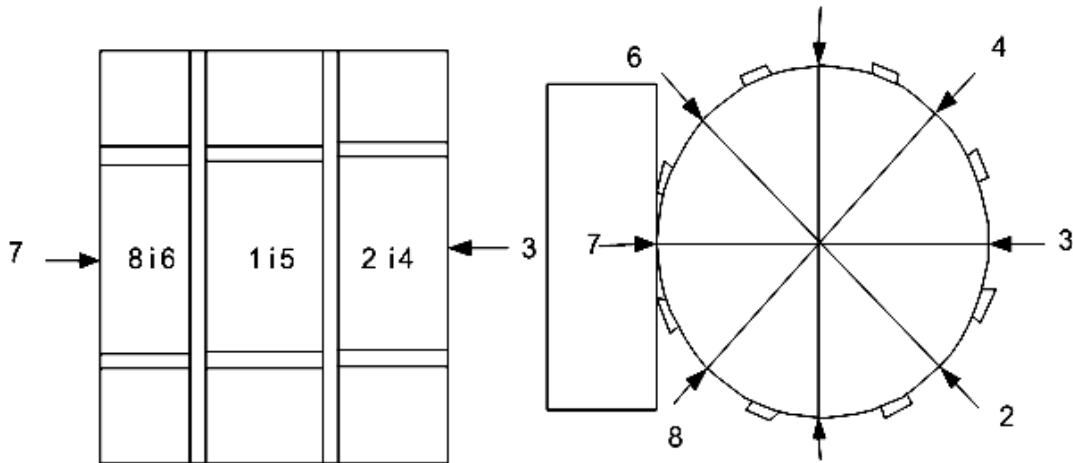


Рисунок 2.9 – Результати вимірювання вібрації бака при прийомно-здавальному випробуванні реактора РОДЦ – 110000/750

Таблиця 2.8 – Результати вимірювання вібраційних зсувів

Реактор №1		Реактор №1	
Вібраційний зсув, мкм		Вібраційний зсув, мкм	
Ампліт удне	середньоквадра тичне	ампліту дне	середньоквадра тичне
12	8,5	136	9,1
10	7,1	9	6,4
11	7,8	14	10
15	10,6	8	5,6
24	17	10	7,1
10	7,1	10	7,1
25	17,8	12	8,5
6	4,2	6	4,2

У табл. 2.7 дані результати вимірювання вібрації бака в 8 точках (рис. 2.9)

при приймально-здавальних випробуваннях двох реакторів типу РОДЦ-60000/500.

З табл. 2.8 витікає, що вібрація бака вказаних реакторів значно менше за ту, що допускається стандартом.

Висновки до другого розділу

Аналіз умов експлуатації реакторів та їх пошкоджуваність свідчить про необхідність розробки нового методу їх випробування, напругою, яка близька до номінальної та напругою $2,1U_{\text{ном}}$ підвищеної частоти (750 Гц).

3 ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ШР

3.1 Ймовірнісна математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу шунтового реактора

Системи контролю реакторів, що існують на даний час використовують у своїх розрахунках відомі математичні моделі трансформаторів, однак ці моделі мають досить суттєвий недолік – вони не можуть визначити і врахувати функціональні зв'язки між багатьма з їх контрольованих діагностичних параметрів одночасно, в одній математичній моделі. Задача ускладнюється в умовах неповноти початкових даних, коли частина параметрів відома на момент розрахунків, наприклад, з причин необхідності проведення додаткових досліджень. Для встановлення таких зв'язків дуже конструктивною технологією є нечітке моделювання. Таке моделювання дозволяє одержувати більш достовірні результати в порівнянні з результатами роботи існуючих систем діагностування.

Якщо в результаті аналізу даних, наданих представниками цеху ремонтів ШР, з літературних джерел чи за даними служби ізоляції і т.п. буде зібрана інформація щодо деяких причин виведення в ремонт високовольтних маслонаповнених (з паперово-масляною ізоляцією конденсаторного типу) реакторів, то такі дані можна упорядкувати, наприклад так, як це показано таблиці (3.1) для ШР 750 кВ (таблиця причин виведення в ремонт ШР не повна з метою спрощення наступних пояснень методу прогнозування визначення коефіцієнту загального залишкового ресурсу ШР).

В таблиці (3.1) під контрольованим діагностичним параметром розуміємо параметр, відхилення якого від норми сприяло виведенню ШР в ремонт або враховулось при виведенні ШР в ремонт. В якості діагностичних параметрів в таблиці (3.1) приведені: параметри, які характеризують стан паперово-масляної

ізоляції, стан деталей ШР.

Параметри, які характеризують стан паперово-масляної ізоляції: C_x – ємність паперово-масляної ізоляції, R – активний опір ізоляції ШР, $tg(\delta)$ – тангенс кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції, T_1 – нагрів покришки вводу, комплексна провідність Y ізоляції, хроматографічний аналіз розчинених газів (ХАРГ) масла – понаднормована зміна вмісту розчинених в трансформаторному маслі ШР газів, або понаднормова зміна відношень вмісту розчинених в трансформаторному маслі ШР газів, фізико-хімічний аналіз (ФХА) масла – ряд випробовувань, що передбачає визначення пробивної напруги, густини, температури спалаху масла а також на перевірка наявності у ньому механічних домішок та води, T_2 – температура компенсатора тиску вводу, P – тиск всередині баку реактора і рівень масла, R_2 – опір ізоляції магнітопроводу відносно баку та землі, R_3 – активний опір обмотки ШР.

Проаналізувавши дані таблиці 3.1 та літературні джерела нами була створена схема, яка показує залежний, або не залежний вплив діагностичних параметрів на коефіцієнт загального залишкового ресурсу ШР.

На рис. 3.1 не показано взаємний вплив одного контрольованого діагностичного параметра на інший, а лише показано у взаємозалежний чи не у залежний спосіб ці параметри впливають на коефіцієнт загального залишкового ресурсу ШР.

Таблиця 3.1 – Причини виведення в ремонт шунтових реакторів

Елемент ШР	Діагностичний параметр		Кількість ремонтіваних ШР, що мають понаднормове значення діагностичного параметра	
	Позначення	Назва параметра	штук	%
Паперово-масляна ізоляція	C_x	Ємність паперово-масляної ізоляції	1	2
	Y	Комплексна провідність ізоляції	6	10
	R_I	Активний опір ізоляції ШР	2	4
	$tg(\delta)$	тангенс кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції	12	22
	T_I	нагрів покриття вводу, наприклад, внаслідок погіршення значень параметрів ізоляції	2	4
Трансформаторне масло	$XAPГ$	за результатами хімічного аналізу розчинених в трансформаторному маслі газів	12	22
	ΦXA	за результатами фізико-хімічного аналізу масла	5	8

продовження таблиці 3.1

Елемент ШР	Діагностичний параметр		Кількість ремонтів ШР, що мають понаднормове значення діагностичного параметра	
	Позначення	Назва параметра	штук	%
Компенсатор тиску ввода	T_2	температура компенсатора тиску ввода	6	10
Пошкодження С подібного шунта	R_2	опір ізоляції магнітопроводу відносно баку та землі	6	10
Бак реактора	P	тиск всередині баку реактора і рівень масла	3	6
Обмотка ШР	R_3	активний опір обмотки ШР	1	2
Разом			56	100

На рис. 3.1 не показано взаємний вплив одного контрольованого діагностичного параметра на інший, а лише показано у взаємозалежний чи не у залежний спосіб ці параметри впливають на коефіцієнт загального залишкового ресурсу ШР.

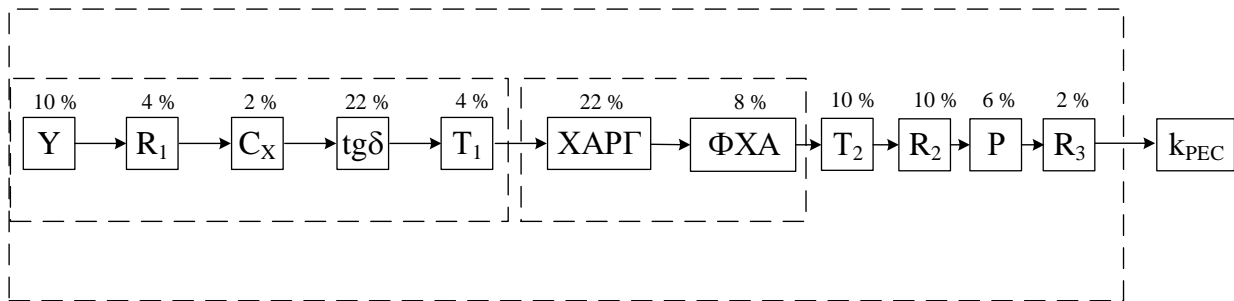


Рисунок 3.1 – Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу шунтуючого реактора.

На рис. 3.1 не показано взаємний вплив одного контрольованого діагностичного параметра на інший, а лише показано у взаємозалежний чи не у залежний спосіб ці параметри впливають на коефіцієнт загального залишкового ресурсу ШР.

На рис. 3.1 над параметром показана відсоткова кількість виявлених дефектних трансформаторів за даним параметром, яка наведена у відсотках від загальної кількості дефектних реакторів.

На рис. 3.1 послідовно позначені блоки з параметрами, відхилення яких від норми сприяло виведенню ШР в ремонт, а паралельно – блоки з параметрами, які сприяють виведенню ШР в ремонт за умови одночасного відхилення від норм цих параметрів, що зумовлено вимогами до надійності роботи ШР.

З метою отримання узагальненого показника залишкового ресурсу ШР, який вираховує значення всіх діагностичних параметрів та їх вплив, пропонується від

відомих значень діагностичних параметрів перейти до відповідних цим значенням коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному діагностичному параметру. Ці коефіцієнти визначаються у відносних одиницях за виразом (3.1) і тому характеризують сумарне напрацювання ШР від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан коли діагностичний параметр досягає граничного значення, тобто залишковий технічний ресурс [15]. Коефіцієнт залишкового ресурсу k_i по i -му діагностичному параметру:

$$k_{i_l} = \left| \frac{x_{i_l, \text{гран}} - x_{i_l, \text{ном}}}{x_{i_l, \text{гран}} - x_{i_l, \text{поч}}} \right| \quad (3.1)$$

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

Так для ШР на клас напруги 750 кВ параметр $tg(\delta)$ паперово – масляної ізоляції після ремонту дорівнював 0,2 %, а на момент контролю дорівнював 0,4 %, граничне значення цього параметру – 1,0 % [15]. Тому коефіцієнт залишкового ресурсу $k_{tg(\delta)}$ по діагностичному параметру $tg(\delta)$ визначається за виразом (3.2)

$$k_{tg(\delta)} = \left| \frac{1.0 - 0.4}{1.0 - 0.2} \right| = 0.75 (\text{в.о.}) \quad (3.2)$$

У загальному випадку структурна схема моделі коефіцієнта залишкового

ресурсу обладнання може мати вигляд показаний на рис. 3.2.

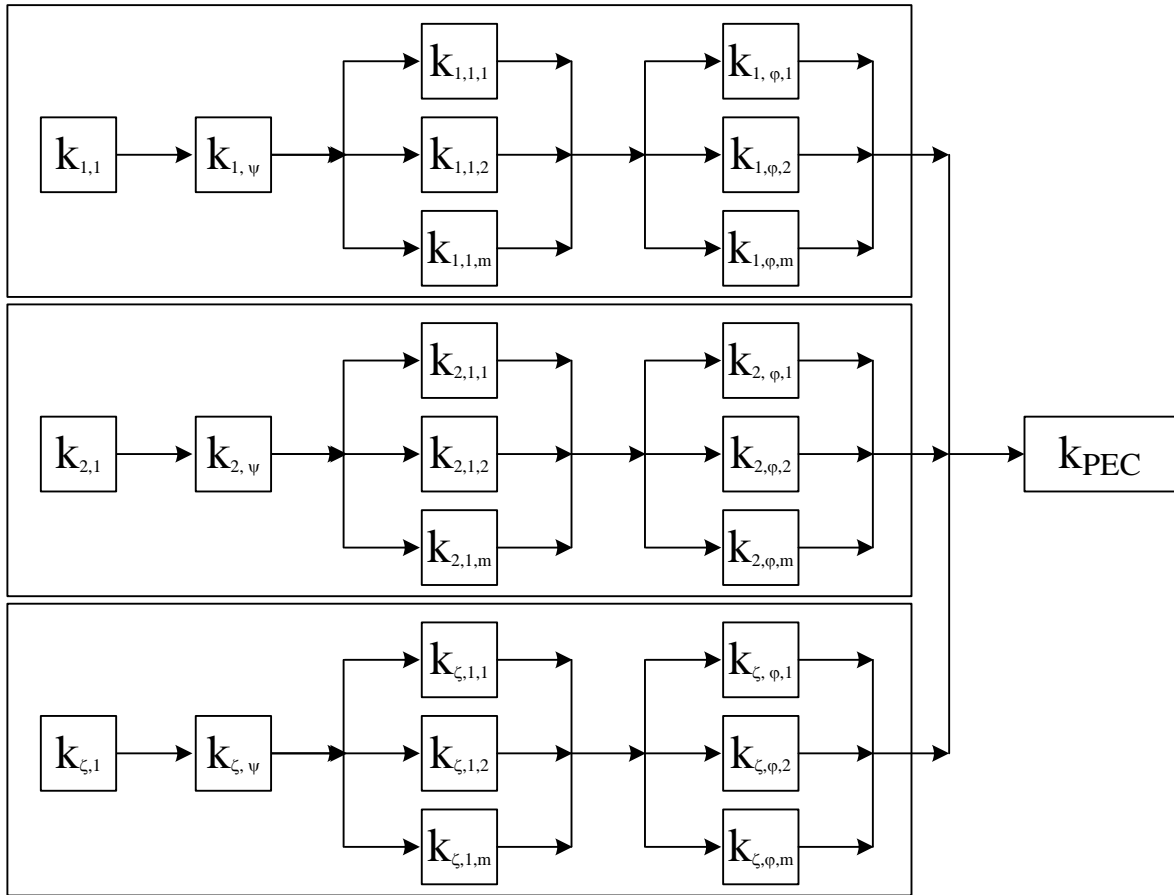


Рисунок 3.2 – Загальна структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу обладнання.

У відповідності до рис. 3.2 коефіцієнт загального залишкового ресурсу обладнання визначається за виразом (3.3):

$$k_{\text{ЗАГ.РЕС}} = 1 - \sum_{\Theta=1}^{\zeta} \left\{ 1 - \left\{ \prod_{\chi=1}^{\psi} (k_{\Theta\chi}^{P_{\Theta\chi}}) \cdot \prod_{\lambda=1}^{\varphi} \left\{ 1 - \sum_{j1=1}^{m1} [(1 - k_{\Theta\lambda j1}) \cdot P_{\Theta\lambda j1}] \right\}^{P_{\Theta\lambda}} \right\} P_{\Theta} \right\} \quad (3.3)$$

де: j_1 – номер блока в паралельній частині схеми, яка згортається; m_1 – кількість блоків в паралельній частині схеми, яка згортається; λ – номер блока в послідовній частині схеми яка складається зі згорнутих паралельних блоків; φ – кількість блоків в послідовній частині схеми яка складається зі згорнутих паралельних блоків; χ – номер блока в послідовній частині схеми яка складається з не згорнутих блоків; ψ – кількість блоків в послідовній частині схеми яка складається з не згорнутих блоків; Θ – номер блока в паралельній частині схеми яка складається зі згорнутих послідовно-паралельних блоків; ζ – кількість блоків в паралельній частині схеми, яка складається зі згорнутих послідовно-паралельних блоків; $k_{\Theta j_1}$ – коефіцієнт залишкового ресурсу по контрольованому Θj_1 –тому параметру у відповідній групі паралельних блоків які в подальшому згортаються; $p_{\Theta j_1}$ – ймовірність відхилення контрольованого параметра від норми у ШР який виведений в ремонт по Θj_1 –тому параметру у відповідній групі паралельних блоків які в подальшому згортаються; $k_{\Theta \chi}$ – коефіцієнт залишкового ресурсу по діагностичному параметру у блоку який не згортається у послідовній частині; $p_{\Theta \chi}$ – ймовірність відхилення контрольованого діагностичного параметра у блоку який не згортається у послідовній частині; $p_{\Theta \lambda}$ – ймовірність відхилення групи контрольованих параметрів від норми у згорнутій групі яка містить паралельні блоки у ШР який виведений в ремонт; p_{Θ} – ймовірність відхилення групи контрольованих параметрів від норми у згорнутій групі, яка містить послідовно-паралельні блоки у ШР, який виведений в ремонт.

У відповідності до рис. 3.2. здійснюємо згортання схеми за наступними виразами. Для послідовної частини схеми коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом (3.4) :

$$k_{pec} = \prod_{\tau=1}^{\nu} k_{\tau}^{p_{\tau}} \quad (3.4)$$

де: k_{τ} – коефіцієнт залишкового ресурсу ШР по τ -му діагностичному параметру, τ – τ -тий діагностичний параметр, ν – кількість блоків у послідовній частині схеми рис. 3.2, p_{τ} – ймовірність відхилень контрольованого параметру від гранично допустимого нормованого значення цього параметра [15] (3.5)

$$p_{\tau} = \frac{y_{\tau}}{m_2}, \quad (3.5)$$

де, y_{τ} – кількість відхилень контрольованого параметру від гранично допустимого нормованого значення цього параметра, які були виявлені шляхом контролю τ -го діагностичного параметра з загальної кількості виявлених відхилень контрольованих параметрів від гранично допустимого нормованого значення, m_2 – загальна кількість виявлених відхилень контрольованих діагностичних параметрів від їх гранично допустимих нормованих значень.

Для паралельної частини схеми коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом (3.6):

$$k_{pec\Sigma} = 1 - \sum_{j=1}^{m_1} [(1 - k_{pec,j}) p_j] \quad (3.6)$$

де: k_j – коефіцієнт залишкового ресурсу ШР по j -му діагностичному параметру, j – j -тий діагностичний параметр, m_1 – кількість блоків у паралельній частині схеми, яка згортається (рис.3.2).

У відповідності до виразів (3.5) і (3.6) та коефіцієнта загального залишкового ресурсу ШР визначається за виразом (3.7):

$$k_{\text{заг.рес}} = k_Y^{p_Y} \cdot k_{R1}^{p_{R1}} \cdot k_{C_X}^{p_{C_X}} \cdot k_{tg(\delta)}^{p_{tg(\delta)}} \cdot k_{T1}^{p_{T1}} \cdot k_{ХАРГ}^{p_{ХАРГ}} \cdot k_{ФХА}^{p_{ФХА}} \cdot k_{T2}^{p_{T2}} \cdot k_{R2}^{p_{R2}} \cdot k_P^{p_P} \cdot k_{R3}^{p_{R3}} \quad (3.7)$$

де $k_Y, k_{R1}, k_{C_X}, k_{tg(\delta)}, k_{T1}, k_{ХАРГ}, k_{ФХА}, k_{T2}, k_{T3}, k_{T4}, k_{R2}, k_{R3}$ – відомі на момент розрахунку значення коефіцієнтів залишкового ресурсу відповідно по параметрам $Y, R1, C_X, tg(\delta), T3, ХАРГ, ФХА, T2, T1, P, R2, R3$; $p_Y, p_{R1}, p_{C_X}, p_{tg(\delta)}, p_{T1}, p_{ХАРГ}, p_{ФХА}, p_{T1}, p_{T2}, p_{R2}, p_{R3}, p_P$ – ймовірності відхилень значень діагностичних параметрів від граничних допустимих нормованих значень з урахуванням загальної кількості відхилень всіх діагностичних параметрах.

