

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна робота

другий магістерський

(рівень вищої освіти)

на тему «Аналіз моделей визначення ефективності
обладнання головної схеми ГЕС»

Виконав: студент 2 курсу, групи ГЕ-18-1мз
спеціальності 145 – Гідроенергетика

(код і назва спеціальності)

освітньої програми 145 – Гідроенергетика

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації 145 – Гідроенергетика

(код і назва спеціалізації)

Шляга Сергій Володимирович

(ініціали та прізвище)

Керівник доцент, к.т.н. В.В. Радченко

(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент нач. маш. цеху ДГЕС А.О. Даниленко

(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

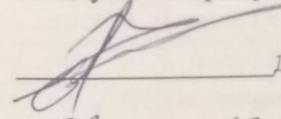
Запоріжжя
2020

**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ ІНСТИТУТ**

Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій
 Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики
 Рівень вищої освіти другий магістерський
 Спеціальність 145 – Гідроенергетика
(код та назва)
 Освітня програма 145 – Гідроенергетика
 Спеціалізація 145 – Гідроенергетика
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



д.т.н Чейлітко А. О.

« 26 » 12 2019 року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)**

Шлязі Сергію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Аналіз моделей визначення ефективності роботи обладнання головної схеми ГЕС

керівник роботи Радченко В. В. к.т.н., доцент

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

затверджені наказом ЗНУ від « 10 » 09 2019 року № 1537-с

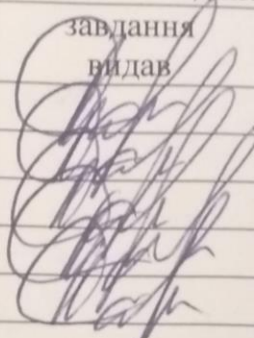
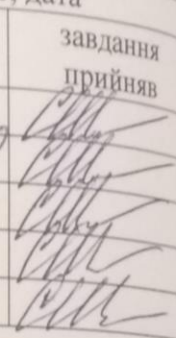
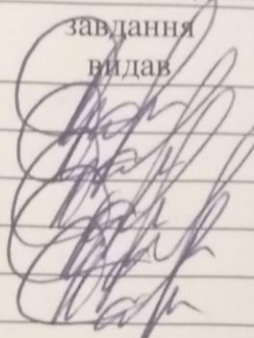
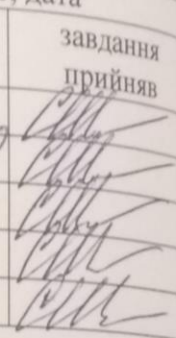
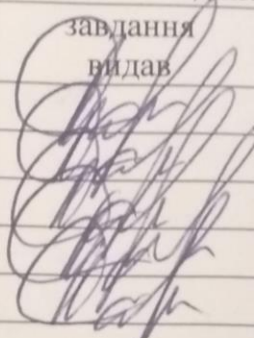
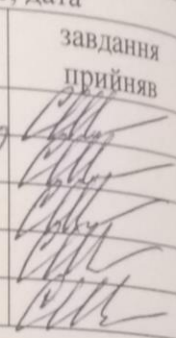
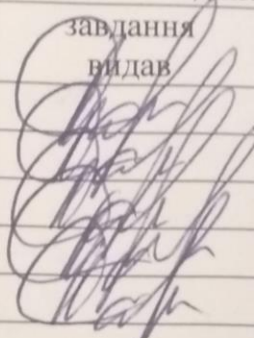
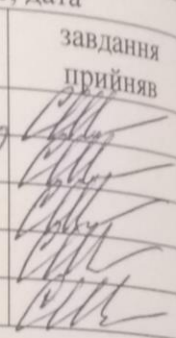
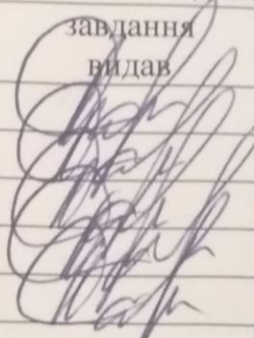
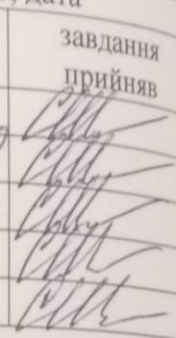
2 Строк подання студентом роботи 26 грудня 2019 року

