

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Лежнюк П. Д.

«_____» _____ 2019 р.

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр»

**АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДІАГНОСТУВАННЯ
ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ**

08-13.МКР.016.00.191.ПЗ

Виконав: студент 2 курсу ОППП магістр,
групи ЕС-18м
галузь знань 14 «Електрична інженерія»
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
освітня програма «Електричні станції»
Хавтирко В.В _____

Керівник: к.т.н., проф., доцент каф. ЕСС
Рубаненко О.Є. _____

«_____» _____ 2019 р.

Рецензент: _____

«_____» _____ 2019 р.

3. Консультанти з окремих розділів магістерської кваліфікаційної роботи:

Науковий керівник _____
(підпис)

канд. техн. наук, проф. кафедри ЕСС

наук. ступінь, вчене звання (посада)

О. Є. Рубаненко

ініціали та прізвище

“ _____ ” _____ 2019р.

Економічна частина _____
(підпис)

канд. техн. наук, доцент кафедри ЕСС

наук. ступінь, вчене звання (посада)

В. В. Нетребський

ініціали та прізвище

“ _____ ” _____ 2019р.

Охорона праці та безпека
в надзвичайних ситуаціях _____
(підпис)

д-р. техн. наук, доц, проф. кафедри ЕСС

наук. ступінь, вчене звання (посада)

“ _____ ” _____ 2019р.

Є.А Бондаренко

ініціали та прізвище

Дата попереднього захисту роботи “ _____ ” _____ 2019 р.

Рецензент _____
(підпис)

_____ наук. ступінь, вчене звання (посада)

“ _____ ” _____ 2019р.

_____ ініціали та прізвище

Завдання видав _____
(підпис)

канд. техн. наук, проф. кафедри ЕСС

наук. ступінь, вчене звання (посада)

“ _____ ” _____ 2019 р.

О. Є. Рубаненко

ініціали та прізвище

Завдання отримав магістрант _____
(підпис)

В.В Хавтирко

(ініціали та прізвище)

“ _____ ” _____ 2019 р.

АНОТАЦІЯ

Хавтирко В.В. «Аналіз особливостей діагностування вимірювальних трансформаторів». Магістерська дипломна робота – Вінниця.: ВНТУ. 2019 – с. 185. Бібліографія: 40, рисунків -27, таблиць - 25 .

В магістерській кваліфікаційній роботі розглядаються питання особливостей діагностування вимірювальних трансформаторів, їх конструктивне виконання, призначення та область застосування.

Досліджено причини пошкоджуваності вимірювальних трансформаторів струму та напруги; процеси старіння оливо-паперової ізоляції конденсаторного типу вимірювальних трансформаторів та проаналізовані їх дефекти та пошкодження.

Проаналізовано та вдосконалено існуючі методи діагностування вимірювальних трансформаторів, використано математичний апарат нечітких множин у визначенні дефектів трансформаторних олив та оливо наповненого високовольтного обладнання. Досліджено засоби діагностування вимірювальних трансформаторів.

В економічній частині роботи оцінено комерційний потенціал розробки, спрогнозовано витрати на проведення науково-дослідної роботи, проведено розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності.

В розділі охорони праці та безпеки життєдіяльності проаналізовано умови праці при виконанні робіт, пов'язаних з монтажем вимірювальних трансформаторів, які працюють у складі електроенергетичної системи України; виконані організаційно-технічні рішення з охорони праці за стандартами України з монтажу вимірювальних трансформаторів, а також протипожежний захист вимірювальних трансформаторів.

Ключові слова: вимірювальний трансформатор, діагностика, дефект, нейрон-нечітке моделювання, опір ізоляції.

АННОТАЦИЯ

Хавтырко В.В. «Анализ особенностей диагностики измерительных трансформаторов». Магистерская дипломная работа - Винница .: ВНТУ. 2019 - с. 182. Библиограф.40, рисунков -27, таблиц -25.

В магистерской квалификационной работе рассматриваются вопросы особенностей диагностики измерительных трансформаторов, их конструктивное исполнение, назначение и область применения. Исследованы причины повреждаемости измерительных трансформаторов тока и напряжения; процессы старения масляно-бумажной изоляции конденсаторного типа измерительных трансформаторов и проанализированы их дефекты и повреждения.

Проанализированы и усовершенствованы существующие методы диагностики измерительных трансформаторов, использован математический аппарат нечетких множеств в определении дефектов трансформаторных масел и масляно наполненного высоковольтного оборудования. Исследованы средства диагностирования измерительных трансформаторов. В экономической части работы оценены коммерческий потенциал разработки, спрогнозировано расходы на проведение научно-исследовательской работы, проведен расчет эффективности вложенных инвестиций и периода их окупаемости.

В разделе охраны труда и безопасности жизнедеятельности проанализированы условия труда при выполнении работ, связанных с монтажом измерительных трансформаторов, работающих в составе электроэнергетической системы Украины; исполнены организационно-технические решения по охране труда по стандартам Украины по монтажу измерительных трансформаторов, а также противопожарная защита измерительных трансформаторов.

Ключевые слова: измерительный трансформатор, диагностика, дефект, нейро-нечеткое моделирование, сопротивление изоляции.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
АННОТАЦІЯ	5
ВСТУП.....	9
1 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	13
1.1 Призначення вимірювальних трансформаторів.....	13
1.2 Класифікація вимірювальних трансформаторів	14
1.3 Особливості вимірювальних трансформаторів струму.....	17
1.3.1 Особливості вимірювальних трансформаторів струму 110 кВ.....	20
1.4 Особливості вимірювальних трансформаторів напруги	23
1.4.1 Особливості вимірювальних трансформаторів напруги 110 кВ.....	26
Висновки до першого розділу	29
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖУВАНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	30
2.1 Класифікація дефектів вимірювальних трансформаторів.....	30
2.2 Аналіз дефектів та пошкоджень вимірювальних трансформаторів струму	31
2.3 Аналіз дефектів та пошкоджень вимірювальних трансформаторів напруги	32
2.4 Дослідження процесів старіння оливо-паперової ізоляції конденсаторного типу вимірювальних трансформаторів	35
Висновки по другому розділу	46
3 ВДОСКОНАЛЕННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	47

3.1 Використання математичного апарату нечітких множин у визначенні дефектів трансформаторних олиф та оливо наповненого високовольтного обладнання.....	47
3.2 Математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу вимірювальних трансформаторів струму	58
Висновки до третього розділу	91
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ВІМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	92
4.1 Мости змінного струму	92
4.2 Прилад універсальний вимірювальний Р4833	95
4.3 Вимірювач параметрів трансформаторів К540.....	96
4.4 Пристрій для випробування ізоляції твердих діелектриків АИД-70.....	97
Висновки до четвертого розділу:	99
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	100
5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки	100
5.2 Прогнозування витрат на проведення науково-дослідної роботи	102
5.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації результатів розробки.....	108
5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності.....	110
Висновки до п'ятого розділу	112
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	114
6.1 Задача розділу.....	114

6.2 Аналіз умов праці при виконанні робіт, пов'язаних з монтажем вимірювальних трансформаторів, які працюють у складі електроенергетичної системи України	115
6.3 Розробка організаційно-технічних рішень з охорони праці при електричному монтажі вимірювального трансформатора.....	117
6.3.1 Організаційно-технічні рішення з охорони праці за стандартами України з монтажу вимірювальних трансформаторів.....	117
6.3.2 Розрахунок захисного заземлення трансформатора	121
6.4 Протипожежний захист вимірювальних трансформаторів.....	125
Висновок до шостого розділу	127
ВИСНОВКИ	128
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	129
ДОДАТОК А	135
ДОДАТОК Б.....	140
ДОДАТОК В.....	143
ДОДАТОК Г	154

ВСТУП

Розвиток промисловості в Україні в останні роки обумовлює збільшення споживання електричної енергії та, як наслідок, зростання навантаження на електроенергетична обладнання. У той же час велика кількість вимірювальних трансформаторів, які є важливим обладнанням електроенергетики, експлуатуються з перевищенням призначеного ресурсу (розрахункового терміну служби). Дійсно, ще на початку 2000-х років парк вимірювальних трансформаторів в Україні на 50% - 60% складався з такого обладнання. І, незважаючи на постійне збільшення витрат, що виділяються на оновлення парку енергетичного обладнання, на сьогоднішній день істотно змінити цю ситуацію не вдалося [1, 2]. З іншого боку, багато фахівців відзначають, що міняти трансформатор після закінчення його призначеного ресурсу (25 [3] - 30 [4] років) найчастіше виявляється недоцільно [5]. Справа в тому що, якщо, умови роботи устаткування протягом терміну експлуатації відповідали розрахунковим, а навантаження не перевищували номінальних значень, велика ймовірність того, що стан його твердої ізоляції (основний параметр, що визначає реальний термін служби трансформатора) після завершення призначеного ресурсу залишиться задовільним .

Разом з тим для забезпечення необхідного рівня надійності роботи енергосистеми, при подальшій експлуатації обладнання, що вичерпало призначений ресурс, особлива увага повинна бути приділена контролю його технічного стану. Таким чином, на сучасному етапі розвитку енергетики підвищується актуальність питань діагностики вимірювальних трансформаторів.

Необхідно відзначити, що за минулі роки була проведена велика робота по створенню методів діагностики трансформаторного обладнання, що дозволяють при комплексному їх застосуванні адекватно оцінити стан обстежуваного об'єкта з надійністю, що досягає 98% [6, 7]. Однак,

незважаючи на це, кількість трансформаторів, "доживають" до відмов через термохімічне старіння твердої ізоляції (природна відмова через зношування): складає за різними джерелами від 7% до 20% [7] - тобто причиною відмови від 80% до 93% трансформаторів є різні своєчасно не виявлені дефекти. Дана ситуація обумовлена низькою ефективністю традиційної схеми діагностики.

Традиційна схема (проведення планових комплексних обстежень) розроблялася для умов планової економіки СРСР, принципи якої виключали можливість експлуатації більшої кількості обладнання понад розрахункового періоду. Відповідно, період комплексних обстежень вибирався з урахуванням ймовірностей появи і швидкостей розвитку дефектів в трансформаторах з напрацюванням до 25 років і не враховував особливості розвитку дефектів в застарілому обладнанні. Внаслідок цього в сучасних умовах почастишали випадки, коли за період між обстеженнями дефект встигає зародитися, розвинути і викликати аварійну відмову трансформатора. При цьому просте скорочення інтервалу проведення обстежень призводить до неприйнятної збільшення витрат на діагностику, що говорить про необхідність розробки схеми діагностики, ефективної в сучасних умовах.

Тому, **метою** магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження методів та засобів діагностування вимірювальних трансформаторів струму та напруги, вдосконалення методу діагностування стану ізоляції вимірювальних трансформаторів шляхом моніторингу зміни $\text{tg}(\delta)$, а також використання нейро-нечіткого моделювання в задачах прогнозування стану вимірювальних трансформаторів в умовах неповноти поточних значень діагностичних параметрів.

Об'єктом дослідження - методи діагностики вимірювальних трансформаторів.

Предметом дослідження в даній роботі є вимірювальні трансформатори струму та напруги.

В роботі вирішуються наступні **задачі**:

1. Дослідити особливості вимірювальних трансформаторів струму та напруги напругою 110, 330 та 750 кВ, їх призначення, класифікацію; провести вибір вимірювальних трансформаторів.

2. Провести аналіз причин пошкоджуваності вимірювальних трансформаторів струму та напруги, класифікувати їх дефектів; дослідити процеси старіння оливо-паперової ізоляції конденсаторного типу вимірювальних трансформаторів.

3. Виконати порівняльний аналіз існуючих методів діагностування вимірювальних трансформаторів; вдосконалити метод діагностування стану ізоляції вимірювальних трансформаторів шляхом моніторингу зміни $\text{tg}(\delta)$.

4. Використати нейро-нечіткого моделювання в задачах прогнозування стану вимірювальних трансформаторів в умовах неповноти поточних значень діагностичних параметрів.

5. Провести економічний розрахунок за методикою визначення економічних показників заміни обладнання контролю параметрів ізоляції Р5026 на СА 7100.

6. Проаналізувати умови праці при виконанні робіт, пов'язаних з монтажем вимірювальних трансформаторів, які працюють у складі електроенергетичної системи України, а також розробити організаційно-технічні рішення з охорони праці при електричному монтажі вимірювального трансформатора.

Наукова новизна:

Отримав подальший розвиток метод визначення коефіцієнту залишкового ресурсу трансформаторів струму високої напруги, який шляхом використання методів нейро-нечіткого моделювання дозволяє

одночасно врахувати, як результати поточного контролю діагностичних параметрів так і результати попередніх вимірювань.

Практична цінність.

Наведений приклад визначення коефіцієнту залишкового ресурсу вимірювального трансформатора струму може бути використаний під час оцінювання технічного стану інших вимірювальних трансформаторів струму.

В МКР використанні методи теорії електричних апаратів для визначення діагностичних показників, а також методи теорії нечітких множин та теорії нейронних мереж для визначення прогнозованого значення коефіцієнта залишкового ресурсу високовольтного трансформатора струму.

1 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Вимірювальними трансформаторами струму і напруги називаються трансформатори струму й напруги, які мають нормовані метрологічні характеристики і застосовуються як масштабні вимірювальні перетворювачі. На відміну від силових трансформаторів, вимірювальні трансформатори мають бути малої потужності, щоб забезпечити високі метрологічні характеристики.

Вимірювальні трансформатори струму і напруги застосовуються для розширення діапазону вимірювання струмів і напруг у таких галузях, як електроенергетика, системи енергопостачання, електротранспорт тощо. Крім того, вимірювальні трансформатори створюють електричну ізоляцію між вимірювальними приладами і електричними високовольтними колами, що значно підвищує безпечну роботу обслуговуючого персоналу, оскільки прилади ввімкнені в обмотку низької напруги і заземлені.

1.1 Призначення вимірювальних трансформаторів

Вимірювальні трансформатори призначені для зменшення первинних струмів та напруг до значень, найбільш зручних для підключення вимірювальних пристроїв, реле захисту, пристроїв автоматики. Застосування вимірювальних трансформаторів забезпечує безпеку персоналу, а також дозволяє уніфікувати конструкцію пристроїв та реле.

Вимірювальні трансформатори складаються з двох ізольованих одна від іншої обмоток: первинної з кількістю витків ω_1 та вторинної – ω_2 , які розташовуються на феромагнітному осерді. За схемами включення та умовами роботи трансформатори струму та напруги відрізняються. Первинну обмотку трансформаторів струму включають у вимірювальний

ланцюг послідовно, а трансформаторів напруги – паралельно. Вимірювальні прилади підключають до вторинної обмотки.

Трансформатори струму призначені для вимірювання великих струмів, коли неможливе вмикання приладів безпосередньо на струми контролюючих кіл. Вони складаються з замкнутого сердечника і двох обмоток — первинної і вторинної. Вторинну обмотку ізолюють від первинної та заземлюють її з огляду на забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу. Кількість витків у первинній і вторинній обмотках повинна бути такою, щоб струм у вторинній обмотці при номінальній в первинній становив 1А або 5А.

Виділяють п'ять класів точності трансформаторів: 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 10. Трансформатори класів 0,5; 1; 3 використовують переважно в промислових установках, а класу точності 0,2 — для лабораторних вимірювань.

Вимірювальні трансформатори напруги призначені для пониження напруги до стандартного значення 100 або $100/\sqrt{3}$ В і для відділення кіл (контактів) вимірювання і релейного захисту первинних кіл від високої напруги.

1.2 Класифікація вимірювальних трансформаторів

Існує цілий ряд параметрів, за якими проводиться класифікація вимірювальних трансформаторів струму. Залежно від конкретного критерію можна виділити основні ознаки за якими поділяють вимірювальні трансформатори струму:

- кліматичне виконання (У1 або УХЛ1 згідно з ГОСТ 15150);
- вид внутрішньої ізоляції (масляна, елегазові, тверда тощо);
- вид зовнішньої ізоляції (фарфорова, полімерна тощо);
- ступінь трансформації (одноступінчастий, двоступінчастий);

- кількість вторинних обмоток (дві, три або більше);
- клас точності вторинних обмоток;
- кількість коефіцієнтів трансформації;
- особливість конструктивного виконання (римовидне, ланкове, U-подібне, та бакове);
- спосіб захисту внутрішньої ізоляції від зволоження(герметичний, негерметичний тощо).

Представлена класифікація дозволяє описати всі види вимірювальних трансформаторів струму і правильно класифікувати їх виходячи з основних критеріїв.

Вимірювальні трансформатори напруги (ВТН) - окрема група електротехнічних пристроїв, в яких основний режим роботи - холостий хід, оскільки пристрій не призначений для передачі потужності. За своєю конструкцією і принципом роботи ВТН практично не відрізняється від силового понижувального трансформатора - такий самий сталевий сердечник, одна первинна і кілька вторинних обмоток. Основні ознаки, за якими поділяють однофазні заземлені ТН:

- кліматичне виконання (У1 або УХЛ1 згідно з ГОСТ 15150);
- принцип дії (електромагнітний, ємісний);
- вид внутрішньої ізоляції (масляна, елегазові, тверда тощо);
- вид зовнішньої ізоляції (фарфорова, полімерна тощо);
- ступінь трансформації (одно - , дво - або багатоступінчастий);
- клас точності вторинних обмоток;
- особливість конструктивного виконання (металевий або фарфоровий корпус);
- спосіб захисту внутрішньої ізоляції від зволоження(герметичний, негерметичний тощо).

Вимірювальні трансформатори струму (ВТС) перетворюють струм в ланцюзі до заданих значень. Такі пристрої широко використовуються в

захисних реле як невід'ємна частина енергетичних систем і в первинних ланцюгах електростанцій, струм в яких досягає сотень кА. Особливість такого трансформатора полягає в тому, що вторинна обмотка замикається на контрольному вимірювальному приладі або захисній автоматиці, а на первинну подається струм. Практичний приклад використання – в побутових і промислових мережах електропостачання, де через такий трансформатор підключається стандартний електричний лічильник. Існує кілька основних різновидів вимірювальних трансформаторів струму, які відрізняються типом первинної обмотки (стрижневі, шинні і котушкові).

Таблиця 1.1 – Класифікація вимірювальних трансформаторів по напрузі, та за типом ізоляції

Напруга	Тип вимірювального трансформатора	
	ТС	ТН
110кВ (масляні)	ТФЗМ – 110, ТБМО – 110, ТГМ – 110	НКФ – 110, НАМИ – 110, НДЕ – 110
110кВ (елегазові)	ТАГ – 123, ТГ – 145, ТГФМ – 110, ТОГ – 110, ТОГФ – 110	НОГ – 123, TVG – 123, ЗНОГМ – 123
330 кВ (масляні)	ТФРМ (ТРМ) – 330, ТФУМ – 330	НКФ – 362, НДЕ – 330.
330кВ (елегазові)	SAS – 362, ТАГ – 362, ТГ – 420, ТГФ – 330, ТОГ – 330	SVS – 362, TVI – 362, НКГ – 362
750 кВ (масляні)	–	ETH – 765

продовження таблиці 1.1

750 кВ (елегазові)	SAS – 765, ТОГ – 750	–
-----------------------	-------------------------	---

Якщо брати за критерій робочу напругу, то виділяють дві групи пристроїв – ті, що працюють в діапазоні до 1000 вольт і вище вказаного значення.

Вимірювальні трансформатори постійного струму (ВТПС) отримали широке застосування для зняття значень основних показників в високовольтних ланцюгах. За своєю конструкцією і принципом дії цей вид трансформаторів практично нічим не відрізняється від магнітного підсилювача. В основі принципу роботи лежать нелінійні магнітні властивості феромагнетиків. Конструктивно такий трансформатор має спеціальний сердечник з феромагнітного матеріалу і два різновиди обмоток, які призначені для змінних і постійних струмів.

1.3 Особливості вимірювальних трансформаторів струму

Трансформатори струму класифікують:

- за конструкцією - втулкові, вбудовані, прохідні, опорні, шинні, роз'ємні;
- за родом установки - зовнішні, для закритих і комплектних розподільних пристроїв;
- за числом ступенів трансформації - одноступінчасті і каскадні;
- за коефіцієнтами трансформації - з одним або декількома значеннями;
- за числом і призначенням вторинних обмоток.

Буквені позначення:

Т - трансформатор струму;

Ф - з фарфорового ізоляцією;

- Н - зовнішньої установки;
- К - каскадний, з конденсаторною ізоляцією або котушковий;
- П - прохідний;
- О - одновитковий стрижневий;
- Ш - одновитковий шинний;
- В - з повітряною ізоляцією, вбудований або з водяним охолодженням;
- Л - з литою ізоляцією;
- М - маслонаповнений, модернізований або малогабаритний;
- Р - для релейного захисту;
- Д - для диференціального захисту;
- З - для захисту від замикань на землю.

Технічні характеристики трансформаторів струму:

1. Номінальний первинний і вторинний струм трансформаторів струму.

Трансформатори струму характеризуються номінальним первинним струмом $I_{ном1}$ (стандартна шкала номінальних первинних струмів містить значення від 1 до 40000 А) і номінальним вторинним струмом $I_{ном2}$, який прийнятий рівним 5 або 1 А. Відношення номінального первинного до номінального вторинного струму являє собою коефіцієнт трансформації $K_T = I_{ном1} / I_{ном2}$.

2. Струмова похибка трансформаторів струму. Трансформатори струму характеризуються струмовою похибкою ΔI (у %) і кутовою похибкою (в хвилинах). Залежно від струмової похибки вимірювальні трансформатори струму розділені на п'ять класів точності: 0,2; 0,5; 1; 3; 10. Найменування класу точності відповідає граничній струмовій похибці трансформатора струму при первинному струмі, рівному 1-1,2 номінального. Для лабораторних вимірювань призначені трансформатори струму класу точності 0,2, для приєднань лічильників електроенергії -

трансформатори струму класу 0,5, для приєднання щитових вимірювальних приладів - класів 1 і 3.

3. Навантаження трансформаторів струму. Навантаження трансформатора струму - це повний опір зовнішнього ланцюга Z_2 , виражений в Ом. Опори r_2 і x_2 - це опори приладів, проводів і контактів. Навантаження трансформатора можна також характеризувати уявною потужністю S_2 (В·А). Під номінальним навантаженням трансформатора струму $Z_{2ном}$ розуміють навантаження, при якому похибки не виходять за межі, встановлені для трансформаторів даного класу точності. Значення $Z_{2ном}$ задається в каталогах.

4. Електродинамічна стійкість трансформаторів струму. Електродинамічну стійкість трансформаторів струму характеризують номінальним струмом динамічної стійкості $I_{дин}$.

За конструкцією розрізняють трансформатори струму котушкові, одновиткового типу, багато виткові, з литою ізоляцією (типу ТПЛ і ТЛМ). Трансформатор типу ТЛМ призначений для КРП і конструктивно поєднаний з одним із штепсельних роз'ємів первинного ланцюга комірки.

Для великих значень струмів застосовують трансформатори типу ТШЛ і ТПШЛ, у яких роль первинної обмотки виконує шина. Електродинамічна стійкість таких трансформаторів струму визначається стійкістю шини.

Для ВРП випускають трансформатори типу ТФН в фарфоровому корпусі з паперово-масляною ізоляцією і каскадного типу ТРН. Для релейного захисту є спеціальні конструкції. На виводах масляних бакових вимикачів і силових трансформаторів напругою 35 кВ і вище встановлюються вбудовані трансформатори струму. Похибка їх за рівних умов більша, ніж у окремо розташованих трансформаторів.

1.3.1 Особливості вимірювальних трансформаторів струму 110 кВ

Трансформатори струму позначаються ТАА, ТАС, або ТА 1, ТА2, а струмові реле КА1, КА2.(рис. 1.1) У мережах ефективно заземленою нейтраллю (мережі напругою 110 кВ і вище) ТС в обов'язковому порядку встановлюються у всіх трьох фазах. У випадку, коли в три фази вторинні обмотки ТС з'єднуються за схемою «зірка», у випадку двох фаз - «неповна зірка».

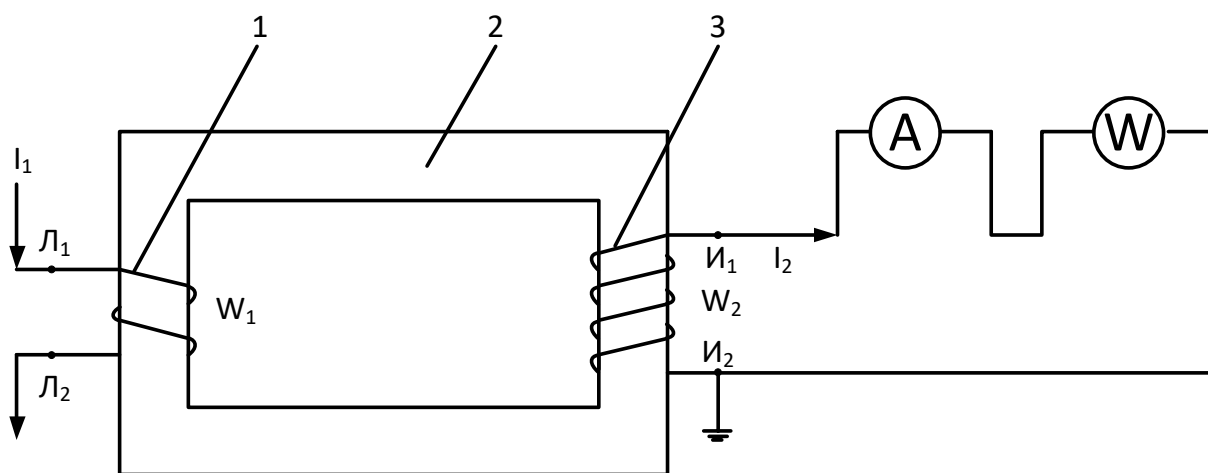


Рисунок 1.1 – Схема ввімкнення вимірювального трансформатора струму: 1 — первинна обмотка; 2 — магнітопровід; 3 — вторинна обмотка
Розглянемо масляні та елегазові ТС напругою 110 кВ

Трансформатор струму масляний типу ТФЗМ (ТФНД) – 110,220 з обмоткою ланкового типу, паперово-масляною ізоляцією призначені для передавання сигналу вимірювальної інформації приладам вимірювання, захисту, автоматики, сигналізації і управління в електричних колах змінного струму частоти 50 або 60 Гц.

Трансформатори цього типу мають ланкову конструкцію і паперову ізоляцію без вирівнювальних алюмінієвих обкладок. Захист внутрішньої ізоляції від зволоження у них недостатній через малий об'єм масляного

затвора, який не перевищує 50 см³. Силікагелевий патрон не в змозі осушити необхідний об'єм зовнішнього повітря(від 1,5 л до 2 л на добу).

Недостатній захист внутрішньої ізоляції трансформаторів струму призводить до того, що через 15-20 років вологість внутрішньої ізоляції може досягти небезпечних значень (від 4% до 6%), а надмірна волога конденсується на дні. При цьому критична інтенсивність часткових розрядів настає вже під робочою напругою. В результаті ризик пошкодження трансформаторів різко зростає.

При виборі номінального струму трансформатора виходять, в першу чергу, з необхідності забезпечити вимоги по термічній і динамічній стійкості до струмів КЗ. При цьому ТС сильно недовантажений по струму, і температура його ізоляції перевищує температуру навколишнього середовища не більше ніж на 5°C – 10°C. Ресурс паперової ізоляції навіть після роботи трансформатора струму протягом 4- років і більше залишається великим.

Трансформатор струму елегазовий з порцеляною ізоляцією типу ТОГФ-110, 220 (УХЛ1)

Трансформатори струму серії ТОГФ призначені для передачі сигналу вимірювальної інформації вимірювальним приладами і пристроям захисту і управління у відкритих і закритих розподільних пристроях змінного струму частоти 50 Гц на номінальну напругу 110, 220 кВ. Вони мають наступні особливості:

- Трансформатор струму вибухобезпечного виконання, що забезпечується наявністю захисного пристрою.
- Трансформатор струму пожежобезпечного виконання, що забезпечується застосовуваними в конструкції матеріалами і негорючим інертним газом.
- Застосування елегазової ізоляції з низьким рівнем витоків.
- Наявність надійних ущільнень, що забезпечують герметичність пристрою, в тому числі при низьких температурах навколишнього повітря.

- Застосування надійних довготривалих покриттів сталевих частин трансформатора і опорних металоконструкцій гарячим цинкуванням не менше 100 мкм, термодифузійним цинком.

- Забезпечення необхідних замовником параметрів.
- Застосування надійних комплектуючих.
- Трансформатор струму практично не вимагає обслуговування.
- Трансформатори струму можуть поставляти на замовлення з рамою під три трансформатора, опорними стійками під раму або без них.

Трансформатор струму типу ТГФМ-110П

ТС типу ТГФМ-110 П призначений для передавання сигналу вимірювальної інформації вимірювальним пристроям та приладам захисту та керування в відкритих розподільних пристроях змінного струму частоти 50 та 60 Гц на номінальну напругу 110 кВ, а також для експлуатації в макрокліматичних районах з помірним та холодним кліматом (кліматичне виконання У1, УХЛ1), при цьому:

- верхнє робоче значення температури навколишнього середовища 40 °С;

- нижнє робоче значення температури навколишнього середовища:

для У1 – мінус 50 °С;

для УХЛ1 – мінус 60 °С.

- висота над рівнем моря – не більше 1000 м.

Механічне навантаження від вітру швидкістю до 40 м/с та від тяжіння проводів в вертикальному напрямленні до поверхні виводів – 1000 Н (100 кгс) та горизонтальному напрямленні в площині виводів – 1000 Н (100 кгс).

ТС відноситься до опорних трансформаторів струму, основними частинами якого є металевий корпус з мембраною, фарфорова кришка, блок вторинних обмоток в екрані, основа з сигналізатором тиску та коробкою виводів. ТГМФ- 110 П має три варіанти виконання по

конструкції первинної обмотки: одновитковий, двовитковий на два коефіцієнта трансформації та багатовитковий. Виконання за конструкцією первинної обмотки обумовлюється при замовленні ТС в залежності від вимог. В конструкції двовиткового ТС зворотній струм по другому витку протікає по корпусу. В багатовитковому ТС є 12 витків, виконаних гнучким проводом. В залежності від номінального первинного струму вмикається паралельно необхідна кількість витків. В коробці вторинних виводів виділені зажими вторинної обмотки для комерційного обліку, зажими закриті скобою з болтами, в яких передбачені отвори для пломбування. На нижньому фланці встановлений зворотній клапан для підкачування електричного та сигналізатор тиску з температурною компенсацією, приєднаний до трансформатора струму через зворотній клапан.

1.4 Особливості вимірювальних трансформаторів напруги

Трансформатор напруги призначений для зниження високої напруги до стандартного значення 100 або $100/\sqrt{3}$ В і для відділення ланцюгів вимірювання та релейного захисту від первинних ланцюгів високої напруги. Схема включення однофазного трансформатора напруги показана на рис. 1; первинна обмотка включена на напругу мережі U_1 , а до вторинної обмотки (напруга U_2) приєднані паралельно котушки вимірювальних приладів і реле. Для безпеки обслуговування один вихід вторинної обмотки заземлений. Трансформатор напруги на відміну від трансформатора струму працює в режимі, близькому до холостого ходу, так як опір паралельних котушок приладів і реле великий, а струм, що споживається ними, невеликий.

Номінальний коефіцієнт трансформації визначається наступним виразом(1.1):

$$K_U = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}, \quad (1.1)$$

де $U_{1ном}$ і $U_{2ном}$ - номінальні первинна і вторинна напруги відповідно.

Розсіювання магнітного потоку і втрати в осерді призводять до похибки вимірювання.

$$\Delta U_{\%} = \frac{K_U U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\%. \quad (1.2)$$

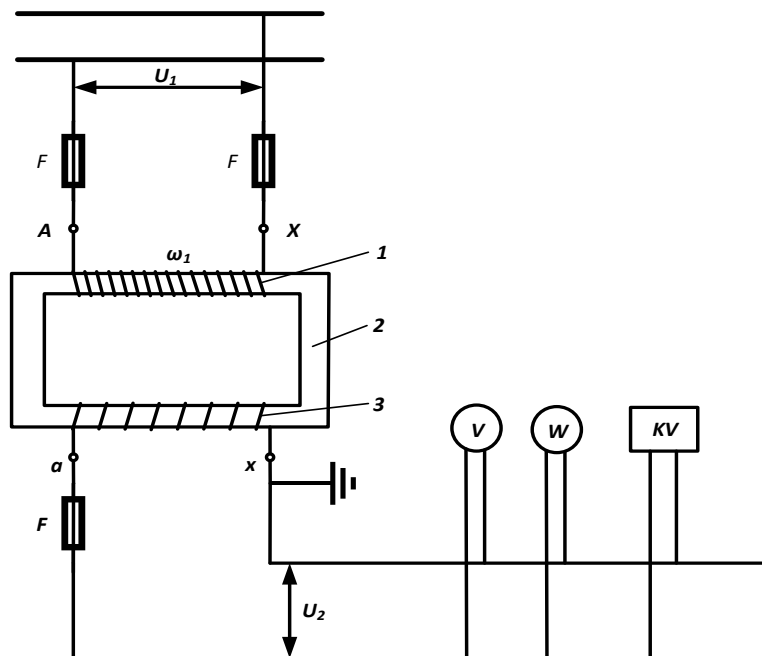


Рисунок 1.2 – Схема ввімкнення вимірювального трансформатора напруги: 1 — первинна обмотка; 2 — магнітопровід; 3 — вторинна обмотка

Так само як і в трансформаторах струму, вектор вторинної напруги зміщений щодо вектора первинної напруги неточно на кут 180° . Це визначає кутову похибку.

Залежно від номінальної похибки розрізняють класи точності 0,2; 0,5; 1; 3.

Похибка залежить від конструкції магнітопровода, магнітної проникності сталі і від $\cos\varphi_2$, тобто від вторинного навантаження. У конструкції трансформаторів напруги передбачається компенсація похибки по напрузі шляхом деякого зменшення числа витків первинної обмотки, а також компенсація кутової похибки за рахунок спеціальних компенсуючих обмоток.

Сумарне споживання обмоток вимірювальних приладів і реле, підключених до вторинної обмотки трансформатора напруги, не повинно перевищувати номінальну потужність трансформатора напруги, так як в іншому випадку це призведе до збільшення похибок.

Залежно від призначення можуть застосовуватися трансформатори напруги з різними схемами з'єднання обмоток. Для вимірювання трьох міжфазних напруг можна використовувати два однофазних двообмоткових трансформатора НОМ, НОС, НОЛ, з'єднаних за схемою відкритого трикутника (рис. 1.4, а), а також трифазні двообмоткові трансформатори НТМК, обмотки яких з'єднані в зірку (рис. 1.3, б). В останньому випадку обмотка, з'єднана в зірку, використовується для приєднання вимірювальних приладів, а до обмотки, з'єднаної в розімкнутий трикутник, приєднується реле захисту від замикань на землю. Таким же чином в трифазну групу з'єднуються однофазні трьохобмоткові трансформатори типу ЗНОМ і каскадні трансформатори НКФ.