Так, у відповідності до табл. 3.1 : $p_Y=0,1$ в.о., $p_R=0,04$ в.о., $p_{C_X}=0,02$ в.о., $p_{tg(\delta)}=0,22$ в.о., $p_{T1}=0,04$ в.о., $p_{ХАРГ}=0,21$ в.о., $p_{ФХА}=0,22$ в.о., $p_P=0,06$ в.о., $p_{T2}=0,1$ в.о., $p_{R2} = 0,1$ в.о., $p_{R3} = 0,02$ в.о.

3.2 Нейро-нечітка модель коефіцієнта залишкового ресурсу ШР

Теорія нечітких множин була створена досить давно, проте активно застосовуватись вона почала в наш час. Її перевагами є те, що вона оперує нечіткими вхідними даними, зв'язки між якими заздалегідь невідомі, не завжди відома їх точність і правдивість [15].

На відміну від теорії вірогідності, теорія нечітких множин використовує інші правила і залежності. Теорія вірогідності вказує можливість появи тієї чи іншої події в часі, теорія нечітких множин не розглядає події в часі, а вказує наскільки та чи інша подія близька до дійсності [15]. Для створення математичної моделі коефіцієнту залишкового ресурсу ШР було використано параметри, по кожному з яких можна робити висновок про стан ШР. Але жоден з даних параметрів не в

повній мірі характеризує технічний стан вводу, він лише вказує на певні зміни технічного стану ШР. Якщо один з цих технічних параметрів виходить за нормовані межі, це зовсім не означає що ШР повністю втратив свою роботоздатність. Тому, задача полягає у знаходженні не завжди відомих, нечітких взаємовпливів різних технічних параметрів на загальний технічний стан ШР і як можна точніше спрогнозувати динаміку розвитку пошкоджень і її вплив на загальний технічний стан.

На даному етапі розвитку сучасного комп'ютерного забезпечення, використання, для вирішення поставленої задачі, методів теорії нечітких множин є не складним завданням [15]. Це дає нам змогу врахувати значення різних діагностичних параметрів при діагностуванні ШР 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 коефіцієнту залишкового ресурсу ШР, використовуючи яку відредагувати раніше створену ймовірнісну виборку навчальних даних за якими далі можна отримати аналітичну залежність коефіцієнту залишкового ресурсу ШР від діагностичних параметрів у вигляді поліному. Ця залежність може бути використана у програмному забезпеченні сучасних мікропроцесорних пристроїв діагностування ШР. Формування початкових навчальних даних було проведено наступним чином. Для 11 вхідних параметрів моделі, які змінювались випадковим чином від 0 до 1, був визначений коефіцієнт загального залишкового ресурсу ШР. Для зручності застосування даних і спрощення поточних розрахунків у системі комп'ютерної математики MATLAB вхідні параметри моделі приводились до відносних одиниць їх відхилення від норми. Дванадцять вхідних параметрів моделі – коефіцієнти залишкового ресурсу ШР, які відповідають 11 діагностичним параметрам. Кількість параметрів може бути більшою. Фрагмент результатів розрахунків приведений в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків коефіцієнта залишкового ресурсу ШР

Діагностичні параметри											Коеф-т залишко- во го ресурсу ШР
k_Y , в.о.	k_{R1} , в.о.	k_{CX} , в.о.	$k_{tg(\delta)}$, в.о.	k_{T1} , в.о.	$k_{ХАРГ}$, в.о.	$k_{ФХА}$, в.о.	k_{T2} , в.о.	k_{R2} , в.о.	k_P , в.о.	k_{R3} , в.о.	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
...
0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,930063
Діагностичні параметри											Коеф-т залишко- во го ресурсу ШР
k_Y , в.о.	k_{R1} , в.о.	k_{CX} , в.о.	$k_{tg(\delta)}$, в.о.	k_{T1} , в.о.	$k_{ХАРГ}$, в.о.	$k_{ФХА}$, в.о.	k_{T2} , в.о.	k_{R2} , в.о.	k_P , в.о.	k_{R3} , в.о.	
1	1	1	1	1	0,06	0,92	1	1	1	1	0,653953
1	1	1	1	1	0,07	0,93	1	1	1	1	0,644808
1	1	1	1	1	1	0,09	0,91	1	1	1	0,264758
1	1	1	1	1	1	0,08	0,92	1	1	1	0,248279
...
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,92	0,08	0,924798
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,91	0,09	0,927788
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,1	0,93044

Продовження таблиці 3.2

..
0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,940
0,6	0,5	0,8	0,4	0,7	0,5	0,8	0,2	0,4	0,3	0,7		0,614
0,2	0,5	0,3	0,4	0,7	0,5	0,5	0,2	0,4	0,3	0,8		0,446
0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,7	0,5	0,5	0,3	0,4	0,6		0,492

Повна таблиця містить варіанти сполучень діагностичних параметрів та відповідних їм значень загального залишкового ресурсу ШР. Далі у рядках цієї таблиці були скореговані значення коефіцієнту залишкового ресурсу ШР (табл.3.2) шляхом опитування незалежних експертів: кваліфікованих представників цеху ремонту ШР служби ремонтів високовольтного обладнання, служби підстанцій, служби ізоляції, діагностування та грозозахисту, монтажної та інших організацій.

Таблиця 3.3 – Фрагмент скорегованих значень коефіцієнта залишкового ресурсу ШР.

Діагностичні параметри											Коефіцієнт залишкового ресурсу ШР
k_Y , в.о.	k_{R1} , в.о.	k_{CX} , в.о.	$k_{tg(\delta)}$, в.о.	k_{TL} , в.о.	$k_{ХАПГ}$, в.о.	$k_{ФХА}$, в.о.	k_{T2} , в.о.	k_{R2} , в.о.	k_P , в.о.	k_{R3} , в.о.	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0,9	0,9	0,9	0,93	0,9	0,93	0,93	0,9	0,9	0,9	0,93	0,9

Продовження таблиці 3.3

...
1	1	1	1	1	0,07	0,93	1	1	1	1	0,5
1	1	1	1	1	1	0,09	0,91	1	1	1	0,4
1	1	1	1	1	1	0,08	0,92	1	1	1	0,3
...
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,92	0,08	0,9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,91	0,09	0,85
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,1	0,95
...
0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,9
0,6	0,5	0,8	0,4	0,7	0,5	0,8	0,2	0,4	0,3	0,7	0,55
0,2	0,5	0,3	0,4	0,7	0,5	0,5	0,2	0,4	0,3	0,8	0,5
0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,7	0,5	0,5	0,3	0,4	0,6	0,6

Відкориговані дані були використані в якості навчальних даних при моделюванні в системі комп'ютерної математики MATLAB. Для цього використовувався пакет Fuzzy Logic Toolbox. За допомогою редактора ANFIS Editor (Edit – редактор, Adaptive Network of Fuzzy Inference of the System – адаптивна мережа системи нечіткого висновку) з використанням гібридного навчального алгоритму та використовуючи алгоритм нечіткого висновку Сугено [15] була отримана нейро-нечітка модель коефіцієнту залишкового ресурсу ШР 750 кВ (з використанням методу субкластеризації).

Для кожної вхідної змінної нейро-моделі використовувались по чотири лінгвістичні терми з Гаусовими функціями належності (рис. 3.3) вираз (3.8) [15]:

$$k_{pec.il} = f(x_{i1}; \sigma_{i1}; c_{i1}) = e^{-\frac{(x_{i1}-c_{i1})^2}{2\cdot\sigma_{i1}^2}} \quad (3.8)$$

У виразі (3.8): σ_{i1} та c_{i1} – числові параметри, σ_{i1}^2 – в теорії ймовірності називається дисперсією розподілу [15], а другий параметр c_{i1} – математичним очікуванням, i_1 – вхідний параметр нейро-нечіткої моделі, який відповідає діагностичному параметру, x_{i1} – значення i_1 -го вхідного параметра моделі: $x_1=k_Y$, $x_2=k_{R1}$, $x_3=k_{C_x}$, $x_4=k_{tg(\delta)}$, $x_5=k_{T1}$, $x_6=k_{XAPF}$, $x_7=k_{\Phi XA}$, $x_8=k_{T2}$, $x_9=k_{R2}$, $x_{10}=k_P$, $x_{11}=k_{R3}$.

Це такі терми, як: «нормальні» значення діагностичного параметру, «незначні відхилення» значення діагностичного параметру, «передаварійні» значення діагностичного параметру, «аварійні» значення діагностичного параметру.

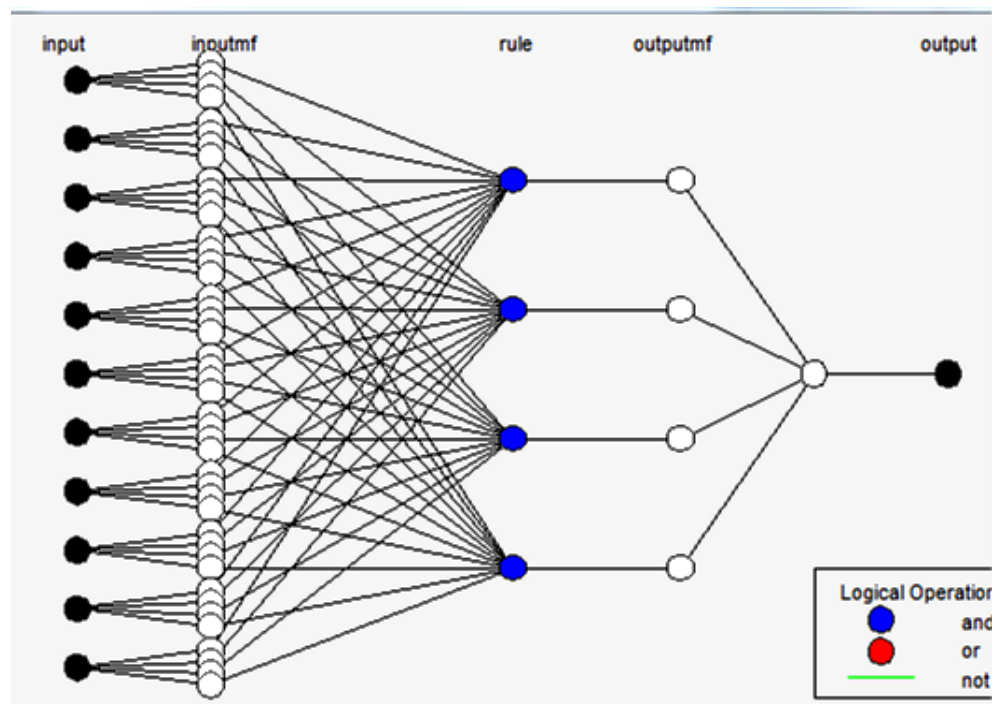


Рисунок 3.3 – Структура ANFIS-мережі ШП.

Для знаходження значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу використовуємо нечітку нелінійну авторегресійну модель коефіцієнта загально залишкового ресурсу ШР. Ця модель встановлює нечітке нелінійне перетворення між значеннями коефіцієнтів залишкового ресурсу по діагностичним параметрам та загальним коефіцієнтом залишкового ресурсу ШР (3.9).

$$k_{\text{заг.зали.рес}} = F(Y, R_1, C_x, \text{tg}(\delta), T_1, XAPГ, \Phi XA, P, T_2, R_2, R_3) \quad (3.9)$$

де: F – нечітке функціональне перетворення.

Для визначення значення коефіцієнта загально залишкового ресурсу ШР використовуємо модель логічного висновку Такагі-Сугено. В цій моделі нечіткі правила визначаються на основі заданої кількості значень «вхід-вихід» модельованого об'єкта у вигляді (3.10)

$$\text{ЯКЩО } x_1 \in A_1 \text{ ТА } x_2 \in B_2 \text{ ТА } \dots x_m \in V_i \text{ ТО } y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (3.10)$$

де: A_1, B_2, V_m – нечіткі множини посилянь, а $y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ – чітка функція висновку, зазвичай $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ – визначається у вигляді поліному вхідних змінних x_1, x_2, \dots, x_m .

Математична модель коефіцієнта загально залишкового ресурсу є системою логічних рівнянь (3.11).

$$\left. \begin{aligned}
& \text{ЯКЩО } k_Y \in \text{"нормальне"} \text{ТАк}_{R_1} \in \text{"нормальне"} \text{ТАк}_{C_x} \in \text{"нормальне"} \text{ТАк}_{I_g(\delta)} \in \text{"нормальне"} \\
& \text{ТАк}_{T_1} \in \text{"нормальне"} \text{ТАк}_{XAPF} \in \text{"нормальне"} \text{ТАк}_{\Phi XA} \in \text{"нормальне"} \text{ТАк}_{T_2} \in \text{"нормальне"} \\
& \text{ТАк}_{R_2} \in \text{"нормальне"} \text{ТАк}_P \in \text{"нормальне"} \text{ТАк}_{R_3} \in \text{"нормальне"} \text{ТО} \\
& k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{11} \cdot k_Y + a_{12} \cdot k_{R_1} + a_{13} \cdot k_{C_x} + a_{14} \cdot k_{I_g(\delta)} + a_{15} \cdot k_{T_1} + a_{16} \cdot k_{XAPF} + a_{17} \cdot k_{\Phi XA} \\
& + a_{18} \cdot k_{T_2} + a_{19} \cdot k_{R_2} + a_{10} \cdot k_P + a_{111} \cdot k_{R_3} \\
& \text{ЯКЩО } k_Y \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТАк}_{R_1} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТАк}_{C_x} \in \text{"незначне відхилення"} \\
& \text{ТАк}_{I_g(\delta)} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТАк}_{T_1} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТАк}_{XAPF} \in \text{"незначне відхилення"} \\
& \text{ТАк}_{\Phi XA} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТАк}_{T_2} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТАк}_{R_2} \in \text{"незначне відхилення"} \\
& \text{ТАк}_P \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТАк}_{R_3} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТО} \\
& k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{21} \cdot k_Y + a_{22} \cdot k_{R_1} + a_{23} \cdot k_{C_x} + a_{24} \cdot k_{I_g(\delta)} + a_{25} \cdot k_{T_1} + a_{26} \cdot k_{XAPF} + a_{27} \cdot k_{\Phi XA} + \\
& + a_{28} \cdot k_{T_2} + a_{29} \cdot k_{R_2} + a_{210} \cdot k_P + a_{211} \cdot k_{R_3} \quad , \\
& \text{ЯКЩО } k_Y \in \text{"передаварійне"} \text{ТАк}_{R_1} \in \text{"передаварійне"} \text{ТАк}_{C_x} \in \text{"передаварійне"} \text{ТА} \\
& k_{I_g(\delta)} \in \text{"передаварійне"} \text{ТАк}_{T_1} \in \text{"передаварійне"} \text{ТАк}_{XAPF} \in \text{"передаварійне"} \\
& \text{ТАк}_{\Phi XA} \in \text{"передаварійне"} \text{ТАк}_{T_2} \in \text{"передаварійне"} \\
& \text{ТАк}_{R_2} \in \text{"передаварійне"} \text{ТАк}_P \in \text{"передаварійне"} \text{ТАк}_{R_3} \in \text{"передаварійне"} \text{ТО} \\
& k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{31} \cdot k_Y + a_{32} \cdot k_{R_1} + a_{33} \cdot k_{C_x} + a_{34} \cdot k_{I_g(\delta)} + a_{35} \cdot k_{T_1} + a_{36} \cdot k_{XAPF} + a_{37} \cdot k_{\Phi XA} + \\
& + a_{38} \cdot k_{T_2} + a_{39} \cdot k_{R_2} + a_{310} \cdot k_P + a_{311} \cdot k_{R_3} \\
& \text{ЯКЩО } k_Y \in \text{"аварійне"} \text{ТАк}_{R_1} \in \text{"аварійне"} \text{ТАк}_{C_x} \in \text{"аварійне"} \text{ТАк}_{I_g(\delta)} \in \text{"аварійне"} \\
& \text{ТАк}_{T_1} \in \text{"аварійне"} \text{ТАк}_{XAPF} \in \text{"аварійне"} \text{ТАк}_{\Phi XA} \in \text{"аварійне"} \text{ТАк}_{T_2} \in \text{"аварійне"} \\
& \text{ТАк}_{R_2} \in \text{"аварійне"} \text{ТАк}_P \in \text{"аварійне"} \text{ТАк}_{R_3} \in \text{"аварійне"} \text{ТО} \\
& k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{41} \cdot k_Y + a_{42} \cdot k_{R_1} + a_{43} \cdot k_{C_x} + a_{44} \cdot k_{I_g(\delta)} + a_{45} \cdot k_{T_1} + a_{46} \cdot k_{XAPF} + a_{47} \cdot k_{\Phi XA} + \\
& + a_{48} \cdot k_{T_2} + a_{49} \cdot k_{R_2} + a_{410} \cdot k_P + a_{411} \cdot k_{R_3} \\
& \dots
\end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Вихід моделі $k_{\text{заг.зал.рес.}}$ знаходиться, як зрівноважена сума висновків (3.11) бази правил, записаних у вигляді системи логічних рівнянь (3.12).

$$k_{\text{заг.зал.рес}} = \sum_{j_2=1}^{m_3} w_{j_2} \left(\begin{array}{l} a_{j_21} \cdot k_Y + a_{j_22} \cdot k_{R_1} + a_{j_23} \cdot k_{C_x} + a_{j_24} \cdot k_{I_g(\delta)} \\ + a_{j_25} \cdot k_{T_1} + a_{j_26} \cdot k_{XAPF} + a_{j_27} \cdot k_{\Phi XA} \\ + a_{j_28} \cdot k_{T_2} + a_{j_29} \cdot k_{R_2} + a_{j_210} \cdot k_P + a_{j_211} \cdot k_{R_3} + c_{j_2} \end{array} \right), \quad (3.12)$$

де: $0 \leq w_{j_2} \leq 1$ – степінь виконання (вага) j_2 -го правила, яка визначається відповідністю реальних змін діагностичних параметрів ШР, що відображені у j_2 -му правилі (3.13)

$$\begin{aligned}
w_1 &= \frac{\Omega_1}{\zeta} \\
w_2 &= \frac{\Omega_2}{\zeta} \\
w_3 &= \frac{\Omega_3}{\zeta} \quad , \\
w_4 &= \frac{\Omega_4}{\zeta}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