3 Вихідні дані до роботи основні параметри діагностики обладнання головної схеми ГЕС (дані хроматографічного аналізу, результати випробувань, паспортні дані обладнання)

Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Методи і моделі оцінювання технічного стану обладнання Дніпровської ГЕС. 2. Опис задачі оцінювання технічного стану електрообладнання ГЕС. 3. Розроблення нейро-нечіткої моделі оцінювання технічного стану електрообладнання. 4. Експериментально-модельне дослідження стану обладнання головної схеми Дніпровської ГЕС. 5. Охорона праці та техногенна безпека

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
 1. Аналіз методів та моделей визначення ефективності роботи обладнання головної
 схеми ГЕС 2. Головна схема Дніпровської ГЕС 3. Оцінка стану обладнання за методом
 Байеса 4. Аналіз методів і моделей стану електрообладнання ГЕС 5. Структура системи
 прийняття рішень про стан обладнання 6. Систематизація основних систем
 трансформаторів 7. Нейро-нечітке моделювання технічного стану обладнання дефект
 8. Функції приналежності нейро-нечіткої моделі 9. Структура формування висновку
 виявлення дефекту в трансформаторі для хроматографічного аналізу 10. Результати
 дослідження трансформатору 11. Висновки.

4 Консультанти розділів роботи

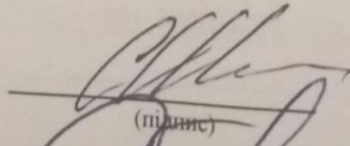
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Радченко В. В. к.т.н., доцент		
Розділ 2	Радченко В. В. к.т.н., доцент		
Розділ 3	Радченко В. В. к.т.н., доцент		
Розділ 4	Радченко В. В. к.т.н., доцент		
Розділ 5	Радченко В. В. к.т.н., доцент		

5 Дата видачі завдання 10.09.19р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Сучасні методи і моделі оцінювання технічного стану обладнання Дніпровської ГЕС.	23.09.19	Виконано
2	Опис задачі оцінювання технічного стану електрообладнання ГЕС	16.10.19	Виконано
3	Розроблення нейро-нечіткої моделі оцінювання технічного стану електрообладнання.	22.11.19	Виконано
4	Експериментально-модельне дослідження стану обладнання головної схеми Дніпровської ГЕС.	9.12.19	Виконано
5	Охорона праці та техногенна безпека	20.12.19	Виконано

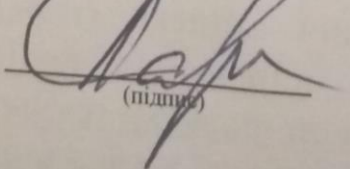
Студент


(підпис)

Шляга С. В.

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)


(підпис)

Радченко В. В.

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

АНОТАЦІЯ

Шляга С.В. Аналіз моделей визначення ефективності обладнання головної схеми ГЕС.

Кваліфікаційна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 145 – Гідроенергетика, науковий керівник В.В. Радченко. Запорізький національний університет. Інженерний інститут. Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій, кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2020.

Розроблено нейро-нечіткий підхід до комплексної оцінки технічного стану електричного обладнання головної схеми ГЕС в умовах неповноти вхідної інформації та при відсутності математичних зв'язків між технічними станами окремих вузлів обладнання. На підставі розробленого підходу синтезовано нейро-нечітку модель для оцінювання технічного стану головних трансформаторів. Запропоновано підхід до формування навчальної вибірки нейронної мережі.

Розроблена модель дозволяє раціонально планувати капітальні та поточні ремонти електричного обладнання ГЕС та прогнозувати ймовірні відмови впродовж експлуатації обладнання.

Ключові слова: НЕЙРО-НЕЧІТКА МЕРЕЖА, НАВЧАЛЬНА ВИБІРКА, ФУНКЦІЯ ПРИНАЛЕЖНОСТІ, БЛОЧНИЙ ТРАНСФОРМАТОР, ТЕХНІЧНИЙ СТАН, ЕЛЕКТРИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ, ГОЛОВНА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА СТАНЦІЇ.

ABSTRACT

Shliaha S.V. Analysis of models for determining the operational efficiency of equipment of the main hydroelectric power station.