По конструкції розрізняють трифазні і однофазні трансформатори. Трифазні трансформатори напруги застосовуються при напрузі до 18 кВ, однофазні - на будь-які напруги. За типом ізоляції трансформатори можуть бути сухими, масляними і з литою ізоляцією.

Трансформатори напруги з масляною ізоляцією застосовуються на напругу 6 - 1150 кВ в закритих і відкритих розподільних пристроях. У цих трансформаторах обмотки і магнітопровід залиті маслом, яке служить для ізоляції та охолодження.

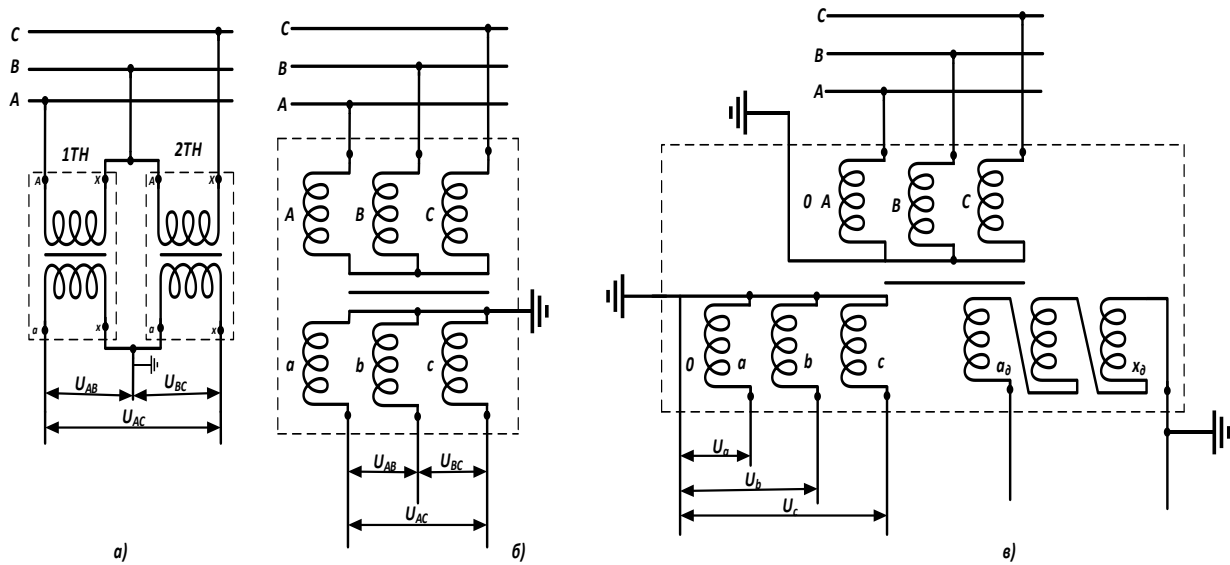


Рисунок 1.3 – Схеми з'єднання обмоток трансформаторів напруги

1.4.1 Особливості вимірювальних трансформаторів напруги 110 кВ

Трансформатор напруги масляний типу НКФ – 110

ТН цього типу мають паперово-масляну ізоляцію. Обмотки ВН всіх ступенів трансформації з'єднані послідовно, а зрівнювальні обмотки між ступенями – паралельно. Дотримуватися при з'єднанні потрібно обов'язково. Масло у кожному ступені захищено від зволоження силікагелевим патроном, що мало ефективно.

У результаті до середини нормативного терміну служби паперова ізоляція зволожується, а надмірна волога конденсується на дні.

При сильному зволоженні в товщі між шарової паперової ізоляції під робочою напругою виникають часткові розряди високого рівня. Вони утворюють прогари, які надалі розширюються, збільшуючись у розмірі. У маслі з'являються вуглеводневі гази і погіршується його tgδ. Цей процес може тривати роками і завершитися або пошкодженням, або

відбракуванням ТН. Зміна масла у таких ТН неефективна. Відновлювальному ремонту такі ТН не підлягають.

При сильному зволоженні у електромагнітних ТН розвивається виткове замикання в первинній обмотці. Короткозамкнені витки перегріваються, зона ушкодження розширюється, захоплюючи сусідні шари. В результаті зростає напруга вторинної обмотки, що є достовірною ознакою що розвивається пошкодження, за умови, що напруга сусідніх фаз залишається стабільною. У таких випадках потрібно негайно зняти напругу з ТН.

Пошкодження ТН може наступити і в результаті КЗ в відрізьку кабелю, що з'єднує виводи вторинних обмоток з агрегатною шафою. При заміні старого ТН слід замінювати і старі кабелі.

Трансформатор напруги масляний типу НДЕ – 110

У трансформаторах НДЕ на напругу 110 - 750 кВ використовуються сучасні термостабільні ємнісні подільники напруги, що дозволяють забезпечувати в експлуатації клас точності 0,2.

Застосування ємнісних трансформаторів типу НДЕ-М замість індуктивних трансформаторів типу НКФ дозволяє вирішити проблему стійкості вимірювальних трансформаторів до ферорезонансних явищ в енергосистемах.

Трансформатори серії НДЕ складаються з ємнісного подільника напруги, електромагнітного пристрою, роз'єднувача та розрядника. Ємнісний подільник напруги складається з конденсаторів зв'язку з'єднаних послідовно і встановлених один на одного, екрану.

Обмотка реактора з'єднана послідовно з первинною обмоткою понижуючого трансформатора, демпфер з'єднаний паралельно з вторинною обмоткою понижуючого трансформатора.

Реактор необхідний для компенсації ємнісного падіння напруги в подільнику і підтримки постійного значення напруги в первинній обмотці понижувального трансформатора при зміні навантаження.

Демпфер призначений для придушення субгармонійних коливань, що виникають у вторинному ланцюзі при відключенні навантаження або КЗ.

У понижувальному трансформаторі магнітопровід шихтований, з електротехнічної сталі і шарові циліндричні обмотки. Реактор має магнітопровід стрижневої конструкції і електротехнічну обмотку.

Трансформатор напруги елегазовий типу НОГ-123 IV (НОГ-110 IV)

Трансформатор НОГ-123 IV I (НОГ-110 IV I) має кліматичне виконання "У" категорії розміщення 1 і його необхідно експлуатувати при наступних умовах:

- установку необхідно проводити на висоті, що не перевищує 1000 м над рівнем моря;
- температура повітря всередині КРУ від -45°C до $+40^{\circ}\text{C}$;
- неагресивні і не вибухонебезпечна довкілля.

Трансформатори не вимагають планових ремонтів і забезпечують стабільну роботу впродовж усього терміну служби. Трансформатори типу НІГ є вибухобезпечними і пожежобезпечними. При короткому замиканні не відбувається руйнування металоконструкцій і не виникає пожежа. Крім візуального контролю тиску газу, є можливість підключення.

Трансформатор НОГ-123 IV I (НОГ-110 IV I) має наступну конструкцію. Всередині трансформатор заповнений елегазом і має датчик контролю тиску з пристроєм сигналізації. На вимогу можлива додаткова установка датчика щільності елегазу з газосигналізаторами по верхньому і нижньому рівню тиску елегазу. У конструкції трансформатора типу НОГ повинна бути передбачена захисна мембрана, яка не допускає збільшення надлишкового тиску в трансформаторі, при аварії, обумовленої пробоем внутрішньої ізоляції трансформатора і виникненням дуги. Викид газу відбувається через запобіжний пристрій - захисну мембрану, тому для забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу, викид повинен відбуватися поза робочої зони персоналу і бути направлений вгору.

Висновки до першого розділу

Досліджено особливості вимірювальних трансформаторів струму та напруги напругою 110, 330 та 750 кВ, їх призначення, класифікацію, також показано алгоритм вибір вимірювальних трансформаторів.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖУВАНOSTІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

2.1 Класифікація дефектів вимірювальних трансформаторів

Одна з найчастіших причин виходу з ладу електроустановки є утворення дефектів в ізоляції трансформаторів струму і напруги. Тому діагностика вимірювальних трансформаторів струму і напруги дозволяє дати оцінку його стану і уникнути аварійних ситуацій.

Вимірювальні трансформатори, як правило, мають більшу стійкість до коротких замикань і перенапруг в мережі, ніж вимірювальні прилади. Тому дуже часто виявляються пошкодженими саме вимірювальні прилади, а не трансформатори. Замінюючи пошкоджений прилад, необхідно попередньо виконати перевірку трансформатора струму або напруги. При перевірці трансформаторів слід виміряти похибку в коефіцієнті трансформації і кутову похибку.

При перевірці полярності вимірювальних трансформаторів позначення однієї з обмоток, наприклад, первинної вибирають довільно. Залишається визначити тільки початок вторинної обмотки. Простий спосіб перевірки полярності полягає в порівнянні випробуваного трансформатора з іншим, полярність якого вже відома.

Діагностування вимірювальних трансформаторів засобами контролю такі дає змогу класифікувати такі дефекти:

- дефекти контактних з'єднань (зовнішніх і внутрішніх);
- дефекти основної ізоляції;
- дефекти магнітопроводу (викові замикання та обриви у вторинних обмотках, замикання між пластинами в магнітопроводі);
- зниження рівня масла в маслonaповнених баках;
- нагрів фарфорової кришки;

2.2 Аналіз дефектів та пошкоджень вимірювальних трансформаторів струму

Характерна ознака пошкодження трансформатора струму - невідповідність вторинного струму первинному. Однак таке ж значне зменшення вторинного струму може виникнути і при несправності і помилці в схемі. Тому перевірці підлягає як трансформатор струму, так і його коло.

Виявити пошкоджений трансформатор струму можна за наступною характерною ознакою: вторинний струм при опорі вторинних ланцюгів, близькому до нуля (обмотка закорочена на затискачах), значно більший, ніж вторинний струм при фактичному опорі.

Конструктивні особливості трансформаторів струму (ДСТУ 7746) дають змогу діагностувати засобами інфрачервоної техніки такі дефекти:

- порушення контактів у роз'ємних і нероз'ємних контактних з'єднаннях (зовнішніх і внутрішніх);
- порушення контактів у перемикачах відгалужень первинних обмоток трансформатора струму (зовнішніх і внутрішніх);
- дефекти основної ізоляції (загальне підвищення діелектричних втрат у основній ізоляції через її зволоження, забруднення та старіння; локальне підвищення діелектричних втрат у основній ізоляції, зумовлене конструктивними особливостями конкретних типів трансформаторів струму; поява в литій епоксидній ізоляції ТС провідних доріжок тощо);
- дефекти вторинних обмоток і магнітопроводу (виткові замикання та обриви у вторинних обмотках, замикання між пластинами в магнітопроводі);
- зниження рівня масла в маслonaповнених баках ТС;
- дефекти розрядників, встановлених між елементами багатоелементних ТС (на з'єднувальних обмотках);

- дефекти монтажу (наприклад, шунтування первинної обмотки в разі помилок під час монтажу ТС типу ТРН (ТФРМ) у парі з підвісним роз'єднувачем (неправильним підключенням нерухомого контакту та заземлюваного ножа роз'єднувача).

Ознаки та причини дефектів ТС наведено в додатку В.

2.3 Аналіз дефектів та пошкоджень вимірювальних трансформаторів напруги

Конструктивні особливості ТН (ДСТУ 1983) дають змогу засобами інфрачервоної техніки діагностувати:

- дефекти контактних з'єднань (в основному, зовнішніх);
- дефекти обмоток ТН і ізоляційних стоек, які підтримують активну частину ТН серії НКФ;
- дефекти обмоток сухих ТН і ТН з литою ізоляцією; їм властиві ті самі дефекти, що й маслонаповненим ТН);
- дефекти магнітопроводу;
- зниження рівня масла в маслонаповнених ТН;
- дефекти конденсаторів подільника напруги ТН типк НДЕ;
- дефекти допоміжних електричних апаратів (роз'єднувачів, розрядників тощо), присутніх в електричній схемі ТН типу НДЕ.

Температури нагріву та перевищення температури відкритих контактних з'єднань і струмопровідних частин вимірювальних ТН не повинні перевищувати значень, вказаних в [8]. Перевищення температури інших елементів ТН, призначених для застосування в електричних колах змінного струму на напругу 0,38-750 кВ включно та виконань класів У, УХЛ, ХЛ за ГОСТ 15150 і ГОСТ 1553, не повинні перевищувати значень, вказаних в табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Допустимі температурні значення для елементів ТН напругою 0,38-750 кВ

№	Елемент ТН	Клас нагрів-ті за ГОСТ 8865	Перевищення температури, °С, за номінальної напруги та протікання струму, який відповідає граничній потужності трансформатора та ефективній температурі навколишнього повітря 40 °С
1	Обмотки, занурені в масло	Усі класи	60
2	Обмотки, залиті епоксидним компаундом	В	85
3	Обмотки, залиті бітумним компаундом	В	50
4	Обмотки сухих ТН	А Е В F Н	60 75 85 110 135
5	Масло у верхніх шарах: - виконання герметичне або з пристроєм, який повністю захищає масло від контакту з навколишнім повітрям; - в інших випадках	- -	55 50

Поверхні фарфорових покриттів не повинні мати локальних нагрівів, а значення температур, виміряних в аналогічних зонах покриттів трьох фаз, не повинні відрізнятися між собою більше, ніж на 2 °С, у протилежному випадку вважається, що ТН має внутрішній дефект.

Підвищене навантаження вимірювальних трансформаторів, що перевищує допустиме для заданого класу точності, вносить додаткову негативну похибку (недооблік) при вимірюванні споживання

електроенергії. Для визначення навантаження вимірюють одночасно струми і напруги у вторинних колах. Вимірювання можуть бути проведені як під робочим струмом і напругою, так і на відключеному приєднанні з подачею напруги від стороннього джерела. Знизити навантаження вторинної обмотки трансформатора струму можна шляхом збільшення перерізу жил кабелів в струмових ланцюгах і шляхом виключення з цих ланцюгів додаткової апаратури.

Для зниження навантаження і зниження похибки трансформатора напруги навантаження слід розподілити по можливості так, щоб струми в усіх фазах були однакові. Навантаження трансформаторів напруги, з'єднаних у відкритий трикутник, доцільно розподілити наступним чином. Якщо на напругу U_{ca} не вдалося підключитися, то вона по можливості рівномірно розподіляється між напругами U_{ab} і U_{bc} . Необхідно перевірити можливість зниження навантаження шляхом виключення додаткової апаратури в ланцюгах напруги, а також перевірити падіння напруги в проводах, що з'єднують трансформатор напруги з лічильником.

Підвищене падіння напруги в проводах, що з'єднують трансформатор напруги з лічильником, призводить до збільшення негативної похибки. Практично це може мати місце, якщо довжина проводу перевищує 15 м. Падіння напруги може бути визначено дослідним шляхом. Для цієї мети придатний вольтметр змінного струму, що володіє великим внутрішнім опором (1 10 кОм / В). Вольтметр підключається до кінців жили. Вимірювання втрати напруги, як різниці лінійних напруг на кінцях кабелю не може дати достовірних результатів. Для зменшення падіння напруги необхідно збільшити переріз жил кабелю. В окремих випадках доводиться жити лічильники не від загальних «шин напруги», а прокладати до них окремий кабель.

2.4 Дослідження процесів старіння оливо-паперової ізоляції конденсаторного типу вимірювальних трансформаторів

Оскільки паперово-масляна ізоляція обладнання є одним з найбільш розповсюджених і відповідальних елементів електрообладнання електроенергетичних систем [9, 10], то для оцінки її технічного стану створені і розвиваються спеціальні системи контролю [11, 12]. Вони контролюють обладнання великої потужності та дозволяють підвищити надійність на електростанціях і крупних вузлових підстанціях. Для визначення дефектів паперово-масляної ізоляції обладнання в умовах експлуатації доцільно застосовувати навіть складні і вартісні контрольні-діагностичні системи, наприклад, систему автоматичного визначення місця пошкодження та його причини [11].

В той же час, широко проваджені методи та засоби періодичних випробувань без відключення обладнання. До них відносять наступні основні випробування: вимірювання часткових розрядів (ЧР); вібраційний контроль; тепловізійний контроль; вимірювання тангенса кута втрат, ємності і струму небалансу трифазної системи введів; відбір проб масла для проведення різних аналізів, але для визначення стану паперово-масляної ізоляції обладнання в умовах експлуатації, не кожен метод дасть змогу правильно визначити дефект.

Як бачимо, не дивлячись на велику кількість методів і засобів, як періодичного так і постійного контролю стану високовольтного обладнання ЕЕС, не поодинокі випадки його пошкодження.

В наш час на багатьох електричних підстанціях України велика кількість високовольтного обладнання пропрацювала понад 25 років. Вимірювальні трансформатори струму та напруги є одним з найнебезпечніших ланок енергосистем. В більшості випадків аварії трансформаторів струму на напруги супроводжуються повним руйнуванням апарату, а іноді і сусіднього обладнання. Аналіз даних про

відмови [13] свідчить про те, що характерними дефектами для ТС 330-750 кВ є місцеві дефекти, розвиток яких приводить або до теплового пробою, або до появи часткових розрядів і електричного пробою основної ізоляції.

Такі дефекти бажано виявляти на ранній стадії розвитку. Особливо часто пошкодження має місце ТС та високовольтний ввід. В наш час вони виявляються періодичного контролю тангенса кута діелектричних втрат під високовольтних випробувань електроенергетичного обладнання та шляхом контролю засобами інфрачервоної техніки. До причин появи дефектів можна віднести дію струмів короткого замикання і високочастотних перенапруг, зволоження, утворення струмопровідних відкладень на внутрішній поверхні фарфорової покритишки для ввідів і т.п. У міру розвитку дефектів з'являються часткові розряди і змінюється тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції, у тому числі і в меншу сторону. Дефекти в ізоляції можуть розвиватися як повільно, так і за короткий час. Тому періодичний контроль не завжди дозволяє їх зафіксувати, а це диктує необхідність використовувати пристрої безперервного контролю за характеристиками ізоляції ТС і високовольтних ввідів. В світі існує декілька виробників таких пристроїв, всі вони базуються на різних методах контролю, проте різні методи нерівнозначні і не однаково ефективні. На даний момент більшість енергокомпаній, у тому числі і НЕК «Укренерго» [12], займаються впровадженням різних систем безперервного контролю ізоляції трансформаторів струму і високовольтних ввідів. Проте різні виробники використовують різні методи контролю, які, як вже було відмічено, нерівнозначні і не однаково ефективні. Тому, метою роботи є оцінка можливості, ефективності та доцільності використання систем безперервного контролю ізоляції залежно від використовуваного методу контролю. Фактори пов'язані з пошкодженням ізоляції показані на рис. 2.1 [14].

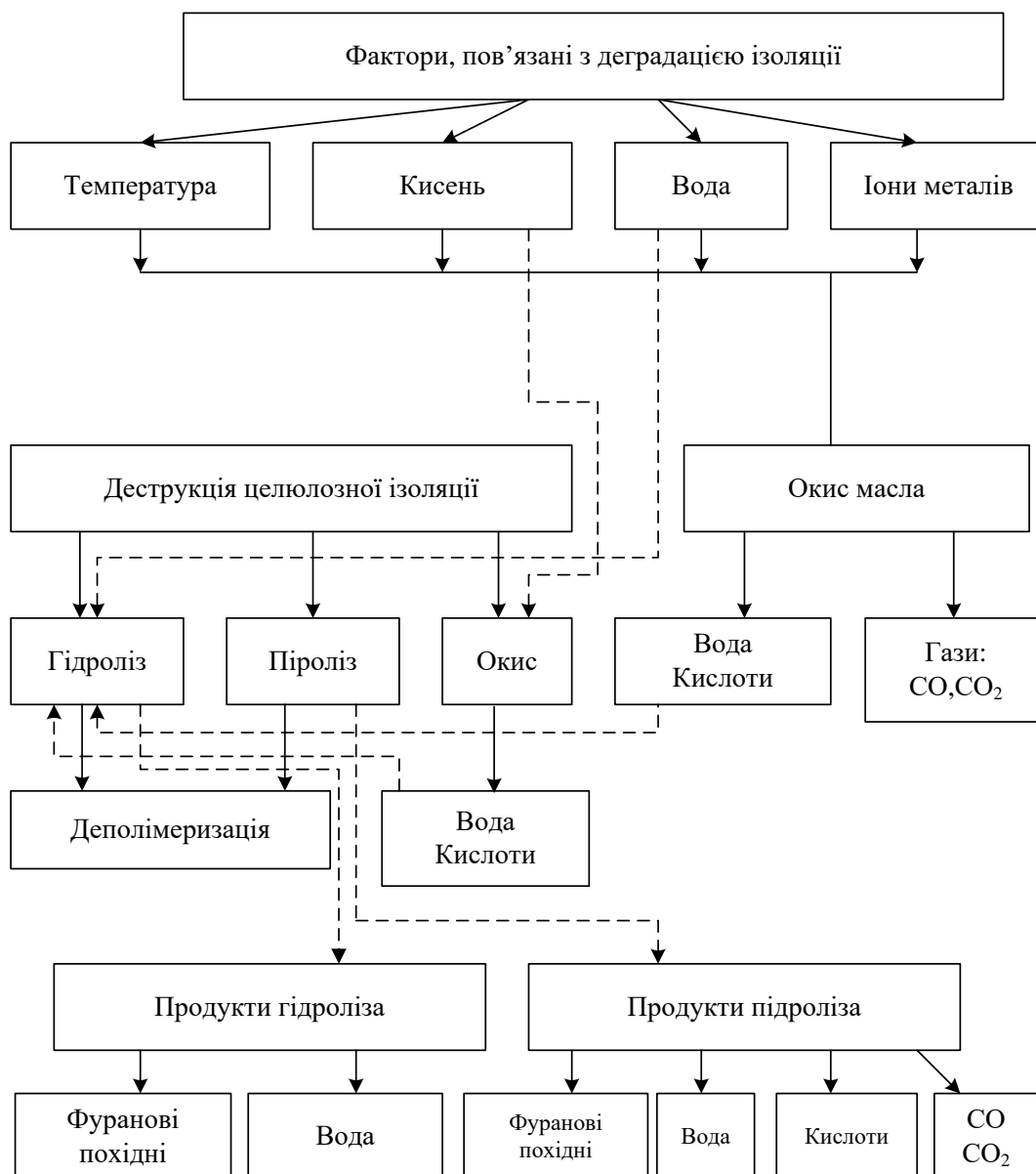


Рисунок 2.1 – Фактори пов'язані з пошкодженням ізоляції

Електрична міцність ізоляції при змінній напрузі промислової частоти залежить від швидкості підйому напруги і часу витримки ізоляції при заданій напрузі [15-17].

Короткочасна електрична міцність ізоляції зазвичай визначається при плавному підйомі напруги промислової частоти до пробивної, причому при таких випробуваннях для зразків ізоляції з пробивним напругою до 20 кВ швидкість підйому напруги зазвичай дорівнює 1 кВ/сек. Тривалість підйому напруги, у будь-якому випадку, не повинна

бути менше 10 сек. При великих значеннях пробивної напруги швидкість підйому становить 2-3% від очікуваного пробивної напруги в секунду. При такому способі визначення електрична міцність при плавному підйомі напруги приблизно відповідає міцності при 30-секундній витримці під напругою, що прикладається до ізоляції поштовхом.

Відомо, що залежність пробивної напруги від товщини різна для листової ізоляції, виконаної з конденсаторних і з кабельних паперів.

Розглянемо залежність пробивної напруги від товщини або від числа аркушів конденсаторного паперу в листовій ізоляції з гострим краєм електрода.

Мала товщина кожного аркуша конденсаторного паперу (7-12 мк) обумовлює істотну залежність пробивної напруги від числа аркушів. В одному аркуші конденсаторного паперу завжди є провідні включення, що складаються в основному з частинок вугільного пилу, металів, їх солей та оксидів. Число таких включень залежить від товщини листа і для паперу товщиною 10-12 мк становить 50-60 на квадратний метр її поверхні [18-19].

Якщо товщина діелектрика дорівнює двом аркушам, то електрична міцність його буде визначатися тільки одним листом конденсаторного паперу. Ймовірність збігу двох включень у різних аркушах при площі електродів менше 1 м² дуже мала, тому можна вважати, що кожне провідне включення шунтує тільки один аркуш паперу. При цьому пробій відбувається в місці розташування включення, що здебільшого відповідає області рівномірного поля.

Точно так само пробивна напруга U_{np} трьох аркушів буде визначатися електричною міцністю двох аркушів; чотирьох аркушів - міцністю трьох аркушів і т. д.

Таким чином,

$$U_{np} = E_{об} (n - 1) \delta_{п} \quad (2.1)$$

де $E_{об}$ - пробивна напруженість паперу за відсутності включень;

$\delta_{п}$ – товщина одного аркушу;

n – число аркушів в шарі ізоляції.

Середня пробивна напруженість E_{np} визначається наступним співвідношенням(2.2):

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{n \delta_{п}}. \quad (2.2)$$

Зі збільшенням числа аркушів у шарі ізоляції середня пробивна напруженість буде зростати за законом(2.3):

$$E_{np} = E_{об} \frac{n - 1}{n}. \quad (2.3)$$

Наявність провідних включень в шарі здебільшого призводить до пробую ізоляції в області середини електрода. Однак якщо число аркушів більше семи-восьми, то починає позначатися крайовий ефект на краю електрода (обкладки). Як тільки товщина діелектрика збільшиться до такого ступеня, що провідні включення практично перестануть позначатися ($\frac{n-1}{n}$ близько до одиниці), пробой будуть відбуватися в тому місці, де напруженість електричного поля найбільша.

У різко неоднорідному полі умова пробую може бути сформульована двояко. Якщо виходити з того, що різниця потенціалів, пройдена лавиною електронів, повинна перевершувати певну критичну величину, то умова переходу часткового розряду в наскрізний пробой виразиться наступною формулою (2.4):

$$\int_0^{r_k} E_r dr \geq U_{кр}, \quad (2.4)$$

де r - відстань від тієї точки електрода, де напруженість найбільша, відлічена вздовж шляху розвитку розряду; E_r - напруженість на відстані r , $U_{кр}$ - критична величина різниці потенціалів, пройденої лавиною електронів.

При іншій можливій умові розвитку пробою напруженість поля E_r повинна перевершувати напруженість E_0 , достатню для підтримки іонізації на певній відстані r_k , яка необхідно для утворення лавини електронів достатньої інтенсивності. Ця умова виражається формулою (2.5):

$$E_{r_k} \geq E_0. \quad (2.5)$$

Аналіз поля біля краю обкладки плоского конденсатора, з урахуванням її товщини [20, 21], призводить, незалежно від того яку з двох умов розвитку пробою прийнято за критерій, до наступної формули середньої пробивної напруженості в функції від товщини діелектрика d (2.6):

$$E_{пр} = kd^{-0.5}, \quad (2.6)$$

де коефіцієнт k залежить від величини U_0 або E_0 .

Характерна залежність пробивної напруженості від кількості аркушів представлена на рис. 2.2 [22]. Як видно з цього рисунка, в даному випадку внаслідок накладення обох розглянутих вище механізмів виникає максимум пробивної напруженості при товщині шару приблизно 80 мк (кількість аркушів близько 8). Кількість аркушів (товщина шару ізоляції), відповідна максимуму пробивної напруженості, залежить від площі

електродів, зміщуючись при збільшенні площі у бік більшої кількості аркушів.

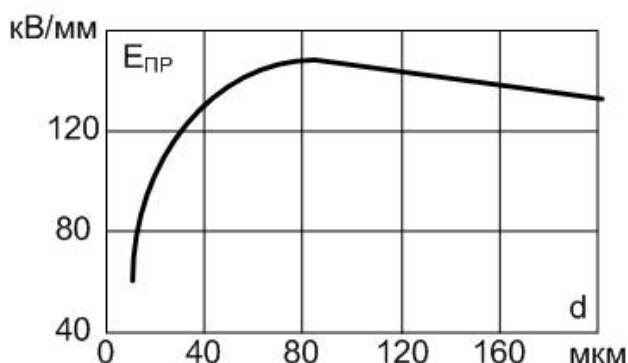


Рисунок 2.2 – Залежність пробивної напруженості від товщини ізоляції для конденсаторного паперу 10 мк

У ряді випадків бажано вибрати таку товщину діелектрика, при якій пробивна напруженість була б найбільшою. Тому часто товщину ізоляції секцій, виготовленої з конденсаторного паперу, приймають такою, яка дорівнює семи-восьми аркушам при товщині аркуша 10-12 мк. Крім короточасної електричної міцності, для ізоляції характерний розкид пробивних напруг окремих зразків. При збільшенні цього розкиду в процесі масового виробництва виробів зростає ймовірність появи зразків з ослабленою ізоляцією. На рис. 2.3 [20] наведені криві розподілу зразків за пробивним напруженням при числі аркушів, рівному 3, 5 і 7. Порівняння кривих розподілу показує, що розкид зразків з п'ятьма аркушами мало відрізняється від розкиду зразків з сімома аркушами, при цьому середньоквадратичне відхилення σ одно 6-8%. Істотне збільшення розкиду в пробивних напругах настає при зменшенні числа аркушів менше п'яти. Зменшення електричної міцності і збільшення розкиду пробивних напруг при зменшенні числа аркушів у шарі менше п'яти призводить до необхідності, в цьому випадку, зниження допустимих напруженостей.

Залежність пробивної напруженості від товщини листової ізоляції з кабельного паперу має дещо інший вигляд. Унаслідок великої її товщини мало ймовірна наявність такого включення, яке б шунтувало весь аркуш.

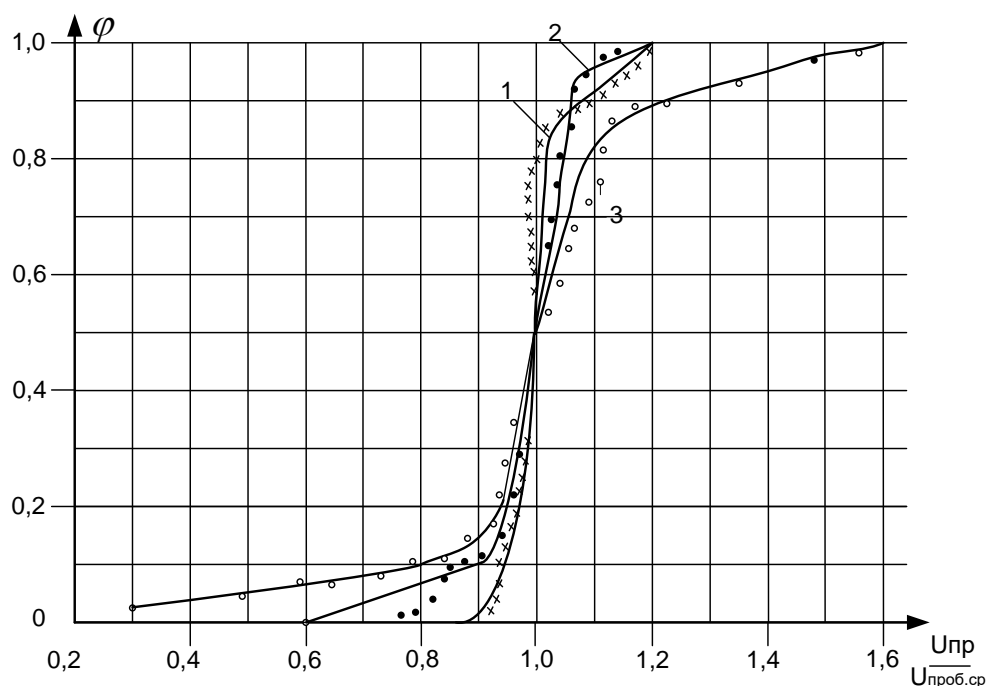


Рисунок 2.3 – Криві ймовірності пробивних напруг для конденсаторного паперу 12 мк.1 - n= 7 аркушів; 2 - n=5 аркушів, 3 - n=3 аркушів

Тому електрична міцність ізоляції з кабельного паперу в області рівномірного або слабо нерівномірного поля мало залежить від товщини ізоляції, поступово зменшуючись із збільшенням товщини діелектрика. В області сильно нерівномірного поля на краю електрода середня пробивна напруженість зменшується приблизно пропорційно $d^{-0.5}$. Залежність пробивної напруженості масляного прошарку від товщини для рівномірного поля в зазорі, прилеглому до електрода (пунктиром показана область розкиду пробивних напруженостей) показана на рисунку 2.4.

Слід зазначити, що електрична міцність листової ізоляції з конденсаторного паперу при нарузі промислової частоти перевершує міцність такої ізоляції з кабельного паперу приблизно в два рази (120

кВ/мм для конденсаторного паперу і 50 кВ/мм для кабельної). Це пояснюється як більшою щільністю конденсаторного паперу, так і меншими товщинами шарів ізоляції, застосовуваних в даному випадку.

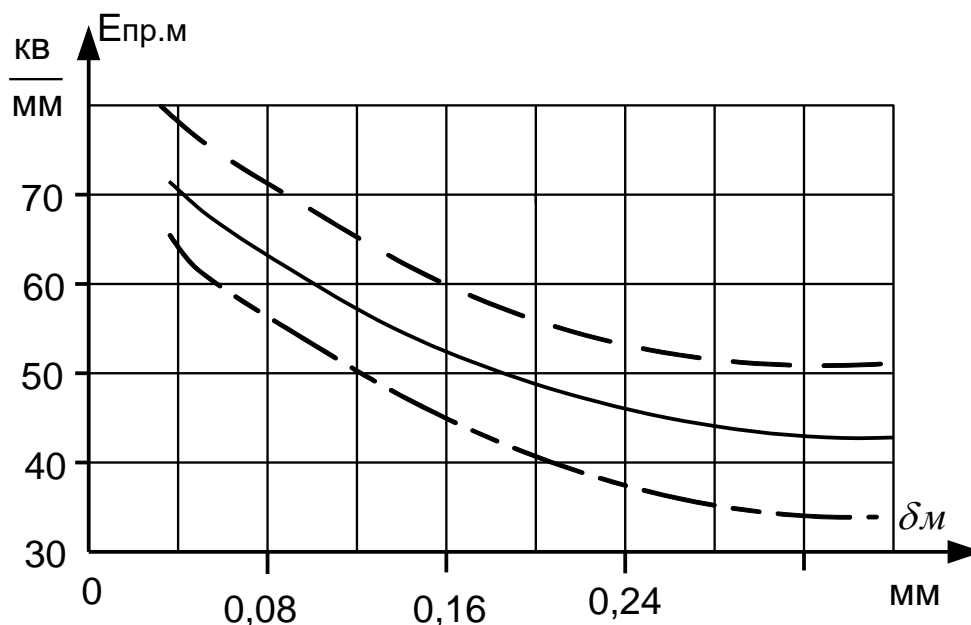


Рисунок 2.4 – Залежність пробивної напруженості масляного прошарку від товщини для рівномірного поля в зазорі, прилеглому до електрода (пунктиром показана область розкиду пробивних напруженостей)

У стрічкової ізоляції наявність масляних зазорів між шарами паперу значно полегшує розвиток пробою. Електрична міцність масляного зазору набагато менше міцності одного шару паперу такої ж товщини. Тому в масляних зазорах при певній напрузі виникають місцеві часткові розряди, що призводять при подальшому зростанні напруги до пробою ізоляції. Схема розвитку пробою в стрічковій ізоляції показана на рисунку 2.5. Залежність пробивної напруги від товщини ізоляції для кабельного паперу (стрічкова ізоляція) показана на рисунку 2.6.