де:

$$\zeta = \sum_{j=1}^{m_3} \left[\mu_j(k_Y) \cdot \mu_j(k_{R1}) \cdot \mu_j(k_{Cx}) \cdot \mu_j(k_{tg(\delta)}) \cdot \mu_j(k_{T1}) \cdot \mu_j(k_{XAPF}) \cdot \mu_j(k_{\Phi XA}) \cdot \mu_j(k_{T2}) \cdot \mu_j(k_{R2}) \cdot \mu_j(k_P) \cdot \mu_j(k_{R3}) \right] \quad ,$$

$$\begin{aligned}
\Omega 1 &= \mu_{"1"}(k_Y) \cdot \mu_{"1"}(k_{R1}) \cdot \mu_{"1"}(k_{Cx}) \cdot \mu_{"1"}(k_{tg(\delta)}) \cdot \mu_{"1"}(k_{T1}) \cdot \mu_{"1"}(k_{XAPF}) \cdot \mu_{"1"}(k_{\Phi XA}) \cdot \\
&\cdot \mu_{"1"}(k_{T2}) \cdot \mu_{"1"}(k_{R2}) \cdot \mu_{"1"}(k_P) \cdot \mu_{"1"}(k_{R3})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Omega 2 &= \mu_{"2"}(k_Y) \cdot \mu_{"2"}(k_{R1}) \cdot \mu_{"2"}(k_{Cx}) \cdot \mu_{"2"}(k_{tg(\delta)}) \cdot \mu_{"2"}(k_{T1}) \cdot \mu_{"2"}(k_{XAPF}) \cdot \mu_{"2"}(k_{\Phi XA}) \cdot \\
&\mu_{"2"}(k_{T2}) \cdot \mu_{"2"}(k_{R2}) \cdot \mu_{"2"}(k_P) \cdot \mu_{"2"}(k_{R3})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Omega 3 &= \mu_{"3"}(k_Y) \cdot \mu_{"3"}(k_{R1}) \cdot \mu_{"3"}(k_{Cx}) \cdot \mu_{"3"}(k_{tg(\delta)}) \cdot \mu_{"3"}(k_{T1}) \cdot \mu_{"3"}(k_{XAPF}) \cdot \mu_{"3"}(k_{\Phi XA}) \cdot \\
&\mu_{"3"}(k_{T2}) \cdot \mu_{"3"}(k_{R2}) \cdot \mu_{"3"}(k_P) \cdot \mu_{"3"}(k_{R3})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Omega 4 &= \mu_{"4"}(k_Y) \cdot \mu_{"4"}(k_{R1}) \cdot \mu_{"4"}(k_{Cx}) \cdot \mu_{"4"}(k_{tg(\delta)}) \cdot \mu_{"4"}(k_{T1}) \cdot \mu_{"4"}(k_{XAPF}) \cdot \mu_{"4"}(k_{\Phi XA}) \cdot \\
&\mu_{"4"}(k_{T2}) \cdot \mu_{"4"}(k_{R2}) \cdot \mu_{"4"}(k_P) \cdot \mu_{"4"}(k_{R3})
\end{aligned}$$

$$\mu_j(k_w), \mu_j(k_{R1}), \mu_j(k_{Cx}), \mu_j(k_{tg(\delta)}), \mu_j(k_{T1}), \mu_j(k_{XAPF}), \mu_j(k_{\Phi XA}), \mu_j(k_{T1}), \mu_j(k_{T2}), \mu_j(k_{R2}), \mu_j(k_P)$$

– функції належності значень коефіцієнтів залишкового ресурсу контрольованих діагностичних параметрів до відповідної нечіткої множини значень цих параметрів відповідного правила (j_2 – номер правила, m_3 – кількість правил),

$$\mu_1(k_Y) = \mu_{\text{нормальне}}(k_Y), \quad \mu_1(k_{R1}) = \mu_{\text{нормальне}}(k_{R1}), \quad \mu_1(k_{Cx}) = \mu_{\text{нормальне}}(k_{Cx}),$$

$$\begin{aligned} \mu_1(\mathbf{k}_{tg(\delta)}) &= \mu_{\text{нормальне}}(\mathbf{k}_{tg(\delta)}), & \mu_1(\mathbf{k}_{T1}) &= \mu_{\text{нормальне}}(\mathbf{k}_{T1}), & \mu_1(\mathbf{k}_{ХАРГ}) &= \mu_{\text{нормальне}}(\mathbf{k}_{ХАРГ}), \\ \mu_1(\mathbf{k}_{ФХА}) &= \mu_{\text{нормальне}}(\mathbf{k}_{ФХА}), & \mu_1(\mathbf{k}_{T2}) &= \mu_{\text{нормальне}}(\mathbf{k}_{T2}), & \mu_1(\mathbf{k}_{T2}) &= \mu_{\text{нормальне}}(\mathbf{k}_{T2}), \\ \mu_1(\mathbf{k}_P) &= \mu_{\text{нормальне}}(\mathbf{k}_P), & \mu_1(\mathbf{k}_{R3}) &= \mu_{\text{нормальне}}(\mathbf{k}_{R3}). \end{aligned}$$

Налаштування моделі полягає у визначенні параметрів функцій належності і рівнянь висновку. Терми значень лінгвістичних змінних задаються у вигляді Гаусових функцій належності. Необхідно визначити середньо квадратичне відхилення σ_{k_Y} , $\sigma_{k_{R1}}$, $\sigma_{k_{Cx}}$, $\sigma_{k_{tg(\delta)}}$, $\sigma_{k_{T1}}$, $\sigma_{k_{ХАРГ}}$, $\sigma_{k_{ФХА}}$, $\sigma_{k_{T2}}$, $\sigma_{k_{R2}}$, σ_{k_P} , $\sigma_{k_{R3}}$ Гаусових функцій належності, і параметри рівнянь висновку ($a_{11} - a_{44}$, $c_1 - c_4$). Для полегшення налаштування та адаптації структури розробленої моделі до реальних параметрів конкретного ШР модель реалізується у вигляді адаптивної нейронечіткої багатошарової мережі прямого розповсюдження ANFIS. ANFIS являє собою найпростішу мережу прямого розповсюдження яка містить адаптивні вузли, використовуючи правила навчання параметри цих вузлів налаштовуються так, щоб мінімізувати похибку між реальним виходом моделі $k_{заг.зал.рес.мод.}$ та реальним коефіцієнтом загально залишкового ресурсу $k_{заг.зал.рес.}$ ШР (3.18):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N_I} \sum_{k_3=0}^{N_I-1} (k_{заг.зал.рес.мод.k_3} - k_{заг.зал.рес.k_3})^2} \rightarrow \min, \quad (3.14)$$

де: N_I – кількість рядків у навчальній вибірці, k_3 – номер рядка в навчальній вибірці починаючи з рядка з порядковим номером «0».

Використовується гібридний навчальний алгоритм, кожна епоха якого, складається з прямого та зворотного оптимізаційних розрахунків. При прямому розрахунку початкова інформація про значення вектора входу k_Y , k_{R1} , k_{Cx} , $k_{tg(\delta)}$, k_{T1} , $k_{ХАРГ}$, $k_{ФХА}$, k_{T2} , k_{R2} , k_P , k_{R3} та виходу $k_{заг.зал.рес}$ використовується для визначення

параметрів висновку $a_{1,1} - a_{4,4}$ та $c_{1,1} - c_{4,4}$ методом найменших квадратів. Далі розраховується похибка ANFIS-мережі. При зворотному розрахунку методом градієнтного спуску визначаються параметри послань які мінімізують середньо квадратичну похибку моделі.

Модель загального залишкового ресурсу ШР реалізована у вигляді ANFIS-мережі з використанням прикладних програм Fuzzy Logic Toolbox системи MathLab. Структура ANFIS-мережі показана на рисунку 3.3 .

З метою зменшення часу на навчання нейро-нечіткої моделі в системі комп'ютерної математики MATLAB [15], використовуємо метод субкластеризації. Субкластеризація – це об'єднання об'єктів у групи на основі однаковості ознак для об'єктів однієї групи та неоднаковості ознак між групами. Більшість алгоритмів кластеризації не ґрунтуються на традиційних для статистичних методів припущеннях. Вони можуть використовуватись в умовах майже повної відсутності інформації про закони розподілу даних. Кластеризацію використовують для об'єктів з кількісними (числовими), якісними або змішаними ознаками. Початковою інформацією для кластеризації є матриця спостережень, кожен рядок якої являє собою значення n ознак одного з M кластеризації. Задача кластеризації полягає в розбитті об'єктів на декілька підмножин (кластерів) в яких об'єкти схожі між собою ніж з об'єктами з інших кластерів. В матричному просторі «однаковість» зазвичай визначають через відстань. Відстань може розраховуватись як між початковими об'єктами (рядками матриці) так і від цих об'єктів прототипу кластерів. Зазвичай координати прототипів не відомі і вони знаходяться одночасно з розбиттям даних на кластери. Використовувались наступні параметри методу кластеризації: рівень впливу вхідних змінних (Range of influence) –0.8; коефіцієнт послаблення (Squash factor) – 1.1; коефіцієнт який встановлює у скільки раз потенціал даної точки має бути вищим за потенціал центра першого кластера для того, щоб центром одного

з кластерів була призначена точка яка розглядається (Accept radio) – 0.5; коефіцієнт який встановлює у скільки разів потенціал даної точки має бути меншим за потенціал центра першого кластера, щоб ця точка була виключена з можливих центрів кластерів (Reject radio) – 0.15.

Для навчання мережі використовувався гібридний алгоритм навчання. Після тридцяти епох навчання середньо квадратична похибка навчання склала 0.011 в.о. В результаті навчання були отримані параметри Гаусових функцій належності які в подальшому були використані при створенні нейро-нечіткої моделі ШР.

Тому, наприклад, при подальшому моделюванні, для коефіцієнта залишкового ресурсу k_Y діагностичного параметра Y першого правила значення Гаусової функції належності були взяті наступні значення параметрів: $\delta_Y = 0.3186$ в.о., $C_Y = 0.8993$ в.о.

У відповідності до виразу (3.14) були введені наступні параметри рівнянь висновків правил (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Параметри висновків правил нейро-нечіткої моделі ШР

Номер правила, j_2	Параметри рівняння висновку											
	$a_{j,2,1}$	$a_{j,2,2}$	$a_{j,2,3}$	$a_{j,2,4}$	$a_{j,2,5}$	$a_{j,2,6}$	$a_{j,2,7}$	$a_{j,2,8}$	$a_{j,2,9}$	$a_{j,2,10}$	$a_{j,2,11}$	c_{j2}
1	0.09943	0.009774	0.009213	0.09896	0.09896	0.09896	0.09896	0.09896	0.09896	0.09896	0.09896	0.09896
2	16.66	-16.36	0.01225	0.09188	0.09188	0.09188	0.09188	0.09188	0.09188	0.09188	0.09188	0.09188
3	-31.97	33.52	0.09652	0.06312	0.06312	0.06312	0.06312	0.06312	0.06312	0.06312	0.06312	$1.74 \cdot 10^{-8}$
4	136.5	-0.6256	-1.699	0.1138	0.1138	0.1138	0.1138	0.1138	0.1138	0.1138	0.1138	0.1138

З урахуванням проведених ітераційних обчислювальних експериментів визначений вектор параметрів функцій приналежності (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Параметри функцій належності.

Діагностичні параметри	Вхідні параметри моделі	Назва терма (нечіткої множини значень вхідних параметрів)	Номер правила	Параметри функцій належності	
				б	с
<i>I</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Y</i>	<i>k_Y</i>	нормальні	1	0,08891	0,6246
		незначні відхилення	2	0,09491	0,3543
		передаварійні	3	0,11190	0,0892
		аварійні	4	0,09070	-0,04993
<i>RI</i>	<i>k_{RI}</i>	нормальні	1	0,29800	1,153
		незначні відхилення	2	0,22540	0,3668
		передаварійні	3	0,27850	0,2889
		аварійні	4	0,27100	0,9023
<i>C_x</i>	<i>k_{C_x}</i>	Нормальні	1	0,24410	1,214
		незначні відхилення	2	0,2870	1,0030
		передаварійні	3	0,2870	1,0030
		аварійні	4	0,2870	0,9954
<i>Tg(δ)</i>	<i>k_{Tg(δ)}</i>	нормальні	1	0,2828	1,0000
		незначні відхилення	2	0,2828	1,0000
		передаварійні	3	0,2831	0,3650
		аварійні	4	0,2830	0,9259
<i>ХАРГ</i>	<i>k_{ХАРГ}</i>	нормальні	1	0,2830	1,0580
		незначні відхилення	2	0,2830	0,9180
		передаварійні	3	0,2831	0,3383

Продовження таблиці 3.5

		аварійні	4	0,2830	0,9841
ΦX_A	$k_{\Phi X_A}$	нормальні	1	0,2830	0,9816
		незначні відхилення	2	0,2830	1,0630
		передаварійні	3	0,2511	0,3153
		аварійні	4	0,3150	1,0590
R_2	k_{R_2}	нормальні	1	0,2832	1,1670
		незначні відхилення	2	0,2810	1,0340
		передаварійні	3	0,2822	1,0290
		аварійні	4	0,2847	-0,0496
T_1	k_{T_1}	нормальні	1	0,2841	1,1000
		незначні відхилення	2	0,2810	0,9847
		передаварійні	3	0,2797	0,8049
		аварійні	4	0,2875	-0,0279
P	k_P	нормальні	1	0,2928	0,4471
		незначні відхилення	2	0,2634	0,2779
		передаварійні	3	0,2785	0,1179
		аварійні	4	0,2920	-0,0240
T_2	k_{T_2}	нормальні	1	0,2655	0,4838
		незначні відхилення	2	0,1963	0,2951
		передаварійні	3	0,2771	0,1361
		аварійні	4	0,3004	-0,0108
R_3	R_3	нормальні	1	0,1699	0,5437
		незначні відхилення	2	0,1699	0,3226
		передаварійні	3	0,1283	0,1199

Продовження таблиці 3.5

		аварійні	4	0,2694	-0,0217
--	--	----------	---	--------	---------

З урахуванням даних таблиць 3.4, 3.5 та виразу (3.15) отримуємо математичну модель коефіцієнта загально залишкового ресурсу у вигляді (3.19)

$$\begin{aligned}
 & \text{ЯКЩО } k_Y \text{ "нормальне" } \mathbf{ТА} k_{R_1} \text{ "нормальне" } \mathbf{ТА} k_{C_x} \text{ "нормальне" } \mathbf{ТА} k_{I_g(\delta)} \text{ "нормальне" } \\
 & \mathbf{ТА} k_{T_1} \text{ "нормальне" } \mathbf{ТА} k_{XAPG} \text{ "нормальне" } \mathbf{ТА} k_{\Phi XA} \text{ "нормальне" } \mathbf{ТА} k_{T_2} \text{ "нормальне" } \\
 & \mathbf{ТА} k_{R_1} \text{ "нормальне" } \mathbf{ТА} k_P \text{ "нормальне" } \mathbf{ТА} k_{R_2} \text{ "нормальне" } \mathbf{ТО} \\
 k_{\text{заг.зал.рес}} &= 0,09943k_Y + 0,009774k_{R_1} + 0,009213k_{C_x} + 0,09896k_{I_g(\delta)} + 0,09896k_{T_3} + 0,09896k_{XAPG} + 0,09896 \\
 & + 0,09896k_{T_2} + 0,09896k_{R_1} + 0,09896k_P + 0,09896k_{R_3} + 0,09896 \\
 & \text{ЯКЩО } k_Y \text{ "незначне відхилення" } \mathbf{ТА} k_{R_1} \text{ "незначне відхилення" } \mathbf{ТА} k_{C_x} \text{ "незначне відхилення" } \\
 & \mathbf{ТА} k_{I_g(\delta)} \text{ "незначне відхилення" } \mathbf{ТА} k_{\Phi XA} \text{ "незначне відхилення" } \mathbf{ТА} k_{XAPG} \text{ "незначне відхилення" } \\
 & \mathbf{ТА} k_{T_1} \text{ "незначне відхилення" } \mathbf{ТА} k_{T_2} \text{ "незначне відхилення" } \mathbf{ТА} k_{R_2} \text{ "незначне відхилення" } \\
 & \mathbf{ТА} k_P \text{ "незначне відхилення" } \mathbf{ТА} k_{R_3} \text{ "незначне відхилення" } \mathbf{ТО} \\
 k_{\text{заг.зал.рес}} &= 16,66k_Y + 16,36k_{R_1} + 0,01225k_{C_x} + 0,09188k_{I_g(\delta)} + 0,09188k_{T_1} + 0,09188k_{XAPG} + 0,09188k_{\Phi XA} + \\
 & + 0,09188k_{T_2} + 0,09188k_{R_2} + 0,09188k_P + 0,09188k_{R_3} + 0,09188 \quad (3.1) \\
 & \text{ЯКЩО } k_Y \text{ "передаварійне" } \mathbf{ТА} k_{R_1} \text{ "передаварійне" } \mathbf{ТА} k_{C_x} \text{ "передаварійне" } \\
 & \mathbf{ТА} k_{I_g(\delta)} \text{ "передаварійне" } \mathbf{ТА} k_{\Phi XA} \text{ "передаварійне" } \mathbf{ТА} k_{XAPG} \text{ "передаварійне" } \quad 9) \\
 & \mathbf{ТА} k_{T_1} \text{ "передаварійне" } \mathbf{ТА} k_{T_2} \text{ "передаварійне" } \mathbf{ТА} k_{R_2} \text{ "передаварійне" } \\
 & \mathbf{ТА} k_P \text{ "передаварійне" } \mathbf{ТА} k_{R_3} \text{ "передаварійне" } \mathbf{ТО} \\
 k_{\text{заг.зал.рес}} &= -31,97k_Y + 33,52k_{R_1} + 0,09652k_{C_x} + 0,06312k_{I_g(\delta)} + 0,06312k_{T_1} + 0,06312k_{XAPG} + 0,06312k_{\Phi XA} + \\
 & + 0,06312k_{T_2} + 0,6312k_{R_2} + 0,6312k_P + 0,06312k_{R_3} + 1,74 \cdot 10^{-8} \cdot \\
 & \text{ЯКЩО } k_Y \text{ "аварійне" } \mathbf{ТА} k_{R_1} \text{ "аварійне" } \mathbf{ТА} k_{C_x} \text{ "аварійне" } \mathbf{ТА} k_{I_g(\delta)} \text{ "аварійне" } \\
 & \mathbf{ТА} k_{T_1} \text{ "аварійне" } \mathbf{ТА} k_{XAPG} \text{ "аварійне" } \mathbf{ТА} k_{\Phi XA} \text{ "аварійне" } \mathbf{ТА} k_{T_2} \text{ "аварійне" } \\
 & \mathbf{ТА} k_{R_2} \text{ "аварійне" } \mathbf{ТА} k_P \text{ "аварійне" } \mathbf{ТА} k_{R_3} \text{ "аварійне" } \mathbf{ТО} \\
 k_{\text{заг.зал.рес}} &= 136,5k_Y - 0,6256k_{R_1} - 1,699k_{C_x} + 0,1138k_{I_g(\delta)} + 0,1138k_{T_1} + 0,1138k_{XAPG} + 0,1138k_{\Phi XA} + \\
 & + 0,1138k_{T_2} + 0,1138k_{R_2} + 0,1138k_P + 0,1138k_{R_3} + 0,1138 \\
 & \dots
 \end{aligned}$$

На рис. 3.3 показаний фрагмент віконної заставки редактора адаптивної мережі системи нечіткого висновку (ANFIS Editor) пакету Fuzzy Logic Toolbox

системи комп'ютерної математики MATLAB. Ця мережа має одинадцять входів, один вихід та передбачає використання алгоритму нечіткого висновку Сугено.