Qualifying work for obtaining a master's degree in higher education by specialty 145 - Hydropower, scientific V.V. Radchenko. Zaporizhzhia National University. Engineering Institute. Faculty of Energy, Electronics and Information Technology, Department of Thermal Power and Hydropower, 2020.

A neuro-fuzzy approach has been developed for a comprehensive assessment of the technical condition of the electrical equipment of the main power plant circuit in the conditions of incomplete input information and in the absence of mathematical connections between the technical condition of individual equipment nodes. Based on the developed approach of a synthesized neuro-fuzzy model for assessing the technical condition of main transformers. An approach is proposed for the formation of a training sample of a neural network.

Key words: NEURAL FUZZY SYSTEMS, TRAINING SAMPLE, MEMBERSHIP FUNCTION, BLOCK TRANSFORMER, TECHNICAL CONDITION, ELECTRICAL EQUIPMENT, MAIN ELECTRIC DIAGRAM OF THE STATION.

АННОТАЦИЯ

Шляга С.В. Анализ моделей определения эффективности работы оборудования главной схемы ГЭС.

Квалификационная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 145 - Гидроэнергетика, научный руководитель В. В. Радченко. Запорожский национальный университет. Инженерный институт. Факультет энергетики, электроники и информационных технологий, кафедра теплоэнергетики и гидроэнергетики, 2020.

Разработан нейро-нечеткий подход комплексной оценки технического состояния электрического оборудования главной схемы ГЭС в условиях неполной входной информации и при отсутствии математических связей между техническим состоянием отдельных узлов оборудования. На основании

разработанного подхода синтезированной нейро-нечеткой модели для оценки технического состояния главных трансформаторов. Предложено подход для формирования обучающей выборки нейронной сети.

Разработанная модель позволяет рационально планировать капитальный и поточный ремонты электрического оборудования ГЭС и прогнозирование вероятности отказа во время эксплуатации оборудования.

Ключевые слова: НЕЙРО-НЕЧЕТКАЯ СЕТЬ, ОБУЧАЮЩАЯ ВЫБОРКА, ФУНКЦИЯ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ, БЛОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР, ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ГЛАВНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СТАНЦИИ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	9
ВСТУП	10
1 МЕТОДИ І МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ДНІПРОВСЬКОЇ ГЕС	14
1.1 Класифікація існуючих методів та моделей оцінювання технічного стану електрообладнання	14
1.2 Порівняльний аналіз сучасних методів оцінювання технічного стану електрообладнання та визначення сфер застосування	19
1.3 Дослідження ефективності застосування моделей оцінювання технічного стану електрообладнання	23
2 ФОРМАЛІЗОВАНИЙ ОПИС ЗАДАЧІ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ГЕС	34
2.1 Особливості функціонування та технічного стану основного обладнання ГЕС	34
2.2 Нечітке та нейро-нечітке моделювання технічного стану електрообладнання ГЕС	47
3 РОЗРОБЛЕННЯ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	55
3.1 Визначення структури нейро-нечіткої моделі оцінювання технічного стану електрообладнання ГЕС	55
3.2 Синтез нейро-нечіткої моделі оцінювання технічного стану електрообладнання ГЕС	58
3.3 Налагодження нейро-нечіткої моделі оцінювання технічного стану електрообладнання ГЕС	71
3.3.1 Формування навчальної вибірки	71
3.3.2 Алгоритм навчання розробленої нейро-нечіткої моделі	93
3.3.3 Визначення результуючої оцінки технічного стану обладнання електричної схеми ГЕС	98

4 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ГОЛОВНОЇ СХЕМИ ДНІПРОВСЬКОЇ ГЕС	103
4.1 Оцінювання технічного стану блочного трансформатора за допомогою нейро-нечіткої моделі	106
4.2 Оцінювання стану елементів блочного трансформатора	107
4.2.1 Підсистема оцінювання стану трансформаторного масла	107
4.2.2 Підсистема оцінювання стану магнітопроводу трансформатора	113
4.2.3 Підсистема оцінювання стану обмоток трансформатора	115
4.2.4 Підсистема оцінювання стану високовольтних вводів	120
4.3 Результуюча оцінка стану блочного трансформатора ГЕС	122
4.4 Аналіз отриманих результатів	126
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА	128
5.1 Основні небезпечні фактори на підприємстві	128
5.2 Основні положення пожежної безпеки	129
5.3 Електробезпека при роботі в електроустановках	130
5.4 Випробування з подаванням підвищеної напруги	134
ВИСНОВКИ	136
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	138
ДОДАТОК А	144
ДОДАТОК Б	145
ДОДАТОК В	146