Дуже часто, особливо при тривалому впливі підвищеної напруги, пробій стрічкової ізоляції розвивається на велику відстань по

зигзагоподібному шляху між шарами паперу, так як при розряді в масляному зазорі виникає поздовжня складова напруженості електричного поля, що сприяє розвитку пробою між шарами до найближчого масляного каналу.

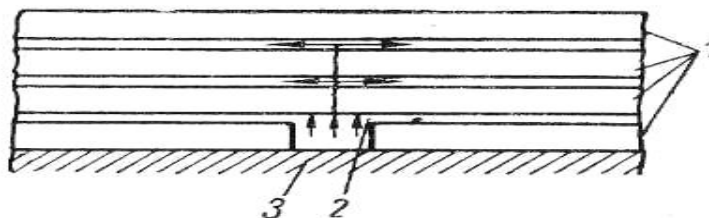


Рисунок 2.5 – Схема розвитку пробою в стрічковій ізоляції: 1 – папір; 2 – масляна прошарок, 3 – жила

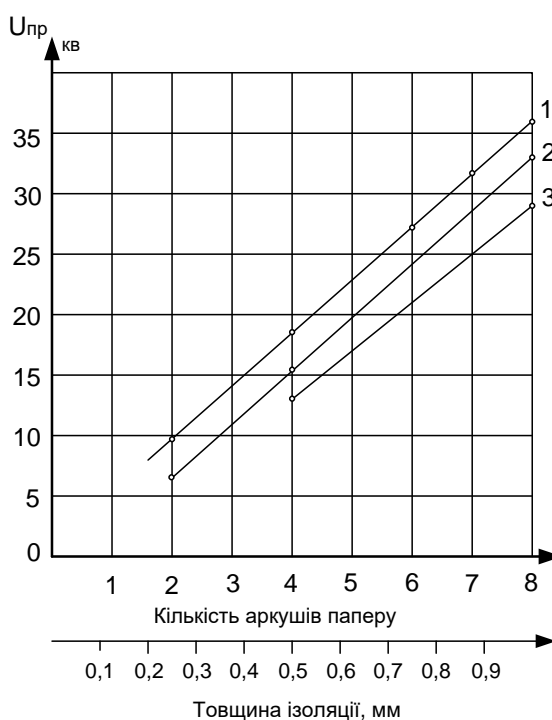


Рисунок 2.6 – Залежність пробивної напруги від товщини ізоляції для кабельного паперу (стрічкова ізоляція): 1– зразки без масляних прошарків; 2 – зразки з масляними прошарками товщиною в один шар паперу (0,12 мм), розташованими у стрижня; 3 – теж саме тільки з масляними прошарками товщиною в два шари паперу

Конструкція зразків паперово-масляної ізоляції показана на рис. 2.7.

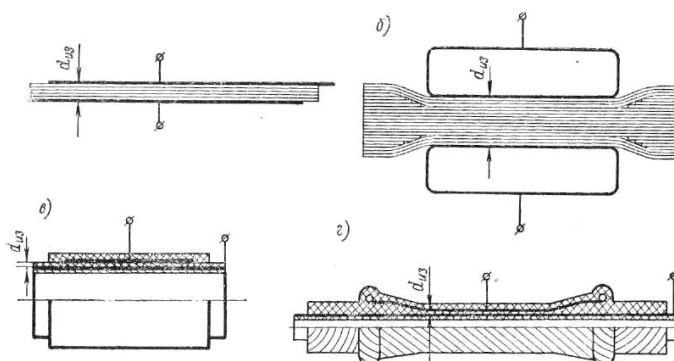


Рисунок 2.7 – Конструкція зразків паперово-масляної ізоляції: а – листова ізоляція, електроди з гострими краями, б – листова ізоляція, електроди з ослабленим крайовим ефектом; в – стрічкова ізоляція, електроди з гострими краями; г – стрічкова ізоляція, електроди з ослабленим крайовим ефектом

У стрічкової ізоляції з кабельного паперу [23], внаслідок масляних зазорів між стрічками, електрична міцність одного шару дуже низька і суттєво зростає із збільшенням товщини ізоляції. Починаючи з восьми-десяти шарів, накладених з зазором між стрічками, і з чотирьох-п'яти шарів, накладених впів-нахилу, пробивна напруженість в області слабо нерівномірного поля мало змінюється з ростом товщини ізоляції, а пробивна напруга зростає пропорційно цій товщині (рис. 2.7). За наявності значної нерівномірності поля електрична міцність у великій мірі визначається конфігурацією поля електродів.

У разі гострого краю електрода (рис. 2.7, а і в) середня пробивна напруженість падає пропорційно $d^{-0.5}$. У зразках з усуненим крайовим ефектом (рис. 2.7, г) пробивна напруженість визначається максимальною

напруженістю. У цьому випадку пробивна напруга пропорційна $r \ln \frac{r_2}{r_1}$, де r_1 і r_2 – внутрішній і зовнішній радіуси електродів.

На рис. 2.8 показана залежність пробивної напруги від товщини діелектрика для апаратної ізоляції трансформаторів струму ланкового типу, електродами якого є два тороїда. Порівняння наведеної експериментальної і розрахункової залежностей показує, що пробивна напруга в цьому випадку також визначається максимальною напруженістю, яка в середньому становить 40-50 кВ/мм. Товщина ізоляції на кожному електроді - $\frac{d}{2}$.

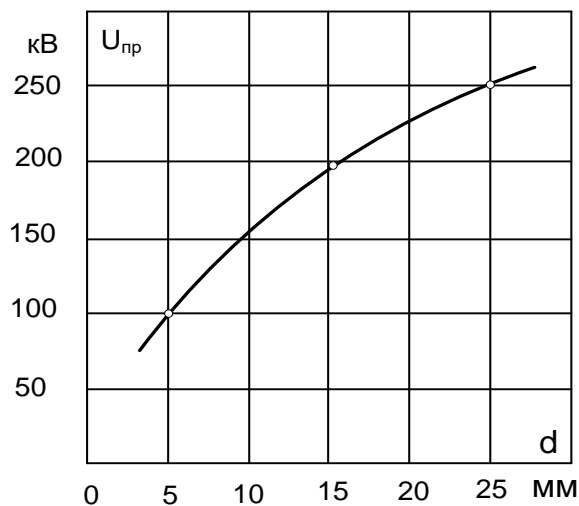


Рисунок 2.8 – Залежність пробивної напруги від товщини для ізоляції трансформаторів струму ланкового типу.

Висновки по другого розділу

Проаналізовано причини пошкоджуваності вимірювальних трансформаторів струму та напруги, показана класифікація їх дефектів; досліджено процеси старіння оливо-паперової ізоляції конденсаторного типу вимірювальних трансформаторів.

3 ВДОСКОНАЛЕННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

3.1 Використання математичного апарату нечітких множин у визначенні дефектів трансформаторних олиव та оливо наповненого високовольтного обладнання

Проведення оперативного діагностування трансформаторних олив та оливо наповненого обладнання в умовах неповноти даних на момент визначення їх поточного стану пов'язано з необхідністю продовження експлуатації, як зношеного так і нового електрообладнання (ЕО) енергопостачальних компаній обленерго, агропереробних підприємств та потужних агропромислових комплексів. Прикладами таких підприємств можуть бути: Вінницька птахофабрика на якій експлуатуються силові та вимірювальні оливо наповнені трансформатори 35 та 110 кВ, ТОВ ВКП «Прилуки-Агропереробка», ЗАТ «Прилуцький м'ясокомбінат», ТОВ «Мак-Бест» (харчова промисловість); Агропромислове об'єднання ім. Івана Супруненка ВАТ «Прилуцький хлібозавод» та інші.

Розглянемо визначення поточного стану трансформаторної оливи та високовольтного обладнання на прикладі вимірювальних трансформаторів струму (ВТС) 110 кВ.

Огляд зовнішнього стану (перший рівень оцінювання технічного стану ВТС) забезпечує спрощене оцінювання. Він дозволяє виявити: протікання масла, суттєві пошкодження фарфорової покришки та інші дефекти.

На другому рівні здійснюється контроль технічного стану не лише зовнішніх елементів ВТС, а і внутрішніх складових ВТС, їх вузлів і елементів (наприклад, шляхом дослідження проб трансформаторної оливи), а також шляхом визначення технічного стану ВТС в обсязі міжремонтних випробувань. Другий рівень потребує високої кваліфікації персоналу і

оперування значними об'ємами спеціальної інформації. Таке діагностування здійснюється або представниками експлуатуючих підприємств, або шляхом залучення спеціалізованих організацій. На цьому рівні ставиться мета більш точно, ніж на першому рівні, оцінити фізичне і моральне зношування ВТС для обґрунтування можливості подальшої експлуатації, а також фіксації внутрішніх дефектів, як на початковій стадії їх розвитку, так і вже розвинених – аварійних. Для підвищення ефективності проведених робіт використовують інформаційну систему (ІС), організовану на базі персонального комп'ютера (ПК) і складену із реляційної бази даних (БД), бази знань і експертної системи (ЕС).

Діагностування ВТС передбачає три етапи досліджень:

– лабораторний – фізико-хімічний аналіз (ФХА) трансформаторного масла ВТС; аналіз розчинених у маслі газів та хроматографічний аналіз розчинених у трансформаторному маслі уводу газів (ХАРГ) [4, 5, 7, 8] ;

– випробовування ВТС і контроль параметрів з відключенням і без відключення напруги;

– статистичний – діагностування ВТС за результатами досліджень і експертних оцінок стану ВТС з використанням БД і БЗ.

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

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

б) технічний стан інших внутрішніх складових ВТС.

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

Перший стан відповідає інтервалу від значень після заливання в ВТС до значень, які обмежують область нормального стану масла в експлуатації (з урахуванням значень гранично допустимих параметрів масла, яке заливається в ВТС, визначених діючими нормативними документами [6]). На цьому інтервалі можна гарантувати надійну роботу ВТС при контролі діагностичних параметрів, наприклад: пробивної напруги, кислотного числа та температури спалаху в закритому об'ємі.

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

Розглянемо приклади правил бази знань.

Перше правило з бази знань.

ЯКЩО температура спалаху старого масла знижується,

ТО є локальні внутрішні перегріву.

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

Друге правило.

ЯКЩО понизилась електрична міцність масла,

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

Пояснення: “область ризику” відповідає інтервалу від значень в області нормального стану масла до гранично допустимих значень показників якості масла в експлуатації. Погіршення навіть одного з багатьох показників призводить до зниження надійності ВТС. В цьому випадку потрібен більш частий і розширений контроль для прогнозування терміну служби і прийняття спеціальних заходів із відновлення експлуатаційних властивостей масла. Таким способом можна відвернути заміну ВТС і не виводити ВТС в ремонт.

Зниження стабільності масла як охолоджувального середовища, в результаті окислення призводить до потемніння і помутніння, з'являються

низькомолекулярні кислоти, які негативно впливають на ізоляцію, виникає корозія металу, випадає осад і підвищується в'язкість, що погіршує умови охолодження ВТС. Ще один приклад правила з БЗ:

Аналіз проб масла як джерела інформації про стан ВТС заснований на двох стадіях діагностування ВТС з метою виявлення дефектів, що розвиваються за результатами ХАРГ.

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

Вихід параметрів масла за гранично допустимі межі відповідає певним видам дефектів ВТС, наприклад: локальні нагриви, часткові розряди, іскріння контактів, зволоження, забруднення і старіння масла та твердої ізоляції [34].

БД, поряд з іншою інформацією, містить граничні значення концентрації деяких газів в маслі ВТС, які перебувають в експлуатації. Так, в таблиці 3.1 наведені деякі граничні значення для ВТС 110 кВ, що знаходяться в експлуатації.

Таблиця 3.1 – Норми концентрації деяких газів в трансформаторному маслі ВТС 110 кВ, мкл/л [2]

H ₂	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CH ₄	C ₂ H ₂
600	800	3000	140	60	30	<1

Із розвитком дефекту концентрація розчинених у маслі газів зростає.

Оскільки норми визначалися емпірично й мають статистично-імовірнісну зглаженість, а результати аналізу проб масла залежать від багатьох факторів (особливостей роботи уводу, засобу відбору масла, обсягу й способу зберігання проб масла, виду газу-носія, особливостей конструкції газоаналізатора (хроматографа), виду опису отриманих даних, тривалості дослідження, кваліфікації персоналу й ін.), то результат порівняння з нормою є умовно правильним. Тому для компенсації впливу перерахованих факторів невизначеності та спрощення порівняння різних форм подання результатів контролю та вимірювань діагностичних параметрів, дані норми й результати аналізу за допомогою розрахунків у системі управління базами даних (СУБД) подані у вигляді лінгвістичних змінних та згруповані в нечіткі множини так, що кожен результат вимірювань чи контролю належить до тієї чи іншої множини зі своїм значенням функції належності до цієї множини. Діапазон зміни концентрації характерних газів, що виділяються з появою дефектів, подано у вигляді лінгвістичної змінної [34] (рис. 3.1).

Терм-множинам T_i присвоєні лінгвістичні значення, які ідентифікують концентрацію газу: T_R – нехарактерний газ [34]; T_{LR1} – мала концентрація газу; T_{LR2} – висока концентрація газу; T_L — основний газ[1].

$$G^i = \langle T'_R, T'_{LR1}, T'_{LR2}, T'_L \rangle. \quad (3.1)$$

У виразі (3.1): i – номер газу: 1 – водень (H_2), 2 – метан (CH_4), 3 – етан (C_2H_6), 4 – етилен (C_2H_4), 5 – ацетилен (C_2H_2), 6 – оксид вуглецю (CO), 7 – вуглекислий газ (CO_2) і т. п.; $T = \mu(x)$ – терм-множина, що характеризується лінгвістичною змінною та значенням функції належності μ (3.3) до відповідної нечіткої множини концентрацій газів (x), а значення функції належності ($\mu(x)$) результату вимірювань досліджуваного газу до відповідної нечіткої множини концентрацій газу, в свою чергу, залежить

від концентрації газу x ; $R = f(\beta)$, $L = f(\alpha)$, $LR = f(\alpha, \beta)$ – види нечітких множин з функціями належності (3. 4), графіки яких мають трикутну форму (рис.3.1) [3] і описуються рівняннями (3.2).

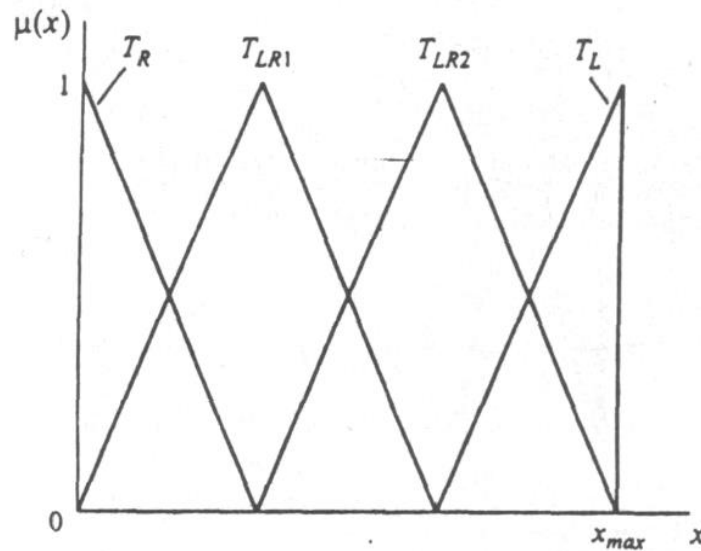


Рисунок 3.1 – Графіки функцій належності, які відповідають термам-множинам лінгвістичних змінних досліджуваного газу

$$\mu = f_{\Delta}(x; a, b, c) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{array} \right\}. \quad (3.2)$$

Ці графіки мають відповідно праву або ліву (рис. 3.1) спадну частину (характеризуються параметрами α або β), а також мають дві спадні частини (характеризуються параметрами α та β) [36].

Віднесення отриманих результатів ХАРГ до відповідних нечітких множин з найбільшими значеннями функцій належності, порівняння отриманих результатів із нормами (з використанням) дозволяє зробити висновок про наявність або відсутність внутрішніх пошкоджень в ВТС.

На основі нормативних даних складено таблиці терм-множин норм газів, що виділяються при різних внутрішніх дефектах у ВТС (таблиця 3.8), і дефектів, які визначаються по сполученнях цих терм-множин (таблиця 3.2). Дефекти ідентифікуються класом k і номером j .

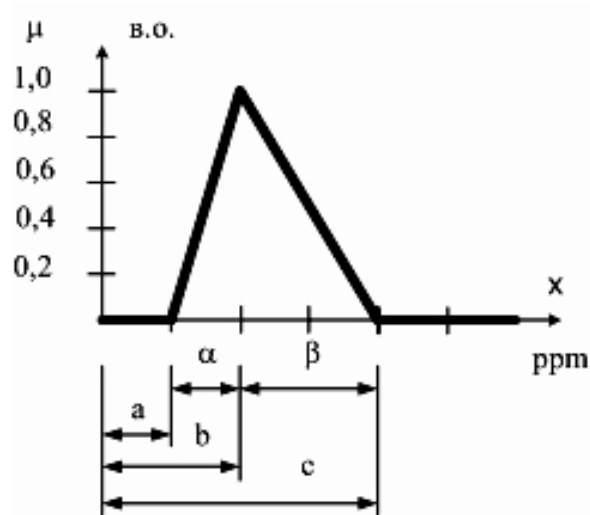


Рисунок 3.2 – Графік функції належності трикутної форми

Таблиця 3.2 – Терм-множини норм газів, що виділяються при різних внутрішніх дефектах

H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	CO ₂	Терм-множина дефектів $D^{(j)}_k$
1	2	3	4	5	6	7	8
Руйнування масла електричними розрядами $D^{(1)}_k$							
T ¹ _L	T ² _{LR2}	T ³ _R	T ⁴ _{LR2}	T ⁵ _L	T ⁸ _R	T ⁹ _R	$D^{(1)}_1$
T ¹ _L	T ² _{LR2}	T ³ _R	T ⁴ _R	T ⁵ _{LR2}	T ⁸ _R	T ⁹ _R	$D^{(1)}_2$
Руйнування просоченого маслом паперу електричними розрядами $D^{(2)}_k$							
T ¹ _L	T ² _{LR2}	T ³ _R	T ⁴ _{LR2}	T ⁵ _L	T ⁸ _{LR2}	T ⁹ _{LR2}	$D^{(2)}_1$
T ¹ _L	T ² _{LR2}	T ³ _R	T ⁴ _R	T ⁵ _{LR2}	T ⁸ _{LR2}	T ⁹ _{LR2}	$D^{(2)}_2$
Локальні перегреви в маслі $D^{(3)}_k$							
T ¹ _R	T ² _{LR1}	T ³ _L	T ⁴ _{LR2}	-	T ⁸ _R	T ⁹ _R	$D^{(3)}_1$

T^1_{LR2}	$T^2_{LR1},$ T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_L	T^5_R	T^8_R	T^9_R	$D^{(3)}_2$
-------------	-----------------------------	---------	---------	---------	---------	---------	-------------

продовження таблиці 3.2

T^1_{LR2}	$T^2_{LR1},$ T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_L	$T^5_{LR1},$ T^5_{LR2}	T^8_R	T^9_R	$D^{(3)}_3$
T^1_R	T^2_{LR1}	T^3_L	T^4_{LR2}	–	$T^8_{LR1},$ T^8_{LR2}	T^9_L	$D^{(3)}_4$

Таблиця 3.3 – Дефекти високовольтних ВТС виявлені по сполученнях терм - множин газів у трансформаторному маслі

Руйнування масла електричними розрядами ($D^{(1)}_j$)	
$D^{(1)}_1$	Іскровими
$D^{(1)}_2$	Частковими
Руйнування просоченого маслом паперу електричними розрядами ($D^{(2)}_j$)	
$D^{(2)}_1$	Іскровими
$D^{(2)}_2$	Частковими
Локальні перегріву в маслі ($D^{(3)}_j$)	
$D^{(3)}_1$	до 300 °С
$D^{(3)}_2$	від 300 до 700 °С
$D^{(3)}_3$	понад 700 °С
$D^{(3)}_4$	локальний перегрів просоченого маслом паперу при температурі 300 °С

Таблиця 3.4 – Індексація критеріїв за ключовим полем діагностичних критеріїв

Терм-множина дефекту $D^{(4)}_j$	Дефект
$D^{(4)}_1$	Норма
$D^{(4)}_2$	Часткові розряди з низькою густиною енергії
$D^{(4)}_3$	Часткові розряди з високою густиною енергії

$D^{(4)}_4$	Розряди малої потужності
$D^{(4)}_5$	Розряди великої потужності

продовження таблиці 3.4

$D^{(4)}_6$	Термічний дефект низької температури до 150
$D^{(4)}_7$	Термічний дефект низької температури в
$D^{(4)}_8$	Термічний дефект в діапазоні середній температур 300 – 700 °С
$D^{(4)}_9$	Термічний дефект високої температури (>700°С)

Таблиця 3.5 – Діагностичні нормативні критерії пошкоджень високовольтних ВТС

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

Для прогнозування можливості подальшого розвитку виявлених дефектів та можливості експлуатації ВТС необхідно оцінити динаміку й швидкість зміни концентрації розчинених газів.

Приклад 3. Формування бази знань

БЗ: Досвід експлуатації (ХАРГ)

ЯКЩО кількість газів, що утворюються при розкладанні масла від часткових розрядів, зростає,

ТО збільшується інтенсивність часткових розрядів.

Пояснення: небезпечний дефект. Газові бульбашки не встигають розчинитися в маслі, тому часткові розряди відбуваються в газовому середовищі.

Правило 4. Формування бази знань.

ЯКЩО швидкість зростання концентрації розчиненого у маслі газу перевищує 10% на місяць,

ТО розвивається небезпечний дефект.

Правило 5. Формування бази знань

ЯКЩО швидкість зростання концентрації діагностичного газу значно перевищує 10% на місяць,

ТО терміново необхідно вживати заходи щодо усунення дефекту.

Далі уточнюються й виявляються інші дефекти, повніше оцінюється стан ВТС. Проводяться розбирання ВТС з метою виявлення місця дефекту.

Правило 6. Формування бази знань (БЗ)

БЗ: Досвід експлуатації (технічне діагностування засобами інфрачервоної техніки)

ЯКЩО виявлено перегріву конструктивних елементів ВТС,

ТО можливо ослаблення болтових з'єднань (апаратний затиск уводу).

Необхідно виявити місця нагріву та причину пошкодження.

Результати дослідження вносяться до БД і ці результати є підставою для наступного етапу діагностування.

Аналітична частина другого рівня дослідження полягає в обґрунтуванні прийнятого рішення про стан ВТС та можливості його подальшої експлуатації.

Правило 7. Формування бази знань

ЯКЩО при ХАРГ виявлено значну кількість CO_2 ,

ТО можливими причинами цього можуть бути:

- 1) сильне старіння масла;
- 2) перевантаження ВТС понаднормовим струмом.

Пояснення: необхідно враховувати дані тестового дослідження, рекомендації заводу-виробника, статистику пошкоджень ВТС даного типу, порівняльний аналіз подібних ВТС, що працюють у схожих умовах.

Правило 8. Формування бази знань

ЯКЩО в маслі ВТС підвищений вологовміст,

ТО ВТС підлягає ремонту з сушінням масла та паперово-масляної ізоляції.

На основі отриманих результатів діагностування приймається одне з рішень:

1) продовжити експлуатацію ВТС відповідно до планової системи технічного обслуговування й ремонтів. При цьому контрольовані параметри повинні відповідати вимогам нормативних документів;

2) продовжити експлуатацію ВТС з більш частими перевірками технічного стану (відхилення від норми деяких параметрів потребують оцінення швидкості розвитку процесу на відносно тривалому відрізку часу, який може виявитись меншим за встановлений відповідними нормативами);

3) перейти до наступного рівня дослідження для визначення складу й обсягу ремонту ВТС, оскільки є дефекти, що не дозволяють продовжити експлуатацію без їх усунення шляхом ремонту ВТС з його розбиранням.

Спеціалізована діагностика й ревізія здійснюються персоналом спеціалізованих ремонтних підрозділів або організацій. Цей рівень має велике значення для оцінення вірогідності результатів попередніх досліджень, їхнього вдосконалення й поповнення БД і БЗ. У той же час ефективність цих заходів залежить від раніше отриманих результатів. За результатами діагностування приймається рішення про можливість та доцільність подальшої експлуатації ВТС.

Тому:

1. Інформаційна підтримка діагностування ВТС скорочує час, що витрачається на дослідження технічного стану, ревізію й ремонт ВТС, а також на виявлення та локалізацію можливих несправностей і дефектів, що розвиваються в ВТС;

2. Для підвищення ефективності інформаційної підтримки потрібно застосовувати нові методи подання й оброблення необхідної різномірної інформації;

3. Використання математичного апарату нечітких чисел дозволяє ідентично подавати й обробляти різні види кількісної і якісної, неповної, невизначеної, суперечливої й іншої інформації;

4. Інформаційні системи підтримки сприяють зменшенню обсягу робіт із діагностики ВТС, пов'язаних з відключенням ВТС, підвищенню надійності й економічності електропостачання. У рамках проведених досліджень вдається поряд із спрощенням оцінення впливу дефектів упорядкувати рішення проблем, що виникають у життєвому циклі ВТС, який ще не перейшов у категорію нероботоздатних.

3.2 Математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу вимірювальних трансформаторів струму

Системи контролю ВТС, що існують на даний час, використовують у своїх розрахунках відомі математичні моделі ВТС, 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 порівнянно з результатами роботи існуючих систем діагностування.

Якщо в результаті аналізу даних, наданих представниками цеху ремонтів ВТС, з літературних джерел чи за даними служби ізоляції і т. п. буде зібрана інформація щодо деяких причини виведення в ремонт високовольтних маслонаповнених (з паперово-масляною ізоляцією конденсаторного типу) ВТС, то такі дані можна упорядкувати, наприклад так, як це показано в таблиці 3.6 для ВТС 35 кВ (таблиця причин виведення в ремонт ВТС не повна з метою спрощення наступних пояснень методу прогнозування визначення коефіцієнта загального залишкового ресурсу ВТС).

В таблиці 3.6 під контрольованим діагностичним параметром розуміємо параметр, відхилення якого від норми сприяло виведенню ВТС в ремонт або враховувалось при виведенні ВТС в ремонт. Як діагностичні параметри в таблиці 3.6 наведено: параметри, які характеризують стан паперово-масляної ізоляції, стан деталей ВТС, які відповідають за герметизацію ВТС, стан компенсатора тиску.

Параметри, які характеризують стан паперово-масляної ізоляції: W – вміст вологи в трансформаторному маслі ВТС [5], C_x – ємність паперово-масляної ізоляції [37], R – активний опір паперово-масляної ізоляції [37], $tg(\delta)$ – тангенс кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції [37], P_1 – постійне зменшення тиску у ВТС, яке зумовлене наявністю місць протіканням трансформаторного масла [38], P_2 – коливання величини тиску у ВТС при зміні температури (добові коливання тиску у ВТС тощо) навколишнього середовища, які зумовлені пошкодженням сільфонів ВТС (діапазон значень нормального тиску у ВТС визначається по графіках залежності тиску масла в уводі від температури для ВТС відповідних типів), наприклад, з [38], T_1 – зростання надлишкової температури у верхній частині ВТС внаслідок дефекту стяжного вузла компенсатора

тиску, T_2 – зростання температури в області вимірювального виводу, T_3 – загальний нагрів покришки уводу, наприклад, внаслідок погіршення значень параметрів ізоляції ВТС [36], T_4 – нагрів верхньої частини покришки (вище з'єднання) у ВТС з набірними верхніми покришками, внаслідок порушень в циркуляції трансформаторного масла у ВТС [36], $XAPГ$ – понаднормована зміна вмісту розчинених в трансформаторному маслі ВТС газів або понаднормована зміна відношень вмісту розчинених в трансформаторному маслі ВТС газів [34, 35, 39].

Проаналізувавши дані таблиці 3.6 та літературні джерела нами була створена схема, яка показує залежний або незалежний вплив діагностичних параметрів на коефіцієнт загального залишкового ресурсу ВТС (рис. 3.3).

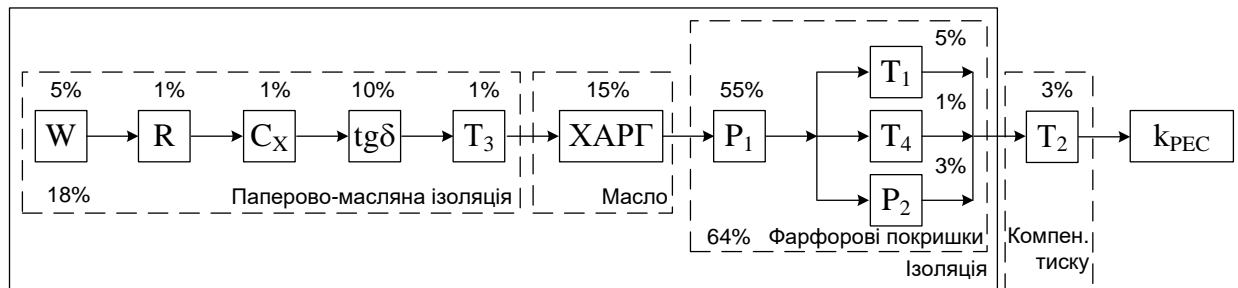


Рисунок 3.3 – Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ВТС

На рис. 3.3 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 ВТС.

Таблиця 3.6 – Причини виведення в ремонт високовольтних ВТС

Клас напруги, кВ	Елемент ВТС	Діагностичний параметр		Кількість ремонтів ВТС, що мають понаднормове значення діагностичного параметра	
		Позначення	Назва параметра	штук	
ВТС 35 кВ	Паперово- масляна ізоляція	C_x	ємність паперово-масляної ізоляції	2	
		W	вміст вологи	8	
		R	активний опір ізоляції ВТС первинної та вторин. обмоток	2	
		$tg(\delta)$	тангенс кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції	14	0
		T_3	нагрів покриття ВТС біля апаратних ввідів	3	
	Трансформаторне масло	$XAPG$	за результатами хімічного аналізу розчинених в трансформаторному маслі газів	32	5

продовження таблиці 3.6

Обладнання	Елемент ВТС	Діагностичний параметр		Кількість ремонтваних ВТС, що мають понаднормове значення діагностичного параметра	
		Позначення	Назва параметра	штук	%
ВТС 35 кВ	Апаратний ввід	T_1	зростання надлишкової температури у контактній частині вводу ВТС внаслідок дефекту контактів у апаратному вводі	5	Апаратний ввід
ВТС 35 кВ	Фарфорові покришки	P_1	постійне зменшення тиску у ВТС, яке зумовлено протіканням трансформаторного масла	65	55
		P_2	коливання величини тиску у ВТС при зміні температури (добові коливання тиску у ВТС, тощо) навколишнього середовища, які зумовлені пошкодженням сільфонів ВТС	3	3
		T_4	нагрів верхньої частини покришки (вище з'єднання) у ВТС, внаслідок порушень в циркуляції трансформаторного масла у ВТС	3	1
ВТС 35 кВ	Шпильки клемного вузла вторинних обмоток	T_2	зростання температури в області клемного вузла (виводи вторинних обмоток)	3	3
Разом				119	100

продовження таблиці 3.6 – Результати аналізу статистики виведення ВТС з експлуатації з причини зростання вмісту в трансформаторній оливі ВТС розчинених газів

Обладнання	Елемент ВТС	Діагностичний параметр		Кількість ремонтваних ВТС, що мають понаднормове значення діагностичного параметра	
		Позначення	Назва параметра	штук	%
ВТС 35 кВ	Трансформаторна олива	Ro1	Вміст метану CH_4 , ppm	5	15,625
		Ro2	Вміст етану C_2H_6 , ppm	3	9,375
		Ro3	Вміст етилену C_2H_4 , ppm	6	18,75
		Ro4	Вміст ацетилену C_2H_2 , ppm	8	25
		Ro5	Вміст кисню O_2 , ppm	5	15,625
		Ro6	Вміст азоту N_2 , ppm	5	6,25
Разом				32	100

На рис. 3.3 над параметром показано відсоткову кількість виявлених дефектних ВТС за даним параметром, яка наведена у відсотках від загальної кількості дефектних ВТС

На рис. 3.3 послідовні позначені блоки з параметрами, відхилення яких від норми сприяло виведенню ВТС в ремонт, а паралельно – блоки з параметрами, які сприяють виведенню ВТС в ремонт за умови одночасного відхилення від норм цих параметрів, що зумовлено вимогами до надійності роботи ВТС.

З метою отримання узагальненого показника залишкового ресурсу ВТС, 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 (3.3) і тому характеризують сумарне напрацювання ВТС від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан, коли діагностичний параметр досягає граничного значення, тобто залишковий технічний ресурс [37, 39]. Коефіцієнт залишкового ресурсу k_i за i -м діагностичним параметром:

$$k_{i_l} = \left| \frac{x_{i_l, \text{гран}} - x_{i_l, \text{ном}}}{x_{i_l, \text{гран}} - x_{i_l, \text{поч}}} \right|, \quad (3.3)$$

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 герметичного ВТС на клас напруги 35 кВ параметр $tg(\delta)$ паперово – масляної ізоляції після ремонту дорівнював 0,038 %, а на момент контролю дорівнював 0,062 %, граничне значення цього параметра – 1,5 % [6]. Тому коефіцієнт залишкового ресурсу $k_{tg(\delta)}$ за діагностичним параметром $tg(\delta)$ визначається за виразом (3.4):

$$k_{tg(\delta)} = \left| \frac{1.5 - 0.062}{1.5 - 0.038} \right| = 0.98 (в.о.). \quad (3.4)$$

У загальному випадку структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу обладнання може мати вигляд, показаний на рис. 3.4.