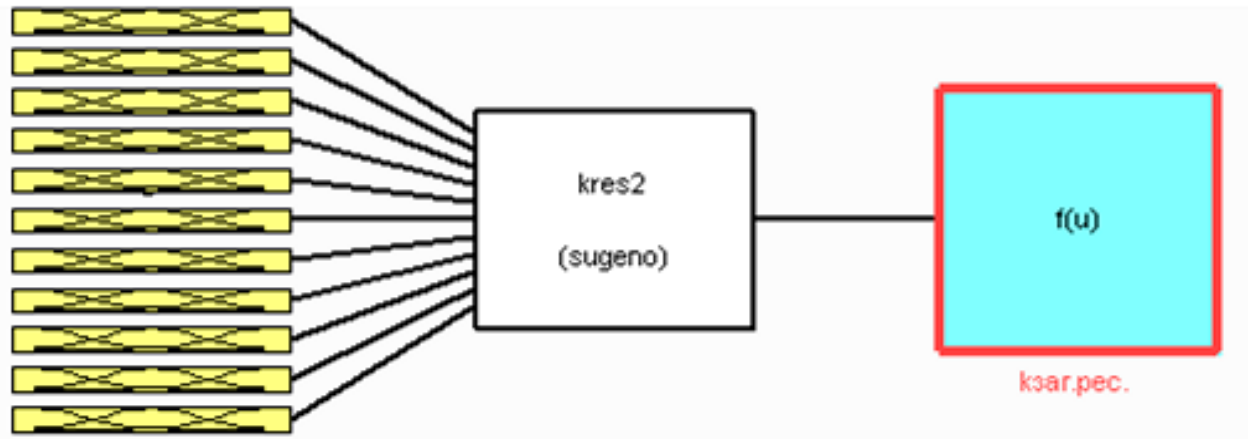


Рисунок 3.3 – Фрагмент віконної заставки редактора ANFIS.

На рис. 3.4 показана екранна заставка системи комп'ютерної математики MATLAB підчас формування структури нейро-нечіткої моделі ШР.

Рисунок 3.4 – Формування структури нейро-нечіткої моделі ШР.

З рис. 3.3 видно, що підчас формування структури нейро-нечіткої моделі ШР було задано одинадцять входів та один вихід цієї моделі. Кожний з одинадцяти входів має по чотири терми. Тобто кожна множина можливих значень вхідних

параметрів моделі умовно поділена на чотири підмножини: «нормальні» значення вхідного параметру, «незначні відхилення» значення вхідного параметру, «передаварійні» значення вхідного параметру, «аварійні» значення вхідного параметру. Степінь належності кожного значення вхідного параметру до відповідної цьому параметру множини значень визначається Гаусовою функцією належності.

Модель призначена для знаходження числового значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу ШР, тому має один вихід. Це числове значення знаходиться шляхом рішення лінійного рівняння, яке описує залежність коефіцієнта загального залишкового ресурсу ШР від вхідних параметрів.

З таблиці 3.1 вводимо параметри функцій належності (рис. 3.5).

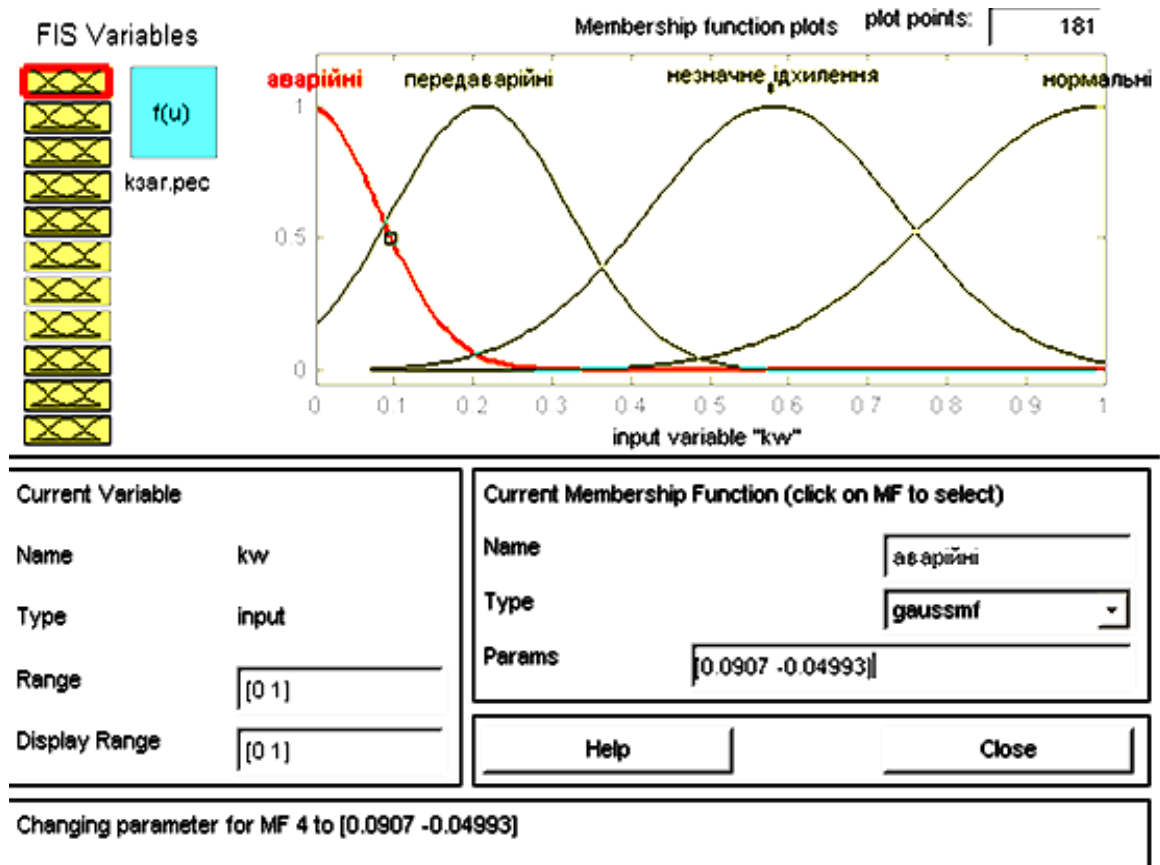


Рисунок 3.5 – Введення параметрів функції належності

На рис. 3.5 показано, що степінь належності значення коефіцієнта k_Y залишкового ресурсу по параметру Y до підмножини «аварійні» значення визначається рівнянням Гаусової функції $\mu(k_Y) = f(k_Y, \sigma, c)$ з параметрами $\sigma = 0,0907$ в.о. та $c = -0,04993$ в.о., $k_Y \in 0,1$ в.о. та $\mu(k_Y) \in 0,1$ в.о. З таблиці 3.1 вводимо параметри рівнянь висновків правил (рис. 3.6), які дозволяють обчислити коефіцієнт загального залишкового ресурсу ШР.

На рис. 3.6 показані: діапазон можливих значень коефіцієнта загального залишкового ресурсу ШР $k_{\text{заг.рес}} = 0 \div 1$ в.о., параметри рівняння висновку першого правила: 0.09943, 0.009774, 0.009213, 0.09896, 0.09896, 0.09896, 0.09896, 0.09896, 0.09896, 0.09896, 0.09896, 0.09896.

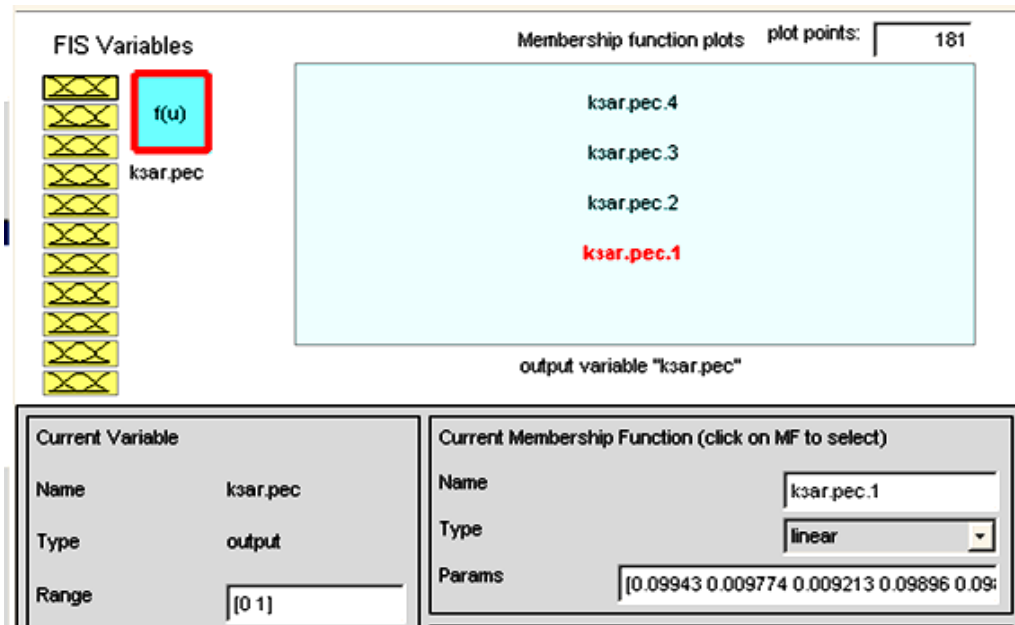


Рисунок 3.6 – Введення параметрів рівняння висновку правила

У відповідності до табл. 3.2 з файлу з розширенням .dat вводимо вибірку навчальних даних (рис. 3.7).

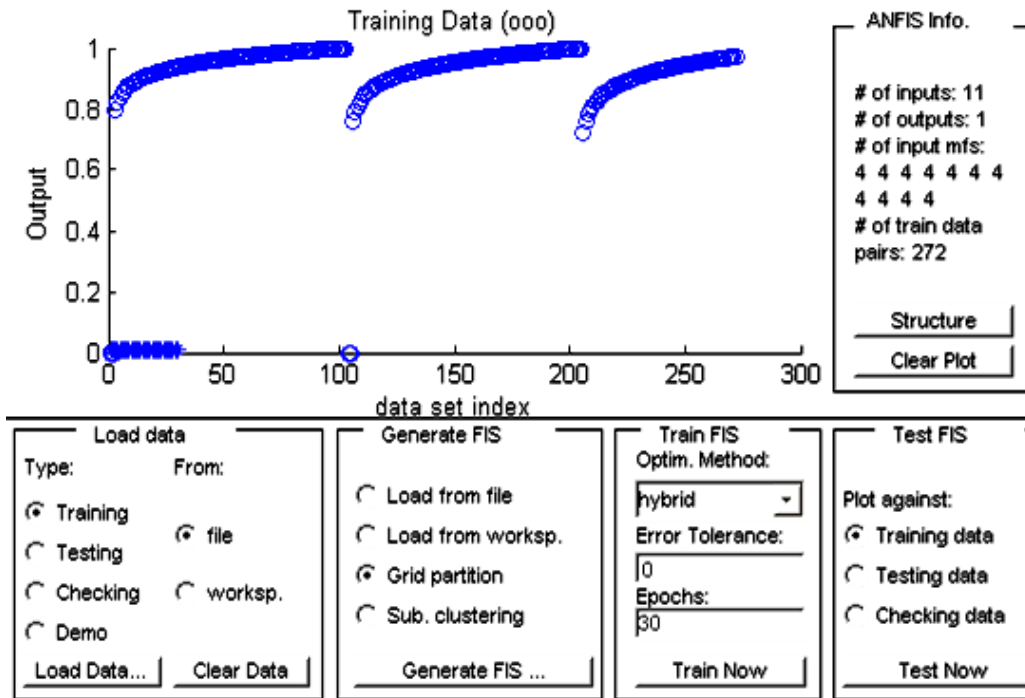


Рисунок 3.7 – Введення вибірки навчальних даних з файлу

Далі навчаємо модель. Навчання передбачає 30 епох. Результати навчання показані на рис. 3.7. Ознакою припинення навчання є незмінність середньоквадратичної похибки навчання. На рис. 3.8 показано, що середньоквадратична похибка навчання, яке тривало 30 епох, дорівнює 0.011 в.о.

Отримана нейро-нечітка модель дозволяє визначити значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу трансформатора струму в залежності від значень вхідних параметрів – коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному з контрольованих діагностичних параметрів. Так: якщо кожний з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 0,5 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу дорівнює 0,64 в.о. (рис. 3.9), якщо кожний з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 1 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу (з похибкою 1%) дорівнює 1,01 в.о., якщо кожний з коефіцієнтів залишкового ресурсу

діагностичних параметрів буде дорівнювати 0 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу (з похибкою $3,16 \cdot 10^{-80}\%$) дорівнює 0 в.о. (Рис. 3.11)

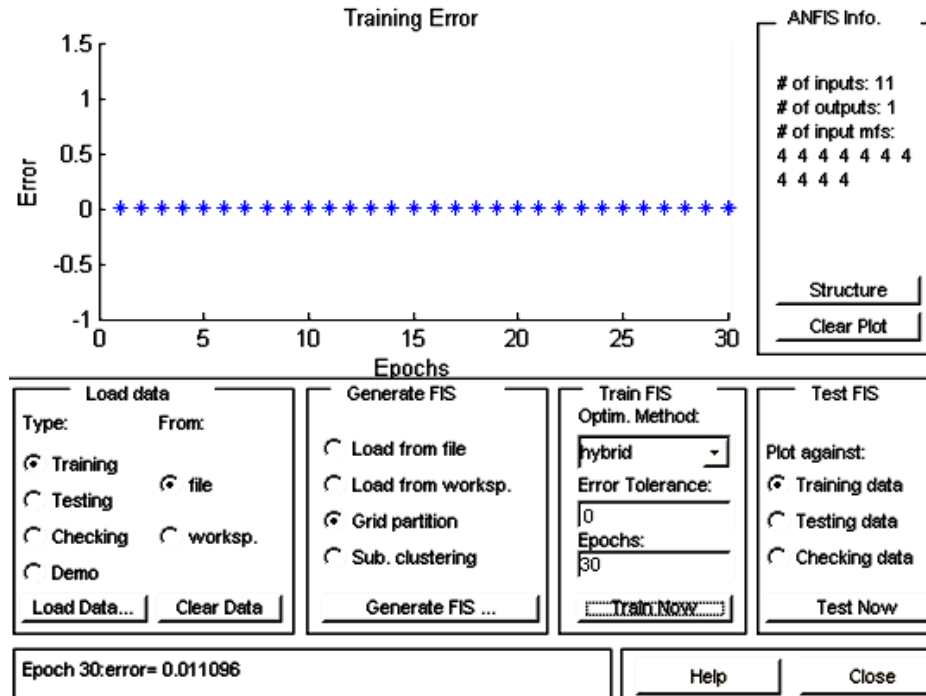


Рисунок 3.8 – Навчання моделі ШР

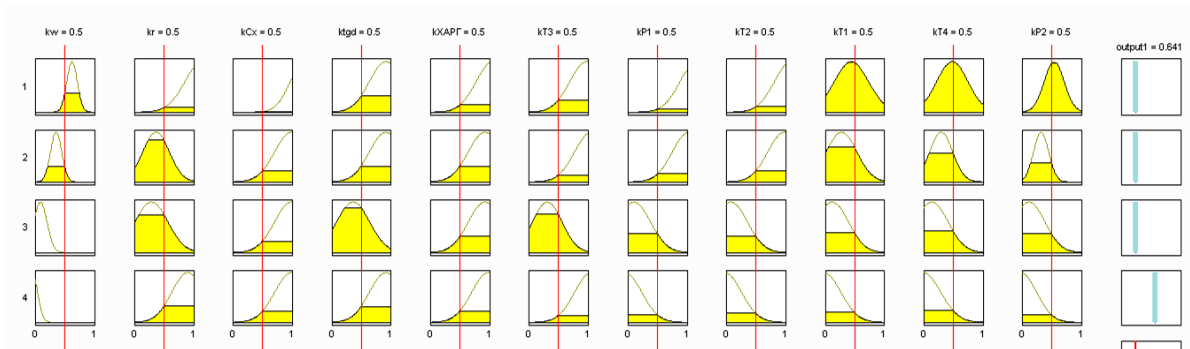


Рисунок 3.9 – Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від при значеннях всіх вхідних параметрів 0.5 в.о

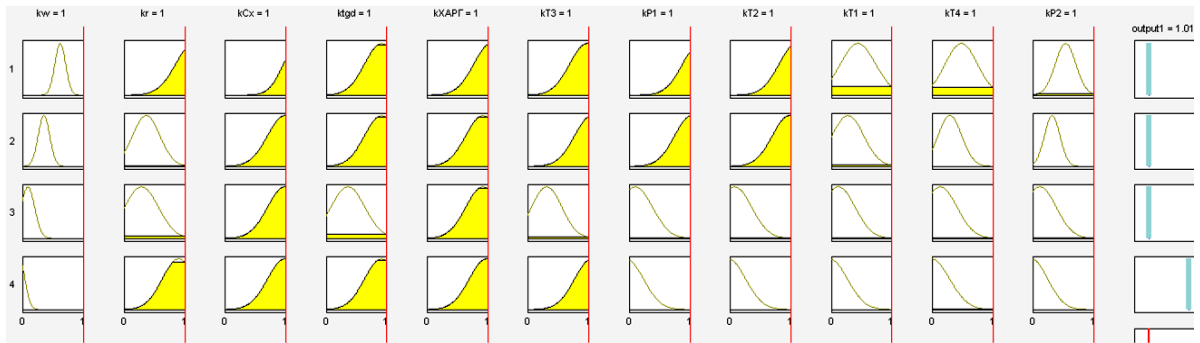


Рисунок 3.10 – Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ШР при значеннях всіх вхідних параметрів 1 в.о

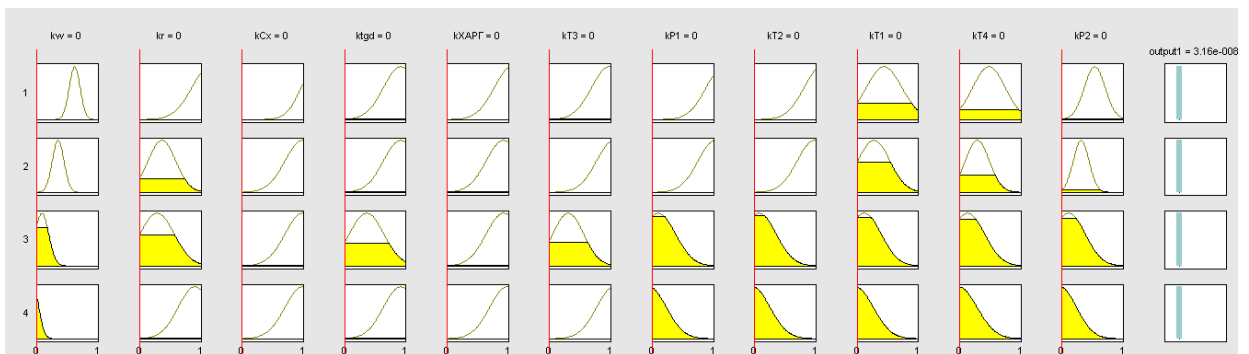


Рисунок 3.11 – Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від при значеннях всіх вхідних параметрів 0 в.о

Складність залежностей вихідного параметру розробленої моделі від сукупності вхідних параметрів підтверджують графіки поверхонь цих залежностей, які показані на рис. 3.12 - 3.17.