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АСКОЕ - автоматизована система комерційного обліку електроенергії;
- ВН - вища напруга;
- ШНМ - штучна нейронна мережа;
- КТ - корпус трансформатора;
- НН - нижча напруга;
- ВАТ - відкрите акціонерне товариство;
- ТОВ - товариство з обмеженою відповідальністю;
- ПНН - потенціометричний пристрій для вимірювання напруги;
- ОТС - оцінка технічного стану
- ПЗР - планово-запобіжний ремонт;
- ЕП - електрична підстанція;
- ЕС - електрична станція;
- РЗіА - релейний захист і автоматика;
- РПН - регулювання під навантаженням;
- ХАРГ - хроматографічний аналіз розчинених у маслі газів;
- ФП - функції приналежності;
- ANFIS - штучна нейронна мережа, заснована на нечіткій системі;
- OLAP - інтерактивна аналітична обробка (on-line analytic processing).

ВСТУП

Актуальність теми. Розробка методики оцінки технічного стану обладнання на електричних станціях і підстанціях є актуальним завданням.

По-перше, вона пов'язана з високим ступенем зносу устаткування обладнання Дніпровської ГЕС і всього електричного обладнання в Україні. Істотна частина основного обладнання виробила встановлений ресурс або термін експлуатації, визначений нормативними документами, і використовується на межі своїх можливостей.

По-друге, існує безумовний взаємний вплив обладнання головної схеми не тільки всередині станції, а й всередині енергосистеми в цілому, що надає дію на стан і режими роботи устаткування. Ступінь цих взаємовпливів і їх закономірності можна визначити тільки при узагальненій оцінці стану всього обладнання Дніпровської ГЕС.

По-третє, актуальність магістерської роботи визначається необхідністю переходу до системи обслуговування обладнання за його технічним станом, а не на базі системи планово-запобіжних ремонтів (ПЗР). Основний недолік системи ПЗР полягає у відсутності комплексного підходу до обслуговування електроустаткування, що може привести до необґрунтованої трудомісткості ремонтів обладнання (в разі працездатного і ремонтпридатного стану) або, навпаки, до пропуску дефекту або несправності (в разі працездатного, але придатні до ремонту стану).

В електроенергетиці активно розвивається інформаційно-вимірювальна база на основі сучасних вимірювальних комплексів, що забезпечують збір, обробку та зберігання інформації з різних датчиків і систем моніторингу окремих видів обладнання, дані з яких отримують в режимі on-line. Такі комплекси забезпечують однозначне визначення контрольованих параметрів і оцінку впливу їх зміни як на саме обладнання, а при аналізі отриманих даних та на роботу об'єкта енергетики в цілому. Така інформація цінна і більш достовірна в порівнянні з даними, отриманими в ході діагностування при виведеному з роботи обладнанні. Вона дозволяє підвищити ступінь достовірності оцінки

технічного стану обладнання. Тим часом, збільшення обсягу інформації, що аналізується про стан обладнання веде до значних змін в методах роботи і вимагає не тільки автоматизації процесів обробки та аналізу даних, а й їх інтелектуалізації. Інтелектуалізація пов'язана як з необхідністю використання експлуатаційного досвіду (у вигляді експертних оцінок), так і отримання об'єктивних оцінок стану обладнання незалежно від кваліфікації персоналу.

Таким чином, визначення «слабких місць» в системі генерації - першочергове завдання, як з технічної, так і з економічної точки зору, що, безумовно, підкреслює актуальність теми даної роботи.

Мета дослідження. Розробка системи оцінки технічного стану обладнання Дніпровської ГЕС із застосуванням інтелектуальних методів обробки інформації, формалізації знань і досвіду експертів, а також автоматизації процесу прийняття рішень.