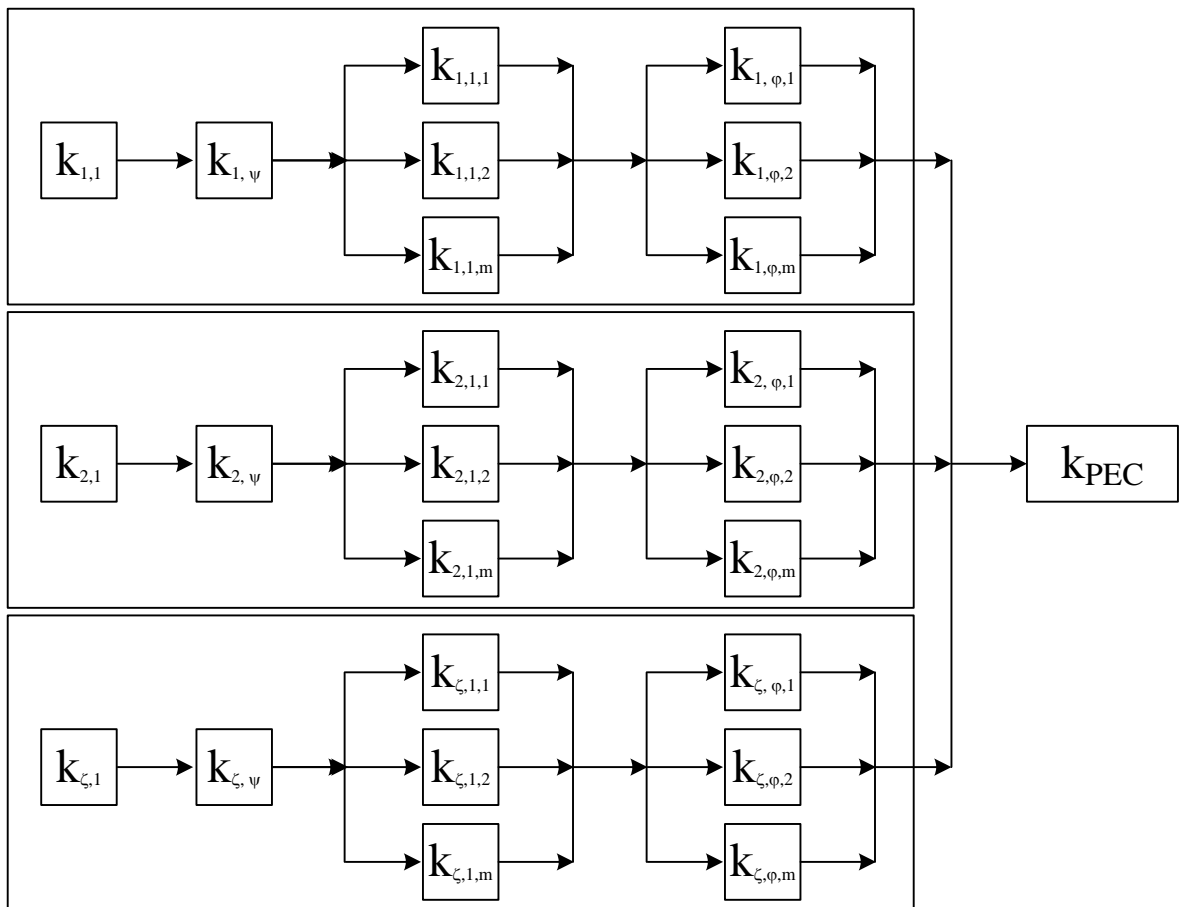


Рисунок 3.4 – Загальна структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу обладнання

Відповідно до рис. 3.4 коефіцієнт загального залишкового ресурсу обладнання визначається за виразом (3.5):

$$k_{\text{ЗАГ.РЕС}} = 1 - \sum_{\Theta=1}^{\zeta} \left\{ 1 - \left\{ \prod_{\chi=1}^{\psi} (k_{\Theta\chi}) \cdot \prod_{\lambda=1}^{\varphi} \left\{ 1 - \sum_{j1=1}^{m1} [(1 - k_{\Theta\lambda j1}) \cdot p_{\Theta\lambda j1}] \right\}^{p_{\Theta\lambda}} \right\} p_{\Theta} \right\} \quad (3.5)$$

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 незгорнутих 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; $k_{\Theta\lambda j1}$ – коефіцієнт залишкового ресурсу за контрольованим $\Theta\lambda j1$ –им параметром у відповідній групі паралельних блоків, які в подальшому згортаються; $p_{\Theta\lambda j1}$ – ймовірність відхилення контрольованого параметра від норми у ВТС, який виведений в ремонт за $\Theta\lambda j1$ –им параметром у відповідній групі паралельних блоків, які в подальшому згортаються; $k_{\Theta\chi}$ – коефіцієнт залишкового ресурсу за діагностичним параметром у блоці, який не згортається у послідовній частині; $p_{\Theta\chi}$ – ймовірність відхилення контрольованого діагностичного параметра у блоці, який не згортається у послідовній частині; $p_{\Theta\lambda}$ – ймовірність відхилення групи контрольованих параметрів від норми у згорнутій групі, що містить паралельні блоки у ВТС, який виведений в

ремонт; p_{θ} – ймовірність відхилення групи контрольованих параметрів від норми у згорнутій групі, що містить послідовно-паралельні блоки у ВТС, який виведений в ремонт.

Відповідно до рис. 3.6 здійснюємо згортання схеми за такими виразами. Для послідовної частини схеми коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом (3.6):

$$k_{pec} = \prod_{\tau=1}^{\nu} k_{\tau}^{p_{\tau}}, \quad (3.6)$$

де k_{τ} – коефіцієнт залишкового ресурсу ВТС по τ -му діагностичному параметру, τ – τ -тий діагностичний параметр, ν – кількість блоків у послідовній частині схеми рис. 3.4, p_{τ} – ймовірність відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра [40] (3.7):

$$p_{\tau} = \frac{y_{\tau}}{m_2}, \quad (3.7)$$

де y_{τ} – кількість відхилень контрольованого параметра 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 (3.8):

$$k_{pec\Sigma} = 1 - \sum_{j=1}^{m_l} [(1 - k_{pec,j}) p_j], \quad (3.8)$$

де k_j – коефіцієнт залишкового ресурсу ВТС за j -м діагностичним параметром, j – j -тий діагностичний параметр, m_l – кількість блоків у паралельній частині схеми, яка згортається (рис. 3.4).

Відповідно до виразів (3.6) і (3.7) та рис. 3.4 коефіцієнт загального залишкового ресурсу ВТС визначається за виразом (3.9):

$$k_{заг.рес} = k_W^{PW} \cdot k_R^{PR} \cdot k_{C_X}^{PC_X} \cdot k_{tg(\delta)}^{P_{tg(\delta)}} \cdot k_{T_3}^{PT_3} \cdot k_{ХАРГ}^{P_{ХАРГ}} \cdot k_{P_1}^{PP_1} \cdot \left\{ 1 - \left[(1 - k_{T_1}) \cdot p_{нар.ч.T_1} + (1 - k_{T_4}) \cdot p_{нар.ч.T_4} + (1 - k_{P_2}) \cdot p_{нар.ч.P_2} \right] \right\}^{P_{УЗАГ.Ч.T_1,T_4,P_2}} \cdot k_{T_2}^{PT_2} \quad (3.9)$$

де $k_W, k_R, k_{C_X}, k_{tg(\delta)}, k_{T_3}, k_{ХАРГ}, k_{P_1}, k_{T_2}, k_{T_1}, k_{T_4}, k_{P_2}$ – відомі на момент розрахунку значення коефіцієнтів залишкового ресурсу відповідно по параметрах $W, R, C_X, tg(\delta), T_3, ХАРГ, P_1, T_2, T_1, T_4, P_2$; $p_W, p_R, p_{C_X}, p_{tg(\delta)}, p_{T_3}, p_{ХАРГ}, p_{P_1}, p_{T_2}$ – ймовірності відхилень значень діагностичних параметрів від гранично допустимих нормованих значень з урахуванням загальної кількості відхилень всіх діагностичних параметрів; $p_{нар.ч.T_1}, p_{нар.ч.T_2}, p_{нар.ч.P_2}$ – ймовірності відхилень значень діагностичних параметрів від гранично допустимих нормованих значень з урахуванням загальної кількості відхилень діагностичних параметрів лише паралельної частини схеми; $p_{УЗАГ.Ч.T_1,T_4,P_2}$ – ймовірність відхилення значень діагностичних параметрів від гранично допустимих нормованих значень для узагальненого (паралельної частини схеми) блоку (в послідовній частині схеми) з урахуванням загальної кількості відхилень діагностичних параметрів. Так, відповідно до табл. 4.2: $p_R=0,05$ в.о., $p_{C_X}=0,01$ в.о., $p_{tg(\delta)}=0,1$ в.о., $p_{T_3}=0,01$

в.о., $p_{ХАРГ}=0,15$ *в.о.*, $p_{P1}=0,55$ *в.о.*, $p_{T2}=0,03$ *в.о.*, $p_{T1}=0,05$ *в.о.*, $p_{T4}=0,01$ *в.о.*,
 $p_{P2}=0,03$ *в.о.*,

$$p_{нар.ч.T1} = p_{T1} / (p_{T1} + p_{T2} + p_{P2}) = 0,55 \text{ в.о.}, \quad (3.10)$$

$$p_{нар.ч.T4} = p_{T4} / (p_{T1} + p_{T2} + p_{P2}) = 0,11 \text{ в.о.}, \quad (3.11)$$

$$p_{нар.ч.P2} = p_{P2} / (p_{T1} + p_{T2} + p_{P2}) = 0,33 \text{ в.о.}, \quad (3.12)$$

$$p_{УЗАГ.ч.T1,T4,P2} = p_{T1} + p_{T2} + p_{P2} = 0,09 \text{ в.о.} \quad (3.13)$$

3.4.2 Нейро-нечітка модель коефіцієнта залишкового ресурсу вимірювальних трансформаторів струму

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 не відомі, не завжди відома їх точність і правдивість [37, 39, 40].

На відміну від теорії ймовірності, теорія нечітких множин використовує інші правила і залежності. Теорія ймовірності 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 [37].

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

Тому, задача полягає у знаходженні не завжди відомих, нечітких взаємовпливів різних технічних параметрів на загальний технічний стан

продовження таблиці 3.7

...
											0,930063
Діагностичні параметри											Коефіцієнт залишкового ресурсу ВТС
k_W , в.о.	k_R , в.о.	k_{CX} , в.о.	$k_{Ig(\delta)}$, в.о.	k_{TZ} , в.о.	$k_{ХАРГ}$, в.о.	k_{P1} , в.о.	k_{T2} , в.о.	k_{T1} , в.о.	k_{T4} , в.о.	k_{P2} , в.о.	
1	1	1	1	1	0,08	0,9	1	1	1	1	0,653953
1	1	1	1	1	0,07	0,9	1	1	1	1	0,644808
1	1	1	1	1	1	0,0	0,9	1	1	1	0,264758
1	1	1	1	1	1	0,0	0,9	1	1	1	0,248279
...
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,0	0,924798
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,0	0,927788
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,1	0,93044
...
0,9	0,9	0,9	0,94	0,9	0,94	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,940054
0,6	0,5	0,8	0,4	0,7	0,5	0,8	0,2	0,4	0,3	0,7	0,614157
0,2	0,5	0,3	0,4	0,7	0,5	0,5	0,2	0,4	0,3	0,8	0,446311
0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,7	0,5	0,5	0,3	0,4	0,6	0,492952

Для одинадцяти вхідних параметрів моделі, які змінювались випадковим чином від 0 до 1, було визначено коефіцієнт загального залишкового ресурсу ВТС (за виразом 3.12). Для зручності застосування даних і спрощення поточних розрахунків у системі комп'ютерної математики MATLAB вхідні параметри моделі зводились до відносних одиниць їх відхилення від норми.

Одинадцять вхідних параметрів моделі – коефіцієнти залишкового ресурсу ВТС, які відповідають одинадцяти діагностичним параметрам. Кількість параметрів може бути більшою.

Повна таблиця містить 3012 розглянутих варіантів сполучень діагностичних параметрів та відповідних їм значень загального залишкового ресурсу ВТС. Далі у 83 рядках цієї таблиці було скореговано значення коефіцієнту залишкового ресурсу ВТС (табл. 3.8) шляхом опитування незалежних експертів: кваліфікованих представників цеху ремонту ВТС служби ремонтів високовольтного обладнання, служби підстанцій, служби ізоляції, діагностування та грозозахисту, монтажної та інших організацій.

Таблиця 3.8 – Фрагмент скорегованих значень коефіцієнта залишкового ресурсу ВТС

Діагностичні параметри											Коефіцієнт залишкового ресурсу ВТС
k_W , в.о.	k_R , в.о.	k_{CX} , в.о.	$k_{Tg(\delta)}$, в.о.	k_{T3} , в.о.	k_{XAPG} , в.о.	k_{P1} , в.о.	k_{T2} , в.о.	k_{T1} , в.о.	k_{T4} , в.о.	k_{P2} , 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
Діагностичні параметри											Коефіцієнт залишкового ресурсу ВТС
k_W , в.о.	k_R , в.о.	k_{CX} , в.о.	$k_{Tg(\delta)}$, в.о.	k_{T3} , в.о.	k_{XAPG} , в.о.	k_{P1} , в.о.	k_{T2} , в.о.	k_{T1} , в.о.	k_{T4} , в.о.	k_{P2} , в.о.	
0,9	0,9	0,9	0,93	0,9	0,93	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
1	1	1	1	1	0,08	0,9	1	1	1	1	0,7
...
1	1	1	1	1	0,07	0,9	1	1	1	1	0,5
1	1	1	1	1	1	0,0	0,9	1	1	1	0,4
1	1	1	1	1	1	0,0	0,9	1	1	1	0,3
...
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,0	0,9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,0	0,85
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,1	0,95
...
0,9	0,9	0,9	0,94	0,9	0,94	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

продовження таблиці 3.8

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 як навчальні дані 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 [3] було отримано нейро-нечітку модель коефіцієнта залишкового ресурсу герметичного ВТС 330 кВ (з використанням методу субкластеризації). Структура отриманої нейро-мережі показана на рис. 3.7.

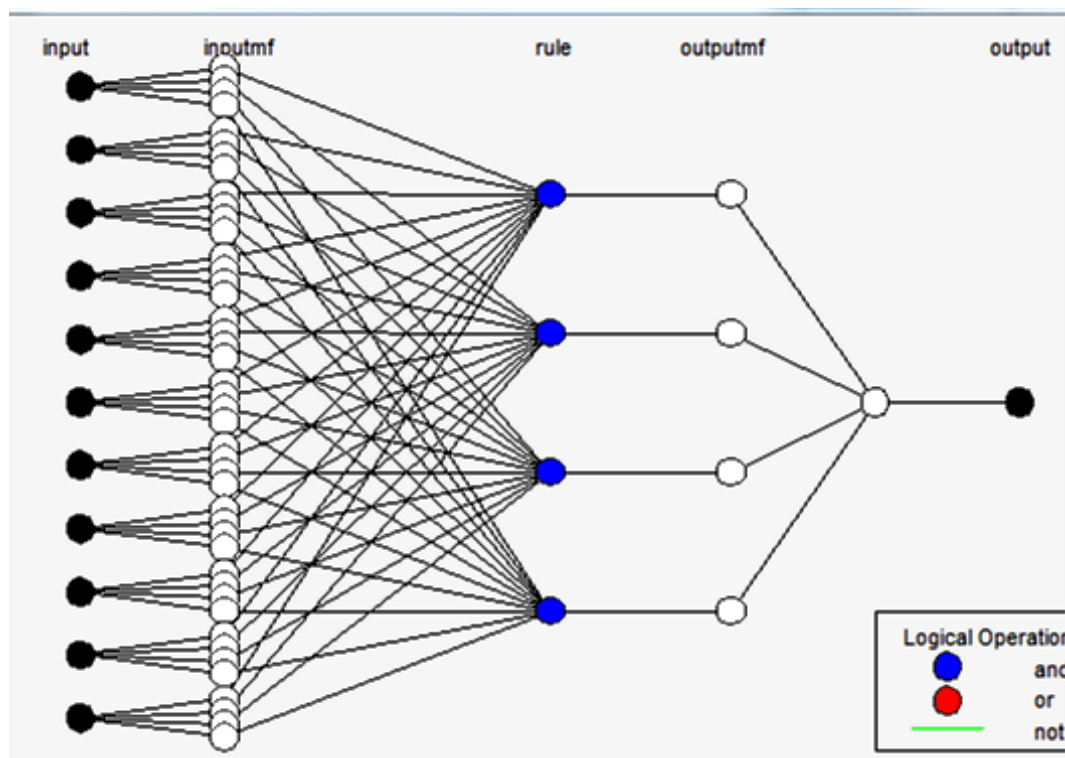


Рисунок 3.5 – Структура ANFIS- мережі ВТС

Для кожної вхідної змінної нейро-моделі використовувались по чотири лінгвіністичних терми з гаусовими функціями належності (рис. 3.5) вираз (3.13) [3]:

$$k_{pec.il} = f(x_{il}; \sigma_{il}; c_{il}) = e^{-\frac{(x_{il}-c_{il})^2}{2 \cdot \sigma_{il}^2}}. \quad (3.14)$$

У виразі (3.14): σ_{il} та c_{il} – числові параметри, σ_{il}^2 в теорії ймовірності називається дисперсією розподілу [40], а другий параметр c_{il} – математичним сподіванням, i_l – вхідний параметр нейро-нечіткої моделі, який відповідає діагностичному параметру, x_{il} – значення i_l -го вхідного параметра моделі: $x_1=k_W$, $x_2=k_R$, $x_3=k_{C_x}$, $x_4=k_{tg(\delta)}$, $x_5=k_{T3}$, $x_6=k_{ХАРГ}$, $x_7=k_{P1}$, $x_8=k_{T2}$, $x_9=k_{T1}$, $x_{10}=k_{T4}$, $x_{11}=k_{P2}$.

Це такі терми, як: «нормальні» значення діагностичного параметра, «незначні відхилення» значення діагностичного параметра, «передаварійні» значення діагностичного параметру, «аварійні» значення діагностичного параметра. Для знаходження значення коефіцієнта загальнозалишкового ресурсу використовуємо нечітку нелінійну авторегресійну модель коефіцієнта загально залишкового ресурсу ВТС. Ця модель встановлює нечітке нелінійне перетворення між значеннями коефіцієнтів залишкового ресурсу по діагностичних параметрах та загальним коефіцієнтом залишкового ресурсу ВТС (3.15).

$$k_{заг.зал.рес} = F(W, R, C_x, tg(\delta), T3, ХАРГ, P1, T2, T1, T4, P2), \quad (3.15)$$

де F – нечітке функціональне перетворення.

Для визначення значення коефіцієнта загальнозалишкового ресурсу ВТС використовуємо модель логічного висновку Такагі-Сугено. В цій моделі нечіткі правила визначаються на основі заданої кількості значень «вхід-вихід» модельованого об'єкта у вигляді (3.16):

$$\text{ЯКЩО } x_1 \in A_1 \text{ ТА } x_2 \in B_2 \text{ ТА...} x_m \in V_i \text{ ТО } y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (3.16)$$

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 поліномо вхідних змінних x_1, x_2, \dots, x_m .

Математична модель коефіцієнта загальнозалишкового ресурсу є системою логічних рівнянь (3.17).

Вихід моделі $k_{\text{заг.зал.рес.}}$ знаходиться як зрівноважена сума висновків (3.17) бази правил, записаних у вигляді системи логічних рівнянь (3.18).

$$\left. \begin{array}{l} \text{ЯКЩО } k_W \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_R \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_{C_x} \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_{I_g(\delta)} \in \text{"нормальне"} \\ \text{ТА } k_{T_3} \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_{XAPF} \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_{P_1} \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_{T_2} \in \text{"нормальне"} \\ \text{ТА } k_{T_1} \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_{T_4} \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_{P_2} \in \text{"нормальне"} \text{ ТО} \\ k_{\text{заг.зал.рес.}} = a_{11} \cdot k_W + a_{12} \cdot k_R + a_{13} \cdot k_{C_x} + a_{14} \cdot k_{I_g(\delta)} + a_{15} \cdot k_{T_3} + a_{16} \cdot k_{XAPF} + a_{17} \cdot k_{P_1} \\ + a_{18} \cdot k_{T_2} + a_{19} \cdot k_{T_1} + a_{110} \cdot k_{T_4} + a_{111} \cdot k_{P_2} \\ \text{ЯКЩО } k_W \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_R \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_{C_x} \in \text{"незначне відхилення"} \\ \text{ТА } k_{I_g(\delta)} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_{T_3} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_{XAPF} \in \text{"незначне відхилення"} \\ \text{ТА } k_{P_1} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_{T_2} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_{T_1} \in \text{"незначне відхилення"} \\ \text{ТА } k_{T_4} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_{P_2} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ ТО} \\ k_{\text{заг.зал.рес.}} = a_{21} \cdot k_W + a_{22} \cdot k_R + a_{23} \cdot k_{C_x} + a_{24} \cdot k_{I_g(\delta)} + a_{25} \cdot k_{T_3} + a_{26} \cdot k_{XAPF} + a_{27} \cdot k_{P_1} + \\ + a_{28} \cdot k_{T_2} + a_{29} \cdot k_{T_1} + a_{210} \cdot k_{T_4} + a_{211} \cdot k_{P_2} \\ \text{ЯКЩО } k_W \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_R \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_{C_x} \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } \\ k_{I_g(\delta)} \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_{T_3} \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_{XAPF} \in \text{"передаварійне"} \\ \text{ТА } k_{P_1} \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_{T_2} \in \text{"передаварійне"} \\ \text{ТА } k_{T_1} \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_{T_4} \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_{P_2} \in \text{"передаварійне"} \text{ ТО} \\ k_{\text{заг.зал.рес.}} = a_{31} \cdot k_W + a_{32} \cdot k_R + a_{33} \cdot k_{C_x} + a_{34} \cdot k_{I_g(\delta)} + a_{35} \cdot k_{T_3} + a_{36} \cdot k_{XAPF} + a_{37} \cdot k_{P_1} + \\ + a_{38} \cdot k_{T_2} + a_{39} \cdot k_{T_1} + a_{310} \cdot k_{T_4} + a_{311} \cdot k_{P_2} \\ \text{ЯКЩО } k_W \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_R \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_{C_x} \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_{I_g(\delta)} \in \text{"аварійне"} \\ \text{ТА } k_{T_3} \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_{XAPF} \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_{P_1} \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_{T_2} \in \text{"аварійне"} \\ \text{ТА } k_{T_1} \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_{T_4} \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_{P_2} \in \text{"аварійне"} \text{ ТО} \\ k_{\text{заг.зал.рес.}} = a_{41} \cdot k_W + a_{42} \cdot k_R + a_{43} \cdot k_{C_x} + a_{44} \cdot k_{I_g(\delta)} + a_{45} \cdot k_{T_3} + a_{46} \cdot k_{XAPF} + a_{47} \cdot k_{P_1} + \\ + a_{48} \cdot k_{T_2} + a_{49} \cdot k_{T_1} + a_{410} \cdot k_{T_4} + a_{411} \cdot k_{P_2} \\ \dots \end{array} \right\} \quad (3.17)$$

$$k_{\text{заг.зал.рес.}} = \sum_{j=2}^{m3} w_{j2} \left(\begin{array}{l} a_{j21} \cdot k_W + a_{j22} \cdot k_R + a_{j23} \cdot k_{C_x} + a_{j24} \cdot k_{I_g(\delta)} \\ + a_{j25} \cdot k_{T_3} + a_{j26} \cdot k_{XAPF} + a_{j27} \cdot k_{P_1} \\ + a_{j28} \cdot k_{T_2} + a_{j29} \cdot k_{T_1} + a_{j210} \cdot k_{T_4} + a_{j211} \cdot k_{P_2} + c_{j2} \end{array} \right), \quad (3.18)$$

де $0 \leq w_{j_2} \leq 1$ – ступінь виконання (вага) j_2 -го правила, яка визначається відповідністю реальних змін діагностичних параметрів ВТС, що відображені у j_2 -му правилі (3.19):

$$\begin{aligned} w_1 &= \frac{\Omega_1}{\xi} \\ w_2 &= \frac{\Omega_2}{\xi} \\ w_3 &= \frac{\Omega_3}{\xi} \quad , \\ w_4 &= \frac{\Omega_4}{\xi} \end{aligned} \quad (3.19)$$

де

$$\xi = \sum_{j=1}^{m_3} [\mu_j(\mathbf{k}_w) \cdot \mu_j(\mathbf{k}_R) \cdot \mu_j(\mathbf{k}_{C_x}) \cdot \mu_j(\mathbf{k}_{I_g(\delta)}) \cdot \mu_j(\mathbf{k}_{T_3}) \cdot \mu_j(\mathbf{k}_{ХАРГ}) \cdot \mu_j(\mathbf{k}_{P_1}) \cdot \mu_j(\mathbf{k}_{T_2}) \cdot \mu_j(\mathbf{k}_{T_1}) \cdot \mu_j(\mathbf{k}_{T_4}) \cdot \mu_j(\mathbf{k}_{P_2})],$$

$$\Omega_1 = \mu_{"1"}(\mathbf{k}_w) \cdot \mu_{"1"}(\mathbf{k}_R) \cdot \mu_{"1"}(\mathbf{k}_{C_x}) \cdot \mu_{"1"}(\mathbf{k}_{I_g(\delta)}) \cdot \mu_{"1"}(\mathbf{k}_{T_3}) \cdot \mu_{"1"}(\mathbf{k}_{ХАРГ}) \cdot \mu_{"1"}(\mathbf{k}_{P_1}) \cdot \mu_{"1"}(\mathbf{k}_{T_2}) \cdot \mu_{"1"}(\mathbf{k}_{T_1}) \cdot \mu_{"1"}(\mathbf{k}_{T_4}) \cdot \mu_{"1"}(\mathbf{k}_{P_2}),$$

$$\Omega_2 = \mu_{"2"}(\mathbf{k}_w) \cdot \mu_{"2"}(\mathbf{k}_R) \cdot \mu_{"2"}(\mathbf{k}_{C_x}) \cdot \mu_{"2"}(\mathbf{k}_{I_g(\delta)}) \cdot \mu_{"2"}(\mathbf{k}_{T_3}) \cdot \mu_{"2"}(\mathbf{k}_{ХАРГ}) \cdot \mu_{"2"}(\mathbf{k}_{P_1}) \cdot \mu_{"2"}(\mathbf{k}_{T_2}) \cdot \mu_{"2"}(\mathbf{k}_{T_1}) \cdot \mu_{"2"}(\mathbf{k}_{T_4}) \cdot \mu_{"2"}(\mathbf{k}_{P_2}),$$

$$\Omega_3 = \mu_{"3"}(\mathbf{k}_w) \cdot \mu_{"3"}(\mathbf{k}_R) \cdot \mu_{"3"}(\mathbf{k}_{C_x}) \cdot \mu_{"3"}(\mathbf{k}_{I_g(\delta)}) \cdot \mu_{"3"}(\mathbf{k}_{T_3}) \cdot \mu_{"3"}(\mathbf{k}_{ХАРГ}) \cdot \mu_{"3"}(\mathbf{k}_{P_1}) \cdot \mu_{"3"}(\mathbf{k}_{T_2}) \cdot \mu_{"3"}(\mathbf{k}_{T_1}) \cdot \mu_{"3"}(\mathbf{k}_{T_4}) \cdot \mu_{"3"}(\mathbf{k}_{P_2}),$$

$$\Omega_4 = \mu_{"4"}(\mathbf{k}_w) \cdot \mu_{"4"}(\mathbf{k}_R) \cdot \mu_{"4"}(\mathbf{k}_{C_x}) \cdot \mu_{"4"}(\mathbf{k}_{I_g(\delta)}) \cdot \mu_{"4"}(\mathbf{k}_{T_3}) \cdot \mu_{"4"}(\mathbf{k}_{ХАРГ}) \cdot \mu_{"4"}(\mathbf{k}_{P_1}) \cdot \mu_{"4"}(\mathbf{k}_{T_2}) \cdot \mu_{"4"}(\mathbf{k}_{T_1}) \cdot \mu_{"4"}(\mathbf{k}_{T_4}) \cdot \mu_{"4"}(\mathbf{k}_{P_2}),$$

$\mu_j(\mathbf{k}_w)$, $\mu_j(\mathbf{k}_R)$, $\mu_j(\mathbf{k}_{C_x})$, $\mu_j(\mathbf{k}_{I_g(\delta)})$, $\mu_j(\mathbf{k}_{T_3})$, $\mu_j(\mathbf{k}_{ХАРГ})$, $\mu_j(\mathbf{k}_{P_1})$, $\mu_j(\mathbf{k}_{T_2})$, $\mu_j(\mathbf{k}_{T_1})$, $\mu_j(\mathbf{k}_{T_4})$, $\mu_j(\mathbf{k}_{P_2})$ – 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), $\mu_1(\mathbf{k}_w) = \mu_{"нормальн\ddot{e}}(\mathbf{k}_w)$, $\mu_1(\mathbf{k}_R) = \mu_{"нормальн\ddot{e}}(\mathbf{k}_R)$, $\mu_1(\mathbf{k}_{C_x}) = \mu_{"нормальн\ddot{e}}(\mathbf{k}_{C_x})$, $\mu_1(\mathbf{k}_{I_g(\delta)}) = \mu_{"нормальн\ddot{e}}(\mathbf{k}_{I_g(\delta)})$, $\mu_1(\mathbf{k}_{T_3}) = \mu_{"нормальн\ddot{e}}(\mathbf{k}_{T_3})$, $\mu_1(\mathbf{k}_{ХАРГ}) = \mu_{"нормальн\ddot{e}}(\mathbf{k}_{ХАРГ})$, $\mu_1(\mathbf{k}_{P_1}) = \mu_{"нормальн\ddot{e}}(\mathbf{k}_{P_1})$, $\mu_1(\mathbf{k}_{T_2}) = \mu_{"нормальн\ddot{e}}(\mathbf{k}_{T_2})$,

$$\mu_1(\mathbf{k}_{T1}) = \mu_{\text{нормальн\ddot{e}}}(\mathbf{k}_{T1}), \mu_1(\mathbf{k}_{T4}) = \mu_{\text{нормальн\ddot{e}}}(\mathbf{k}_{T4}), \mu_1(\mathbf{k}_{P2}) = \mu_{\text{нормальн\ddot{e}}}(\mathbf{k}_{P2}).$$

Налаштування моделі полягає у визначенні параметрів функцій належності і рівнянь висновку. Терми значень лінгвіністичних змінних задаються у вигляді гаусових функції належності. Необхідно визначити середньоквадратичне відхилення $\sigma_{k_W}, \sigma_{k_R}, \sigma_{k_{C_x}}, \sigma_{k_{\text{tg}(\delta)}, \sigma_{k_{T3}}, \sigma_{k_{\text{ХАРГ}}}, \sigma_{k_{P1}}, \sigma_{k_{T2}}, \sigma_{k_{T1}}, \sigma_{k_{T4}}, \sigma_{k_{P2}}$ та математичне очікування $c_{k_W}, c_{k_R}, c_{C_x}, c_{\text{tg}(\delta)}, c_{T3}, c_{\text{ХАРГ}}, c_{k_{P1}}, c_{k_{T2}}, c_{k_{T1}}, c_{k_{T4}}, c_{k_{P2}}$ гаусових функції належності, параметри рівнянь висновку ($a_{1,1} - a_{4,4}, c_1 - c_4$). Для полегшення налаштування та адаптації структури розробленої моделі до реальних параметрів конкретного ВТС 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 $k_{\text{заг.зал.рес.мод.}}$ та реальним коефіцієнтом загальнозалишкового ресурсу $k_{\text{заг.зал.рес. ВТС}}$ (3.20) [40]:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{k_3=0}^{N_1-1} (k_{\text{заг.зал.рес.мод.}k_3} - k_{\text{заг.зал.рес.}k_3})^2} \rightarrow \min, \quad (3.20)$$

де N_1 – 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 $k_W, k_R, k_{C_x}, k_{\text{tg}(\delta)}, k_{T3}, k_{\text{ХАРГ}}, k_{P1}, k_{T2}, k_{T1}, k_{T4}, k_{P2}$ та виходу $k_{\text{заг.зал.рес}}$ 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 посилянь, які мінімізують середньо квадратичну похибку моделі(4.20).

Модель загального залишкового ресурсу ВТС реалізована у вигляді ANFIS-мережі з використанням прикладних програм Fuzzy Logic Toolbox системи MathLab. Структура ANFIS-мережі показана на рисунку 3.7.

Призначення шарів цієї мережі.

Шар 1 визначає нечіткі терми діагностичних параметрів. Кожен вузол цього шару є адаптивним з функцією належності $\mu_{A_i}(x)$, де x – вхід вузла i .

A_i – лінгвістична нечітка змінна, яка асоціюється з цим вузлом.