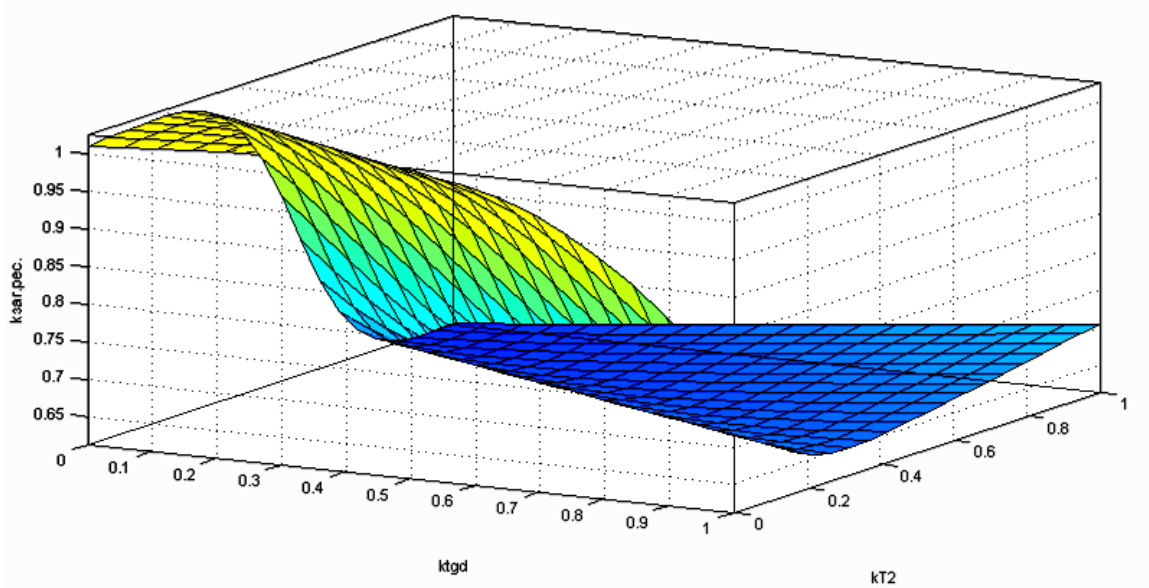


Рисунок 3.12 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від $k_{Tg(\delta)}$ та k_{T2}

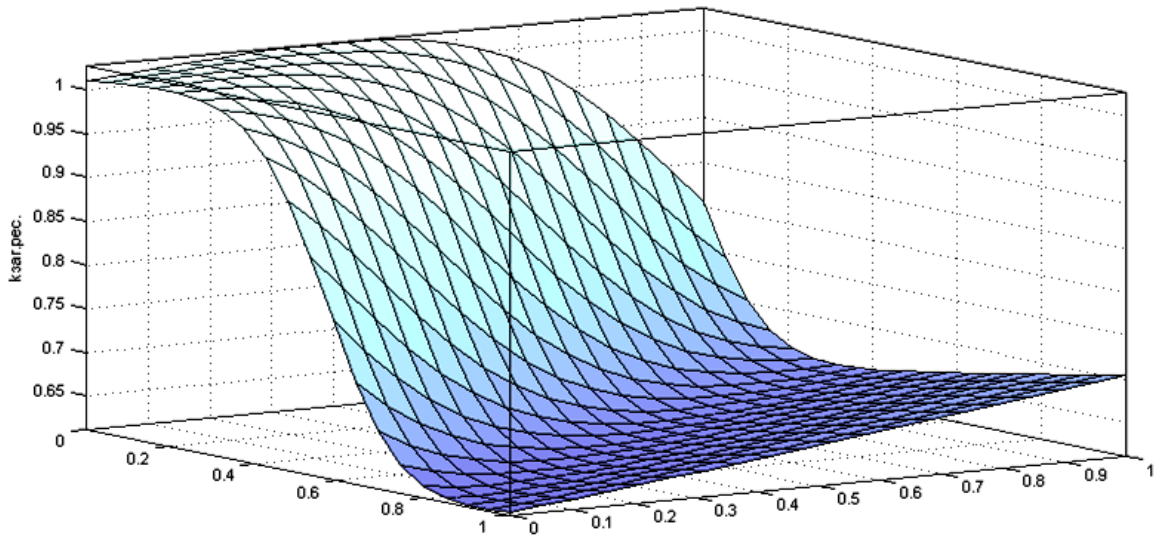


Рисунок 3.13 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від $k_{Tg(\delta)}$ та k_P

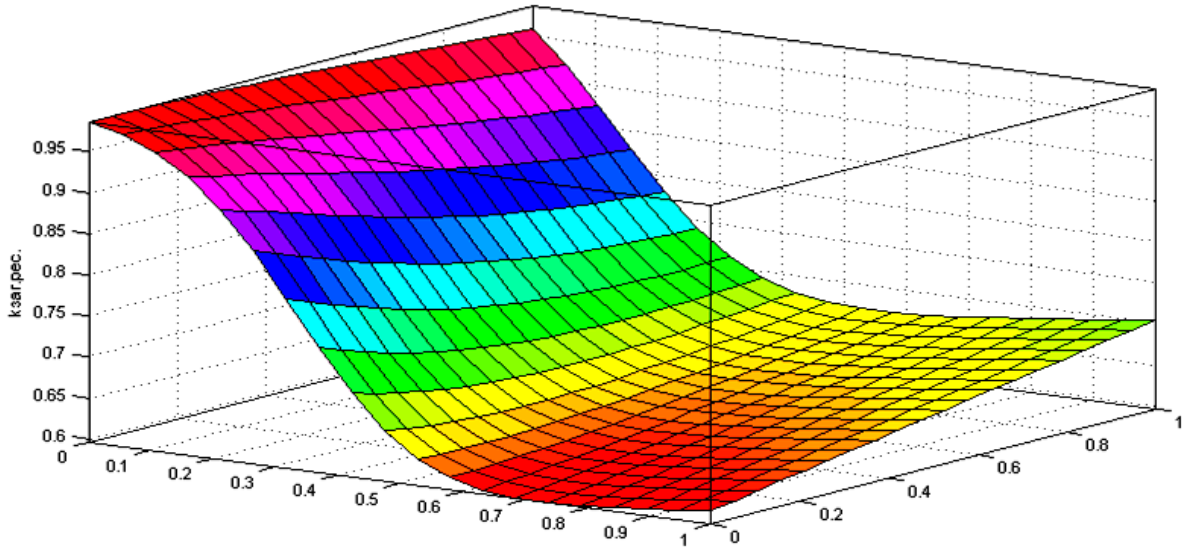


Рисунок 3.14 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від k_{T2} та k_{T1}

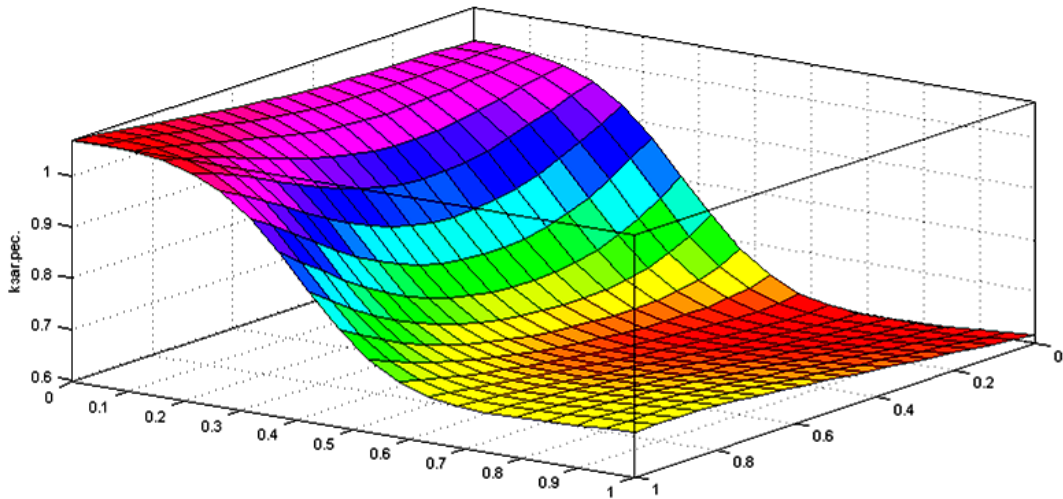


Рисунок 3.15 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від k_{T2} та k_{R1}

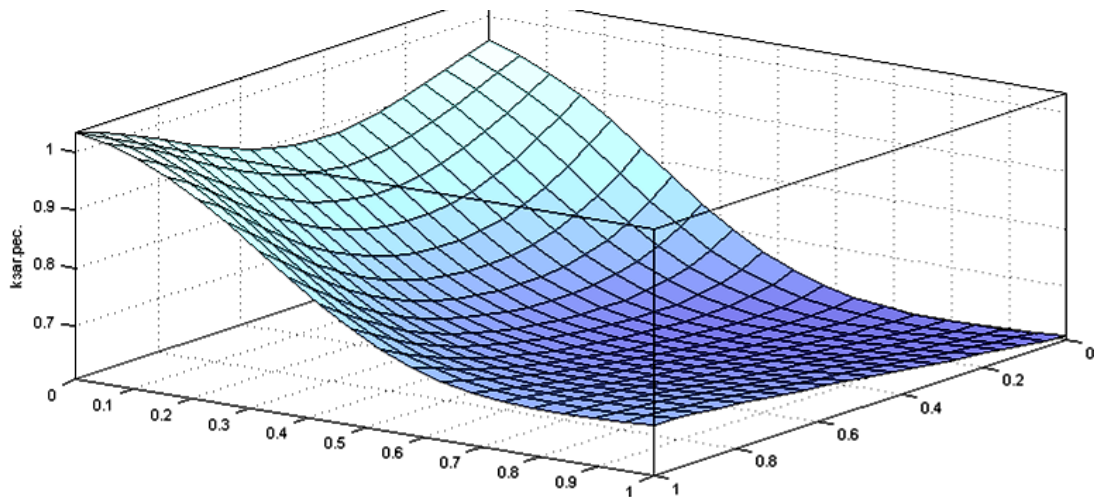


Рисунок 3.16 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від $k_{Tg(\delta)}$ та k_{T1}

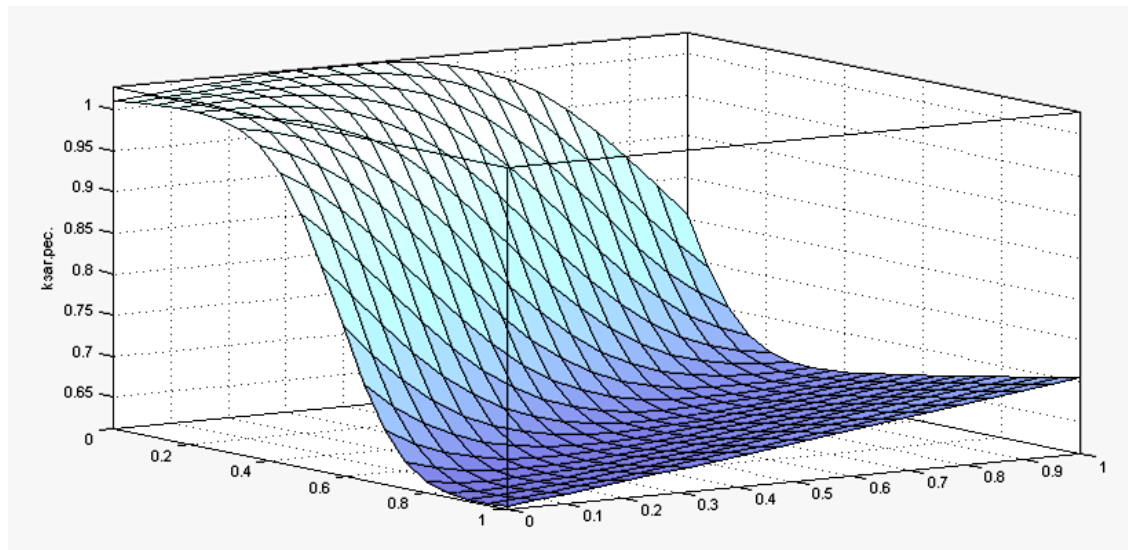


Рисунок 3.17 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від $k_{Tg(\delta)}$ та k_P

Незважаючи на складність залежностей, які показані на рис. 3.15-3.17 математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу ШР (може бути використана для програмування нечіткого контролера з метою створення

пристрою оперативного визначення стану ШР шляхом аналізу величини коефіцієнта залишкового ресурсу ШР.

Висновки до третього розділу

В даному розділі розглянуто методи прогнозування в залишкового ресурсу шунтового реактора.

За допомогою системи комп'ютерної математики – «MATLAB» створено математичну модель коефіцієнту залишкового ресурсу ШР.

Отримана нейро-нечітка модель дозволяє визначити значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу реакторів в залежності від значень вхідних параметрів – коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному з контрольованих діагностичних параметрів.

Результати прогнозування можна використовувати у програмному забезпеченні сучасних мікропроцесорних пристроїв діагностування ШР.

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.

Світова економічна практика давно виробила методи оцінки інвестиційних проектів, які враховують всі можливі умови реалізації і тому мають властивість універсальності, що і дозволяє використовувати їх для визначення ефективності майже будь-якого проекту з достатньою точністю.

Впровадження методів діагностики ШР потребують економічного обґрунтування. Припускається, що здійснення рішень вимагає певних капіталовкладень і тому завдання зводиться до оцінки їх ефективності. Для цього необхідна якісна і кількісна оцінка великої кількості факторів і показників. Наприклад, яких витрат потребує капіталовкладення, які доходи воно принесе, як ці витрати і доходи будуть розподілятися в часі.

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:

- 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 (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 (5.1). 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.

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

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 інтегральних ефект залишається не від'ємним.

Економічна ефективність системи технічної діагностики трансформаторів визначається зниженням експлуатаційних витрат на ремонти і зниженням збитку від аварійних відмов обладнання, вартістю заміни чи ремонту пошкодженого обладнання, а також зменшенням збитку від недовідпуску електроенергії.

Розглянемо розрахунок економічної ефективності вдосконалення системи оперативного діагностування на прикладі частини енергосистеми, в якій знаходяться 32 силових трансформаторів 330/110 кВ. Тоді формулу (5.1) можна записати

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

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.

Значні затрати на 4 році викликані аварією, що призвела до необхідності заміни елементів на одному з реакторів. На 7 році внаслідок аварії довелося замінити високовольтний ввід.

Очікується, що запропоноване вдосконалення системи діагностики дозволить зменшити кількість ремонтів а також уникнути раптових тяжких аварій, таких як вибухи високовольтних ввідів, які в подальшому вимагають їх повної заміни. Очікувані затрати на ремонти в наступні 10 років подані у таблиці 4.3.

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	1140
Обладнання для on-line моніторингу комплексної провідності високовольтних вводів КІН-750	1000
Обладнання FRAnalyzer - свіп-аналізатор частотних характеристик для діагностування обмоток ректора	1050
Обладнання для проведення тепловізійного обстеження	350
Вартість обладнання для on-line моніторингу $\text{tg}\delta$ трансформаторного масла в баку реатора	240
Обладнання для on-line моніторингу $\text{tg}\delta$ масла в баку	150
Разом	3930

Затрати на поточні і розширені поточні ремонти реактора за попередніх вісім років наведено у таблиці 4.2.

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

Вид ремонту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поточні	95	98	38	105	103	97	97	100	106	105
Розширені поточні	1020	480	1860	6820	1020	1050	2175	600	560	500
Разом	1115	578	1898	6925	1123	1147	2272	700	666	605
Разом	17029									

Значні затрати на 4 році викликані аварією, що призвела до необхідності заміни елементів на одному з реакторів. На 7 році внаслідок аварії довелося замінити високовольтний ввід.

Очікується, що запропоноване вдосконалення системи діагностики дозволить зменшити кількість ремонтів а також уникнути раптових тяжких аварій, таких як вибухи високовольтних ввідів, 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	99	94	87	90	91	96	93	94	93	91
Розширені поточні	850	490	730	800	980	920	920	960	600	540
Разом	949	299	817	890	1071	1016	1013	1054	693	631
Разом	8523									

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

$$\Delta Z = 17029 - 8523 = 8506 \text{ (тис. грн.)}. \quad (5.4)$$

Тому за рік в середньому зменшення витрат складе

$$\Delta Z_t = \frac{8506}{10} = 850.6 \text{ (тис. грн.)}. \quad (5.5)$$

Затрати на проведення діагностування визначаємо із таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Вартість проведення діагностування

Вид робіт	Вартість для одного ректора, грн.	Вартість для 36 реакторів, тис. грн.
Хроматографічний аналіз масла	320	11,5
Свіп-аналіз частотних характеристик	600	21,6
Контроль комплексної провідності	260	9,3
Контроль ємності основної ізоляції реактора	350	12,6
Визначення tgδ масла в баку	350	12,6
Контроль температури верхніх шарів масла баку реактора	400	14,4
Разом	2260	82

Підставимо відомі значення у формулу (4.3):

$$NPV = -39300000 + \sum_{t=1}^{10} \frac{(8506000 - 82000)}{(1 + 0,18)^t} = 339300 \text{ (грн.)}. \quad (4.6)$$

Термін окупності за формулою (4.2):

$$T_{ок} = \frac{39300000}{8506000 - 82000} = \frac{1030000}{275200} \approx 4.6 \text{ (років)}. \quad (4.7)$$

З приведених розрахунків видно, що прибуток від реалізації проекту почне надходити на кінець п'ятого року і до кінця 10-го року складе 339300 грн.

Висновок до четвертого розділу

Розрахунки довели економічну ефективність впровадження системи оперативного діагностування реакторів. Впровадження методів та засобів оперативного визначення технічного реакторів в темпі процесу оптимального диспетчерського керування нормальними режимами ЕЕС дає можливість оперативному персоналу враховувати можливості цього обладнання і зменшити його пошкоджуваність.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Задачі розділу

Враховуючи те, що для мінімізації ризику професійного захворювання та травматизму працівників що займаються питаннями експлуатації трансформаторів струму, пов'язаних з діагностикою їх стану в темпі процесу вимагає вирішення цілого комплексу питань з охорони праці, тому сформулюємо основні задачі охорони праці за темою МКР:

1. Провести аналіз умов праці при виконанні робіт, пов'язаних з діагностикою систем діагностики шунтових реакторів, які працюють у складі електроенергетичної системи України

2. Розробити організаційно-технічні рішення з охорони праці при експлуатації шунтових реакторів. Розрахувати параметри заземлюючого пристрою для підстанції 750 кВ.