Наукова новизна роботи пов'язана з наступними основними науковими положеннями і результатами:

- доведено можливість вирішення завдання комплексної оцінки технічного стану обладнання на основі нейро-нечіткого логічного висновку і обґрунтована можливість її визначення з використанням доступної інформації про об'єкт дослідження і формалізованих експертних знань з урахуванням експлуатаційного досвіду;

- обґрунтовано можливість реалізації розробленої моделі оцінки технічного стану на основі даних технічної діагностики і методів випробувань електрообладнання;

- розроблено структури нейро-нечіткого логічного висновку на основі адаптованого методу Такагі-Сугено для оцінки технічного стану обладнання Дніпровської ГЕС;

- визначені оптимальні функції приналежності і нечіткі правила оцінки технічного стану обладнання головної схеми Дніпровської ГЕС для пошуку можливих несправності (дефектів) в елементах електрообладнання.

Об'єктом дослідження є обладнання головної схеми Дніпровської ГЕС (Додаток А), пов'язані безперервністю процесів виробництва електричної енергії. До якої належать трансформатори генераторів, генераторні вимикачі, роз'єднувачі, трансформатори струму, трансформатори напруги, трансформатори власних потреб, систем збірних шин та і.н.

Предметом дослідження є оцінка технічного стану обладнання головної схеми Дніпровської ГЕС на основі нейро-нечіткого логічного висновку.

Теоретична і практична значущість роботи полягає в отриманні технічно-обґрунтованих рішень по експлуатації обладнання на базі розробленої системи оцінки його технічного стану із застосуванням інтелектуальних методів обробки інформації, а також можливості самонавчання і самонастроювання розробленої системи зі збереженням алгоритму роботи при зміні параметрів обладнання.

Методи дослідження. Основним методом дослідження при виконанні магістерської роботи було математичне моделювання. Вихідними даними були дані технічного діагностування, отримані в ході випробувань обладнання. Як інструмент моделювання застосовувався програмний комплекс Matlab. При розробці моделі використовувалися методи штучного інтелекту - на основі нейро-нечіткого логічного висновку, що об'єднує в собі методи нечіткої логіки та штучних нейронних мереж.

Ступінь розробленості. Вивченню проблем, пов'язаних з оцінкою технічного стану електричного обладнання, приділяється велика увага, що відображено в роботах з технічного діагностування [1, 2, 3, 4, 5]. В Україні значний вклад в розвиток методів оцінки технічного стану електричного обладнання внесли В. П. Вдовіко, В. А. Русов, М. Ю. Львів, Б. А. Алексєєв, А. Г. Овсянников, М.В. Костєрев, Є.І. Бардик, П.Д. Лежнюк, О.Є. та ін., а в розробку сучасних експертних систем на основі даних технічного діагностування електричного обладнання - А. Н. Назаричев, Д.А. Андрєєв, А. Ю. Хреніков, І.В. Давиденко, Г. В. Попов, В.Ф. Сивокобиленко та ін. Зважаючи на актуальність даної тематики в представленій магістерській роботі окремий розділ присвячений аналізу сучасних методів і систем оцінки стану електричного обладнання на електростанціях (ЕС) і електропідстанціях (ЕП).

Обґрунтованість і достовірність. Результати магістерської роботи отримані при коректному і обґрунтованому застосуванні методів нечіткої логіки та штучних нейронних мереж і підтверджуються узгодженістю з результатами, отриманими на основі емпіричних висновків і експертних оцінок.

Основні положення, що виносяться на захист:

- основні принципи формування системи оцінки технічного стану електричного обладнання на основі нейро-нечіткого логічного висновку з використанням нормативних критеріїв і формалізованих експертних знань, які враховують експлуатаційний досвід.

- нові математичні та структурні моделі оцінки технічного стану електричного обладнання головної схеми ГЕС на базі агрегованої доступної інформації про об'єкт за допомогою нейро-нечіткого логічного висновку.

- нова структура і алгоритм роботи нейро-нечіткого логічного висновку на основі адаптованого методу Такагі-Сугено для оцінки технічного стану силового масляного трансформатора гідрогенератора за даними технічної діагностики і випробувань.

Апробація роботи. Положення магістерської роботи доповідалися і обговорювалися на XXIV студентській науково-технічній конференції студентів, магістрів, аспірантів і викладачів ІІ ЗНУ «Енергетика, електроніка та інформаційні технології» (місто Запоріжжя, 2019).

Обсяг і структура роботи. Магістерська робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел. Робота викладена на 152 сторінках друкованого тексту, з них 24 таблиць, 48 рисунків, список використаних джерел з 60 найменувань.