Так $\mu_{\text{«нормальне»}W} (k_W)$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра вміст вологи в трансформаторному маслі ВТС,

$\mu_{\text{«нормальне»}R} (k_R)$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра активного опору паперово-оливної ізоляції ВТС,

$\mu_{\text{«нормальне»}CX} (k_{CX})$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра ємність паперово-масляної ізоляції ВТС,

$\mu_{\text{«нормальне»}tg(\delta)} (k_{tg(\delta)})$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра тангенса кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції,

$\mu_{\text{«нормальне»}T3} (k_{T3})$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра загальний нагрів покришки ВТС,

$\mu_{\text{«нормальне»}XAPF} (k_{XAPF})$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра понаднормована зміна вмісту розчинених в трансформаторному маслі ВТС газів,

$\mu_{\text{«нормальне»}P1} (k_{P1})$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра постійне зменшення тиску в ВТС, яке зумовлено наявністю місць протіканням трансформаторного масла,

$\mu_{\text{«нормальне»}T2} (k_{T2})$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра зростання температури в області вимірювального виводу,

$\mu_{\text{«нормальне»}T1} (k_{T1})$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра зростання надлишкових температури у верхній частині ВТС внаслідок дефекту стяжного вузла компенсатора тиску,

$\mu_{\text{«нормальне»}T4} (k_{T4})$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра нагрів верхньої частини покритки (вище з'єднання) у ВТС з набірними верхніми покритками внаслідок порушень в циркуляції трансформаторного масла у ВТС,

$\mu_{\text{«нормальне»}P2} (k_{P2})$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра коливання величини тиску у ВТС при зміні температури (добові коливання тиску у ВТС тощо) навколишнього середовища, які зумовлені пошкодженням сільфонів ВТС,

$\mu_{\text{«незначне відхилення»} W} (k_W)$ – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра вміст вологи в трансформаторному маслі ВТС,

$\mu_{\text{«незначне відхилення»} R} (k_R)$ – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра активного опору паперово-масляної ізоляції ВТС,

$\mu_{\text{«незначне відхилення»} CX} (k_{CX})$ – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра ємність паперово-масляної ізоляції ВТС,

$\mu_{\text{«незначне відхилення» } tg(\delta)}$ ($k_{tg(\delta)}$) – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра тангенса кута діелектричних в паперово-масляній ізоляції,

$\mu_{\text{«незначне відхилення» } T3}$ (k_{T3}) – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра загальний нагрів покриття ВТС,

$\mu_{\text{«незначне відхилення» } XAPG}$ (k_{XAPG}) – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра понаднормована зміна вмісту розчинених в трансформаторному маслі ВТС газів,

$\mu_{\text{«незначне відхилення» } P1}$ (k_{P1}) – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра постійне зменшення тиску у ВТС, яке зумовлене наявністю місць протіканням трансформаторного масла,

$\mu_{\text{«незначне відхилення» } T2}$ (k_{T2}) – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра зростання температури в області вимірювального виводу,

$\mu_{\text{«незначне відхилення» } T1}$ (k_{T1}) – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра зростання надлишкової температури у верхній частині ВТС внаслідок дефекту стяжного вузла компенсатора тиску,

$\mu_{\text{«незначне відхилення» } T4}$ (k_{T4}) – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра нагрів верхньої частини покриття (вище з'єднання) у ВТС з набірними верхніми покриттями, внаслідок порушень в циркуляції трансформаторного масла у ВТС,

$\mu_{\text{«незначне відхилення» } P2}$ (k_{P2}) – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра коливання величини тиску у ВТС при зміні температури (добові коливання тиску у ВТС тощо) навколишнього середовища, які зумовлені пошкодженням сільфонів ВТС,

$\mu_{\text{«передаварійне» } W}$ (k_W) – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметра вміст вологи в трансформаторному маслі ВТС,

$\mu_{\text{«передаварійне»}R} (k_R)$ – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметра активного опору паперово-масляної ізоляції ВТС,

$\mu_{\text{«передаварійне»}CX} (k_{CX})$ – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметра ємність паперово-масляної ізоляції ВТС,

$\mu_{\text{«передаварійне»}tg(\delta)} (k_{tg(\delta)})$ – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметра тангенса кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції,

$\mu_{\text{«передаварійне»}T3} (k_{T3})$ – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметра загальний нагрів покришки ВТС,

$\mu_{\text{«передаварійне»}XAPG} (k_{XAPG})$ – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметру понаднормована зміна вмісту розчинених в трансформаторному маслу ВТС газів,

$\mu_{\text{«передаварійне»}P1} (k_{P1})$ – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметра постійне зменшення тиску у ВТС, яке зумовлене наявністю місць протіканням трансформаторного масла,

$\mu_{\text{«передаварійне»}T2} (k_{T2})$ – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметра зростання температури в області вимірювального виводу,

$\mu_{\text{«передаварійне»}T1} (k_{T1})$ – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметра зростання надлишкової температури у верхній частині ВТС внаслідок дефекту стяжного вузла компенсатора тиску,

$\mu_{\text{«передаварійне»}T4} (k_{T4})$ – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметра нагрів верхньої частини покришки (вище з'єднання) у ВТС з набірними верхніми покришками внаслідок порушень в циркуляції трансформаторного масла у ВТС,

$\mu_{\text{«передаварійне»}P2} (k_{P2})$ – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметра коливання величини тиску у ВТС при зміні температури (добові коливання тиску у ВТС тощо) навколишнього середовища, які зумовлені пошкодженням сільфонів ВТС,

$\mu_{\text{«аварійне»}W} (k_W)$ – величина функції належності для терму «аварійне» значення параметра вміст вологи в трансформаторному маслі ВТС,

$\mu_{\text{«аварійне»}R} (k_R)$ – величина функції належності для терму «аварійне» значення параметра активного опору паперово-масляної ізоляції ВТС,

$\mu_{\text{«аварійне»}CX} (k_{CX})$ – величина функції належності для терму «аварійне» значення параметра ємність паперово-масляної ізоляції ВТС,

$\mu_{\text{«аварійне»}tg(\delta)} (k_{tg(\delta)})$ – величина функції належності для терму «аварійне» значення параметра тангенса кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції,

$\mu_{\text{«аварійне»}T3} (k_{T3})$ – величина функції належності для терму «аварійне» значення параметра загальний нагрів покоришки ВТС,

$\mu_{\text{«аварійне»}XAPG} (k_{XAPG})$ – величина функції належності для терму «аварійне» значення параметра понаднормована зміна вмісту розчинених в трансформаторному маслі ВТС газів,

$\mu_{\text{«аварійне»}P1} (k_{P1})$ – величина функції належності для терму «аварійне» значення параметра постійне зменшення тиску у ВТС, яке зумовлене наявністю місць протіканням трансформаторного масла,

$\mu_{\text{«аварійне»}T2} (k_{T2})$ – величина функції належності для терму «аварійне» значення параметра зростання температури в області вимірювального виводу,

$\mu_{\text{«аварійне»}T1} (k_{T1})$ – величина функції належності для терму «аварійне» значення параметра зростання надлишкової температури у верхній частині ВУ внаслідок дефекту стяжного вузла компенсатора тиску,

$\mu_{\text{«аварійне»}T4} (k_{T4})$ – величина функції належності для терму «аварійне» значення параметра нагрів верхньої частини покоришки (вище з'єднання) у ВТС з набірними верхніми покоришками, внаслідок порушень в циркуляції трансформаторного маслі у ВТС,

$\mu_{\text{«аварійне»}P2} (k_{P2})$ – величина функції належності для терму «аварійне» значення параметра коливання величини тиску у ВТС при зміні температури (добові коливання тиску у ВТС тощо) навколишнього середовища, які зумовлені пошкодженням сильфонів ВТС.

Використовуючи варіантний метод за критерієм мінімізації середньо-квадратичної похибки навчання нейро-мережі для термів вибрані (табл. 3.9) гаусові функції належності.

Функції належності описуються такими виразами:

– для «трикутної» (trimf) функції належності

$$\mu = f_{\Delta}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}, \quad (3.21)$$

–

– для «трапецеподібної» (trapmf) функції належності

–

$$\mu = f_{\Delta}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{a-x}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}, \quad (3.25)$$

Таблиця 3.9 – Результати дослідження похибок нейро-моделей

Назва функції належності	Рівняння функції належності	Параметри рівняння	Похибка навчання, в.о.
1	2	3	4
trimf	(3.21)	a,b,c – довільні дійсні числа від 0 до 1, $a \leq b \leq c$	0,044
gbellmf	(3.23)	a,c – довільні дійсні числа від 0 до 1, $a < b < c$, але $b > 0$ та $b \leq 1$	0,019
gaussmf	(3.14)	σ^2 – в теорії ймовірності називається	0,010

продовження таблиці 3.9

Sigmf	(3.24)	a,b – довільні дійсні числа від 0 до 1, a < b	0,033
rimf	(3.27)	a,b,c,d – довільні дійсні числа від 0	0,022
smf	(3.25)	a,b – довільні дійсні числа від 0	0,029
zmf	(3.26)	a,b – довільні дійсні числа від 0	0,027

– для «дзвоноподібної» (gbellmf) функції належності

$$\mu = f_{\Delta}(x; a, b, c) = \left\{ \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2 \cdot b}} \right\}, \quad (3.22)$$

–

– для «сигмоїдальної» (sigmf) функції належності

$$\mu = f_{\Delta}(x; a, b) = \left\{ \frac{1}{1 + e^{-a(x-b)}} \right\}, \quad (3.23)$$

–

– для сплайн-функції належності «S – подібної» (smf)

$$\mu = f_S(x; a, b) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq a \\ 2 \cdot \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{b-x}{b-a} \right)^2, & \frac{a+b}{2} < x < b \\ 1, & b \leq x \end{array} \right\}, \quad (3.24)$$

–

–

для сплайн-функції належності «Z – подібної» (zmf)

$$\mu = f_z(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \cdot \left(\frac{b-x}{b-a} \right)^2, & \frac{a+b}{2} < x < b \\ 0, & b \leq x \end{cases}, \quad (3.25)$$

–

– для «трапецієподібна» (trapmf) функція належності

$$\mu = f_{\Pi}(x; a, b, c, d) = f_s(x; a, b) \cdot f_z(x; c, d). \quad (3.36)$$

Шар 2. Визначає посилення нечітких правил. Кожен вузол даного шару не адаптивний, виконує нечітку логічну операцію ТА на параметрах посилення кожного правила та посилає інформаційний сигнал далі. Вихід цього вузла – вага правила W_{j2} , яка визначається як добуток значень функцій належності коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів (3.27):

$$W_{j2} = \prod_{i2=1}^{m4} \mu_{j2,i2}(k_{i2}), \quad (3.27)$$

де i_2 – порядковий номер діагностичного параметра, m_4 – кількість діагностичних параметрів.

Так $i_2 = 1$ відповідає параметру k_W – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру W (вміст вологи в трансформаторному маслі); $i_2 = 2$ відповідає параметру k_R – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру R ; $i_2=3$ відповідає параметру k_{Cx} – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру C_x ; $i_2 = 4$ відповідає параметру $k_{tg(\delta)}$ – коефіцієнту залишкового

ресурсу по діагностичному параметру $tg(\delta)$; $i_2 = 5$ відповідає параметру k_{T3} – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру T_3 ; $i_2 = 6$ відповідає параметру $k_{ХАРГ}$ – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру $ХАРГ$; $i_2 = 7$ відповідає параметру k_{P1} – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру P_1 ; $i_2 = 8$ відповідає параметру k_{T2} – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру T_2 ; $i_2 = 9$ відповідає параметру k_{T1} – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру T_1 ; $i_2 = 10$ відповідає параметру k_{T4} – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру T_4 ; $i_2 = 11$ відповідає параметру k_{P2} – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру P_2 .

Тоді: для правила з порядковим номером j_2 ваговий коефіцієнт знаходиться за виразом (3.28):

$$w_{j_2} = \mu_{j_2}(k_{j_2,w}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,R}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,Cx}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,tg(\delta)}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,T3}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,ХАРГ}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,P1}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,T2}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,T1}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,T4}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,P2}), \quad (3.28)$$

де $j_2 = 1, 2, 3, 4$.

Вихід кожного вузла цього шару визначає ступінь спрацьовування правила, тобто виконання умов, які закладені в параметрах посилань.

Шар 3. Не адаптивні вузли цього шару обчислюють нормалізовану вагу правил (3.29):

$$\bar{w}_{j_2} = \frac{w_{j_2}}{\sum_{j_2=1}^{m_3} w_{j_2}}, \quad (3.29)$$

де $j_2 = 1, 2, 3, 4$.

Шар 4. Адаптивні вузли цього шару обчислюють $k_{заг.зал.рес ВТС}$ (3.30) відповідно до кожного з правил (висновок кожного правила):

$$k_{\text{заг.зал.рес.},j_2} = \left(\sum_{i_2=1}^{m_4} a_{j_2,i_2} \cdot k_{i_2} \right) + c_{j_2}, \quad (3.30)$$

тому для j_2 -го правила

$$k_{\text{заг.зал.рес.},j_2} = \left[\begin{array}{l} a_{j_2,1} \cdot k_{W,j_2} + a_{j_2,2} \cdot k_{R,j_2} + a_{j_2,3} \cdot k_{C_x,j_2} + a_{j_2,4} \cdot k_{\text{tg}(\delta),j_2} + \\ + a_{j_2,5} \cdot k_{\text{ХАРГ},j_2} + a_{j_2,6} \cdot k_{T_3,j_2} + a_{j_2,7} \cdot k_{P_1,j_2} + \\ a_{j_2,8} \cdot k_{T_2,j_2} + a_{j_2,9} \cdot k_{T_1,j_2} + a_{j_2,10} \cdot k_{T_4,j_2} + a_{j_2,11} \cdot k_{P_2,j_2} + c_{j_2} \end{array} \right],$$

де $j_2 = 1, 2, 3, 4$; $\{a_{11}-a_{44}, c_1-c_4\}$ – вектор параметрів висновку.

Шар 5. Неадаптивний вузол цього шару є сумматором (3.31):

$$k_{\text{заг.зал.рес}} = \sum_{j_2=1}^{m_3} (\bar{w}_{j_2} \cdot k_{\text{заг.зал.рес.},j_2}), \quad (3.31)$$

якщо в (3.35) підставити (3.32), то $k_{\text{заг.зал.рес}}$ знаходиться за виразом(3.32):

$$k_{\text{заг.зал.рес}} = \frac{\sum_{j_2=1}^{m_3} (w_{j_2} \cdot k_{\text{заг.зал.рес.},j_2})}{\sum_{j_2=1}^{m_3} w_{j_2}}. \quad (3.32)$$

З метою зменшення часу на навчання нейро-нечіткої моделі в системі комп'ютерної математики MATLAB [37] 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 кластерів. Задача кластеризації полягає в розбитті об'єктів на декілька підмножин (кластерів), в яких об'єкти більш 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 до прототипу кластерів.

Зазвичай координати прототипів не відомі і вони знаходяться одночасно з розбиттям даних на кластери. Використовувались такі параметри методу кластеризації: рівень впливу вхідних змінних (Range of influence) – 0.8; коефіцієнт послаблення (Squash factor) – 1,1; коефіцієнт, який встановлює, у скільки разів 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 середньоквадратична 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 ВТС.

Тому, наприклад, при подальшому моделюванні для коефіцієнта залишкового ресурсу k_W діагностичного параметра W першого правила значення гаусової функції належності було взято такі значення параметрів: $\delta_W = 0,3186$ в.о., $C_W = 0,8993$ в.о.

Відповідно до виразу(4.17) було введено такі параметри рівнянь висновків правил (табл. 3.16).

Таблиця 3.10 – Параметри висновків правил нейро-нечіткої моделі ВТС

Номер	Параметри рівняння висновку											
	$j_{2,1}$	$j_{2,2}$	$j_{2,3}$	$j_{2,4}$	$j_{2,5}$	$j_{2,6}$	$j_{2,7}$	$j_{2,8}$	$j_{2,9}$	$j_{2,10}$	$j_{2,11}$	j_2
									0	1	2	3
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

Продовження таблиці 3.10

3	-31.97	33.52	0.09652	0.06312	0.06312	0.06312	0.06312	0.06312	0.06312	0.06312	0.06312	0.06312	1.74·10 ⁻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	0.1138

З урахуванням проведених ітераційних обчислювальних експериментів визначено вектор параметрів функцій належності (табл. 3.11).

Таблиця 3.11 – Параметри функції належності

Діагностичні параметри	Вхідні параметри моделі	Назва терму (нечіткої множини значень вхідних параметрів)	Номер правила	Параметри функцій належності	
				δ	C
1	2	3	4	5	6
W	k_W	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
R	k_R	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
C_x	k_{C_x}	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

Продовження таблиці 3.11

X_{APG}	$k_{X_{APG}}$	нормальні	1	0,2830	1,0580
-----------	---------------	-----------	---	--------	--------

		незначні відхилення	2	0,2830	0,9180
		передаварійні	3	0,2831	0,3383
		аварійні	4	0,2830	0,9841
T_3	k_{T3}	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
P_1	k_{P1}	нормальні	1	0,2832	1,1670
		передаварійні	3	0,2822	1,0290
		аварійні	4	0,2847	-0,0496
T_2	k_{T2}	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
T_1	k_{T1}	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

Результати наступних розрахунків приведені у додатку В.

Висновки до розділу 3

Використання методів нейро-нечіткого моделювання дозволяє визначати коефіцієнт залишкового ресурсу вимірювальних трансформаторів струму в умовах неповноти початкових даних.

Використання методу онлайн моніторингу тангенса дельта оливо-паперової ізоляції ВТС дозволяє більш якісно визначати стан ізоляції на ранній стадії розвитку дефекту порівняно з методом контролю провідності через ізоляцію.

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Вимірювання опору ізоляції виконують мегаомметром на відповідну напругу: для обмотки НН (вторинні обмотки трансформаторів струму і напруги) використовують мегаомметри на 1000 В, а мегаомметри на напругу 2500 В - для обмоток ВН.

Вимірювання опору обмоток постійному струму здійснюється мостами постійного струму (наприклад Р 333), які дозволяють зробити виміри з точністю до 0,001 Ом. При відсутності даних приладів можливо використовувати метод амперметра - вольтметра з джерелом постійного струму, який може забезпечити достатній струм для проведення даних випробувань. При проведенні замірів методом амперметра-вольтметра робочий струм не повинен перевищувати номінальний струм обмотки випробуваного об'єкта.

Випробування підвищеною напругою промислової частоти виконують за допомогою різних установок, які складаються з наступних елементів: випробувального трансформатора, регулюючого пристрою, контрольно-вимірювальної і захисної апаратури. До таких апаратів можна віднести установку АИД - 70, а також різні високовольтні випробувальні трансформатори, які мають достатній рівень захисту і належним рівнем підготовлені для проведення випробувань.

При проведенні випробувань трансформаторів напруги на втрати холостого ходу зручно застосовувати вимірювальні мости і комплекти (типу К-540). При відсутності даних приладів можна використовувати вольтметр, амперметр і ватметр.

4.1 Мости змінного струму

Мости змінного струму високовольтні автоматичні СА7100 (рис. 4.1) і СА7100-3 призначені для вимірювань тангенса кута діелектричних втрат і

електричної ємності, напруги і частоти змінного струму, опору ізоляції постійному струму.



Рис. 4.1 - Міст змінного струму СА7100

Переваги застосування таких засобів діагностування ВТ:

- висока точність вимірювань;
- безпека персоналу, забезпечується за допомогою волоконно-оптичного кабелю, який зв'язує блок вимірювальний з блоком управління;
- наявність в стандартному комплекті поставки кабелю вимірювального КІЗ (25 м) із зовнішньою ізоляцією, що витримує робочу напругу до 10 кВ, завдяки чому при вимірах по "перевернутій" схемі не потрібні додаткові заходи по його ізоляції;
- автоматичне перемикання варіантів вимірювальних схем ("пряма" - "перевернута"), а для моста СА7100-3 також перемикання режимів вимірювань " $Z, \text{tg}\delta$ " \leftrightarrow "R" при наявності комутаторів СА7161;
- можливість управління процесом вимірювання за допомогою персонального комп'ютера;
- збереження результатів в незалежній пам'яті з можливістю зчитування комп'ютером;

- можливість оперативної перевірки працездатності завдяки наявності в комплекті тестуючого пристрою СА7135.

Міст СА7100 з джерелом змінної робочої напруги ІПРН і комутатором СА7161 утворюють функціонально повний вимірювальний комплект, який може використовуватися в наступних варіантах:

- стаціонарно;
- у складі пересувної лабораторії (в транспортному засобі);
- у вигляді пересувної установки (на візку).

Міст Р333 (рис. 4.2) призначений для вимірювання електричного опору, визначення місця пошкодження кабелю за допомогою петлі Варлея або Муррея, вимірювання асиметрії проводів, використання в якості магазину опорів. Р333 має наступні параметри: температура навколишнього повітря - від + 10 до + 35 ° С; відносна вологість – 80 %; габаритні розміри - 300x230x150 мм; маса – 5 кг.

Таблиця 4.1 – Класи точності Р333

Клас точності	Межі вимірювань, Ом
0,5	Від 1 до 99990
1,0	Від ,01 до 0,9999
5,0	Від 0,005 до 0,0999
5,0	Від 100000 до 999900



Рис. 4.2 - Міст Р333

4.2 Прилад універсальний вимірювальний Р4833

Міст вимірник Р4833 (рис. 4.3) призначений для вимірювання опору, постійних е.р.с. і напруг і повірки теплотехнічних приладів. Робочі умови застосування приладу: температура навколишнього повітря від 10 до 35 °С; відносна вологість 80% при температурі 25 °С; атмосферний тиск (84 - 106,7) кПа [(630 - 800) мм Гц].



Рис. 4.3- Універсальний вимірювальний прилад Р4833

Клас точності приладу Р4833 при використанні в якості:

- моста постійного струму - 0,1;
- потенціометра постійного струму - 0,05;
- магазину опору - 0,02x1,5x0,0001.

Діапазон вимірювань приладу Р4833:

- вимірювання опорів при використанні приладу в якості моста від 10^{-4} до 10^{-6} Ом;

- вимірювання е.р.с. і напруг при використанні приладу в якості потенціометра від 0 до 111,10 мВ;

- показань опору при використанні приладу в якості п'ятидекадного магазину опору від початкового ($\leq 0,015$ Ом) до 1111,10 Ом (декади 100; 10; 1; 0,1; 0,01 Ом).

Час встановлення робочого режиму приладу не більше 15 хв після включення живлення. Режим роботи - переривчастий. Тривалість безперервної роботи приладу від мережі і вбудованих джерел живлення - не менше 8 год. Час перерви до повторного включення повинно бути не менше 15 хв. Габаритні розміри, не більше 250x390x190 мм.

4.3 Вимірювач параметрів трансформаторів К540

Комплект вимірювальний К540 переносний призначений для вимірювань сили струму, напруги, потужності і визначення порядку чергування фаз, коефіцієнта потужності в однофазних і трифазних трипровідних і чотирипровідних ланцюгах змінного струму при рівномірному і нерівномірному навантаженнях фаз.

Основні технічні характеристики:

За точністю вбудовані в комплект вимірювальні прилади відповідають:

- амперметр - класу точності 0,5;
- вольтметр на діапазоні вимірювань з кінцевим значенням 15 V - класу точності 2,5, з кінцевим значенням 30 V - класу точності 1,0, від 75 до 600 V - класу точності 0,5;
- ватметр при номінальній напрузі 15 V - класу точності 2,5, при номінальній напрузі 30 V - класу точності 1,0, від 75 до 600 V - класу точності 0,5.

Основною перевагою вимірювального комплексу К 540 є, можливість визначати одразу декілька параметрів: силу струму, потужність і напругу.



Рис. 4.4 - Вимірювач параметрів трансформатора К540

4.4 Пристрій для випробування ізоляції твердих діелектриків АИД-70

Апарат для випробування і вимірювання електричної міцності ізоляції силових високовольтних кабелів, матеріалів, пристроїв і т.п. постійною (70 кВ / 10 мА) або змінною (50 кВ / 50 мА) напругою 50 Гц з контролем струму. Сучасна система зняття заряду без зовнішнього замикача. Дозволяє підключати світлову і звукову індикацію високої напруги. Живлення 220 В / 50 Гц. Маса установки 14 (ПУ) + 37 (БВ) кг. Габарити упаковки 790x300x660 мм. Вага - 56,5 кг.



Рис. 4.5 - Пристрій для випробування ізоляції твердих діелектриків
АИД-70

Пристрій АИД-70 (рис 4.5) призначений для вимірювання електричної міцності ізоляції твердих діелектриків, в тому числі ізоляції силових високовольтних кабелів, різних електроізоляційних матеріалів, а також пристроїв, що працюють у складі електричних установок високої напруги. Вимірювання установкою АИД-70 М здійснюються шляхом подачі на випробуваний об'єкт високовольтної постійної або змінної напруги синусоїдальної форми частотою 50 Гц з контролем струму, споживаного навантаженням, починаючи від десятків мікроампер.

Таблиця 4.2 – Параметри АИД-70

Параметр	Значення
Діапазон регулювання напруги (постійної/змінної)	0-70/0-50 кВ
Струм навантаження при постійній/змінній нарузі	0-10 мА/0-20 мА
Безпосереднє вимірювання напруги на навантаженні з відносною (абсолютною) похибкою	не більше 3%

Продовження таблиці 4.2

Захист від перевищення максимальної напруги струму навантаження	наявний
Межі вимірювання струму на додатковому діапазоні ля змінного та постійного струму	0-2000 мкА 0-1000 мкА
Напруга живлення	(220±22) В, 50 Гц (230±23) В, 50 Гц
Експлуатація при: температурі навколишнього середовища, °С відносна вологість повітря атмосферний тиск, мм.рт.ст	-10...+40 до 98 при $t \leq +25^{\circ}\text{C}$ 630...800
Маса установки пульта керування/блоку високовольтного, кг	14/40
Габарити, мм	830x460x786
Маса, кг	70

Висновки до 4 розділу:

В даному розділі досліджено засоби діагностування вимірювальних трансформаторів а саме: міст змінного струму СА 7100, вимірювач параметрів трансформатора К – 540, пристрій для випробування ізоляції твердих діелектриків АИД-70.

РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

У даному розділі розглядаються основні питання конкурентоспроможності продукту та комерційного потенціалу розробки.

5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Для оцінки комерційного потенціалу розробки, що описується в даній роботі, було залучено трьох експертів. В якості експертів були обрані: викладач кафедри Електричних станцій та систем к.т.н., доцент – Рубаненко О. Є. (основний напрям науково-дослідної діяльності - технічна діагностика силового електрообладнання, мікропроцесорна протиаварійна автоматика та релейний захист); Третьяк Б.С. - головний конструктор Запорізького заводу високовольтної апаратури – підприємства, що виготовляє досліджувані трансформатори струму; Кучеренко В.Г. – начальник служби діагностики ізоляції захисту від перенапруг, що має великий досвід роботи із високовольтним обладнанням, в тому числі і трансформаторами струму.

Рівень комерційного потенціалу розробки. Згідно з таблицею 2.3 методичних вказівок [47] комерційний потенціал розробки можна оцінити як «вище середнього». Виготовлення пристрою діагностики бажано було б здійснювати ІнЕЕЕМ ВНТУ спільно з якою-небудь великою вітчизняною чи закордонною електротехнічною компанією, що має відповідні виробничі потужності на території України. Пристрій діагностики буде здійснювати оцінку стану трансформатора струму на основі вхідних даних про діагностичні параметри за спеціально створеним нечітким алгоритмом. На виході пристрою формуватиметься сигнал, що буде містити загальний коефіцієнт ресурсу трансформатору струму.

Таблиця 5.1 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерій	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Рубаненко О.Є.	Третьяк Б.С.	Кучеренко В.Г.
	Бали виставлені експертами		
1	2	3	3
1	2	3	3
2	3	3	4
3	2	1	2
4	3	3	4
5	4	4	2
6	2	3	1
7	2	2	2
8	4	4	4
9	1	1	2
1	2	3	4
10	4	3	4
11	3	2	2
12	2	1	1
Сума балів	36	36	38
Середньоарифм етична сума балів СБ	37		

Рівень комерційного потенціалу розробки. Згідно з таблицею 2.3 методичних вказівок [47] комерційний потенціал розробки можна оцінити як «вище середнього». Виготовлення пристрою діагностики бажано було б

здійснювати ФЕЕЕМ ВНТУ спільно з якою-небудь великою вітчизняною чи закордонною електротехнічною компанією, що має відповідні виробничі потужності на території України. Пристрій діагностики буде здійснювати оцінку стану трансформатора струму на основі вхідних даних про діагностичні параметри за спеціально створеним нечітким алгоритмом. На виході пристрою формуватиметься сигнал, що буде містити загальний коефіцієнт ресурсу трансформатора струму.

Напрямки організації подальшого впровадження розробки.

Для подальшого впровадження розробки необхідно буде провести додаткові дослідження та підібрати параметри пристрою діагностики для усіх існуючих типів трансформаторів струму. Якщо в результаті таких досліджень буде виявлена можливість створити універсальний пристрій, який би підходив для усіх типів трансформаторів струму, без значного збільшення вартості виробництва то необхідно буде внести відповідні корективи до схеми пристрою. Необхідно також залучити фахівців з програмування мікроконтролерів для оптимізації коду програми мікроконтролера а також для створення програмного забезпечення для обслуговування пристрою діагностики. Необхідно створити усю відповідну документацію та інструкції зі встановлення, налагодження та обслуговування пристрою діагностики.

5.2 Прогнозування витрат на проведення науково-дослідної роботи

Проведемо прогнозування витрат на виконання науково-дослідної та конструкторської роботи згідно з методичними вказівками [47].

Розрахуємо основну заробітну плату кожного із розробників:

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t,$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника, грн.; T_p – число робочих днів у місяці; t – число робочих днів роботи розробника.

Для подальших розрахунків приймаємо, що $t = 25$ днів. Необхідні розрахунки проведемо в табличній формі.

Таблиця 5.2 – Розрахунок основної заробітної плати кожного із розробників

П.П.	Найменування посади виконавця	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на оплату праці, грн.
	Доцент, к.т.н.	3000	120	14	1680,00
	Магістрант	1000	40	50	2000,00
Всього					3680,00

Оскільки робітники до виконання даної дослідної роботи не залучалися, то розраховувати їх заробітну плату немає потреби.

Розрахуємо додаткову заробітну плату Z_d для розробників:

$$Z_d = 0,1 \cdot Z_o.$$

$$Z_d = 0,1 \cdot 3680 = 368,00 \text{ (грн.)}.$$

Розрахуємо нарахування на заробітну плату $H_{зп}$ розробників, які брали участь у виконанні науково-дослідної та конструкторської роботи.

$$H_{зп} = (Z_o + Z_p + Z_d) \cdot \frac{\beta}{100},$$

де Z_o – основна заробітна плата розробників, грн.; Z_p – основна заробітна плата робітників, грн.; Z_d – додаткова заробітна плата всіх

розробників та робітників, грн.; β – ставка єдиного внеску на загальнообов’язкове державне соціальне страхування, %. Для подальших розрахунків, згідно з таблицею 3.2 [47], приймаємо коефіцієнт $\beta = 36,3\%$.

$$H_{\text{зп}} = (3680,00 + 368,00) \cdot \frac{36,3}{100} = 1469,42 \text{ (грн.)}$$

Розрахуємо амортизацію обладнання, комп’ютерів та приміщень А, які використовувались під час виконанні науково-дослідної та конструкторської роботи за формулою:

$$A = \frac{Ц \cdot H_a}{100} \cdot \frac{T}{12} \text{ грн.},$$

де Ц – загальна балансова вартість всього обладнання, комп’ютерів приміщень тощо, що використовувались для виконання дослідної та конструкторської роботи, грн.; H_a – річна норма амортизаційних відрахувань (приймаємо $H_a=10\%$); Т – термін використання обладнання, приміщень тощо, місяці.

Розрахунок для стаціонарного комп’ютеру наведемо нижче:

$$A = \frac{2000 \cdot 10}{100} \cdot \frac{3}{12} = 50 \text{ (грн.)}$$

Однотипні розрахунки для решти техніки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.3 – Розрахунок амортизаційних відрахувань

Найменування обладнання, приміщень тощо	Балансова вартість, грн.	Норма амортизації, %	Термін використання, міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн.
Стаціонарний комп’ютер	2000	10	3	50,00
Ноутбук	1500		8	100,00
Аудиторія 4302	10000		3	250,00
Аудиторія 4306	9000		8	600,00
Всього				1000,00

Таблиця 5.4 – Витрати на комплектуючі, що були використані під час виконання науково-дослідної роботи

№	Назва	Тип	К-сть	Ціна	Сума
1	Блок живлення	MeanWell PD110A	1	254,00	254,00
2	Датчик температури	ТСМ1-3-50М-В-3-60-6-40-Д	1	126,00	126,00
3	Нормуючий перетворювач	ТСМУ-50М-0,5-Д	1	264,00	264,00
4	Датчик тиску	ПД100-ДИ166-160.И.11	1	756,00	756,00
5	Процесорний модуль формату PC104	Advantech PCM-3353F-L0A1E	1	3011,80	3011,80
6	Рідкокристалічний дисплей	WC0802C-STBLWNC-06	1	39,00	39,00
7	Друкована плата модуля В/В	МВВ01	1	340,00	340,00
8	Конденсатор електролітичний	2200 мкФ х 16В	4	2,40	9,60
9	Конденсатор електролітичний	100 мкФ х 16В	12	1,10	13,20
10	Конденсатор електролітичний	47 мкФ х 16В	4	1,10	4,40
11	Конденсатор електролітичний	10 мкФ х 16В	2	1,00	2,00
12	Конденсатор керамічний	0,1 мкФ х 50В	27	0,11	2,97
13	Конденсатор керамічний	0,01 мкФ х 50В	4	0,11	0,44
14	Реле	HJR-21FF-12VDC-S-Z	1	3,50	3,50
15	Транзистор	BC847	1	0,54	0,54
16	Діод	1N4007	1	0,32	0,32
17	Клемник	78H-05P	2	19,80	39,60
18	Мікросхема ПЛМ	Altera EPM3064STC100-10	1	29,30	29,30
19	Мікросхема АЦП	AnalogDevices AD7680	4	49,98	199,92

Продовження таблиці 5.4

№	Назва	Тип	К-сть	Ціна	Сума
20	Мікросхема підсилювач	LM358D	4	3,62	14,48
21	Мікросхема стабілізатор напруги	LM78L05	4	1,50	6,00
22	Супресор	P6KE12CA	4	1,30	5,20
23	Перетворювач DC-DC	RB1212D	4	46,00	184,00
24	Оптопара	PC817	12	1,30	15,60
25	Роз'єм	MF-16F	1	6,90	6,90
26	Роз'єм	MF-16M	1	4,80	4,80
27	Роз'єм	BH-10	1	1,20	1,20
28	Дросель	DL1206-10	4	1,50	6,00
29	Резистор	270 Ом; 0,125Вт	12	0,07	0,84
30	Резистор	620 Ом; 0,125Вт	12	0,07	0,84
31	Резистор	820 Ом; 0,125Вт	4	0,07	0,28
32	Резистор	1 кОм; 0,125Вт	12	0,07	0,84
33	Резистор	10 кОм; 0,125Вт	18	0,07	1,26
34	Кнопка тактова	TS102S H9.5	4	0,60	2,40
35	Корпус прилада	KJA6200-220	1	180,00	180,00
36	Вимикач	H8653VBBR3	1	20,80	20,80
37	Тримач запобіжника	P-12	2	1,80	3,60
38	Запобіжник	5x20мм, 3А, 25В	2	0,30	0,60
39	Стійка металева	DBLM3/10	8	0,90	7,20
40	Стійка металева	DBLM3/20	6	1,90	11,40
41	Тримач провідників самокл.	PTL-2	8	0,80	6,40
42	Провідники (метрів)	0,35мм ²	2,1	2,40	5,04
43	Провідники (метрів)	0,5мм ²	0,6	3,10	1,86
44	Гвинт	M3x6	28	0,10	2,80
45	Гвинт	M4x10	8	0,18	1,44
Разом:					5588,37

Підчас виконання даної дослідної роботи не було виконано дослідних зразків пристрою, так як це не ставилось за мету. Тому витрати на матеріалів набудуть нульових значень.