3. Визначити області працездатності електричної підстанції 750 кВ в умовах дії загрозливих чинників НС.

Кожна людина в Україні має право на охорону праці. Гарантії прав на охорону праці починаються вже з моменту обговорення та укладання трудової угоди, оскільки згідно ст. 5 Закону «Про охорону праці» умови трудового договору не можуть містити положень, що суперечать законам та іншим НПАОП. Під час укладання трудового договору роботодавець повинен проінформувати працівника під розписку про умови праці та про наявність на його робочому місці небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які ще не усунуто, можливі наслідки їх впливу па здоров'я та про права працівника на пільги і компенсації за роботу в таких умовах.

Працівнику не може пропонуватися робота, яка за медичним висновком протипоказана йому за станом здоров'я. До виконання роби підвищеної небезпеки та тих, що потребують професійного добору, допускаються особи за наявності висновку психофізіологічної експертизи.

В приміщенні є небезпечні і шкідливі виробничі фактори. Відносно наступних з них в проекті передбачені рішення з охорони праці:

Фізичні:

-небезпечний рівень напруги в електричній мережі, замикання якої може пройти через тіло людини;

-підвищена або знижена відносна вологість повітря;

-підвищена або знижена температура повітря робочої зони;

-підвищена або знижена швидкість руху повітря.

-підвищена запыленість повітря в робочій зоні;

-недостатня освітленість робочої зони;

-недостача природного світла;

Психофізіологічні:

-статичні (розумове напруження, перенапруга аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження).

5.2 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

Експлуатація масляного обладнання висуває ряд специфічних вимог з охорони праці як при роботі з ним [16].

Відповідно з ГОСТ 12.1.013-78 умови праці в КРП за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у приміщеннях є струмопровідною.

Згідно із ГОСТ 12.1.030-81, в якості захисту від ураження робочого персоналу електричним струмом застосовується заземлення. Крім того безпека експлуатації при нормальному режимі роботи забезпечується застосуванням ізолювальних пристроїв, огороженням струмоведучих частин, використанням малих напруг. Особи, що обслуговують електроустановки повинні користуватися ЗІЗ - спецвзуття, рукавиці. Засоби захисту необхідно періодично випробувати, їх слід захищати від механічних пошкоджень, впливу факторів, що погіршують їх діелектричні властивості.

Загальні вимога безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з ГОСТ 12.2.003-74, в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання любого виду і призначення.

Для безпечного проведення робіт з ремонту трансформаторів струму та напруги слід виконувати наступні організаційні заходи:

- оформлення робіт згідно з нарядом;
- допуск до роботи;
- нагляд під час роботи;
- вивісити плакати «Не вмикати! Працюють люди».

Відповідальним за безпеку проведення робіт по ремонту трансформаторів струму є:

- Людина, яка видала наряд;
- Відповідальний керівник робіт;
- Виконавець робіт;
- Члени бригади.

Для організації проведення ремонтних робіт на трансформаторах необхідно попередньо, не пізніше 10 години дня, що передує дню початку проведення робіт, подати заявку головному інженеру підприємства.

Оформити вбрання - допуск (розпорядження) та передати його оперативному персоналу для підготовки робочого місця.

Той, хто видає наряд, визначає необхідність і можливість безпечного виконання роботи. Він відповідає за достатність та правильність зазначених у наряді (розпорядженні) заходів безпеки, за якісний та кількісний склад бригади та призначення відповідальних за безпеку, а також за відповідність виконуваних роботі груп перерахованих у наряді працівників.

Відповідальний керівник робіт відповідає за виконання всіх зазначених у наряді заходів безпеки та їх достатність, за вживані ним додаткові заходи безпеки, необхідні за умовами виконання робіт, за повноту та якість цільового інструктажу бригади, у тому числі проведеного роботодавцем та виробником робіт, а також за організацію безпечного проведення робіт.

Виконавець робіт відповідає за:

- відповідність підготовленого робочого місця вказівкам наряду, додаткові заходи безпеки, необхідні за умов виконання робіт;
- за чіткість та повноту інструктажу членів бригади;
- наявність, справність та правильне застосування необхідних засобів захисту, інструменту, інвентарю та пристроїв;
- за збереження на робочому місці огорож, плакатів, заземлень, замикаючих пристроїв;
- за безпечне проведення роботи та дотримання вимог «Інструкції з охорони праці електрослюсаря з ремонту обладнання розподільчих пристроїв» ним самим та членами бригади;
- за здійснення постійного контролю над членами бригади.

Виробник робіт, що виконуються за нарядом в електроустановках напругою понад 1000 В, повинен мати групу IV.

5.3 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.3.1 Мікроклімат

Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99. Мікроклімат енергопідприємства характеризується наступними чинниками: температурою повітря, відносною вологістю повітря, швидкістю руху повітря, інтенсивністю теплового випромінювання. Роботи по обслуговуванню електротехнологічного обладнання відносяться до категорії Іб по важкості праці. Енерговитрати за цією категорією становлять - до 140-174Вт.

Склад повітря робочої зони забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³. На енергооб'єктах виділяється пил нетоксичний. При роботі системи вентиляції, провітрюванні у приміщенні може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при технологічних процесах в цеху і знаходяться повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК відповідно до [17] наведено в таблиці 5.1. Для забезпечення складу повітря робочої зони відповідно до ГОСТу 12.1.004-91. ССБТ проектом передбачені наступні рішення [17]: - застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами, які встановлені безпосередньо на дільницях біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення; - необхідно проводити контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні; - застосовувати природну вентиляцію: організовану і неорганізовану. Незважаючи на нетоксичність цеоліту, використовуваного при заповненні фільтрів вимикача, наявність пилу цеоліту в

повітрі може викликати ерозію носоглотки. Допустима концентрація пилу цеоліту в повітрі приміщення - 2 мг / м. Роботи щодо заповнення фільтрів або їх спорожнення повинні проводитися персоналом в спецодязі і респіраторах (або в витяжній шафі) в спеціально обладнаному приміщенні.

5.3.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично-допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³.

На енергооб'єктах виділяється пил нетоксичний. При роботі системи вентиляції, провітрюванні у приміщенні може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при технологічних процесах в цеху і знаходяться в повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК відповідно до [17] наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Гранично допустима концентрація шкідливих речовин в повітрі робочої зони

Назва речовини	Величина ГДК, <i>мг / м³</i>		Клас небезпеки
	Максимально но разова	Середньодо бова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Елегаз	1	0,08	2

5.3.3 Вказівка заходів безпеки при роботі масляним обладнанням

Роботи з обслуговування масляних трансформаторів проводяться за розпорядженням або в порядку поточної експлуатації не менше ніж двома

працівниками, один з яких має групу з електробезпеки не нижче IV, інший - не нижче III.

До робіт з експлуатації масляних трансформаторів допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли медичне обстеження, інструктаж та навчання на робочому місці, перевірку знань правил з охорони праці відповідно до Положення про порядок навчання та перевірки знань з охорони праці керівників, спеціалістів та робітників підприємств, установ та організацій зв'язку.

Кожен працівник повинен бути забезпечений спеціальним одягом та засобами індивідуального захисту відповідно до Типових галузевих норм безкоштовної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту.

При обслуговуванні масляних трансформаторів можливі дії наступних небезпечних та шкідливих виробничих факторів:

- небезпечної напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може статися через тіло людини;

- безпеки виникнення пожежі

Працівники, які обслуговують масляні трансформатори, зобов'язані:

- Виконувати правила внутрішнього трудового розпорядку;

- Дотримуватись інструкції щодо заходів пожежної безпеки;

- Виконувати роботи тільки в тому обсязі та в тій технологічній послідовності, що передбачена інструкцією з технічної експлуатації для даного типу трансформаторів;

- Вміти надавати першу медичну допомогу постраждалим від електричного струму та за інших нещасних випадків

- У разі травмування або нездужання сповістити свого безпосереднього керівника;

- Про кожен нещасний випадок постраждалий або очевидець негайно повідомляє безпосереднього керівника.

Вимоги безпеки під час роботи.

Забороняється:

- Виконувати роботи та перемикання на трансформаторі, включеному в мережу хоча б з одного боку.
- Залишати перемикач у проміжному положенні без фіксації.
- Експлуатувати трансформатор без олії або при зниженні рівня олії у розширювачі нижче температурної позначки.
- Експлуатувати трансформатор за невідповідності відібраного масла нормам якості за результатами фізико-хімічного аналізу.
- Експлуатувати трансформатор із пошкодженими вводами (тріщини, сколи).
- Вмикати трансформатор без заземлення блоку.
- Під час роботи дозволяється користуватися переносною лампою напругою не вище 12 В.
- Доливання масла проводиться за допомогою широкої лійки та спеціальною посудиною ємністю до 3-х літрів.
- При обслуговуванні масляних трансформаторів забороняється застосування металевих драбин і драбин.

Перш ніж розпочати роботу на сходах, необхідно забезпечити її стійкість.

Забороняється експлуатація трансформаторів при виявленні:

- Сильного нерівномірного шуму та потріскування трансформатора.
- Ненормального та постійного зростаючого нагрівання трансформатора при нормальних навантаженнях та охолодженні.
- Викиду олії з розширювача.
- Течі олії зі зниженням її рівня нижче рівня масломірного скла.

5.4 Розрахунок параметрів заземлюючого пристрою підстанції 750 кВ

Заземлювач характеризується опором, що навколишня земля робить стікаючому з його струму.

Грунт мінерального або органічного походження, у якому відбувається розтікання струму з заземлювача, має в сухому стані незначну електропровідність твердої основи. Однак різні солі і кислот, що утримуються в землі, при наявності вологи створюють електроліти, що і визначають в основному електропровідність землі. Чим менше розміри часток ґрунту, тим більше його вологоємність. Пісок має пористу структуру і має дуже малу вологоємність, глина і перегній мають колоїдну будову часток, значну вологоємність.

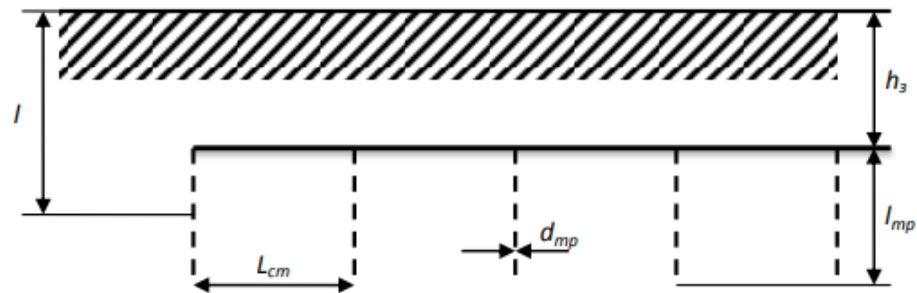


Рисунок 5.1 – Схема заземлюючого пристрою.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для розрахунку заземлення

Вид заземлювача	стрижневий
Довжина заземлювача, $l_{мп}$, см	500
Діаметр заземлювача, $d_{мп}$, см	4
Глибина занурення вимикача, $h_з$, см	80

Продовження таблиці 5.2

Ширина з'єднувальної смуги, b_c , см	5
Грунт	глина
Кліматична зона	II

Наближені значення питомого опору деяких ґрунтів наведені в табл. 5.3.

Визначаємо питомий опір ґрунту $\rho_{табл}$, який рекомендовано для розрахунків, $Ом \cdot см$ (табл. 5.2).

Визначаємо підвищувальні коефіцієнти для труб вертикальних заземлювачів $K_{П.Т}$ та для з'єднувальної полоси $K_{П.С}$, які враховують зміну опору ґрунту в різні пори року залежно від наявності опадів.

Таблиця 5.3 – Приблизні значення питомих опорів ґрунтів

Грунт	Значення, які рекомендуються для розрахунків, $Ом \cdot см$
Пісок	70000
Супісок	30000
Суглинок	10000
Глина	4000
Чорнозем	2000

Таблиця 5.4 – Значення підвищувальних коефіцієнтів за кліматичними зонами

Кліматична зона	Тип заземлювача	
	Горизонтально прокладені заземлювачі, $K_{П.С}$	Стрижневі вертикально встановлені заземлювачі, $K_{П.Т}$
I	4,5-7	1,8-2
II	3,5-4,5	1,6-1,8
III	2,5-4	1,4-1,6
IV	1,5-2	1,2-1,4

Знаходимо питомий розрахунковий опір ґрунту для вертикальних електродів з урахування несприятливих умов за допомогою підвищувального коефіцієнта:

$$\rho_{розр.т} = 4000 \cdot K_{П.Т}, \text{ Ом} \cdot \text{см}. \quad (5.1)$$

$$\rho_{розр.т} = 4000 \cdot 1,7 = 6800(\text{Ом} \cdot \text{см}).$$

Визначаємо питомий розрахунковий опір ґрунту для горизонтального заземлювача (з'єднувальної смуги):

$$\rho_{розр.н} = \rho_{табл} \cdot K_{П.С}, \text{ Ом} \cdot \text{см}. \quad (5.2)$$

Розраховуємо відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача:

$$t = h_3 + \frac{l_{mp}}{2}, \text{ см.} \quad (5.3)$$

$$t = 80 + \frac{500}{2} = 330(\text{см}).$$

де h_3 - глибина заглиблення труб, см; l_{mp} - довжина вертикального заземлювача.

Знаходимо опір розтікання струму для одиночного вертикального заземлювача, який розташований нижче від поверхні землі:

$$R_{розр.Г} = 0,366 \frac{\rho_{розр.м}}{l_{mp}} \left(\lg \frac{2l_{mp}}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t + l_{mp}}{4t - l_{mp}} \right), \text{ (Ом);} \quad (5.4)$$

$$R_{розр.Г} = 0,366 \frac{6800}{500} \left(\frac{1}{2} \lg \frac{2 \cdot 500}{4} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 330 + 500}{4 \cdot 330 - 500} \right) = 0,862(\text{Ом}).$$

Визначаємо відстань між вертикальними заземлювачами h_{cm} із співвідношення $c = \frac{L_{cm}}{l_{mp}}$. Для стаціонарних заглиблених заземлювачів це співвідношення береться таким $c = 1$.

$$L_{cm} = l_{mp} \cdot c, \text{ см.} \quad (5.5)$$

Розраховуємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів без урахування коефіцієнта екранування. У відповідності до вимог ПУЕ визначаємо допустимий опір розтікання струму в заземленні: $R_3 = 0,5$ Ом (для мереж з напругою 750 кВ).

$$n_T = \frac{R_{розр.Т}}{R_3}, \text{ шт.} \quad (6\backslash5.6)$$

$$n_T = \frac{0,862}{0,5} \approx 2(\text{шт}).$$

Результат розрахунку округлюємо для найближчого цілого числа.

Знаходимо коефіцієнт екранування труб $n_{E.T}$ при числі труб n_T . Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів з урахуванням коефіцієнта екранування (при $n_T = 2$, $n_{E.T} = 0,85$):

$$n_{T.E.} = \frac{R_{розр.Т}}{R_3 \cdot \eta_{E.T}}, \text{ шт.} \quad (5.7)$$

$$n_{T.E.} = \frac{0,862}{0,5 \cdot 0,85} = 2(\text{шт}).$$

Результат розрахунку округлюємо для найближчого цілого числа.

Знаходимо розрахунковий опір розтікання струму при взятому числі вертикальних заземлювачів:

$$R_{\text{розр.}n_{TE}} = \frac{R_{\text{розр.}T}}{n_{T.E} \cdot \eta_{E.T}}, \text{ Ом}; \quad (5.8)$$

$$R_{\text{розр.}n_{TE}} = \frac{0,862}{2 \cdot 0,85} = 0,507(\text{Ом}).$$

Знаходимо довжину з'єднувальної смуги:

$$L_{3.C} = 1,05L_{cm}(1 - n_{T.E}), \text{ см.} \quad (5.9)$$

$$L_{3.C} = 1,05 \cdot 500(1 - 0,85) = 78,75(\text{см}).$$

Визначаємо опір розтікання струму в з'єднувальній смузі:

$$R_{3.C} = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр.}n}}{L_{3.C}} \lg \frac{2L_{3.C}^2}{h_3 \cdot b_c}, \text{ Ом.} \quad (5.10)$$

$$R_{3.C} = 0,366 \frac{0,507}{78,75} \lg \frac{2 \cdot 78,75^2}{80 \cdot 5} = 0,004(\text{Ом}).$$

Де h_3 - глибина заглиблення вертикальних заземлювачів, см;

b_c - ширина з'єднувальної смуги, см.

Визначаємо розрахунковий опір для розтікання електричного струму в з'єднувальній смузі з урахуванням коефіцієнта екранування:

$$R_{розр.С} = \frac{R_{3.С}}{n_{ЕС} \cdot \eta_{Е.3.С}}, \text{ Ом.} \quad (5.11)$$

$$R_{розр.С} = \frac{0,004}{1 \cdot 0,77} = 0,005(\text{Ом}).$$

де $n_{ЕС}$ - дорівнює 1.

Знаходимо загальний розрахунковий теоретичний опір розтікання струму від вертикальних заземлювачів та з'єднувальної смуги:

$$R_{заг.розр} = \frac{1}{\frac{1}{R_{розр.Т}} + \frac{1}{R_{розр.С}}}, \text{ Ом.} \quad (5.12)$$

$$R_{заг.розр} = \frac{1}{\frac{1}{0,862} + \frac{1}{0,005}} = 0,0049(\text{Ом}).$$

Отриманий результат порівнюємо із допустимим за вимогами ПУЕ значенням опору розтіканню струму в заземленні.

Висновки до п'ятого розділу

Розрахунки довели економічну ефективність впровадження системи оперативного діагностування трансформаторів. Впровадження методів та засобів оперативного визначення технічного стану ШР в темпі процесу оптимального диспетчерського керування нормальними режимами ЕЕС дає можливість оперативному персоналу враховувати можливості цього обладнання і зменшити його пошкоджуваність.

ВИСНОВКИ

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

1. Аналіз вітчизняних та іноземних літературних жерел свідчить про те, що значна частина шунтових реакторів експлуатується понад паспортний ресурс, а тому має місце зростання частоти пошкоджень вузлів ШР.

2. Тривала безаварійна експлуатація реакторів пояснюється невеликою інтенсивністю джерел газоутворення. Однак, ці дефекти призводять до забруднення ізоляції, прискороеного старіння масла, а головне, залишаються непоміченими ті гази, причиною появи яких можуть бути часткові розряди (ЧР) у твердій ізоляції. Про відсутність останніх можна судити лише за результатами виміру ЧР електричним методом.

3. Розроблений метод визначення технічного стану ШР в умовах неповноти початкових даних, який шляхом використання нейро-нечіткого моделювання дозволяє отримати поточне значення коефіцієнту залишкового ресурсу ШР і в залежності від результату зробити висновок про один зі станів ШР: справний, з незначними відхиленнями параметрів, передаварійний, аварійний.