1 МЕТОДИ І МОДЕЛІ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ДНІПРОВСЬКОЇ ГЕС

1.1 Класифікація існуючих методів та моделей оцінювання технічного стану електрообладнання

В даний час особливо гостро стоять питання оцінки стану електротехнічного обладнання на ЕС і ЕП. Це багато в чому пов'язано з тим, що значна частина основного обладнання головної схеми ГЕС (Додаток А), виробила встановлений парковий ресурс або термін експлуатації, визначений нормативними документами, чи використовується на межі своїх можливостей [1, 6, 7, 8].

Для оцінки стану обладнання ЕС і ЕП використовується моніторинг за допомогою комплексу апаратних і програмних засобів. Такий комплекс призначений для реєстрації різної інформації про параметри обладнання і його складових елементів, умов їх експлуатації та ін., а також для виконання аналізу стану обладнання на основі отриманих даних.

Слід зазначити, що вартість системи моніторингу основного обладнання становить близько (5...8) % від вартості об'єкта. З огляду на скорочення витрат, пов'язане з плановими і аварійними ремонтами обладнання, термін окупності таких систем не перевищує п'яти років [9].

Однак навіть при таких термінах окупності і досить помірною вартістю, економічна (а іноді і технічна) можливість установки системи моніторингу на кожній ЕС, ЕП часто відсутня.

У таких випадках хорошою альтернативою підсистемі моніторингу, пов'язаної з оцінкою стану обладнання, може служити система аналізу даних технічної діагностики та випробувань, або будь-яка доступна інформація про електричне обладнання, отриманої в ході його експлуатації.

Існують різні визначення діагностики (процесу діагностування) і моніторингу електрообладнання.

У контексті використано визначенням діагностики як інтелектуальне

групування даних, що включають статистику значень і тренди (зміни), які згодом обробляються експертної системою для видачі конкретної інформації про стан обладнання та рекомендованих заходів.

Основною метою технічного діагностування в першу чергу є розпізнавання стану обладнання в умовах обмеженої інформації і, як наслідок, оцінка залишкового ресурсу обладнання та підвищення її надійності [10]. Різні технічні системи мають різну структуру і призначення, тому не можна до всіх систем застосовувати один і той же вид технічного діагностування.

Під системою моніторингу мається на увазі саме оцінка технічного стану основного обладнання, без урахування підсистем загальносистемних засобів управління (релейного захисту та протиаварійної автоматики, реєстрації аварійних подій та процесів контролю якості електроенергії тощо).

Система моніторингу в порівнянні з системою аналізу даних технічного діагностування має низку технічних переваг:

- можливістю діагностування електрообладнання під напругою;
- контролем фактичного стану обладнання в процесі експлуатації;
- високою вірогідністю вихідних даних;
- можливістю зберігання вихідних даних (параметрів і характеристик обладнання), що дозволяє виявити залежності і взаємозв'язку між подіями.

Для визначення електрообладнання, наприклад, інтегральної оцінки стану, система моніторингу має ряд недоліків:

- система моніторингу іноді включає в себе вичерпний набір даних по всьому електрообладнанню. Вона спрямована на моніторинг основних вузлів - силових трансформаторів, комутаційного (рідше - допоміжного) обладнання;
- вихідна інформація являє собою набір даних, аналіз і обробка яких складають окрему задачу, рішення якої вимагає відповідного математичного апарату з його програмною реалізацією.

Крім того, для встановлення системи моніторингу на ЕС і ЕП повинні існувати певні умови:

- обладнання повинно мати порівняно високу вартість;

- передбачуваний збиток від недовипуску електричної енергії при відмові такого обладнання повинен бути значним;

- діагностичне обстеження такого обладнання під навантаженням не може бути оперативне і надійно вироблено мобільними переносними засобами і вимагає істотно більш дорогого діагностичного обладнання [10].

Прикладом може послужити аналіз стану гідроагрегатів, коли необхідно забезпечувати одночасний контроль температурних, електричних, механічних та інших параметрів.

Використання систем моніторингу для кожної одиниці обладнання головної схеми, виконаних з використанням спрощених схем, ні технічно, ні економічно невиправдано. Але оскільки виконання аналізу технічного стану всього обладнання необхідно, в даній магістерській роботі в якості системи оцінки технічного стану обладнання ЕС і ЕП пропонується система на основі аналізу даних технічного діагностування і будь-якої доступної інформації про обладнання, отриманої в ході експлуатації.