Витрати на комплектуючі, що були використані підчас виконання роботи розрахуємо за формулою:

$$K = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i,$$

де H_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.; C_i – ціна комплектуючих i -го виду, грн.; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, приймаємо $K_i = 1,1$; n – кількість видів комплектуючих.

Розрахуємо величину інших витрат, прийнявши відсоток на інші витрати за 100% від суми основної та додаткової заробітної плати розробників:

$$B_{in} = 100\% \cdot (Z_o + Z_p).$$

$$B_{in} = 1 \cdot 3680,00 = 3680,00 \text{ (грн.)}.$$

Розрахуємо витрати на виконання даної частини науково-дослідної роботи, як суму усіх попередніх статей витрат.

$$B = Z_o + Z_d + H_{зп} + A + M + K + B_{in}.$$

$$B = 3680,00 + 368,00 + 1489,26 + 1000,00 + 5588,37 + 3680,00 = 15805,63 \text{ (грн.)}.$$

Оскільки робота над пристроєм діагностики в майбутньому буде продовжена, то розрахуємо загальні витрати на виконання даної науково-дослідної та конструкторської роботи.

$$B_{заг} = \frac{B_{in}}{\alpha},$$

де α – частка витрат, які безпосередньо здійснює виконавець даної науково -дослідної та конструкторської роботи, у відн.од.

$$B_{\text{заг}} = \frac{3680,00}{0,2} = 18400,00 (\text{грн.}).$$

Прогнозування загальних витрат здійснимо за формулою:

$$ЗВ = \frac{B_{\text{заг}}}{\beta},$$

де β – коефіцієнт, який враховує стадію виконання даної роботи.

Оскільки розробка знаходиться на стадії розробки конструкторської документації, то приймаємо $\beta = 0,3$.

$$ЗВ = \frac{18400,00}{0,4} = 46000,00 (\text{грн.}).$$

5.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації результатів розробки

Для повного завершення науково-дослідної роботи потрібно 1,5 роки. Такий тривалий термін для повного завершення роботи необхідний для створення універсального пристрою діагностики, який міг би бути встановлений на будь-якому з типів трансформаторів, що наразі експлуатуються на території України та близького зарубіжжя, а також для перевірки роботи діагностики на реальних працюючих трансформаторах для виключення неправильних результатів діагностування, які в свою чергу неправильно вплинуть на корегування розрахунку оптимального режиму. Позитивні результати від впровадження розробки очікуємо отримати через 2 роки. Впровадження даного приладу разом із пропонованим алгоритмом використання його даних для оперативної зміни режиму в залежності від стану встановлених трансформаторів дозволить значно зменшити витрати на ремонти після раптових відмов трансформаторів струму.

Найближчим аналогом даного приладу є багатовходовий прилад, який дозволяє контролювати до дев'яти трансформаторів струму, при цьому його вартість складає близько 150 тис. грн., що для кожного

трансформатора являє ціну близько 16,7 тис. грн. Провівши моніторинг ринку, дійшли висновку що вартість виготовлення аналогу складає мінімум 10 тис. грн. Це означає, що з запровадженням нашого зразка витрати на виготовлення скорочуються на 4 тис. грн. До впровадження наукової розробки обсяг виробництва складав орієнтовно 30 шт. на рік, а прибуток на одиницю продукції, який отримувало підприємство - порядку 5000 грн.

Після впровадження даної розробки і отримання позитивних відгуків про відсутність хибних спрацювань та нормальне функціонування діагностики, на енергооб'єктах, що вже його впровадили очікується збільшення кількості одиниць реалізованої продукції: в перший рік – на 9 шт.; в другий рік – на 18 шт.; в третій рік на 6 шт.; в четвертий рік на 3 шт.

Оцінимо зростання чистого прибутку за наступною формулою:

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta\Pi_{\text{я}} \cdot N + \Pi_{\text{я}} \cdot \Delta N)_i,$$

де $\Delta\Pi_{\text{я}}$ – покращення основного якісного показника від впровадження результатів розробки в даному році; N – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів розробки; ΔN – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки; $\Pi_{\text{я}}$ – основний якісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки; n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки.

Збільшення прибутку підприємства за перший рік впровадження наукової розробки:

$$\Delta\Pi_1 = 5000 \cdot 30 + (5000 + 4000) \cdot 9 = 231000 \text{ (грн.)}.$$

Збільшення прибутку підприємства за другий рік:

$$\Delta\Pi_2 = 5000 \cdot 30 + (5000 + 4000) \cdot (9 + 18) = 393000 \text{ (грн.)}.$$

Збільшення прибутку підприємства за третій рік:

$$\Delta\Pi_3 = 5000 \cdot 30 + (5000 + 4000) \cdot (9 + 18 + 6) = 447000(\text{грн.}).$$

Збільшення прибутку підприємства за четвертий рік:

$$\Delta\Pi_4 = 5000 \cdot 30 + (5000 + 4000) \cdot (9 + 18 + 6 + 3) = 474000(\text{грн.}).$$

5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності

Розрахуємо ефективність вкладених інвестицій та період їх окупності, використовуючи алгоритм запропонований в [47].

В якості теперішньої вартості інвестицій, що вкладаються в наукову розробку, PV приймаємо величину загальних втрат на виконання і впровадження результатів науково-дослідної роботи ZB .

$$PV = ZB = 46000,00(\text{грн.}).$$

Використаємо значення очікуваного збільшення прибутку, що його отримає підприємство від впровадження розробки, розраховані в пункті 5.2.

Побудуємо вісь часу, на яку нанесемо усі інвестиції та прибутки, що мають місце під час виконання даної науково-дослідної роботи.

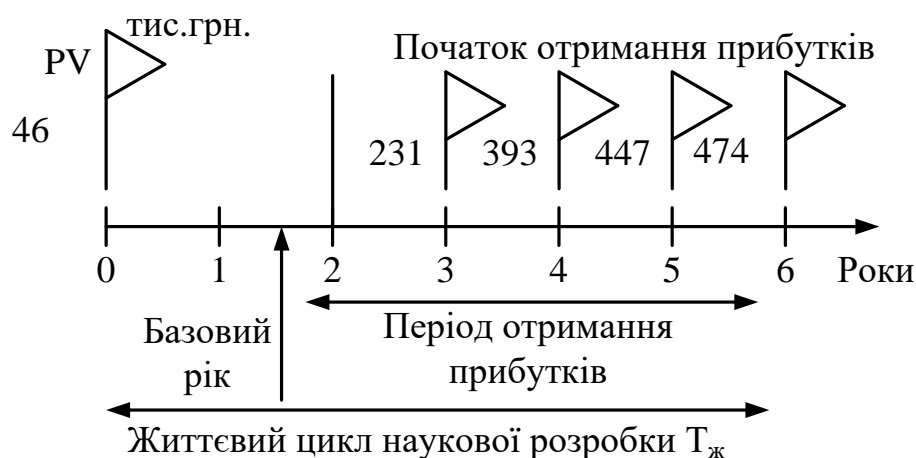


Рисунок 5.1 – Вісь часу з фіксацією платежів, що мають місце під час розробки і впровадження результатів даної науково-дослідної роботи

Визначимо значення приведеної вартості всіх чистих прибутків ПП за формулою:

$$ПП = \sum_1^t \frac{\Delta\Pi_i}{(1+\tau)^t},$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої науково-дослідної роботи; t – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої науково-дослідної роботи; τ – ставка дисконтування, для України – 0,1; t – період часу від моменту отримання чистого прибутку до точки “0”.

$$ПП = \frac{291}{(1+0,1)^3} + \frac{393}{(1+0,1)^4} + \frac{447}{(1+0,1)^5} + \frac{474}{(1+0,1)^6} = 1032,169 \text{ (тис. грн.)}$$

Розрахуємо абсолютну ефективність вкладених інвестицій $E_{абс}$ за формулою:

$$E_{абс} = ПП - PV.$$

$$E_{абс} = 1032,169 - 46,0 = 986,169 \text{ (тис. грн.)}$$

Оскільки $E_{абс} > 0$, то результат від проведення наукових досліджень та їх впровадження може принести прибуток.

Розрахуємо відносну ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій E_B за наступною формулою:

$$E_B = \sqrt[T_{ж}]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1,$$

де $T_{ж}$ – життєвий цикл наукової розробки.

$$E_B = \sqrt[6]{1 + \frac{986,169}{46,0}} - 1 = 0,679.$$

Порівняємо отримане значення відносної ефективності капіталовкладень E_B з бар'єрною ставкою дисконтування $\tau_{\text{мін}}$, що визначається за формулою:

$$\tau_{\text{мін}} = d + f,$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках, у 2012 році в Україні $d = (0,14 \dots 0,2)$; f – показник, що характеризує ризикованість вкладень, $f = (0,05 \dots 0,1)$.

Для подальших розрахунків приймаємо $d = 0,2$ і $f = 0,1$.

$$\tau_{\text{мін}} = 0,2 + 0,1 = 0,3.$$

Оскільки $E_B > \tau_{\text{мін}}$, очікуємо, що інвестор буде зацікавленим у фінансуванні даної наукової розробки.

Визначимо термін окупності вкладених в реалізацію наукового проекту інвестицій за наступним співвідношенням:

$$T_{OK} = \frac{1}{E_B}.$$

$$T_{OK} = \frac{1}{0,679} = 1,673 \text{ (року)}.$$

Оскільки $T_{OK} < 3$ років, то фінансування даної розробки є доцільним.

Висновки до розділу 5:

В даному розділі була дана оцінка економічній доцільності всієї науково-дослідної роботи. Висновок про економічний ефект від її впровадження спочатку було підтверджено експертами – фахівцями в галузі електроенергетики, що мають найбільший практичний досвід а також добре знайомі з ситуацією на сучасному ринку електричного обладнання. Експерти оцінили економічний потенціал розробки та різні можливі аспекти на шляху її впровадження.

Оскільки кінцева мета цієї науково-дослідницької роботи є унікальною у своєму роді (до цього проблема діагностування

трансформаторів струму з метою керування режимом широко не підіймалась), то прямих конкурентів для приладу, що реалізуватиме дану мету фактично немає. Тому конкурентне порівняння прибутків для підприємства-виробника робилось із найбільш схожим приладом, що може виконувати функції діагностування трансформаторів струму. Це порівняння виявило суттєві переваги приладу, що розробляється в економічному плані, навіть не враховуючи його переваги у точності діагностування та можливості застосування його результатів. Отримані результати мають зацікавити:

- покупців (власників розподільчих мереж та енергетичних підприємств), для яких впровадження розробки підвищить надійність роботи;
- виробників, які отримають прибуток від переходу на запроваджену технологію за рахунок зниження собівартості та збільшення обсягу продажів;
- інвесторів, які швидко зможуть повернути свій вкладений капітал із оговореним відсотком прибутку.

РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Задача розділу

Конституція України гарантує право всіх громадян України на належні безпечні та здорові умови праці. Відповідно до Закону України «Про охорону праці» реалізація конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, належні безпечні та здорові умови праці має бути забезпечена на кожному робочому місці. Це стосується і робіт, пов'язаних з монтажем вимірювальних трансформаторів на підстанції.

Коли плануються роботи з розташування, встановлення та експлуатації вимірювальних трансформаторів в першу чергу необхідно подумати про забезпечення безпеки. Ніколи не слід забувати про небезпеки, які пов'язані з механічними й електричними пристроями. Виводи первинної обмотки вимірювального трансформатора є основним джерелом небезпеки, так як на цих виводах при випадковому підключенні до вторинних обмоток освітлювальної або силової мережі на первинній обмотці з'являється велика напруга, яка є небезпечною для людського життя.

Оскільки роботи з монтажу вимірювального трансформатора проводяться на значній висоті та відкритій місцевості, то при їх монтажі або обслуговуванні необхідно дотримуватись правил охорони праці щодо робіт на висоті, враховувати мікрокліматичні умови виробничого середовища, санітарно-гігієнічні параметри, що характеризують виробничий шум, освітлення, вібрацію та ін.

Вимірювальні трансформатори як правило монтують на електричних підстанціях, де є можливість ураження електричним струмом від обладнання яке знаходиться під наведеною напругою, тому при роботі з таким обладнанням необхідно дотримуватись правил з охорони праці

щодо безпечного виконання робіт в електроустановках понад 1 кВ які знаходяться під наведеною напругою.

Наведене вище обґрунтовує актуальність проблеми, що полягає у розвитку питань з охорони праці при виконанні робіт, пов'язаних з монтажем трансформаторів, які працюють у складі енергетичної системи України, з урахуванням сучасних знань, системного та ризик-орієнтованого підходів про природу небезпеки.

Враховуючи те, що для мінімізації ризику професійного захворювання та травматизму працівників при виконанні робіт, пов'язаних з монтажем трансформаторів, потребується вирішення цілого комплексу питань з охорони праці, а обсяг даного розділу МКР обмежений, то сформулюємо основні задачі охорони праці за темою МКР.

1. Провести аналіз умов праці при виконанні робіт, пов'язаних з монтажем трансформаторів, які працюють у складі електроенергетичної системи України, за міждержавним ГОСТ12.0.003-74 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».

2. Розробити організаційно-технічні рішення з охорони праці при елек-тричному монтажі трансформатора. Розрахувати параметри заземлюваль-ного пристрою трансформатора.

3. Описати основні заходи протипожежного захисту вимірювальних трансформаторів.

6.2 Аналіз умов праці при виконанні робіт, пов'язаних з монтажем вимірювальних трансформаторів, які працюють у складі електроенергетичної системи України

На основі аналізу літературних джерел [29–31] та викладеного у підроз-ділі 6.1 матеріалу при проектуванні і виконанні монтажних робіт трансформаторів мають бути враховані небезпечні і шкідливі виробничі фактори з урахуванням міждержавного нормативного документа з охорони праці ГОСТ 12.0.003-74, а саме:

Фізичні небезпечні й шкідливі виробничі фактори:

- небезпечні рівні напруги в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- розташування робочого місця на значній висоті щодо поверхні землі (підлоги);
- гострі крайки, задирки і шорсткість на поверхнях заготовок, інстру-ментів, устаткування;
- рухомі частини виробничого устаткування;
- вироби, що пересуваються, заготівки, матеріали;
- підвищена і знижена температури повітря робочої зони;
- підвищена вологість повітря;
- підвищена чи знижена рухомість повітря;
- підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони;
- підвищена яскравість світла; прямий і відбитий блиск;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- підвищений рівень ультразвуку;
- підвищений рівень іонізуючих випромінювань у робочій зоні;
- підвищений рівень статичної електрики.

Додатково мають бути враховані такі фізичні небезпечні виробничі фа-ктори:

- несправність вантажопідіймальних засобів;
- підвищений рівень електричної енергії;
- підвищена пожежна небезпека (відкритий вогонь, токсичні продукти згорання, іскри,);
- підвищена вибухонебезпечність.

Психофізіологічні небезпечні й шкідливі фактори:

- фізичні перевантаження;

– нервово-психологічні – втрата самовладання, порушення координації рухів, необережні дії, недбале виконання своєї роботи.

Джерелами (носіями) небезпеки є:

- рухомі машини і механізми;
- електрообладнання;
- природне середовище;
- людина.

6.3 Розробка організаційно-технічних рішень з охорони праці при електричному монтажі вимірювального трансформатора

6.3.1 Організаційно-технічні рішення з охорони праці за стандартами України з монтажу вимірювальних трансформаторів.

За умовами МКР розробка організаційно-технічних рішень з охорони праці проводиться для трансформатора ТРН – 330 У1 наведеного на рисунку 6.1.

Для розробки рішень з охорони праці при електричному монтажі вимірювальних трансформаторів заданих технологічних параметрів з темою МКР мають бути проаналізовані Державні стандарти вимірювальних трансформаторів та Галузеві керівні документи:

ГКД 34.20.302-2002 Норми випробувань електрообладнання.

НПАОП 40.1-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок.

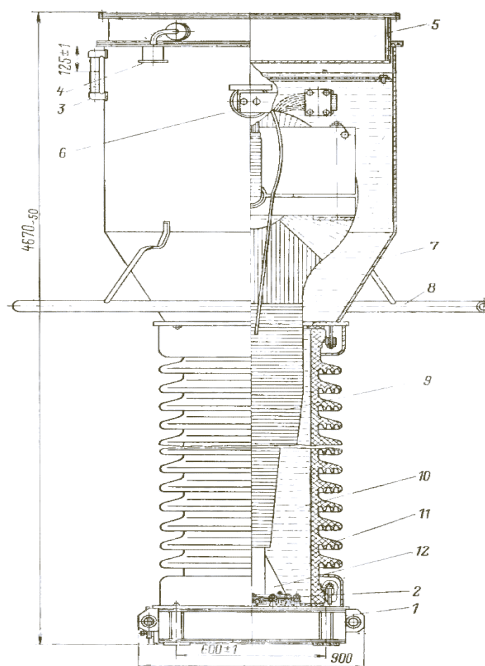


Рис. 6.1 – Трансформатор струму 330 кВ герметичного виконання з римою обмоткою: 1 – цоколь; 2 – вивід вторинної обмотки; 3 – маслопоказчик; 4 – силікагелевий фільтр 5 – еластична ємність; 6 – первинна обмотка; 7 –маслорозширивач; 8 – екрануюче кільце; 9 – ізоляція вторинної обмотки; 10 – трансформаторне масло; 11 – фарфорова покривка; 12 - металева підставка

Аналіз нормативно-технічної літератури дозволив виділити ряд однотипних операцій при монтажі трансформатора: підготовчі роботи, безпосередньо монтаж самого трансформатора та завершення роботи.

Підготовчі роботи охоплюють:

- визначення кліматичних умов на місці проведення робіт;
- підготовку робочого майданчика;
- перевірку справності інструментів та пристосувань, опорних конструкцій, системи монтажу оснащення, ізоляції системи, використовуваних підйомних механізмів та окремих елементів;
- інструктаж та перевірку знань з безпеки праці персоналу.

Кліматичні умови визначаються шляхом вимірювання температури, відносної вологості та швидкості руху повітря. Відповідно до [32] ці показники не мають виходити за межі встановлених допустимих значень:

- температура повітря в теплу пору року не більше плюс 28 °С;
- швидкість вітру 0,2–0,6 м/с;
- відносна вологість не більше 75 %.

Забороняється проведення робіт при опадах у вигляді дощу та снігу, туману та інею, зледенінні на опорах і проводах, наближенні грози. За [33] роботи з монтажу трансформатора потрібно проводити в світлий час доби, значення освітленості на робочому місці монтажника має бути не менше 200 лк.

Підготовка робочого майданчика полягає в розчищенні місця, де розстилають брезент, на який в певному порядку розкладають приладдя та інструмент. Ретельно перевіряють їх цілісність і відсутність дефектів, терміни випробування і придатність ізолювальних засобів. Перевіряють і одягають комплект одягу. Одягають захисні каски і запобіжні пояси.

Монтаж трансформатора проводиться відповідно до технологічної карти робіт за відповідною монтажною схемою (рис. 6.2), подача всіх приладів і інструментів забезпечується за допомогою ізолювальних канатів.

За безпекою виконання всіх технологічних операцій стежить керівник робіт. В процесі робіт здійснюється постійний нагляд за всіма членами ригади. Керівник робіт не може безпосередньо брати участь в роботах і має знаходитися внизу, а виконавець може знаходитися на висоті. При виконанні робіт на висоті необхідно дотримуватися правил охорони праці при роботі на висоті [33].

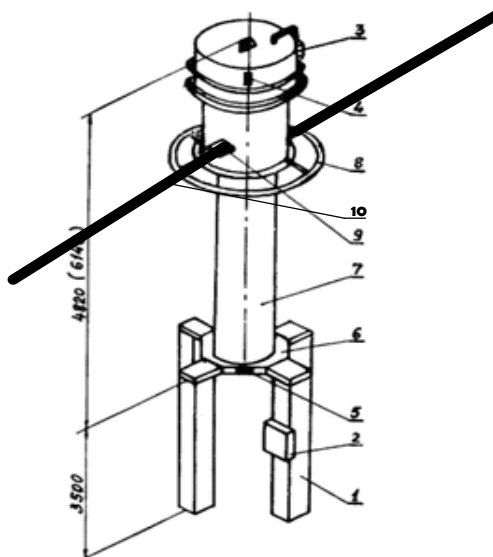


Рис. 6.2 – Монтажна схема трансформатора струму: 1– опорна конструкція; 2 – ящик затискачів; 3 – повітроосушник; 4 – маслопоказчик; 5 – коробка вторинних виводів; 6 – цоколь; 7 – покривка; 8 – екран; 9 – вивід первинної обмотки. 10 – ЛЕП

В процесі встановлення трансформатора для мінімізації ризику травматизму необхідно дотримуватися нижчевикладених організаційно-технічних вимог до техніки безпеки та виробничої санітарії:

- виконання електромонтажних робіт доручається особам, що пройшли медичний огляд і спеціальне навчання для роботи на електроустановках;
- монтаж трансформатора краще проводити в безвітряний день;
- основні операції встановлення трансформатора мають проводитися на рівні землі;
- при проведенні робіт на висоті мають встановлюватися захисні огороження і позначатися в установленому порядку межі небезпечних зон;
- при неможливості облаштування огорожень монтажні роботи мають виконуватися із застосуванням запобіжного пояса і страхувального каната;

- електричні з'єднання мають проводитися за розробленою монтажною схемою системи, приклад якої наведено на рис. 6.2.
- не слід поєднувати при контактних електричних з'єднаннях разом різні метали (наприклад, мідь і алюміній);
- для захисту людей від ураження електричним струмом потрібно виконати заземлення.

6.3.2 Розрахунок захисного заземлення трансформатора

Відповідно до вимог глави 1.7.3 ПУЕ 2014, заземлюючий пристрій трансформатора виконується за вимогою до його опору для електроустановок напругою більше 1 кВ в електричних мережах з глухозаземленою та ізольованою нейтраллю. Відповідно до п. 1.7.106 ПУЕ:2014 опір заземлюючого пристрою повинен складати не більше 0,5 Ом.

По контуру трансформатора прокладається сталева шина ($d=35\text{мм}$), яка приєднана зварюванням до загального заземлюючого пристрою трансформатора не менше, ніж у двох точках.

До заземлюючого пристрою трансформатора для захисту від непрямого дотику приєднується корпус трансформатора. Основний вплив на величину опору заземлювачів надає верхній шар ґрунту на глибині до 20-25 м, тому при розрахунку пристроїв заземлення необхідно знати їх питомий опір.

Залежно від складу (чорнозем, пісок, глина і т. п.), розмірів і щільності прилягання частинок один до одного, вологості і температури, наявності розчинних хімічних речовин (кислот, лугів, продуктів гниття і т. д.) питомий опір ґрунтів змінюється в дуже широких межах.

Найбільш важливими факторами, що впливають на величину питомого опору ґрунту, є вологість і температура. Протягом року в зв'язку зі зміною атмосферних і кліматичних умов утримання вологи в ґрунті: і його температура змінюються, а отже, змінюється і питомий опір. Найбільш різкі коливання питомої опору спостерігаються у верхніх шарах

землі, які взимку промерзають, а влітку висихають. З даних вимірювань випливає, що при зниженні температури повітря від 0 до -10°C питомий опір ґрунту на глибині 0,3 м збільшується в 10 разів, а на глибині 0,5 м - в 3 рази.

Розрахунок контуру заземлювачів зводиться до визначення такого числа розміщення штучних заземлювачів, при якому опір розтікання струму не перевищує нормоване значення.

Для обґрунтування параметрів заземлюючого пристрою, який використовується в схемі заземлення трансформатора проведемо розрахунок за загальноприйнятою методикою.

Тип заземлювального пристрою – вертикальні сталевий прутки з розмірами:

$$l_B = 2.5 \text{ м.}; d_B = 0.02 \text{ м.}; \text{відстань між вертикальними заземлювачами } a = 5 \text{ м.}$$

Ґрунт – чорнозем; склад – однорідний; вологість – нормальна.
Кліматична зона – III.

Визначаємо розрахунковий питомий опір чорнозему :

$$\rho_{\text{розр.}} = \rho_{\text{табл.}} \cdot K_c, \quad (6.2)$$

де $\rho_{\text{табл.}} = 40 \text{ Ом}$ - приблизні значення питомих електричних опорів різних ґрунтів та води, (Ом·м)

$K_c = 1,4$ - коефіцієнт сезонності, для однорідної землі при вимірюванні її опору:

$$\rho_{\text{розр.}} = 40 \cdot 1,4 = 56 (\text{Ом} \cdot \text{м}).$$

Визначаємо відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача (рис. 4.1)

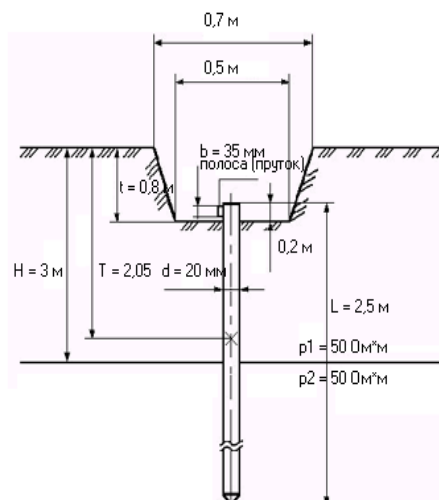


Рисунок 4.1 – Схема розміщення заземлювача в ґрунті

$$H = H_0 + \frac{l_B}{2}, \quad (6.3)$$

$$H = 0,8 + \frac{2,5}{2} = 2,05 \text{ (м)}.$$

Визначаємо опір розтікання струму в одному вертикальному заземлювачі:

$$R_B = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр.}}}{l_B} \left(\lg \frac{2l_B}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4H + l_B}{4H - l_B} \right), \quad (6.4)$$

$$R_B = 0,366 \frac{56}{2,5} \left(\lg \frac{2 \cdot 2,5}{0,02} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 2,05 + 2,5}{4 \cdot 2,05 - 2,5} \right) = 24,83 \text{ (Ом)}.$$

Визначаємо орієнтовну кількість вертикальних заземлювачів при $\eta_B = 1$ де η_B – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів

$$n_{\text{ор}} = \frac{R_B}{R_d \cdot \eta_B}. \quad (6.5)$$

$$n_{\text{ор}} = \frac{24,83}{4 \cdot 1} = 6,2 \text{ (шт.)}; \text{ приймаємо } n_{\text{ор}} = 6 \text{ (шт.)}.$$

Визначаємо коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів n_B , заземлювачі розташовані в ряд, $a/l_B = 2, n = 6$. Приймаємо $\eta_B = 0,69$.

Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів з врахуванням коефіцієнта використання:

$$n_B = n_{\text{ор}} / n_{\text{вик}} \quad (6.6)$$

$$n_B = 6 / 0,69 = 8,69.$$

Приймаємо $n_B = 9$ шт.

Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму у вертикальних заземлювачах при $n_B = 9$ без врахування з'єднувальної стрічки:

$$R_{\text{розр.в.}} = \frac{R_B}{n_B \cdot \eta_B} \quad (6.7)$$

$$R_{\text{розр.в.}} = \frac{24,83}{9 \cdot 0,69} = 3,99 \text{ (Ом)}.$$

Визначаємо довжину з'єднувальної стрічки:

$$L_c = 1,05 \cdot a(n - 1), \quad (6.8)$$

$$L_c = 1,05 \cdot 5(9 - 1) = 42 \text{ (м)}.$$

За формулою (6.8) для горизонтальних електродів, розташованих в ґрунті, визначаємо опір розтікання струму:

$$R_{\Gamma} = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр.}}}{L_c} \lg \frac{2 \cdot (L_c)^2}{H_0 \cdot B_c}, \quad (6.9)$$

$$R_{\Gamma} = 0,366 \frac{56}{24,83} \lg \frac{2 \cdot (24,83)^2}{2,05 \cdot 0,02} = 10,49 \text{ (Ом)}.$$

Визначаємо коефіцієнт використання горизонтального заземлювача. при $a/l = 2, n = 9$. Приймаємо $\eta_{\Gamma} = 0,4$.

Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі з врахуванням η_{Γ} :

$$R_{\text{розр.}\Gamma} = \frac{R_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}}; \quad (6.10)$$

$$R_{\text{розр.}\Gamma} = \frac{10,49}{0,4} = 26,22 (\text{Ом}).$$

Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму заземлювального пристрою:

$$R_{\text{розр.}} = \frac{R_{\text{розр.В}} \cdot R_{\text{розр.}\Gamma}}{R_{\text{розр.В}} + R_{\text{розр.}\Gamma}}, \quad (6.11)$$

$$R_{\text{розр.}} = \frac{3,99 \cdot 26,22}{3,99 + 26,22} = 3,46 (\text{Ом}).$$

Отже за результатами розрахунку можна сказати, що встановлення по контуру захисного заземлення з кількістю електродів 9 штук забезпечить нормальне заземлення трансформатора і безпеку обслуговуючого персоналу при роботі з ним.

Встановлення такого контурного заземлення економічно вигідне і відповідає усім нормам правил експлуатації електроустановок.

6.4 Протипожежний захист вимірювальних трансформаторів

Пожежна безпека енергетичних підприємств забезпечується за допомогою проведення організаційно-технічних заходів, спрямованих на попередження пожеж, забезпечення безпеки людей, зниження можливих матеріальних збитків, зменшення негативних екологічних наслідків, створення умов для швидкого виклику підрозділів ОРСЦЗ, успішного гасіння пожеж та евакуації людей із зони виникнення й можливого поширення пожежі, а також документів і матеріальних цінностей.

Заходи, що забезпечують пожежну безпеку трансформаторів, можна розділити на дві групи. До першої відносяться заходи, пов'язані з обладнанням трансформаторів, апаратами захисту і різними запобіжними

пристроями. До другої групи належать заходи, пов'язані з раціональним розміщенням трансформаторів, а також плануванням відкритих майданчиків і вибором засобів гасіння пожеж.

В даному випадку може виникнути пожежа, яка відноситься до класу Е – пожежі, пов'язані з горінням електроустановок.

Горючими матеріалами в масляних трансформаторах є: ізоляційне масло, яке використовується в великих кількостях, дерев'яні деталі (планки для кріплення відводів, клинки), а також паперова ізоляція обмоток. У сухих трансформаторах масло відсутнє, а інші горючі матеріали аналогічні тим що використовуються в масляних трансформаторах.

При вибуху або пожежі трансформатора трансформатор повинен бути відключений з усіх сторін від електромережі. Після зняття напруги гасіння пожежі виконувати усіма засобами пожежогасіння: повітряно-механічною піною, розпиленою водою, вогнегасниками. Горюче масло не рекомендується гасити компактними водяними струменями, тому що можливе збільшення площі загорання із-за розтікання масла.

На трансформаторах в загальному випадку повинен передбачатися релейний захист від пошкоджень і ненормальних режимів наступних видів:

- всіх видів КЗ, включаючи і виткові, в обмотках і на виводах;
- замикань всередині бака маслonaповнених трансформаторів, що супроводжуються виділенням газу;
- міжфазних КЗ на ошиновках виводів ВН і НН;
- замикань на землю на ошиновках виводів ВН і НН;
- струмів зовнішніх КЗ;
- перевантажень обмоток;
- підвищення напруги на виводах;
- порушень в системі охолодження;
- загоряння (пожежі) масла.

Засоби пожежогасіння трансформатора необхідно підтримувати в постійній готовності. Протипожежні заходи повинні бути розроблені з урахуванням загальних і місцевих правил та інструкцій із залученням спеціалістів з протипожежної безпеки. Особливу увагу забезпеченню пожежної безпеки необхідно приділяти під час проведення ремонтних, зварювальних робіт і робіт із заміни, доливання та очищення масла.

Висновок до розділу 6. Проведений аналіз літератури та нормативної документації з охорони праці та виконані розрахунки дозволили:

- провести аналіз умов праці при виконанні робіт, пов'язаних з монтажем трансформаторів, які працюють у складі електроенергетичної системи України;
- розробити організаційно-технічні рішення з охорони праці при електричному монтажі трансформатора;
- запропонувати параметри заземлювального пристрою для вимірювального трансформатора;
- описати основні заходи протипожежного захисту трансформаторів.

Урахування та виконання запропонованих заходів з охорони праці дозволяє мінімізувати ризик травматизму та професійного захворювання при виконанні робіт при експлуатації та електричному монтажі трансформатора.

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі досліджено особливості вимірювальних трансформаторів струму та напруги напругою 110, 330 та 750 кВ, їх призначення, класифікацію, також показано алгоритм вибір вимірювальних трансформаторів. Проаналізовано причини пошкоджуваності вимірювальних трансформаторів струму та напруги, показана класифікація їх дефектів; досліджено процеси старіння оливо-паперової ізоляції конденсаторного типу вимірювальних трансформаторів.

Використання методів нейро-нечіткого моделювання дозволяє визначати коефіцієнт залишкового ресурсу вимірювальних трансформаторів струму в умовах неповноти початкових даних. Використання методу онлайн моніторингу тангенса дельта оливо-паперової ізоляції вимірювальних трансформаторів струму дозволяє більш якісно визначати стан ізоляції на ранній стадії розвитку дефекту порівняно з методом контролю провідності через ізоляцію.

В економічній частині була дана оцінка економічній доцільності всієї науково-дослідної роботи. Висновок про економічний ефект від її впровадження спочатку було підтверджено експертами – фахівцями в галузі електроенергетики, що мають найбільший практичний досвід а також добре знайомі з ситуацією на сучасному ринку електричного обладнання. Експерти оцінили економічний потенціал розробки та різні можливі аспекти на шляху її впровадження.

Оскільки кінцева мета цієї науково-дослідницької роботи є унікальною у по-своєму, то прямих конкурентів для приладу, що реалізуватиме дану мету фактично немає. Урахування та виконання запропонованих заходів з охорони праці дозволяє мінімізувати ризик травматизму та професійного захворювання при виконанні робіт при експлуатації та електричному монтажі трансформатора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Федоренко, Г. М. Комплексний аналіз аварійних ситуацій генеруючого обладнання електростанцій / Г. М. Федоренко, О. Г. Кенцицький // Технічна електродинаміка. - 2012. - № 2. - С. 48-49.
2. Дарьян Л.А. Научные основы физико-химической диагностики высоковольтного маслонаполненного электрооборудования с изоляцией конденсаторного типа. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Новосибирск, 2009, - 48 с.
3. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 2002. - 39 с.
4. ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. - М.: Стандартинформ» 2007. - 45 с.
5. Львов М.Ю. Об оценке состояния силовых трансформаторов с длительным сроком эксплуатации // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Выпуск 1 і. - СПб: ПЭИПК, 2000. - С, 264 - 268.
6. Тубо Ж.-П., Ломан Т., Райхерт А., Монастырский А.Е., Николова С.А. Современные проблемы эксплуатации электроэнергетического оборудования // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования, Выпуск 2. «Технологии координации изоляции и эксплуатация современных технических средств от перенапряжений в сетях с изолированной и резонансно заземленной нейтралью»: Материалы международной научно-технической конференции, 31 марта - 05 апреля 2003 года. С-Петербург,: Изд-во ПЭИПК, 2003 г. - С. 4 - 12.
7. Монастырский А.Е., Бунин В.И., Евдокимов Я.А.- Техничко-

экономические проблемы диагностики трансформаторного оборудования // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Выпуск 28. - СПб: ПЭИПК, 2005. - С. 367 - 372.