4. Розрахунок економічної ефективності впровадження системи оперативного діагностування шунтових реакторів показав, що термін окупності такого проекту становить 5 років.

5. Виконання інструкцій з охорони праці та дотримання закону України з охорони праці дасть змогу забезпечити потрібні умови праці та зменшити аварійність та об'єктах енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Жук І.А Випробування реакторів 750 кВ в умовах електричних станцій і підстанцій/ Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. – 2006. – № 3. – Ч. 2. – с. 68-72.
2. Експлуатація електроустановок: Навч. посібник/ Г.Г.Півняк, А.В. Журахівський, Г.А.Кігель, Б.М.Кінаш, А.Я.Рибалко, Ф.П.Шкрабець, З.М.Бахор: За ред. академіка НАН України Г.Г. Півняка. — Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. — 445 с.
3. Лизунов С.Д., Фрід Е.С., Баромикін П.М. Вимірювання часткових розрядів в ізоляції реакторів з компенсацією завад. – «Електротехніка», 1977, №4, с. 11-14.
4. ГДК 34.20.507-2003 Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила.
5. Bao, Yanyan & Liu, Kang & Yang, Junting & Zhang, Guangdong & Wen, Dinjun & Wang, Kun. (2020). A Fault Analysis of 750kV Shunt Reactor and Repair Program. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 782. 032015. 10.1088/1757-899X/782/3/032015.
6. Кутін, В. М. Діагностика електрообладнання : навчальний посібник / В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, М. В. Кутіна – Вінниця : ВНТУ, 2013. –161 с.
7. Посібник з вивчення Правил технічної експлуатації електричних станцій і мереж. Електротехнічне устаткування електричних станцій та мереж, оперативно-диспетчерське керування. / Баженов О.Г. та інші – К.: ДП НТУКЦ «Аселенерго», 2004. – 800с.
8. Матвійчук В. А. Діагностування електрообладнання. Навч. посіб. / В. А. Матвійчук, О. Є.Рубаненко, І.О. Гунько – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 172 с.
9. Голота А.Д. Автоматика в електроенергетичних системах: Навч. посіб.-

К.: Вища шк.. 2006. – 367 с.

10. Рубаненко О.Є. Високовольтні вводи. Конструкція, експлуатація, діагностика та ремонт: монографія / О.Є. Рубаненко, О.І. Гуменюк - Вінниця: ВНТУ, 2011. - 183 с.

11. Гуменюк О.І. Технологія ремонту і експлуатація високовольтних уводів та їх конструктивні особливості. (Посібник): Довідково методичний посібник / Гуменюк О.І., Рубаненко О.Є., Остапчук О.М., Таловея В.Л., Шаповалов Ю.О. - К.: ДП «Науково-технічний учбово-консультаційний центр». - 2012. - 552 с. з іл.

12. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Жук І.А Випробування реакторів 750 кВ в умовах електричних станцій і підстанцій/ Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. – 2006. – № 3. – Ч. 2. – с. 68-72.

13. Guide for Life Management Techniques for Power Transformers. — Брошюра СИГРЕ РГ А2, 2003.

14. Sokolov V. V. Consideration on Power Transformer Condition based Maintenance. — EPRI Substation Equipment Diagnostic Conference VIII, 2000, February 20—23, New Orleans, LA.

15. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Жук І.А. Діагностування силових трансформаторів з використанням нечітких множин // Вісник ВП. – 2005. – №1. – С.43-51.

16. Бондаренко Є. А. Безпека життєдіяльності: навч. посіб. / Є. А.Бондаренко, А. В. Сердюк. – Вінниця: ВДТУ, 2013. – 160 с.

17. Навчальний посібник до розділу «Охорона праці» в магістерських кваліфікаційних роботах для студентів спеціальності 141 – Електро-енергетика, електротехніка та електромеханіка : навч. посібник / Бондаренко Є. А., Кутін В. М., Лежнюк П. Д. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 120 с.

ДОДАТОК А

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ
ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Вдосконалення методів діагностування шунтових реакторів 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 89,3 Схожість 15,7

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

Гуцько
(підпис)

Гуцько І.О.
(прізвище, ініціали)

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

Автор роботи

Сауляк
(підпис)

Сауляк В.В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

Гуцько
(підпис)

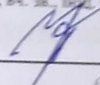
Гуцько І.О.
(прізвище, ініціали)

ДОДАТОК Б

Технічне завдання МКР

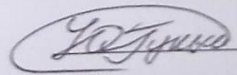
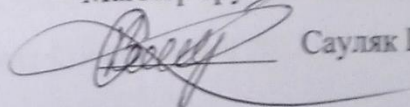
Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.
(наук. ст., вч. зв., інж. зв. присв.)


(підпис)

" 14 " 09 2022 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ШУНТОВИХ
РЕАКТОРІВ 750 КВ**
08-21.МКР.007.00.124 ТЗ

Науковий керівник: к.т.н.
 Гунько І.О.
Магістр групи ЕС-22м
 Сауляк В.В.

Вінниця 2022 р.

Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)

а) актуальність досліджень обумовлена тим, діагностування силового електротехнічного устаткування, зокрема шунтуючих реакторів, сьогодні стає звичайним технічним заходом підвищення надійності і якості електропостачання. Для цього є всі передумови: з одного боку це економічна необхідність і доцільність, а з іншого – технічні можливості. Перше обумовлене високою вартістю шунтуючих реакторів, складністю і значними витратами на їх транспортування і монтаж, а також збитками, викликаними порушенням технологічних процесів через обмеження електропостачання;

б) наказ ректора ВНТУ № 203 від 14 вересня 2022 р. про затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи.

2. Мета і призначення МКР

а) мета – дослідження систем діагностування шунтових реакторів напругою 750 кВ;

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

3. Джерела розробки

Список використаних джерел розробки:

1. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Жук І.А. Випробування реакторів 750 кВ в умовах електричних станцій і підстанцій/ Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. – 2006. – № 3. – Ч. 2. – с. 68-72.

2. Bao, Yanyan & Liu, Kang & Yang, Junting & Zhang, Guangdong & Wen, Dinjun & Wang, Kun. (2020). A Fault Analysis of 750kV Shunt Reactor and Repair Program. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 782. 032015. 10.1088/1757-899X/782/3/032015.

3. MIAO Junjie, JIANG Qingli. Fault analysis of a 35 kV dry-type reactor in 500 kV substation . Power Capacitor& Reactive Power Compensation, 2012, 33 (2): 65 - 69.

4. Технічні вимоги до виконання МКР

Дослідити причини пошкодженості шунтових ректорів 750 кВ. Тип РОДЦ 110000/750. Номінальна напруга 750 кВ. Номінальна потужність 110000 кВА. Допустима тривала лінійна напруга 787 кВ. Номінальний струм 242 А. Частота 50 Гц.

5. Економічні показники

Провести розрахунок економічного ефекту від впровадження сучасних методів діагностування ШР.

6. Етапи МКР та очікувані результати

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	кінець	
1	Розроблення технічного завдання	02.09.22	06.09.22	формування технічного завдання
2	Аналіз об'єкта діагностування	07.09.22	12.09.22	аналітичний огляд літературних джерел, задачі досліджень, розділ 1 ПЗ
3	Методи та засоби діагностування шунтових ректорів	13.09.22	05.10.22	розділ 2
4	Визначення залишкового ресурсу ШР	06.10.22	30.10.22	розділ 3
5	Економічна частина	01.11.22	10.11.22	розділ 4
6	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	11.11.22	16.11.22	розділ 5
7	Оформлення пояснювальної записки	17.11.22	25.11.22	розділ 6
8	Виконання графічної частини та оформлення презентації	26.12.22	30.12.22	пояснювальна записка

7. Матеріали, що подаються до захисту МКР

Пояснювальна записка МКР, ілюстративні матеріали, відгук наукового керівника, відгук опонента, протоколи складання державних іспитів, анотації до МКР українською та іноземною мовами.

8. 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.

9. Вимоги до оформлення МКР

Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти. СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:2, 2021 р.

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

Відсутні.

ДОДАТОК В

Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи електричної підстанції 750 кВ в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Надзвичайні ситуації завжди супроводжували існування людства, нерідко через них гинули держави та цивілізації. Сьогодні надзвичайні ситуації не менше загрожують людству, ніж сотні і тисячі років тому.

Надзвичайна ситуація - порушення нормальних умов життя і діяльності людей на об'єкті або території, що спричинена аварією, катастрофою, стихійним лихом, використанням засобів масового враження, яке призвело або може призвести до людських чи матеріальних втрат і т.д..

Причини надзвичайних ситуацій розділяються на техногенні, природні, соціально-політичні та воєнні. Якщо більш детально то це можуть землетруси, повені, ударна хвиля і т. д..

Саме тому необхідно дослідити стійкість роботи підстанції 750 кВ в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. На основі проведених досліджень будуть розроблені заходи, які підвищать стійкість роботи підстанції, що надасть можливість запобігти великим матеріальним та фінансовим збиткам у разі виникнення надзвичайної ситуації. В даному підрозділі буде оцінено стійкість підстанції в умовах дії іонізуючого випромінювання та електромагнітного імпульсу.

Іонізуюче випромінювання - це випромінювання, взаємодія якого з середовищем призводить до утворення електричних зарядів (іонів) різних знаків. Джерелом іонізуючого випромінювання є природні та штучні радіоактивні речовини та елементи (уран, радій, цезій, стронцій та ін.). Джерела іонізуючого випромінювання широко використовуються в енергетиці, медицині (для

діагностики та лікування) та в різних галузях промисловості (для дефектоскопії металів, контролю якості зварних з'єднань, визначення рівня агресивних середовищ у замкнених об'ємах, боротьби з розрядами статичної електрики і т. ін.). Що в свою чергу викликає електромагнітний імпульс (ЕМІ), це поняття означає явище створення і поширення електромагнітного випромінювання великої напруженості та широкого спектру частот протягом дуже короткого часу. Даний імпульс індукує високу напругу в провідниках, що згубно впливає на електричні пристрої.

В.1 Дослідження стійкості роботи електричної підстанції 750 кВ в умовах дії іонізуючих випромінювань

В електричній підстанції 750 кВ використовуються елементи, до складу яких входять матеріали: метали, неорганічні матеріали, напівпровідники та різні органічні сполуки (діелектрики, смоли та ін.). Серед цих матеріалів найбільш вразливими до радіації є метали, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв.

Висновок по оцінці стійкості роботи виконується за рахунок аналізу системи в цілому та визначення експозиційної дози, а також з'ясування межі стійкості та граничного значення потужності гамма-випромінювання. Дані розрахунки проведемо на прикладі системи цехової вентиляції.

Можливу дозу опромінення D_m за встановлений час можна визначити за формулою Д.1:

$$D_m = \frac{2 \cdot P_1 \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{K_{\text{посл}}}, [P]. \quad (\text{В.1})$$

D_m для пульту керування:

$$D'_M = \frac{2 \cdot 4,73 \cdot (\sqrt{70080} - \sqrt{1})}{4} \approx 623 \text{ (P)}.$$

D_M для система збору і обробки даних:

$$D''_M = \frac{2 \cdot 4,73 \cdot (\sqrt{26280} - \sqrt{1})}{2} \approx 986 \text{ (P)}.$$

D_M для системи захисту:

$$D'''_M = \frac{2 \cdot 5,67 \cdot (\sqrt{26280} - \sqrt{1})}{1} \approx 1532 \text{ (P)}.$$

Таблиця В.1 – Максимально допустимі експозиційні дози для елементів підстанції

№ п/п	Системи	Блок	Елементи РЕА	D_{igr}, P	$D_{гр}, P$
1	Пульт керування	Блок живлення ($U_{ж} = 24 \text{ В}$)	Транзистор NDS9435A	10^3	10^3
			Конденсатор EHR471M25BA	10^6	
2	Система збору і обробки даних	Блок пам'яті ($U_{ж} = 12 \text{ В}$)	Мікросхема LM258ADT	10^4	
			Мікросхема ULN2803AFWG	10^3	
			Транзистор IRF7420	10^5	

Продовження таблиці В.1

3	Система аварійного ввімкнення	Блок захисту ($U_{ж} = 5 \text{ В}$)	Діод STPS2L25U	10^4
			Транзистор IRFB3207Z	10^4

Допустимий час роботи вимикачної частини підстанції в заданих умовах можна визначити за допомогою формули В.2:

$$t_{\partial} = \left(\frac{D_{2p} \cdot K_{носл} + 2 \cdot p_{1\max} \cdot \sqrt{t_n}}{2p_{1\max}} \right)^2, [\text{год}]. \quad (\text{В.2})$$

Допустимий час роботи пульта керування буде становити:

$$t_{\partial}^i = \left(\frac{10^3 \cdot 4 + 2 \cdot 4,73 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 4,73} \right)^2 \approx 179634 (\text{год}) \approx 20 (p).$$

Допустимий час роботи системи збору і обробки даних буде становити:

$$t_{\partial}^{\prime\prime} = \left(\frac{10^3 \cdot 2 + 2 \cdot 4,73 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 4,73} \right)^2 \approx 45120 (\text{год}) \approx 5,1 (p).$$

Допустимий час роботи системи захисту буде становити:

$$t_{\partial}^{\prime\prime\prime} = \left(\frac{10^3 \cdot 1 + 2 \cdot 4,73 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 4,73} \right)^2 \approx 11386 (\text{год}) \approx 1,3 (p).$$

Результати розрахунку експозиційної дози опромінення та допустимого часу роботи для системи електроспоживання електричної підстанції 750 кВ представлені в таблиці В.2.

Таблиця В.2 – Дані розрахунку D_m , $t_{доп.}$ для підстанції 750 кВ

№	Блоки системи електропостачання	$D_m, (P)$	$t_{доп.}, (р.)$
1	Пульт керування	383	20
2	Система збору і обробки даних	766	5,1
3	Система захисту	1532	1,3

В ході розрахунків було визначено допустимий час роботи вимикачної частини. Отже для пульта керування $t_{доп} = 20$ років при заявлених виробником 8-ми, як бачимо випромінювання не вплине на роботу блока, для система збору і обробки даних $t_{доп} = 5,1$ року при заявлених виробником 4-х, отже дія випромінювання буде не значною, а для блоку системи захисту $t_{доп} = 1,3$ року при заявлених виробником 3-х, що свідчить про швидке руйнування елементів блоку. Даний розрахунок наведено в пункті В.2.

В.2 Дослідження стійкості роботи електричної підстанції 750 кВ в умовах дії електромагнітного імпульсу

За критерій стійкості роботи електричної підстанції 750 кВ в умовах дії електромагнітного імпульсу можна прийняти коефіцієнт безпеки:

$$K_B = 20 \cdot \lg \frac{U_{\partial}}{U_{в(г)}} \geq 40 [\text{дБ}], \quad (\text{В.3})$$

де U_d - допустиме коливання напруги живлення, В;

$U_{в(г)}$ - напруга наведена за рахунок електромагнітного імпульсу у вертикальних (горизонтальних) струмопровідних частинах, В.

Допустиме коливання напруги живлення обчислюється так:

$$U_d = U_{ж} + \frac{U_{ж}}{100} \cdot N, [В], \quad (В.4)$$

де $U_{ж}$ - напруга живлення, В;

N - допустимі коливання, %.

Отже, допустиме коливання напруги живлення для пульта керування при $U_{ж} = 24В$ становить:

$$U'_d = 24 + \frac{24}{100} \cdot 10 = 26,4 (В).$$

Допустиме коливання напруги живлення для системи збору і обробки даних при $U_{ж} = 12В$ становить:

$$U''_d = 12 + \frac{12}{100} \cdot 10 = 13,2 (В).$$

Допустиме коливання напруги живлення для система а захисту при $U_{ж} = 5В$ становить:

$$U'''_d = 5 + \frac{5}{100} \cdot 10 = 5,5 (В).$$

Визначимо горизонтальну складову напруженості електричного поля за формулою:

$$E_r = 10^{-3} \cdot E_B, \text{ [кВ/м]}. \quad (\text{B.5})$$

Отже, горизонтальна складова напруженості електричного поля при $E_B=12,82$ кВ/м буде становити:

$$E_r = 10^{-3} \cdot 12,82 \cdot 10^3 = 12,82 \text{ (В/м)}.$$

Визначимо максимальні довжини струмопровідних частин підстанції:

$$l_{2i} = 4,3 \text{ м}, l_{6i} = 1,6 \text{ м}$$

4. За допомогою формул В.6 та В.7:

$$U_{6i} = E_z \cdot l_{6i}; \text{ [В]} \quad (\text{B.6})$$

$$U_{2i} = E_z \cdot l_{2i}; \text{ [В]} \quad (\text{B.7})$$

Визначимо напруги наводок у струмопровідних частинах.

Пульт керування:

$$U'_{2i} = 12,82 \cdot 0,1 = 1,23 \text{ (В)};$$

$$U'_{6i} = 12,82 \cdot 1,3 = 16,6 \text{ (кВ)}.$$

Система збору і обробки даних:

$$U''_{zi} = 12,82 \cdot 2,7 = 34,61 (B);$$

$$U''_{vi} = 12,82 \cdot 1,2 = 15,39 (\kappa B).$$

Система захисту:

$$U'''_{zi} = 12,82 \cdot 4,3 = 55,1 (B);$$

$$U'''_{vi} = 12,82 \cdot 1,6 = 20,5 (\kappa B).$$

Визначимо коефіцієнти безпеки за формулами Д.8 та Д.9:

$$K_{B_{vi}} = 20 \cdot \lg \frac{U_{\partial}}{U''_{vi}}, [\text{дБ}]; \quad (\text{В.8})$$

$$K_{B_{zi}} = 20 \cdot \lg \frac{U_{\partial}}{U''_{zi}}, [\text{дБ}]. \quad (\text{В.9})$$

Отже, коефіцієнти безпеки для пульта керування будуть дорівнювати:

$$K_{B_{vi}} = 20 \cdot \lg \frac{26,4}{16,6} \approx 4 \text{ (дБ)};$$

$$K_{B_{zi}} = 20 \cdot \lg \frac{26,4}{1,23} \approx 26,634 \text{ (дБ)}.$$

Коефіцієнти безпеки для системи збору і обробки даних будуть дорівнювати:

$$K''_{B_{ei}} = 20 \cdot \lg \frac{13,2}{15,39} \approx -1,3 \text{ (дБ)};$$

$$K''_{B_{zi}} = 20 \cdot \lg \frac{13,2}{34,61} \approx -8,373 \text{ (дБ)}.$$

Коефіцієнти безпеки для системи захисту будуть дорівнювати:

$$K'''_{B_{ei}} = 20 \cdot \lg \frac{5,5}{20,5} \approx -11,428 \text{ (дБ)};$$

$$K'''_{B_{zi}} = 20 \cdot \lg \frac{5,5}{55,1} \approx -20 \text{ (дБ)}.$$

Результати обчислень для інших блоків занесемо до таблиці В.3.