На сьогоднішній день методи технічного діагностування (на основі методів неруйнівного контролю) та випробувань активно застосовуються для оцінки стану електрообладнання на ЕС і ЕП.

Періодичність і обсяги діагностування та випробувань обладнання регламентовані [8]. Число, вид, значення і способи збору даних різні і залежать від методу діагностування та призначення обладнання.

Практично для будь-якого виду і типу обладнання існує як мінімум один метод неруйнівного контролю (випробувань), з допомогою якого можна отримати дані про стан обладнання з періодичністю проведення контролю не рідше одного разу на рік. Це дає можливість мати ретроспективну інформацію про параметри стану устаткування, що дозволяє не тільки стежити за динамікою зміни цих параметрів, а й на основі її аналізу прогнозувати можливі несправності і дефекти. За загальною класифікацією всі методи діагностування (контролю) електрообладнання можна розділити на дві групи:

- методи неруйнівного контролю, які не вимагають руйнування зразків

випробуваного матеріалу (вироби);

- методи руйнівного контролю, які вимагають руйнування зразків випробуваного матеріалу (вироби).

Всі методи неруйнівного контролю можна розділити, спираючись на фізичні явища, на яких вони засновані. Для електротехнічного обладнання найбільш часто застосовуються такі методи неруйнівного контролю:

- магнітний;
- електричний;
- вихрострумний;
- радіохвильовий;
- теплової;
- оптичний;
- радіаційний;
- акустичний;
- проникаючими речовинами.

Усередині кожного виду методи також класифікуються за додатковими ознаками.

Розглянемо визначення для кожного методу неруйнівного контролю, що використовуються в нормативній документації.

Магнітні методи контролю засновані на реєстрації магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами, або на визначенні магнітних властивостей контрольованих виробів.

Електричні методи контролю, засновані на реєстрації параметрів електричного поля, що взаємодіє з контрольним об'єктом, або поля, що виникає в контрольованому об'єкті в результаті зовнішнього впливу.

Вихрострумний метод контролю, заснований на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться збудливою котушкою в електропровідній частині об'єкта контролю.

Радіохвильовий метод контролю ґрунтується на аналізі взаємодії

електромагнітного випромінювання радіохвильового діапазону з об'єктом контролю.

Теплові методи контролю засновані на реєстрації теплових полів об'єкта контролю.

Візуально-оптичні методи контролю засновані на взаємодії оптичного випромінювання з об'єктом контролю.

Радіаційні методи контролю засновані на реєстрації і аналізі проникаючого іонізуючого випромінювання після взаємодії з контрольованим об'єктом [11].

Акустичні методи контролю засновані на застосуванні пружних коливань, порушуваних в об'єкті контролю.

Капілярні методи контролю засновані на капілярному проникненні індикаторних рідин в порожнині поверхневих і наскрізних неоднорідності матеріалу об'єкта контролю та реєстрації утворюються індикаторних слідів візуальним способом або за допомогою перетворювача.

Варто відзначити, що згідно з нормативною базою аналізу стану електричного обладнання Дніпровської ГЕС не всі перераховані методи є обов'язковими, частина з них носить рекомендаційний характер.

До обов'язкових належать такі методи випробувань [8]:

- вимірювання опору ізоляції постійному струму і коефіцієнта абсорбції;
- вимірювання характеристик ізоляції (тангенс кута діелектричних втрат, ємність ізоляції);
- випробування ізоляції підвищеною напругою;
- фізико-хімічний аналіз;
- оцінка вологості твердої ізоляції тощо.

1.2 Порівняльний аналіз сучасних методів оцінювання технічного стану електрообладнання та визначення сфер застосування

Моделювання життєвого циклу електрообладнання є важко реалізовується завданням, так як на будь-якій стадії існує ряд факторів, вплив яких неможливо врахувати або передбачити: людський фактор, навколишнє середовище (кліматичні умови), умови експлуатації і т.д.

У практиці контроль життєвого циклу електрообладнання здійснюється з моменту його монтажу або установки.

Використання в розробленій системі не тільки методів випробувань електрообладнання, а й методів технічного діагностування дозволяє отримувати частину даних в режимі моніторингу (без виведення обладнання з роботи), а значить визначати стан обладнання в реальних експлуатаційних умовах з урахуванням протікання в ньому різних фізичних процесів.