8. СОУ-Н ЕЕ 40.1-21677681-90:2013 Експлуатація вимірювальних трансформаторів. Настанова.

9. IEC 60422 Supervision and maintenance guide for mineral insulating oils in electrical equipment, 2001.

10.ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.

11. Кириленко О. Інформатизація та інтелектуалізація систем керування в електроенергетиці: деякі підсумки за останні роки / Олександр Кириленко, Артур Праховник // Технічна електродинаміка: спеціальний випуск. – 2010. – С. 10–17.

12. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М.: НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.

13. Гобрей Р. М. Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагоджування і в експлуатації. / Р.М. Гобрей, Г. В. Шинкаренко, Г. М. Коліушко Г. М., Коліушко Д. Г., Болдирєв О. М., - К.: «ДП НТУКЦ», – 2011. – 1008 с.

14. Акопян Г. Е. Основные принципы системы технической диагностики маслонаполненного электрооборудования высокого напряжения / Г. Е. Акопян, П. М. Сви, В. В. Смекалов // Электрические станции. – 1991. – № 3. – С. 67.

15. Иерусалимов М.Е., Проценко А.Р., Баранник Е.Я. Автоматизированная диагностика изоляции мощного маслонаполненного электрооборудования // Энергетика и электрификация. – 1993. – № 2. – С. 44-47.

16. Равновесие влаги и бумажно-масляной изоляции трансформаторов / У. Ду. М. Zahn, В.С. Lesieutre, А. V Mainishev, S.R. Lindgren // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 1999. – Vol. 15. – № 1. – P. 11- 20.

17. Understanding Water in Transformer Systems, The Relationship Between Relative Saturation and Parts per Million (ppm), Lance Lewand (Doble Engineering), NETA WORLD, Chemist's Perspective, Spring 2002.

18. Аналіз результатів моніторингу паперово-оливної ізоляції конденсаторного типу високовольтного обладнання «Вінницька 750 кВ» / О.О. Рубаненко, І. І. Смагло. Режим доступу до журн.: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2013/ineeem/txt/smaglo.pdf>

19. Смагло І. І., Рубаненко І.О. Дослідження результатів моніторингу результатів паперово-оливної ізоляції конденсаторного типу високовольтного обладнання електропідстанції 750 кВ «Вінницька». Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 09-11 квітня 2013 р. – Кременчук, КрНУ, 2013. – С. 188 – 190.

20. Славинский А.З. Физика диэлектриков. Том 2. Высоковольтные вводы. – М.: ООО Издательство «Научтехлитиздат», 2007. – 256 с.

21. Лизунов С.Д. Проблемы современного трансформаторостроения в России / С.Д. Лизунов, А.К. Лоханин // Электричество. – 2000. – № 8. – С. 2-10.

22. Славинский А.З. Физика диэлектриков. Том 1. Высоковольтная изоляция энергетической аппаратуры. – М.: ООО Издательство «Научтехлитиздат», 2007. – 228 с.

23. Сосновский В.В., Гуменюк А.И., Юхименко М.А., Организация ремонта оборудования 330 – 750 кВ в Юго-Западной электроэнергетической системе. – Электрические сети и системы – 2003, - №1, с. 42-47.

24. Абрамов Ю. В. Трансформаторное масло как диагностическая среда маслonaполненного оборудования. [Лекционный курс] / Ю. В. Абрамов. – Ростов-на-Дону, 2017. – 32 с.

25. Хроматографический анализ трансформаторного масла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ntcretec.ru/hromatograficheskiy-analiz-transformatornogo-masla>.

26. Львов М. Ю. Физико-химические методы в практике оценки состояния силовых трансформаторов в условиях эксплуатации: учебно-методическое пособие / М. Ю. Львов, П. П. Кутлер. – М., 2003. – 20 с.

27. Кузнецов Ф.Д. Техническое обслуживание измерительных трансформаторов тока и напряжения / Сост. Ф.Д Кузнецов; Под. ред. Б.А Алексеева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – 96 ст.

28. Дудюк Д.Л., Максимів В.М., Оріховський Р.Я. Електричні вимірювання. Навчальний посібник. — Львів: Афіша, 2003. — 273 с.

29. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – Київ, 2000.

30. Природне і штучне освітлення : ДБН В.2.5.-28-2006. – К. : Мінбуд України, 2006. – 78 с.

31. НПАОП 0.00-1.15-07. Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті. Затвержені 27.03.2007 № 62/ Державний комітет України з промислової безпеки з охорони праці та гірничого нагляду.

32. Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках / Долин П. А. – М. : Энергоатомиздат, 1983.

33. Бондаренко Є. А. Пожежна безпека : навч. посіб./ Бондаренко Є. А. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 109 с.

34. Лежнюк П.Д. Оптимізація режиму розподільних електричних мереж з розосередженими джерелами електроенергії / П.Д. Лежнюк, О.А. Ковальчук, В.В. Кулик // Наукові праці Донецького національного

технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика», випуск 11 (186). – 2011. – С. 250 - 251.

35. K. De Brabandere. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters / B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans // IEEE Trans. Power Electron. - Jul. 2007. - vol. 22, no. 4. - P. 1107–1115.

36. K.D. Brabandere. Voltage and frequency droop control in low voltage grids by distributed generatros with inverter front-end: Ph.D. dissertation, Dept. Elektrotechniek, Katholieke Univ. Lueven, Leuven Belgi / K.D. Brabandere. - 2006.

37. A. Engler. Applicability of droops in low voltage grids / A. Engler // Int. J. Distrib. Energy Resources, Technology and Science Publisher, Germany, Kassel. - 2005. - vol. 1, no. 1.

38. H. Laaksonen. Voltage and frequency control of inverter based weak LV network microgrid / P. Saari, and R. Komulainen // Int. Conf. Future Power Syst., - 2005, - P. 1–6.

39. S. Tabatabaee. Investigation of droop characteristics and X/R ratio on small-signal stability of autonomous microgrid / H.R. Karshenas, A. Bakhshai, and P. Jain // Proc. 2nd Power Electron., Drive Syst. Technol. Conf. – 2011. – P. 223–228.

40. J.M. Guerrero. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control / L. GarciadeVicuna, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret // IEEE Trans. Ind. Electron. - Aug. 2005. - vol. 52, no. 4 - P. 1126–1135.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А**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 Лежнюк П.Д.
(наук. ст., вч. зв., ініц. та прізви.)

(підпис)

«_____» _____ 20__ р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
**АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ
ТРАНСФОРМАТОРІВ**
08-13.МКР.016.00.191 ТЗ

Науковий керівник: к.т.н., проф.,
доцент каф. ЕСС

_____ Рубаненко О. Є.
(підпис)

Магістр групи ЕС-18м

_____ Хавтирко В. В.
(підпис)

Вінниця 2019 р.

1. Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)

а) для забезпечення необхідного рівня надійності роботи енергосистеми, при подальшій експлуатації обладнання, що вичерпало призначений ресурс, особлива увага повинна бути приділена контролю його технічного стану. Таким чином, на сучасному етапі розвитку енергетики підвищується актуальність питань діагностики вимірювальних трансформаторів.

б) наказ ректора ВНТУ № 254 від 2 жовтня 2019 р. про затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи.

2. Мета і призначення МКР

Метою МКР є дослідження методів та засобів діагностування вимірювальних трансформаторів струму та напруги, вдосконалення методу діагностування стану ізоляції вимірювальних трансформаторів шляхом моніторингу зміни $\text{tg}(\delta)$, а також використання нейро-нечіткого моделювання в задачах прогнозування стану вимірювальних трансформаторів в умовах неповноти поточних значень діагностичних параметрів.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі **основні задачі**:

- дослідити особливості вимірювальних трансформаторів струму та напруги напругою 110, 330 та 750 кВ, їх призначення, класифікацію; провести вибір вимірювальних трансформаторів.
- провести аналіз причин пошкодженості вимірювальних трансформаторів струму та напруги, класифікувати їх дефектів; дослідити процеси старіння оливо-паперової ізоляції конденсаторного типу вимірювальних трансформаторів.
- виконати порівняльний аналіз існуючих методів діагностування вимірювальних трансформаторів; вдосконалити метод

діагностування стану ізоляції вимірювальних трансформаторів шляхом моніторингу зміни $\text{tg}(\delta)$.

- використати нейро-нечітке моделювання в задачах прогнозування стану вимірювальних трансформаторів в умовах неповноти поточних значень діагностичних параметрів.
- провести економічний розрахунок за методикою визначення економічних показників заміни обладнання контролю параметрів ізоляції P5026 на СА 7100.
- проаналізувати умови праці при виконанні робіт, пов'язаних з монтажем вимірювальних трансформаторів, які працюють у складі електроенергетичної системи України, а також розробити організаційно-технічні рішення з охорони праці при електричному монтажі вимірювального трансформатора.

3. Вихідні дані для виконання МКР

Виконано розрахунок нейро-нечіткого моделювання в задачах прогнозування стану вимірювальних трансформаторів в умовах неповноти поточних значень діагностичних параметрів.

Список використаних джерел розробки:

СОУ-Н ЕЕ 40.1-21677681-90:2013 Експлуатація вимірювальних трансформаторів. Настанова. Рассальский А.Н., Сахно А.А., Коноград С.П., Спица А.Г., Гук А.А. Анализ методов непрерывного контроля характеристик изоляции трансформаторов тока и вводов на подстанциях 330-750 кВ Гобрей Р. М. Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагоджування і в експлуатації. / Р.М. Гобрей, Г. В. Шинкаренко, Г. М. Коліушко Г. М., Коліушко Д. Г., Болдирєв О. М., - К.: «ДП НТУКЦ», - 2011. - 1008 с. Федоренко, Г. М. Комплексний аналіз аварійних ситуацій генеруючого обладнання електростанцій / Г. М. Федоренко, О. Г. Кенсицький // Технічна електродинаміка. - 2012. - № 2. - С. 48-49. Дарьян Л.А. Научные основы физико-химической диагностики высоковольтного маслонаполненного электрооборудования с изоляцией конденсаторного типа. \

4. Вимоги до виконання МКР

Вимоги до виконання викладені у відповідних нормативних матеріалах

з використанням основних законів електротехніки і методів розрахунку струмів короткого замикання .

5. Економічні показники

Методика визначення економічних показників заміни обладнання контролю параметрів ізоляції Р5026 на СА 7100

6. Етапи МКР та очікувані результати

№ етапу	Назва етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	кінець	
1	Розроблення технічного завдання	02.09.19	06.09.19	формування технічного завдання
2	Конструктивні особливості вимірювальних трансформаторів	09.09.19	13.09.19	аналітичний огляд літературних джерел, задачі досліджень, розділ 1 ПЗ
3	Дослідження пошкоджуваності вимірювальних трансформаторів	16.09.19	27.09.19	розділ 2
4	Аналіз та вдосконалення існуючих методів діагностування вимірювальних трансформаторів	30.09.19	11.10.19	розділ 3
5	Дослідження засобів діагностування вимірювальних трансформаторів	15.10.19	25.10.19	розділ 4
6	Економічна частина	28.10.19	15.11.19	розділ 5
7	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	18.11.19	29.11.19	розділ 6
8	Оформлення пояснювальної записки та презентації	02.12.19	06.12.19	презентація

7. Матеріали, що подаються до захисту МКР

Пояснювальна записка МКР, ілюстративні матеріали, відгук наукового керівника, відгук рецензента, 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 кваліфікаційну роботу у Вінницькому національному технічному університеті (БДР (БД), ДП (ДР), МКР)», 2015р.

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

Відсутні.

ДОДАТОК Б

**Найменші допустимі значення опору ізоляції обмоток
трансформаторів напруги та трансформаторів струму**

Таблиця Б.1 — Найменші допустимі значення опору ізоляції обмоток трансформаторів напруги та трансформаторів струму

Тип вимірювального трансформатора	Найменше допустиме значення опору ізоляції, МОм			Примітка
	Основна ізоляція	Вимірювальний конденсатор	Зовнішні шари основної ізоляції	
Трансформатори напруги	300 і більше для трансформаторів напруги серії НКФ під час приймально-здавальних випробувань і 50 — під час експлуатації. Для решти трансформаторів напруги — не нормується	—	—	
Трансформатори струму усіх напруг (крім трансформаторів струму з конденсаторною паперово- масляною ізоляцією)	Не нормується	—	—	У каскадних трансформаторах струму під час приймально-здавальних випробувань опір ізоляції проміжних обмоток повинен бути не менше

				ніж 1 МОм.
Трансформатори струму з конденсаторною паперово- масляною ізоляцією і <i>U</i> -подібною обмоткою на напругу 330 кВ	$\frac{5000^{*)}}{3000}$	1000	$\frac{1000^{*)}}{500}$	—
Трансформатори струму з конденсаторною паперово- масляною ізоляцією і римоподібною обмоткою	$\frac{5000^{*)}}{3000}$	—	$\frac{100^{*)}}{50}$	—
*) У чисельнику наведено найменші допустим значення опору ізоляції для ТС, які вводяться до роботи, у знаменнику — для ТС, які знаходяться в експлуатації.				

Таблиця Б.2 — Граничні значення $tg\delta$ основної ізоляції обмоток трансформаторів струму (за $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ та напруги 10 кВ)

Виконання трансформатора струму і періодичність вимірювання	Граничні значення $tg\delta\%$, ізоляції трансформатора струму на напругу, кВ					
	35	60-110	150-220	330	500 ^{**)}	750 ^{*)}
Трансформатори струму з паперово-масляною ізоляцією і обмоткою кільцевого виконання:				—		—
під час першого увімкнення	2,5	2,0	1,5		1,0	
в експлуатації	4,5	3,5	2,5		1,5	

Трансформатори струму з конденсаторною паперово-масляною ізоляцією і U-подібною обмоткою: — під час першого увімкнення — в експлуатації	—	—	—	0,6/0,8/ 1,0**)	—	—
Трансформатори струму з конденсаторною паперово-масляною ізоляцією і римоподібною обмоткою: — під час першого увімкнення — в експлуатації	—	—	—	150% від вимірян ого наго заводі, але більше ніж 0,5 0,6	150% від виміряно наого заводі, неале більше ніж 0,5 0,6	150% від вимірян наого заводі, неале більше ніж 0,5 0,6

*) Норму надано для одного елемента каскадного трансформатора струму.

***) Норма — у першому знаменнику для вимірювального конденсатора, у другому - для останніх шарів ізоляції.

ДОДАТОК В

Результати нейро-нечіткого моделювання

З урахуванням даних таблиць 4.9, 4.10 та (4.17) отримуємо математичну модель коефіцієнта загально залишкового ресурсу у вигляді (В.1)

$$\begin{aligned}
 & \text{ЯКЩО } k_W \in \text{"нормальне"} \text{ } T A k_R \in \text{"нормальне"} \text{ } T A k_{C_x} \in \text{"нормальне"} \text{ } T A k_{I_{g(\delta)}} \in \text{"нормальне"} \\
 & \quad T A k_{T_3} \in \text{"нормальне"} \text{ } T A k_{X_{APG}} \in \text{"нормальне"} \text{ } T A k_{P_1} \in \text{"нормальне"} \text{ } T A k_{T_2} \in \text{"нормальне"} \\
 & \quad T A k_{T_1} \in \text{"нормальне"} \text{ } T A k_{T_4} \in \text{"нормальне"} \text{ } T A k_{P_2} \in \text{"нормальне"} \text{ } \text{ТО} \\
 & k_{\text{заг.зал.рес}} = 0,09943k_W + 0,009774k_R + 0,009213k_{C_x} + 0,09896k_{I_{g(\delta)}} + 0,09896k_{T_3} + 0,09896k_{X_{APG}} + 0,09896k_{P_1} \\
 & \quad + 0,09896k_{T_2} + 0,09896k_{T_1} + 0,09896k_{T_4} + 0,09896k_{P_2} + 0,09896 \\
 & \text{ЯКЩО } k_W \in \text{"незначне відхилення"} \text{ } T A k_R \in \text{"незначне відхилення"} \text{ } T A k_{C_x} \in \text{"незначне відхилення"} \\
 & \quad T A k_{I_{g(\delta)}} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ } T A k_{T_3} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ } T A k_{X_{APG}} \in \text{"незначне відхилення"} \\
 & \quad T A k_{P_1} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ } T A k_{T_2} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ } T A k_{T_1} \in \text{"незначне відхилення"} \\
 & \quad T A k_{T_4} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ } T A k_{P_2} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ } \text{ТО} \\
 & k_{\text{заг.зал.рес}} = 16,66k_W + -16,36k_R + 0,01225k_{C_x} + 0,09188k_{I_{g(\delta)}} + 0,09188k_{T_3} + 0,09188k_{X_{APG}} + 0,09188k_{P_1} + \\
 & \quad + 0,09188k_{T_2} + 0,09188k_{T_1} + 0,09188k_{T_4} + 0,09188k_{P_2} + 0,09188 \\
 & \text{ЯКЩО } k_W \in \text{"передаварійне"} \text{ } T A k_R \in \text{"передаварійне"} \text{ } T A k_{C_x} \in \text{"передаварійне"} \text{ } T A \\
 & \quad k_{I_{g(\delta)}} \in \text{"передаварійне"} \text{ } T A k_{T_3} \in \text{"передаварійне"} \text{ } T A k_{X_{APG}} \in \text{"передаварійне"} \\
 & \quad T A k_{P_1} \in \text{"передаварійне"} \text{ } T A k_{T_2} \in \text{"передаварійне"} \\
 & \quad T A k_{T_1} \in \text{"передаварійне"} \text{ } T A k_{T_4} \in \text{"передаварійне"} \text{ } T A k_{P_2} \in \text{"передаварійне"} \text{ } \text{ТО} \\
 & k_{\text{заг.зал.рес}} = -31,97k_W + 33,52k_R + 0,09652k_{C_x} + 0,06312k_{I_{g(\delta)}} + 0,06312k_{T_3} + 0,06312k_{X_{APG}} + 0,06312k_{P_1} + \\
 & \quad + 0,06312k_{T_2} + 0,6312k_{T_1} + 0,6312k_{T_4} + 0,06312k_{P_2} + 1,74 \cdot 10^{-8} \\
 & \text{ЯКЩО } k_W \in \text{"аварійне"} \text{ } T A k_R \in \text{"аварійне"} \text{ } T A k_{C_x} \in \text{"аварійне"} \text{ } T A k_{I_{g(\delta)}} \in \text{"аварійне"} \\
 & \quad T A k_{T_3} \in \text{"аварійне"} \text{ } T A k_{X_{APG}} \in \text{"аварійне"} \text{ } T A k_{P_1} \in \text{"аварійне"} \text{ } T A k_{T_2} \in \text{"аварійне"} \\
 & \quad T A k_{T_1} \in \text{"аварійне"} \text{ } T A k_{T_4} \in \text{"аварійне"} \text{ } T A k_{P_2} \in \text{"аварійне"} \text{ } \text{ТО} \\
 & k_{\text{заг.зал.рес}} = 136,5k_W - 0,6256k_R - 1,699k_{C_x} + 0,1138k_{I_{g(\delta)}} + 0,1138k_{T_3} + 0,1138k_{X_{APG}} + 0,1138k_{P_1} + \\
 & \quad + 0,1138k_{T_2} + 0,1138k_{T_1} + 0,1138k_{T_4} + 0,1138k_{P_2} + 0,1138 \\
 & \quad \dots
 \end{aligned}$$

На рис. В.1 показано 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.

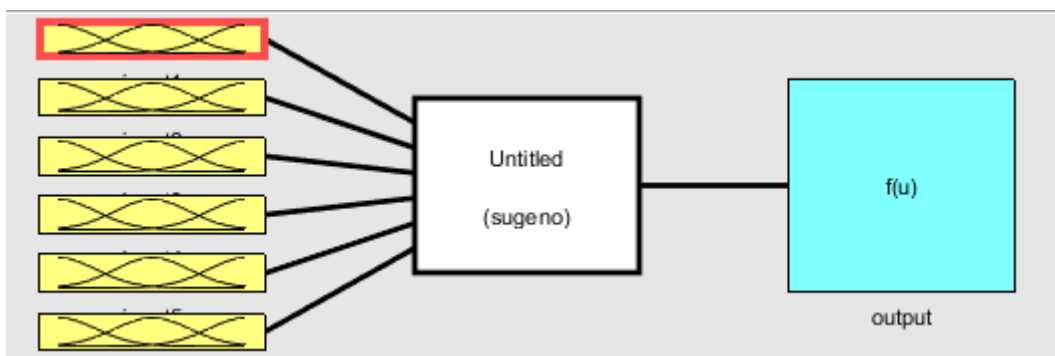


Рисунок В.1 – Фрагмент віконної заставки редактора ANFIS.

На рис. В.2 показано екранну заставку системи комп'ютерної математики MATLAB під час формування структури нейро-нечіткої моделі ВТС.

Рисунок В.3 – Формування структури нейро-нечіткої моделі ВТС

З рис. В.1 видно, що під час формування структури нейро-нечіткої моделі ВТС було задано одинадцять входів та один вихід цієї моделі. Кожен з одинадцяти входів має по чотири терми. Тобто кожна множина можливих значень вхідних параметрів моделі умовно поділена на чотири підмножини: «нормальні» значення вхідного параметра, «незначні відхилення» значення вхідного параметра, «передаварійні» значення вхідного параметра, «аварійні» значення вхідного параметра. Ступінь належності кожного значення вхідного параметра до відповідної цьому параметру множини значень визначається гаусовою функцією належності. Модель призначена для знаходження числового значення коефіцієнта

загального залишкового ресурсу ВТС, тому має один вихід. Це числове значення знаходиться шляхом рішення лінійного рівняння, яке описує залежність коефіцієнта загального залишкового ресурсу ВТС від вхідних параметрів.

З таблиці В.2 вводимо параметри функцій належності (рис. В.2).

На рис. В.2 показано, що ступінь належності значення коефіцієнта k_w залишкового ресурсу за параметром «вміст вологи W в трансформаторному маслі ВТС» до підмножини «аварійні» значення визначається рівнянням гаусової функції $\mu(k_w) = f(k_w, \sigma, c)$ з параметрами $\sigma = 0,0907$ в.о. та $c = -0,04993$ в.о., $k_w \in 0,1$ в.о. та $\mu(k_w) \in 0,1$ в.о.

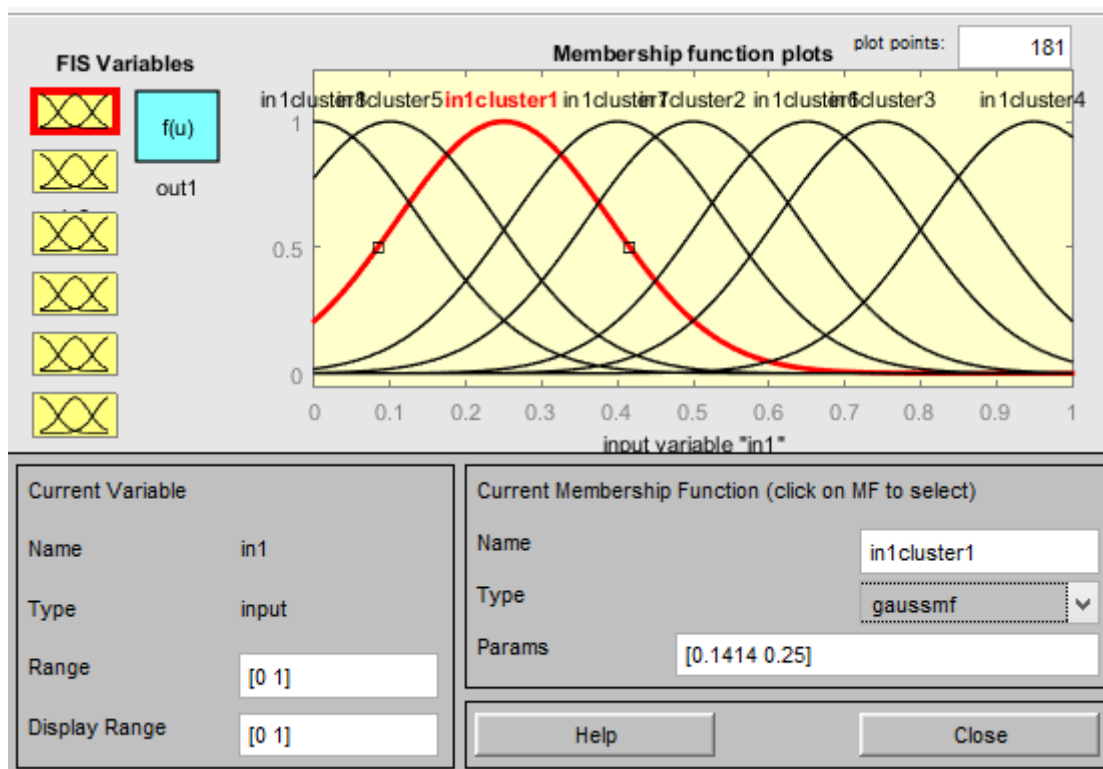


Рисунок В.4 – Введення параметрів функції належності

З таблиці В.4; вводимо параметри рівнянь висновків правил (рис. В.5), які дозволяють обчислити коефіцієнт загального залишкового ресурсу ВТС.

На рис. В.5 показано: діапазон можливих значень коефіцієнта загального залишкового ресурсу ВТС $k_{заг.рес} = 0 \div 1$ 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, 0.09896.

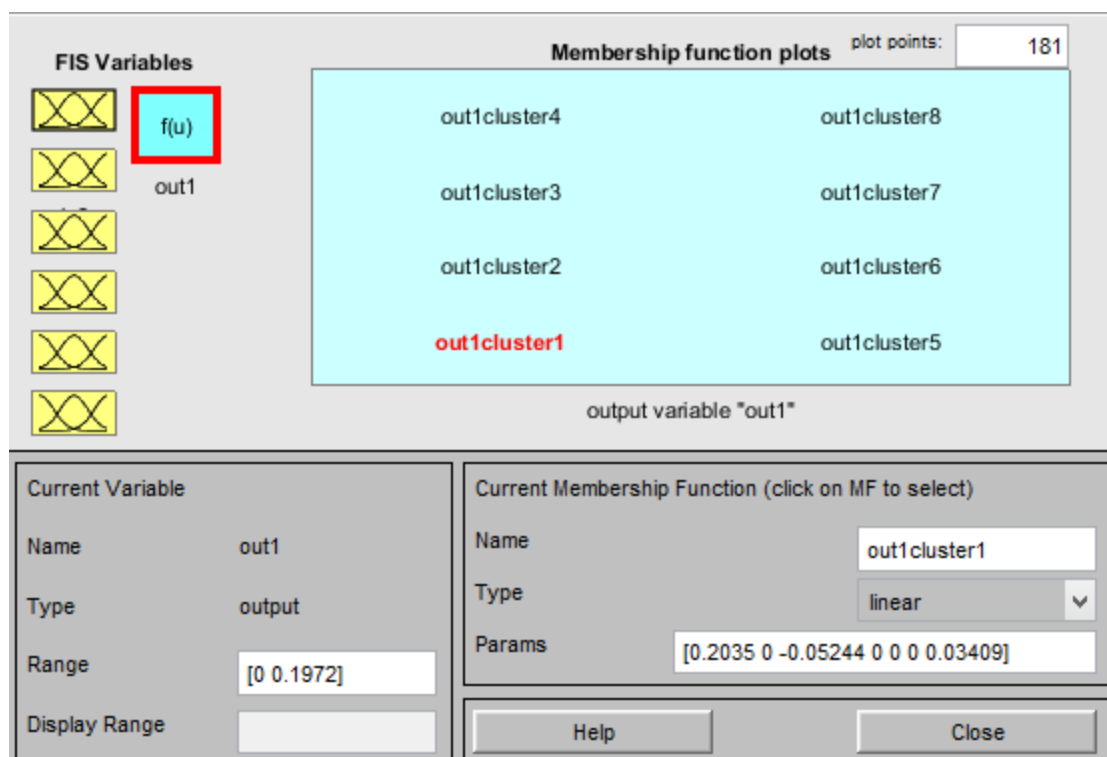


Рисунок В.5 – Введення параметрів рівняння висновку правила
Відповідно до табл. В.4 з файлу з розширенням .dat вводимо вибірку
навчальних даних (рис. В.6).

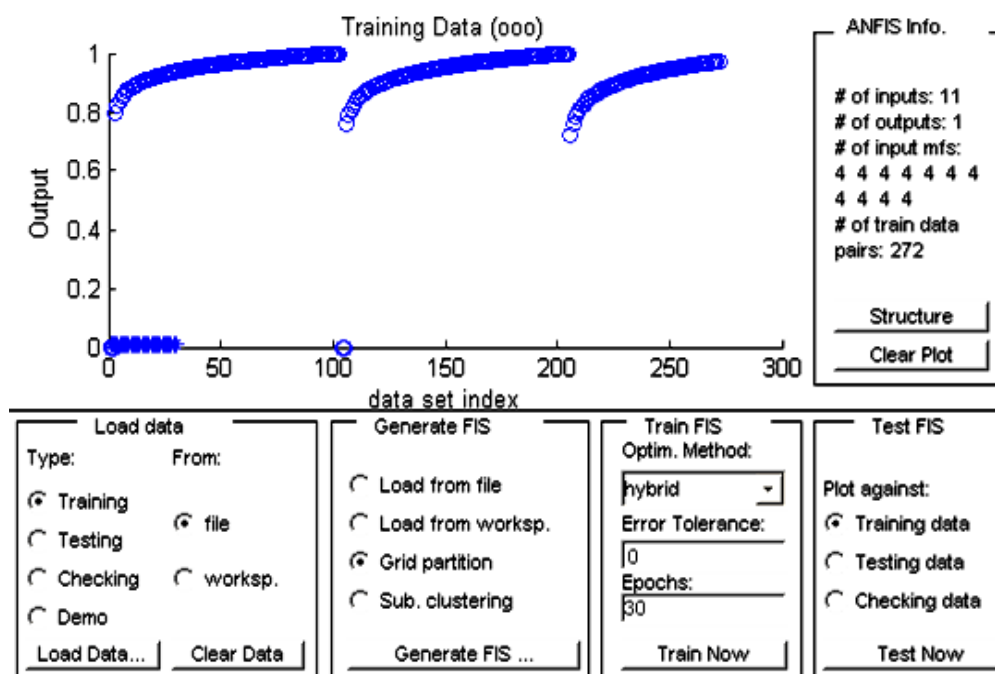


Рисунок В.7 – Введення вибірки навчальних даних з файлу
Далі навчаємо модель. Навчання передбачає 30 епох. Результати
навчання показані на рис. В.8.

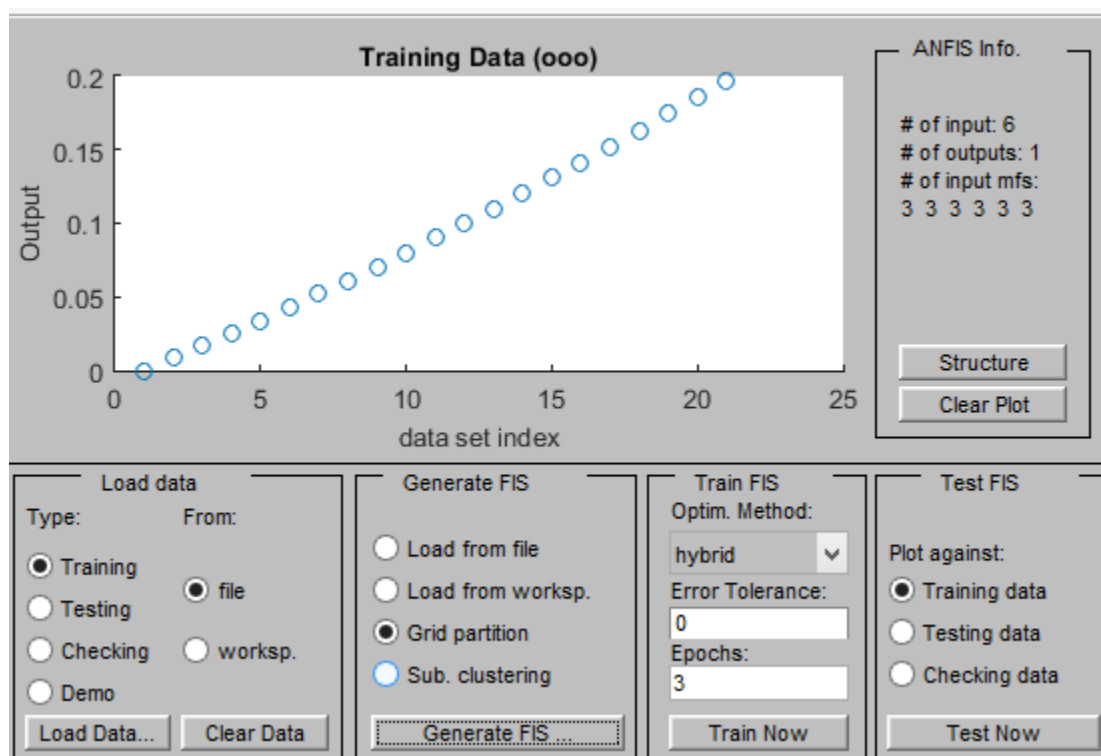


Рисунок В.8 – Навчання моделі ВТС

Ознакою припинення навчання є незмінність середньоквадратичної похибки навчання. На рис. В.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 ВТС залежно від значень вхідних параметрів – коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному з контрольованих діагностичних параметрів. Так, якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 0,5 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу дорівнює 0,64 в.о. (рис. В.8), якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 1 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу (з похибкою 1%) дорівнює 1,01 в.о. (рис. В.8), якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 0 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу (з похибкою $3,16 \cdot 10^{-8} \%$) дорівнює 0 в.о. (рис. В.9).