Таблиця В.3 – Розрахунок коефіцієнтів безпеки по блоках підстанції

№	Блок	l_{zi}	l_{ei}	$K_{B_{vi}}$, дБ	$K_{B_{gi}}$, дБ	Стійкість
1	Блок пульта керування	0,1	1,3	4	26,634	нестійкий
2	Блок пам'яті	2,7	1,2	-1,3	-8,373	нестійкий
3	Блок захисту	4,3	1,6	-11,428	-20	нестійкий

Оскільки $K_{B_{vi}} < 40$ дБ та $K_{B_{gi}} < 40$ дБ, то підстанція нестійка в роботі в умовах дії електромагнітного імпульсу.

ДОДАТОК Д

Графічний матеріал



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

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ
ШУНТОВИХ РЕАКТОРІВ 750 кВ**



Виконав: ст. гр ЕС-21м
Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСС

*Сауляк Владислав
Гулько І.О.*

2022 р.

Актуальність

2

Діагностування силового електротехнічного устаткування, зокрема шунтуючих реакторів, сьогодні стає звичайним технічним заходом підвищення надійності і якості електропостачання. Для цього є всі передумови: з одного боку це економічна необхідність і доцільність, а з іншого – технічні можливості. Перше обумовлене високою вартістю шунтуючих реакторів, складністю і значними витратами на їх транспортування і монтаж, а також збитками, викликаними порушенням технологічних процесів через обмеження електропостачання. Друге пояснюється потенційними можливостями сучасного апаратного і програмного забезпечення. В той же час актуальною є розробка методів діагностування, вимогам, що відповідають, які істотно зросли до систем діагностики, і повною мірою використовували б можливості комп'ютерного моделювання. Оскільки шунтуючі реактори є одними з найбільш складних і відповідальних видів електроустаткування електроенергетичних систем, то для оцінки їх технічного стану створені і розвиваються спеціальні системи контролю. Ефективними, в попередженні аварій шунтуючих реакторів, є мікропроцесорні системи безперервного контролю і діагностики, які використовують комплекс датчиків. Високовольтні випробовування шунтувальних реакторів можуть проводитись з використанням індукованої напруги підвищеної частоти. Системи контролю шунтуючих реакторів, що існують на даний час використовують у своїх розрахунках існуючі математичні моделі реакторів, однак ці моделі мають досить суттєвий недолік – вони вимагають досить великого часу впливу на них вхідних сигналів. Тобто на реактор потрібно на протязі великого проміжку часу подавати сигнал для перевірки його стану. Для того, щоб визначити, які реактори потребують першочергової заміни або ремонту потрібно знати їх залишковий ресурс, що підтверджує **актуальність теми**.

Мета та задачі дослідження

3

Метою роботи є вдосконалення методів діагностування шунтових реакторів

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

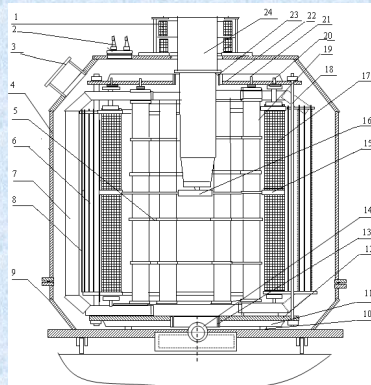
- досліджено конструктивні особливості шунтових реакторів;
- виконано аналіз методів та алгоритмів діагностування ШР;
- розроблено математичну модель загального залишкового ресурсу ШР з використанням нечіткого моделювання;
- виконано розрахунок економічної ефективності вдосконалення системи оперативного діагностування ШР.

Об'єктом дослідження є шунтові реактори.

Предметом дослідження є методи та засоби діагностування шунтових реакторів.

Конструктивні особливості шунтових реакторів

4

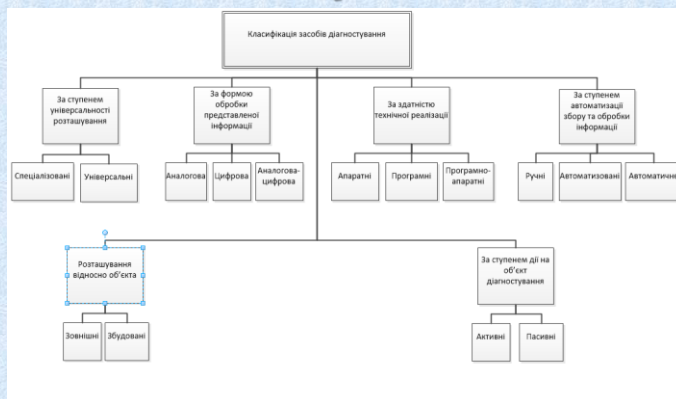


- 1 — трансформатор струму; 2 — виводи 0,5 кВ; 3 — коробка виводів НН; 4 — бак реактора; 5 — ізоляційні плити; 6 — головна ізоляція; 7 — магнітні шунти; 8 — електростатичні екрани; 9 — піддон реактора; 10 — амортизатори; 11 — опорна пластина (брусок); 12 — нижня плита; 13 — нижній електромагнітний екран; 14 — зливний патрубок; 15 — обмотка реактора; 16 — екран ВН («павук»); 17 — вивід ВН; 18 — стяжні шпильки; 19 — фарфорові циліндри; 20 — нажимні болти обмотки; 21 — нажимні болти фарфорових циліндрів; 22 — верхня плита; 23 — верхній електромагнітний екран; 24 — ввід ВН.

Рисунок 4.1 – Принципова схема конструкції реактора РОДЦ 110 000 / 750

Класифікація засобів діагностування ШР

5



Пошкоджуваність шунтових реакторів

6

Реактори РОДЦ-110000/750 – один з ненадійних елементів силового електрообладнання у мережі 750 кВ.



Рисунок 6.1 – Пошкоджений реактор 750 кВ

Пошкоджуваність шунтових реакторів

7

Основні види пошкоджень реакторів :

1. Застосування маслорасосів, у яких обмотка охолоджувалася потоком масла реактора, призводила до того, що при пошкодженні механічної частини маслорасосу, металевий пил попадав у середину бака реактора і осідав у місцях концентрації найбільших напруженостей електричного і магнітного полів – на прошивних рейках у районі виводу з середини обмотки. Через невелику конструкцію цих рейок (вони були виконані суцільними) створювалися сприятливі умови для розвитку так званих «повзучих» розрядів по поверхні рейок.
2. Низька якість виконання пайки елементарних проводів обмотки приводила до виникнення виткових замкнень у обмотці повздовжній диференційний захист не реагував на ці пошкодження, до тих пір, поки не виникало замкнення на землю, а це призводило до виникнення газового пузиря і значного руйнування реактора.
3. Потужні магнітні поля розсіяння викликають значні струми у короткозамкнених контурах, що призводить до перегрівів елементів конструкції, розкладання органічної ізоляції і утворення вуглеводних газів, що розчинюються у маслі.

Пошкоджуваність шунтових реакторів

8



Рисунок 8.1 – Перегрів внаслідок замкнень електромагнітного екрану на пресуючу плиту



Рисунок 8.2 – Сліди перегріву на текстолітовому кільці внаслідок замкнення магнітного шунта на пресуючу плиту

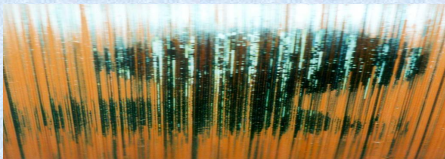


Рисунок 8.3 - Сліди перегріву на С-подібному магнітному шунті

Методи визначення технічного стану ШР

9

- Випробування в режимі резонансу напруг
- Випробування в режимі резонансу струмів
- Вимірювання індуктивності і втрат при робочій напрузі
- Вимірювання індуктивності і втрат при малій напрузі
- Вимірювання вібрації

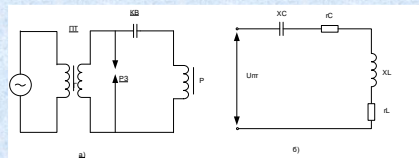


Рисунок 9.1 – Схема випробування в режимі резонансу напруг.
а - схема з'єднань випробовуваного реактора і КБ з джерелом живлення;
б — еквівалентна схема заміщення.

Етапи побудови математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ШР

10



- Обґрунтування доцільності використання методів нейронечіткого моделювання
- Формування таблиці початкових даних
- Розробка структурної схеми діагностичної моделі даних
- Розробка математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу
- Визначення параметрів математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу

Причини виведення в ремонт шунтових реакторів

10.1

Елемент ШР	Діагностичний параметр		Кількість ремонтів ШР, являють собою діагностичного параметра	що значення
	Позначення	Назва параметра		
Паперово-масляна ізоляція	C_x	Ємність паперово-масляної ізоляції	1	2
	γ	Комплексна провідність ізоляції	6	10
	R_l	Активний опір ізоляції ШР	2	4
	$\cos\phi$	тангенс кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції	12	22
	T_l	нагрів покриття вольту, наприклад, внаслідок погіршення значень параметрів ізоляції	2	4
Трансформаторне масло	$XAPF$	за результатами кліматичного аналізу розчинників в трансформаторному маслі газів	12	22
	$\Phi\Delta$	за результатами фізико-хімічного аналізу масла	5	8
Компенсація тиску в'язкої	T_l	температура компенсатора тиску в'язкої	6	10
Пом'якшення С повітряного шунта	R_l	опір ізоляції магнітопроводу відносно баку та землі	6	10
Бак реактора	P	тиск в середній частині баку реактора і рівень масла	3	6
Обмотка ШР	R_l	активний опір обмотки ШР	1	2
Разом			56	100

Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу

11

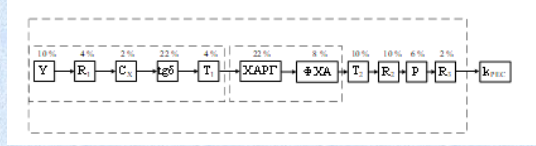


Рисунок 11.1 – Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу шунтуючого реактора

$$k_{i_j} = \frac{X_{i_j, \text{гран}} - X_{i_j, \text{ном}}}{X_{i_j, \text{гран}} - X_{i_j, \text{нов}}}$$

Коефіцієнт залишкового ресурсу k_i за i -м діагностичним параметром:
 де $X_{i, \text{гран}}$ – граничне нормативне значення i -го діагностичного параметра, $X_{i, \text{ном}}$ – значення i -го діагностичного параметра на момент контролю, $X_{i, \text{нов}}$ – початкове значення i -го діагностичного параметра (на момент введення в експлуатацію нового обладнання або після ремонту), i – діагностичний параметр.

Таблиця навчальних даних для моделювання

12

Так для ШР на клас напруги 750 кВ параметр $tg(\delta)$ паперово – масляної ізоляції після ремонту дорівнював 0,2 %, а на момент контролю дорівнював 0,4 %. граничне значення цього параметру – 1,0 %. Тому коефіцієнт залишкового ресурсу $k_{tg(\delta)}$ по діагностичному параметру $tg(\delta)$ визначається за виразом (12.1)

$$k_{tg(\delta)} = \frac{1.0 - 0.4}{1.0 - 0.2} = 0.75 (\text{в.о.}) \quad (12.1)$$

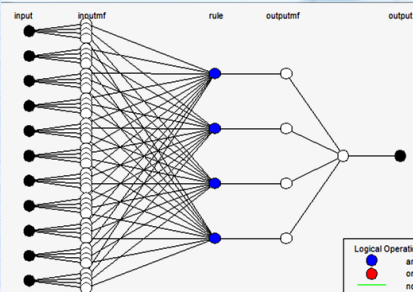
Для послідовної частини схеми коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом (12.2)

$$k_{\text{рес}} = \prod_{\tau=1}^V k_{\tau}^{P_{\tau}} \quad (12.2)$$

Визначення значення коефіцієнта загального ресурсу ШР

13

Для знаходження значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу використовуємо нечітку нелінійну авторегресійну модель коефіцієнта загально залишкового ресурсу ШР. Ця модель встановлює нечітке нелінійне перетворення між значеннями коефіцієнтів залишкового ресурсу по діагностичним параметрам та загальним коефіцієнтом залишкового ресурсу ШР



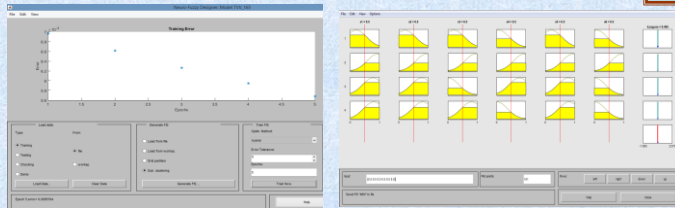
Математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу ШР

14

ЯКНО k_p є "нормальне" ТА k_{R1} є "нормальне" ТА k_{C3} є "нормальне" ТА k_{Q10} є "нормальне"
 ТА k_{T1} є "нормальне" ТА k_{LDF} є "нормальне" ТА k_{Q14} є "нормальне" ТА k_{T2} є "нормальне"
 ТА k_{R2} є "нормальне" ТА k_p є "нормальне" ТА k_{R3} є "нормальне" ТА k_{R4} є "нормальне"
 $k_{\text{запас}} = a_{11} \cdot k_y + a_{12} \cdot k_{R1} + a_{13} \cdot k_{C3} + a_{14} \cdot k_{Q10} + a_{15} \cdot k_{T1} + a_{16} \cdot k_{LDF} + a_{17} \cdot k_{Q14} +$
 $+ a_{18} \cdot k_{T2} + a_{19} \cdot k_{R2} + a_{10} \cdot k_p + a_{111} \cdot k_{R3}$
 ЯКНО k_p є "незначне відхилення" ТА k_{R1} є "незначне відхилення" ТА k_{C3} є "незначне відхилення"
 ТА k_{Q10} є "незначне відхилення" ТА k_{T1} є "незначне відхилення" ТА k_{LDF} є "незначне відхилення"
 ТА k_{Q14} є "незначне відхилення" ТА k_{T2} є "незначне відхилення" ТА k_{R2} є "незначне відхилення"
 ТА k_p є "незначне відхилення" ТА k_{R3} є "незначне відхилення" ТА k_{R4} є "незначне відхилення"
 $k_{\text{запас}} = a_{21} \cdot k_y + a_{22} \cdot k_{R1} + a_{23} \cdot k_{C3} + a_{24} \cdot k_{Q10} + a_{25} \cdot k_{T1} + a_{26} \cdot k_{LDF} + a_{27} \cdot k_{Q14} +$
 $+ a_{28} \cdot k_{T2} + a_{29} \cdot k_{R2} + a_{20} \cdot k_p + a_{211} \cdot k_{R3}$
 ЯКНО k_p є "передаваріант" ТА k_{R1} є "передаваріант" ТА k_{C3} є "передаваріант" ТА
 k_{Q10} є "передаваріант" ТА k_{T1} є "передаваріант" ТА k_{LDF} є "передаваріант"
 ТА k_{Q14} є "передаваріант" ТА k_{T2} є "передаваріант"
 ТА k_{R2} є "передаваріант" ТА k_p є "передаваріант" ТА k_{R3} є "передаваріант" ТА k_{R4} є "передаваріант"
 $k_{\text{запас}} = a_{31} \cdot k_y + a_{32} \cdot k_{R1} + a_{33} \cdot k_{C3} + a_{34} \cdot k_{Q10} + a_{35} \cdot k_{T1} + a_{36} \cdot k_{LDF} + a_{37} \cdot k_{Q14} +$
 $+ a_{38} \cdot k_{T2} + a_{39} \cdot k_{R2} + a_{30} \cdot k_p + a_{311} \cdot k_{R3}$
 ЯКНО k_p є "аварійне" ТА k_{R1} є "аварійне" ТА k_{C3} є "аварійне" ТА k_{Q10} є "аварійне"
 ТА k_{T1} є "аварійне" ТА k_{LDF} є "аварійне" ТА k_{Q14} є "аварійне" ТА k_{T2} є "аварійне"
 ТА k_{R2} є "аварійне" ТА k_p є "аварійне" ТА k_{R3} є "аварійне" ТА k_{R4} є "аварійне"
 $k_{\text{запас}} = a_{41} \cdot k_y + a_{42} \cdot k_{R1} + a_{43} \cdot k_{C3} + a_{44} \cdot k_{Q10} + a_{45} \cdot k_{T1} + a_{46} \cdot k_{LDF} + a_{47} \cdot k_{Q14} +$
 $+ a_{48} \cdot k_{T2} + a_{49} \cdot k_{R2} + a_{40} \cdot k_p + a_{411} \cdot k_{R3}$
 ...

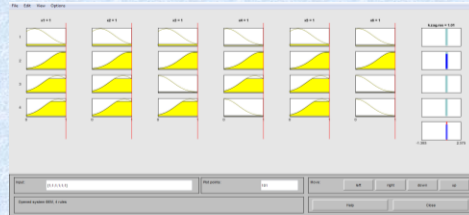
Етапи моделювання MathLab

15



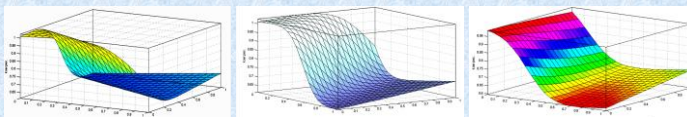
Процес навчання нейромережі

Результати моделювання



Залежності коефіцієнта залишкового ресурсу ТС від діагностичних параметрів

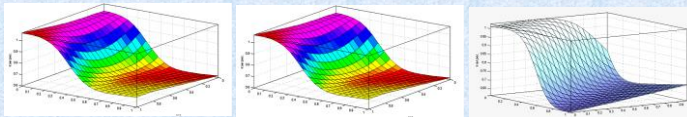
16



Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від $k_T(\delta)$ та k_{T2}

Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від $k_T(\delta)$ та k_p

Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від k_{T2} та k_{T1}



Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від k_{T2} та k_{R1}

Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від $k_T(\delta)$ та k_{T1}

Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ШР від $k_T(\delta)$ та k_p

Висновки

17

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

1. Аналіз вітчизняних та іноземних літературних жерел свідчить про те, що значна частина шунтових реакторів експлуатується понад паспортний ресурс, а тому має місце зростання частоти пошкоджень вузлів ШР.

2. Тривала безаварійна експлуатація реакторів пояснюється невеликою інтенсивністю джерел газоутворення. Однак, ці дефекти призводять до забруднення ізоляції, прискороеного старіння масла, а головне, залишаються непоміченими ті гази, причиною появи яких можуть бути часткові розряди (ЧР) у твердій ізоляції. Про відсутність останніх можна судити лише за результатами виміру ЧР електричним методом.

3. Розроблений метод визначення технічного стану ШР в умовах неповноти початкових даних, який шляхом використання нейро-нечіткого моделювання дозволяє отримати поточне значення коефіцієнту залишкового ресурсу ШР і в залежності від результату зробити висновок про один зі станів ШР: справний, з незначними відхиленнями параметрів, передаварійний, аварійний.

4. Розрахунок економічної ефективності впровадження системи оперативного діагностування шунтових реакторів показав, що термін окупності такого проекту становить 5 років.

5. Виконання інструкцій з охорони праці та дотримання закону України з охорони праці дасть змогу забезпечити потрібні умови праці та зменшити аварійність та об'єктах енергетики.