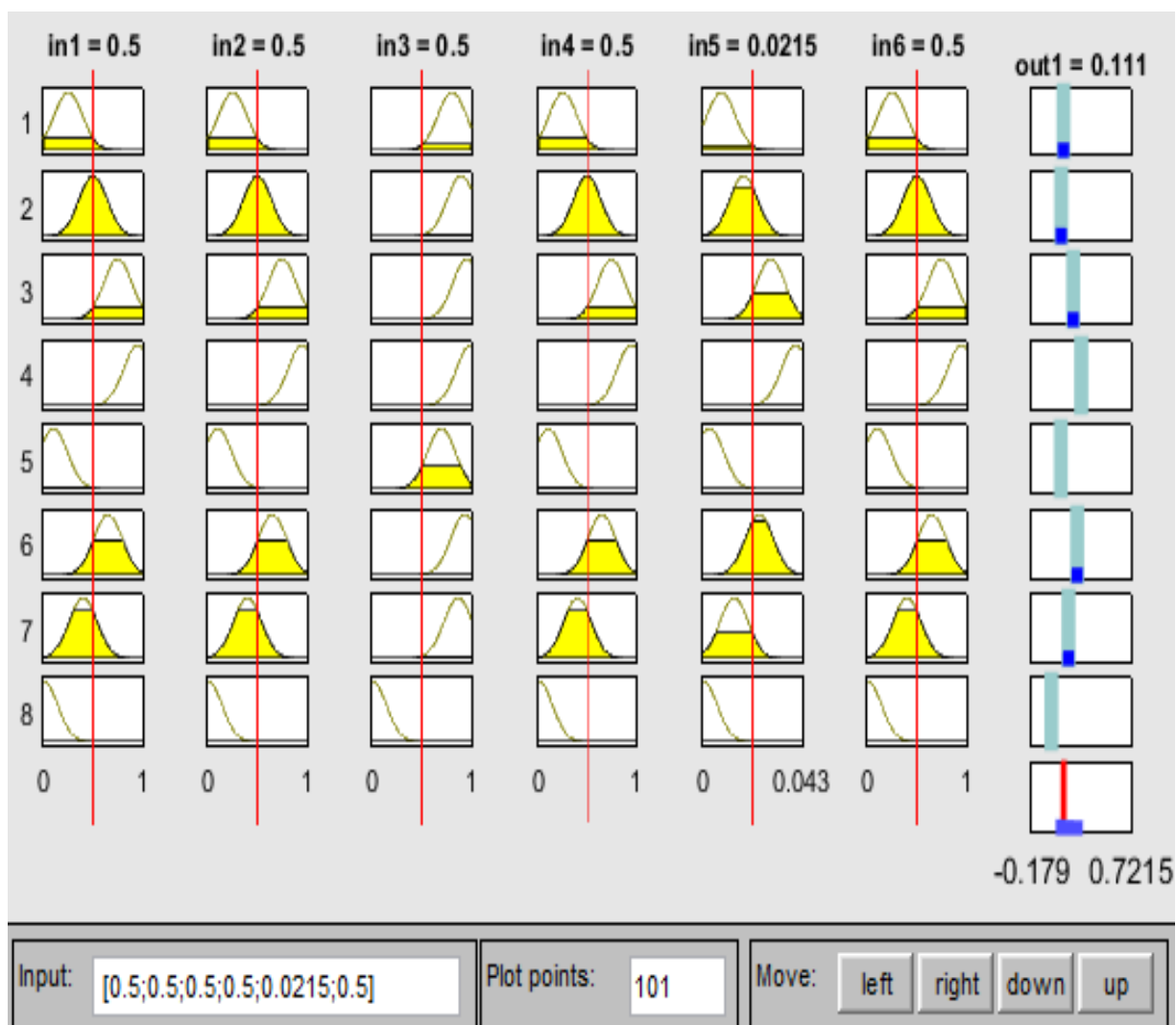


Рисунок В.9 – Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ВТС при значеннях всіх вхідних параметрів 0.5 та 0.0215 в.о

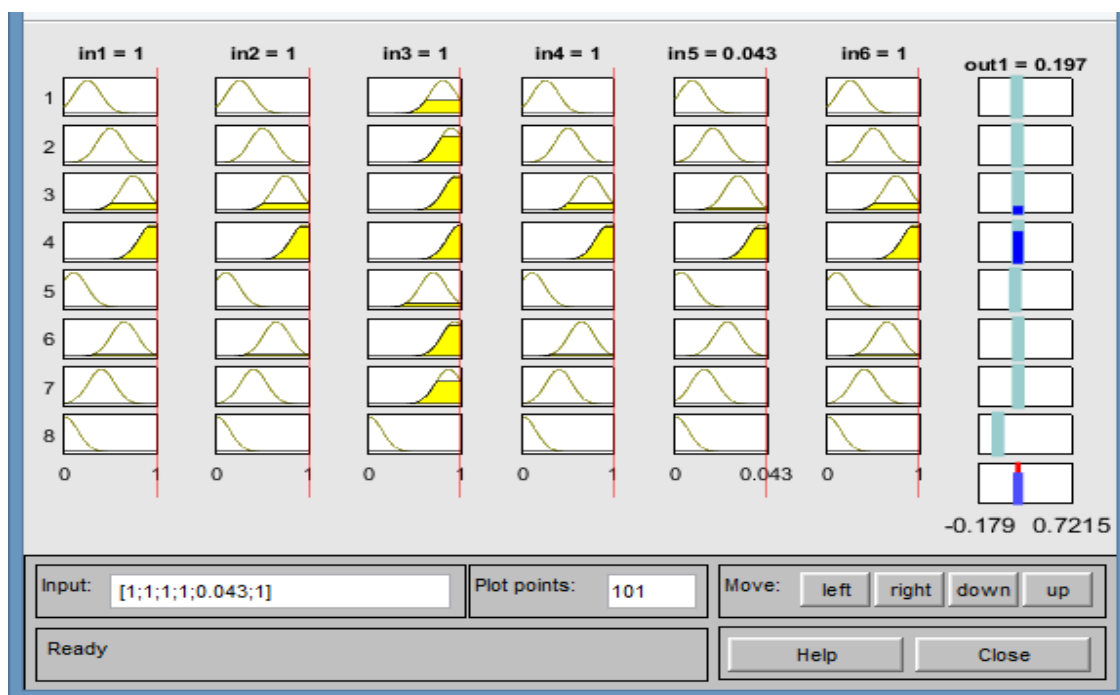


Рисунок В.10 – Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ВТС при значеннях всіх вхідних параметрів 1 в.о окрім 5-го діагностичного параметра який дорівнює 0.043 в.о

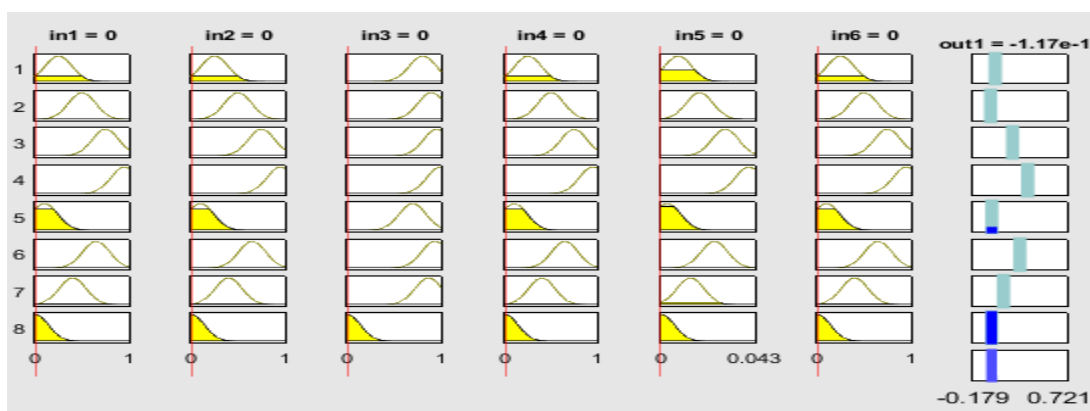


Рисунок В.11 – Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ВТС при значеннях всіх вхідних параметрів 0 в.о

Складність залежностей вихідного параметра розробленої моделі від сукупності вхідних параметрів підтверджують графіки поверхонь цих залежностей, які показані на рис. В.12 - В.15.

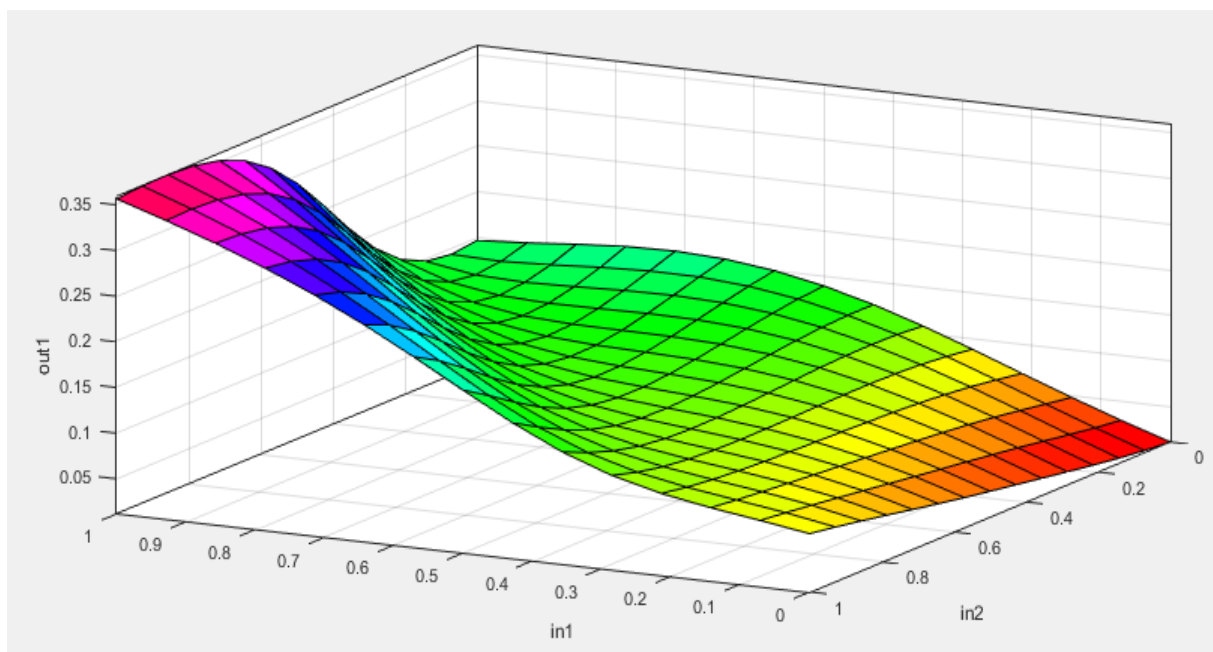


Рисунок В.12 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ВТС від K_W та k_R .

2

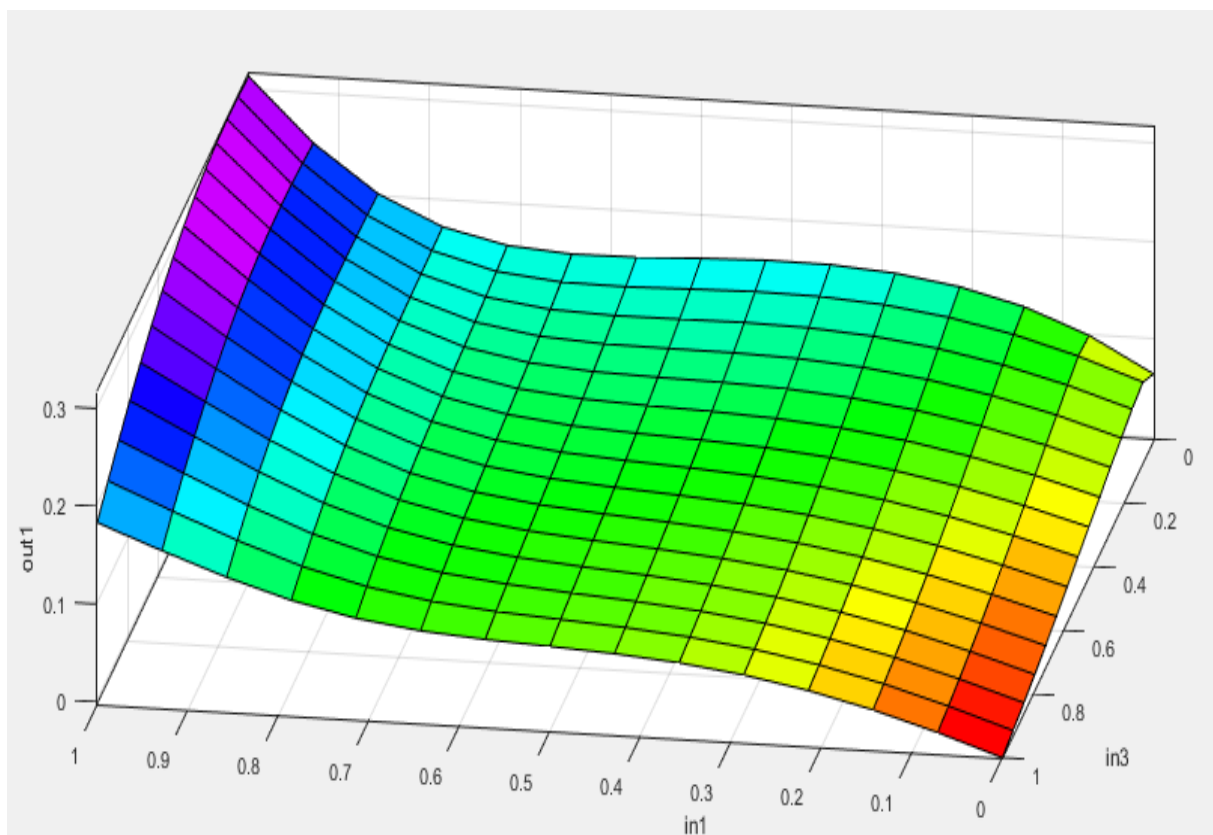


Рисунок В.13 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ВТС від K_W та $k_{ХАРГ}$.

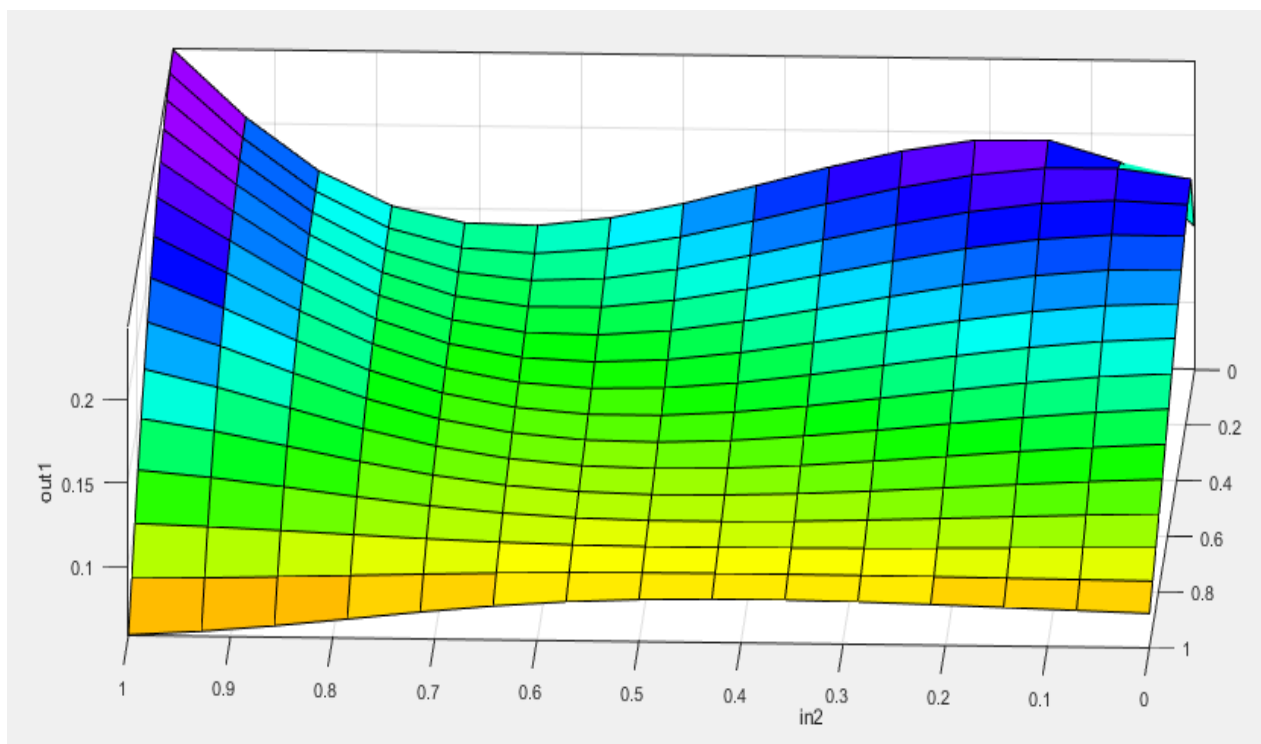


Рисунок В.13 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ВТС від K_R та $k_{ХАПГ}$.

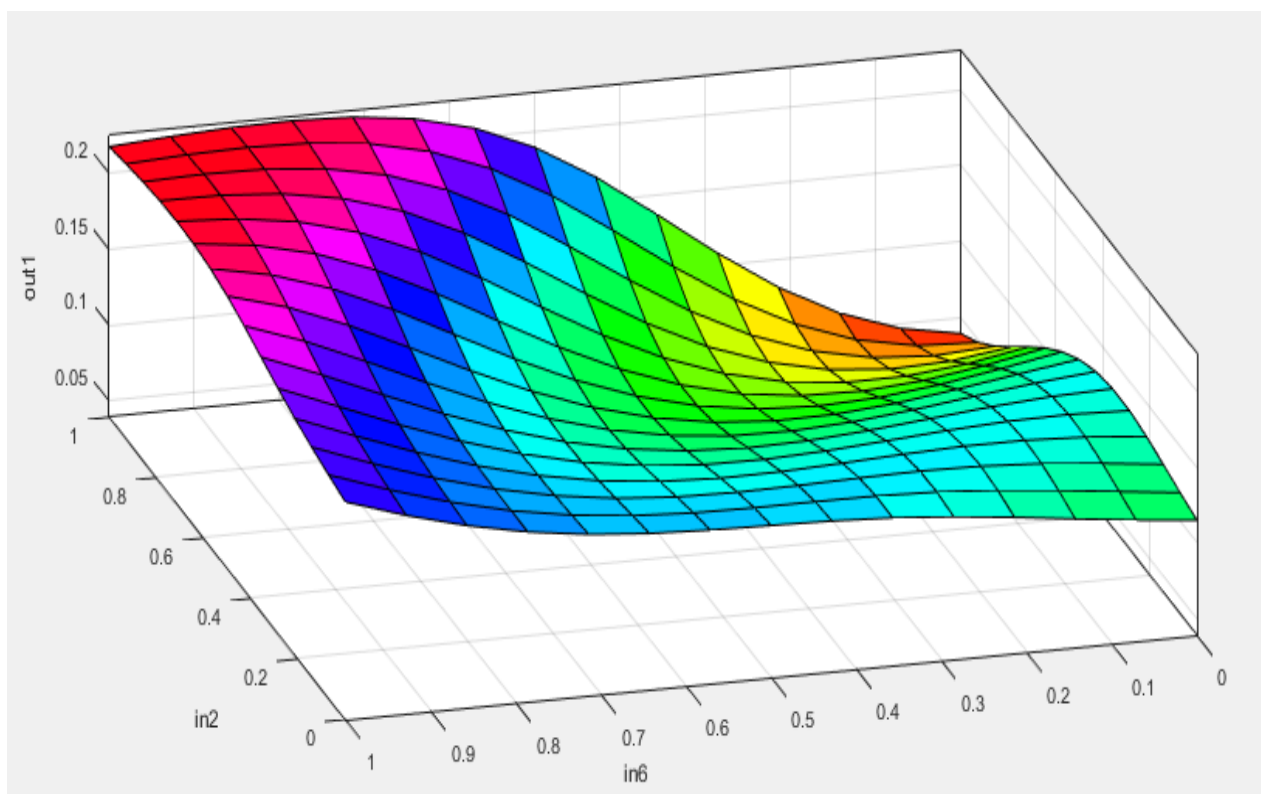


Рисунок В.14 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ВТС від K_R та k_{T2} .

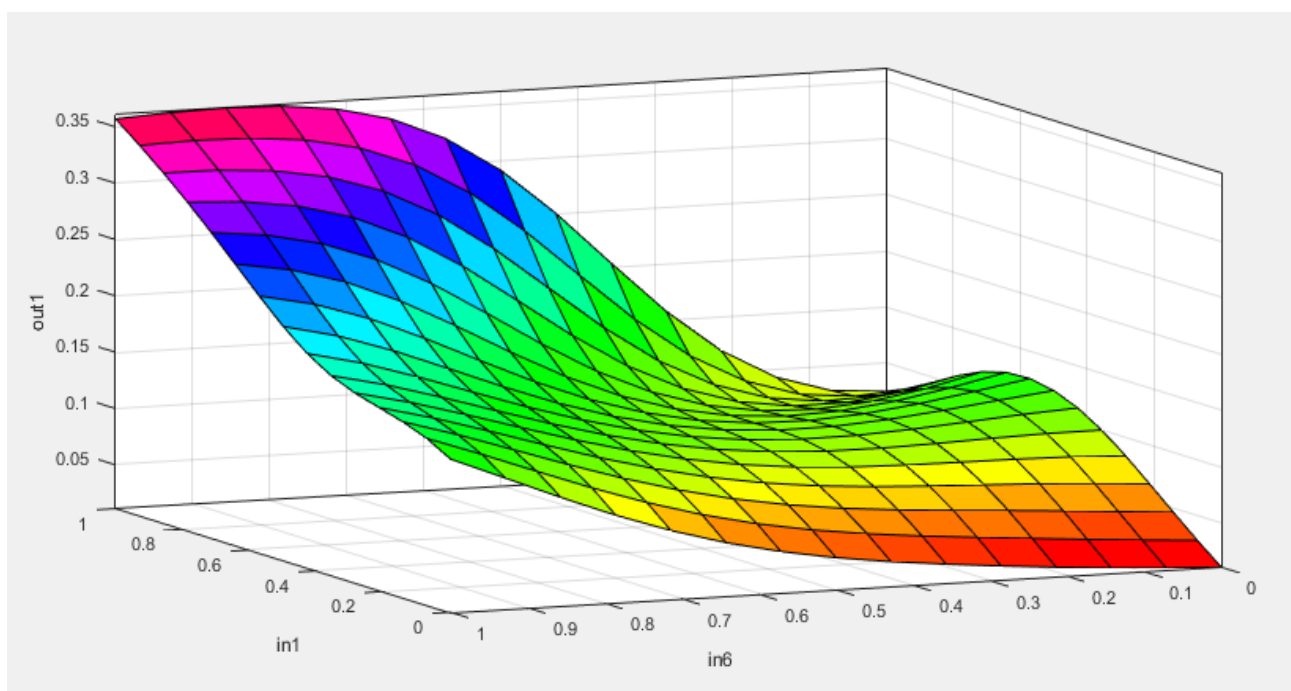


Рисунок В.15 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ВТС від K_W та k_{T2} .

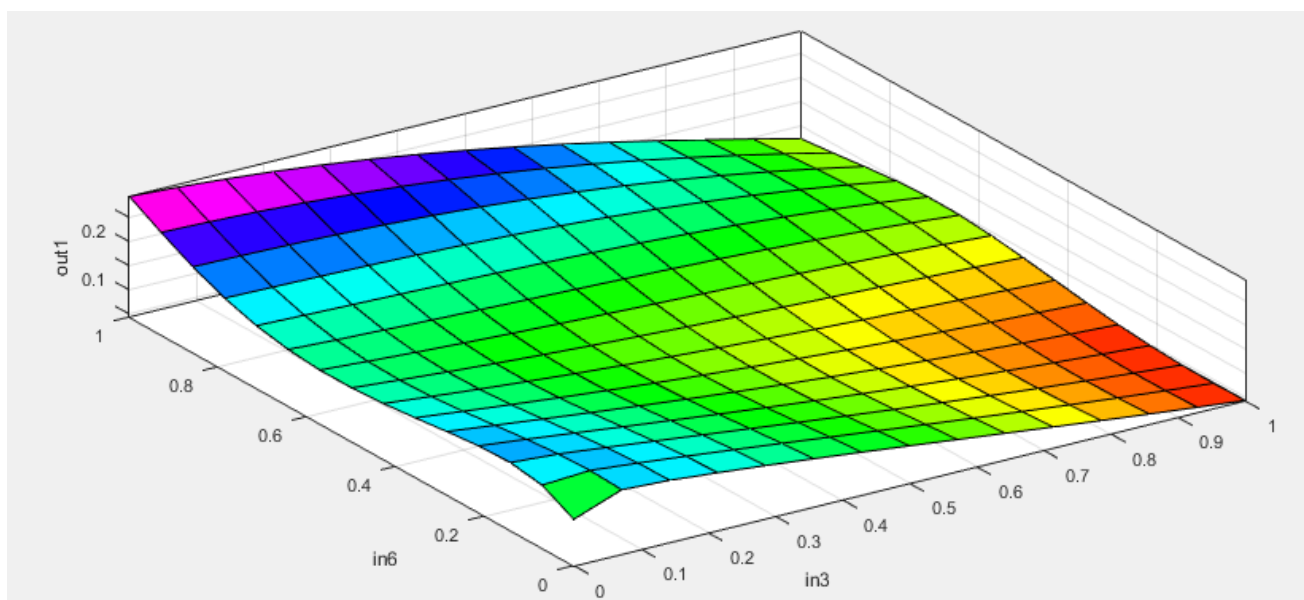


Рисунок В.16 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ВТС від $k_{tg(\delta)}$ та k_{PI} .

Незважаючи на складність залежностей, які показані на рис. Д14 - 4.19 математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу ВТС(4.34) може бути використана для програмування нечіткого контролера з метою створення пристрою оперативного визначення стану ВТС шляхом аналізу величини коефіцієнта залишкового ресурсу ВТС.

ДОДАТОК Г

Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи підстанції 330 кВ в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

НС характеризуються якісними і кількісними критеріями. До якісних критеріїв відносяться раптовість і швидкість розвитку подій. До кількісних критеріїв потрібно відносити, наприклад, потужність факторів ураження, що може привести до людських жертв, руйнувань будинків, споруд, виведенню великих територій із використання, екологічних наслідків.

На підстанціях використовуються елементи, до складу яких входять матеріали: метали, неорганічні матеріали, напівпровідники та різніорганічні сполуки (діелектрики, смоли та ін.). Серед цих матеріалів метали найбільш чутливі до радіації, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв.

В радіоелектронній апаратурі радіація викликає зворотні і незворотні процеси, внаслідок яких можуть бути порушення роботи елементів схеми, що приведе до пошкодження апаратури.

На підстанціях приймачами електромагнітного випромінювання є предмети, які проводять електричний струм: лінії електропередач, управління, трансформаторне обладнання, кабельні лінії, системи релейного захисту.

Апаратура, яка не оснащена спеціальним захистом, може бути пошкоджена внаслідок електромагнітного випромінювання.

Іонізуюче випромінювання взаємодіючи із середовищем спричиняє виникнення електричних зарядів різних знаків, що дуже небезпечно для електричних мереж.

Створення нормальних умов роботи електричних підстанцій у НС дуже важливе в плані забезпечення безпеки важливих підприємств і

обороздатності країни, зменшення збитків від пошкоджень окремих елементів мереж та недовідпуску електричної енергії.

Г.1 Дослідження безпеки роботи підстанції 330 умовах дії іонізуючих випромінювань

Іонізуюче випромінювання, проходячи через біологічні тканини, викликає їх іонізацію, призводить до утворення позитивних і негативних іонів, до складних функціональних і морфологічних змін. Молекули води, що входять до складу організму розпадаються утворюючи вільні атоми та радикали, які мають велику окислювальну здатність. Вільні радикали пошкоджують тканини і порушують нормальні біохімічні процеси у живій тканині. Залежно від поглинутої дози ці зміни можуть бути зворотними і незворотними.

В таблиці Д.1 для кожного елемента наведені граничні значення потужності дози опромінення, при якій в елементах можуть виникнути зворотні процеси

Розраховуємо граничне значення потужності експозиційної дози:

$$P_{гр} = K_{над} \cdot P_{зв.мін} \cdot K_{носл} [P / год]; \quad (Д.1)$$

$$P_{гр} = 0,95 \cdot 10^4 \cdot 2 = 19000 [P / год];$$

де $K_{над}$ - коефіцієнт надійності (приймається $K_{над} = 0,95$);

$P_{зв.мін}$ - потужність експозиційної дози, яка відповідає початку зворотних змін в елементах;

$K_{носл}$ - коефіцієнт послаблення радіації (приймається $K_{носл} = 2$).

Розраховуємо допустимий час роботи підстанції:

$$t_{дон} = \left(\frac{D_{гр} \cdot K_{носл}}{2P_1} + \sqrt{t_n} \right)^2 [год]; \quad (Д.2)$$

$$t_{don} = \left(\frac{10^6 \cdot 2}{2 \cdot 19000} + \sqrt{1} \right)^2 = 2876,17 [\text{год}];$$

Таблиця Г.1 – Граничні значення експозиційних доз

	Підсистема підстанції	Блок системи	Елементи	P	
				$P_{зв.i}$	$P_{зв.min}$
	Система зберігання даних	Процесорний блок	Мікроконтролер Atmel 8515	10^5	10^4
			Транзистор КТ3102	10^5	
		Блок живлення	Мікросхема КРЕН 8505	10^5	
Дистанційний пульт керування	Блок відображення	Мікросхеми АЛС324	10^4		
		МПК	Транзистор КП301	10^5	
	Резистор МЛТ-0,125		10^7		
Система Зв'язку	Блок пам'яті	Конденсатор PHE840E	10^7		
		Блок прийому і Передачі	Конденсатор КМ	10^7	
	Конденсатор К50-35		10^7		
	Оптична система	Оптична пара АОД 103	10^5		
		Діодний місток КЦ 105	10^6		
		Резистор ОМЛТ	10^6		

Проаналізувавши дані таблиці, визначили, що самим уразливим елементом системи з мінімальною дозою $P_{зв.min} = 10^4$ Р є діоди загального призначення.

Таким чином, розроблювальний пристрій в умовах іонізуючих випромінювань буде працювати в межах зміни потужності експозиційної дози від 0 до 19000 Р/год, а допустимий час її безвідмовної роботи може скласти 2876 годин або 119 днів.

Г.2 Дослідження безпеки роботи підстанції 330 кВ в умовах дії електромагнітного імпульсу

Електромагнітний імпульс (ЕМІ) - вражаючий фактор ядерної зброї, а також будь-яких інших джерел ЕМІ (наприклад блискавки, спеціальної електромагнітної зброї, короткого замикання в обладнанні великої потужності і т.д.).

Значні порушення викликає електромагнітний імпульс у роботі цифрових та контрольних пристроїв. Великі електричні потенціали відносно землі, які виникають на екранах, жилах кабелів, антенно-фідерних пристроях та провідних лініях зв'язку, виникають внаслідок дії ЕМІ і можуть являти небезпеку для обслуговуючого персоналу.

При оцінюванні впливу ЕМІ на струмоведучі частини необхідно враховувати вертикальну та горизонтальну складову напруженості електричного поля і тому повинні визначатися значення напруги на вертикальних та горизонтальних ділянках.

Використовуємо для розрахунку такі дані $U_{ж}=220$ В, $l_{г}=0,3$ м.

Визначаємо коефіцієнти безпеки:

$$K_{\mathcal{E}} = 20 \cdot \lg \frac{U_{\partial}}{U_{\mathcal{E}(z)}} \geq 40 [\text{дБ}], \quad (\text{Д.3})$$

де U_{∂} - допустимі коливання напруги живлення, В;

$U_{\mathcal{E}(z)}$ - напруга наведена за рахунок електромагнітного імпульсу в вертикальних(горизонтальних струмопровідних частинах, В.

Розраховуємо спочатку допустиме коливання напруги живлення:

$$U_{\partial} = U_{жс} + \frac{U_{жс}}{100} \cdot N[B], \quad (Д.4)$$

де $U_{жс}$ - робоча напруга живлення, В;

N - допустимі коливання напруги, %.

Визначаємо максимальну очікувану напругу в горизонтальних лініях:

$$U_{\partial} = \frac{U_{\partial}}{10^{K/20}} [B] \quad (Д.5)$$

де K - коефіцієнт безпеки ($K=40$ дБ).

Розраховуємо вертикальну складову напруженості електромагнітного поля за формулою:

$$E_{\partial} = \frac{U_{\partial}}{I_{\partial}} [B/m] \quad (Д.6)$$

Визначаємо горизонтальну складову н напруженості електромагнітного поля за формулою:

$$E_{\partial} = 10^{-3} \cdot E_{\partial} [B/m] \quad (Д.7)$$

Підставивши відомі значення у формули (Д.4, ..., Д.7) отримаємо:

$$U_{\partial} = 220 + \frac{220}{100} \cdot 5 = 231[B];$$

$$U_{\partial} = \frac{231}{10^{40/20}} = 2,31[B];$$

$$E_{\partial} = \frac{2,31}{0,3} = 7,7[B/m]$$

$$E_{\partial} = 10^{-3} \cdot 7,7 = 0,077[B/m]$$

Таким чином обладнання підстанції в умовах дії електромагнітного імпульсу має бути працездатним при значеннях E_g до 7,7 В/м.

Г.3 Розробка превентивних заходів по забезпеченню безпеки роботи підстанції 330 кВ у надзвичайній ситуації

Для підвищення безпеки роботи підстанції у мережах електропостачання виконуються заходи із переведення повітряних ліній електропередач на підземні, а ліній, прокладених на стінах і перекриттям будинків та споруд, — на лінії, прокладені під підлогою перших поверхів (у спеціальних каналах). При монтажі нових й реконструкції електричних мереж встановлюють автоматичні вимикачі, які за коротких замикань і за виникнення перенапруг відключають пошкоджені ділянки. Перенапруги в лініях електропередач можуть бути внаслідок руйнацій чи ушкоджень окремих елементів системи енергопостачання об'єкта, і навіть при впливі електромагнітних полів. Для підвищення стійкості роботи об'єкта до виливу ЕМІ також необхідно провести наступні заходи:

1) кабель живлення двигунів екранувати, помістивши в сталеві труби, а на входах двигунів встановити швидкодіючі відключаючі пристрої (розрядники);

2) розвідну мережу блоку управління прокласти в сталевих трубах, а пульт управління і блоки управління закрити заземленими екранами, екрани заземлити;

3) на входах і виходах пульта управління і блоків управління встановити швидкодіючі відключаючі пристрої і розрядники, плавкі запобіжники.

Також в даному розділі проведено дослідження роботи підстанції в умовах дії загрозливих чинників у надзвичайній ситуації, в умовах дії іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу. З розрахунків ми бачимо що підстанція при дії іонізуючих випромінювань буде працювати в межах зміни потужності експозиційної дози від 0 до 19000

Р/год, а допустимий час її безвідмовної роботи може скласти 2876 годин або 119 днів, обладнання підстанції в умовах дії електромагнітного імпульсу має бути працездатним при значеннях E_g до 7,7 В/м.