В рамках дослідження на основі статистичних даних був проведений аналіз впливу застосування методів технічного діагностування на зміну життєвого циклу обладнання на прикладі трансформатора генератора [12].

Результати аналізу представлені у вигляді функціональної залежності стану обладнання (з моменту його введення) від часу експлуатації обладнання та наведені на рисунку 1.1.

Для опису стану використовувалися не числові значення, а лінгвістичні змінні, представлені чотирма термами [13]:

- справний стан D1, коли об'єкт повністю відповідає всім вимогам нормативно-технічної документації. Такий стан вважається працездатним;
- несправне, але працездатний стан D2, коли вимогам нормативно-технічної документації відповідають тільки ті властивості об'єкта, від яких залежить його можливість виконувати задані функції;
- несправне і непрацездатний, але ремонтпридатність стан D3, коли об'єкт не може виконувати задані функції;
- перехід в працездатний стан можливий при виконанні ремонту, який

технічно можливий і економічно доцільний;

- не працездатний і неремонтопридатний стан D4, коли об'єкт не може виконувати задані функції, і перехід в працездатний стан неможливий, так як виконання ремонту технічно неможливо або економічно недоцільно.

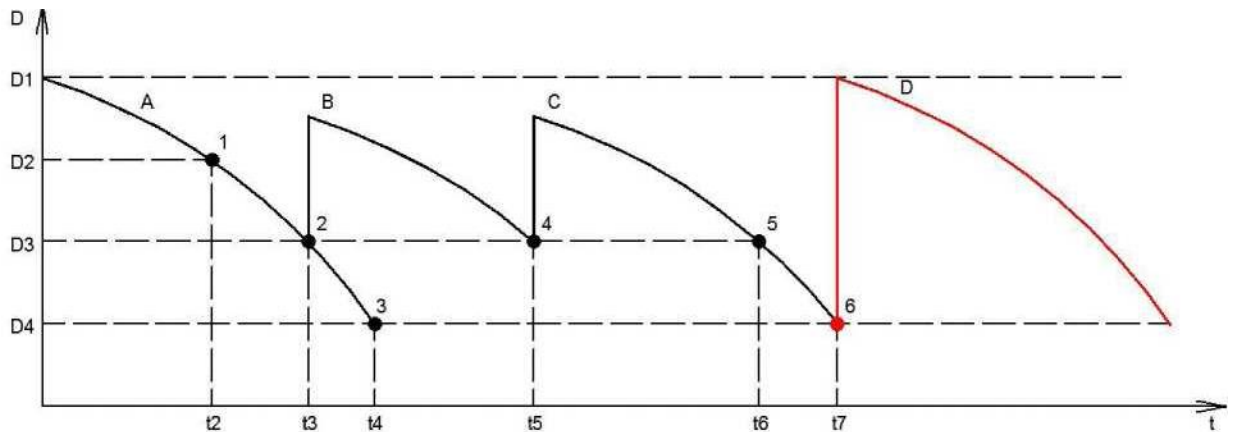


Рисунок 1.1 - Життєвий цикл обладнання без використання методів технічної діагностики

На рисунку 1.1 життєвий цикл трансформатора починається зі стану D1. Подальша експлуатація описується кривою А аж до точки 2, яка відповідає першому капітальному ремонту, виконуваного згідно з аналізом статистичних даних приблизно через 12 років після початку експлуатації трансформатора. Зазвичай стан трансформатора на момент проведення капітального ремонту відповідає D3.

Після першого капітального ремонту стан трансформатора наближається до стану D1. Подальша його експлуатація описується кривою В. За час другого капітального ремонту (точка 4) настає трохи раніше першого і становить близько 10 років, а стан трансформатора на момент проведення другого капітального ремонту також відповідає стану D3.

Після другого капітального ремонту експлуатація трансформатора описується кривою С. Кожен такий ремонт відновлює обладнання до справного, але не первісного стану.

У прикладі враховуються тільки капітальні ремонти трансформатора (без урахування поточних і т.п.), так як даний тип ремонту самий трудомісткий як з технічної, так і з економічної точки зору.

Потім обладнання досягає знову стану D3 (точка 5), після чого вже економічно недоцільно проводити капітальний ремонт, а при досягненні стану D4 (точка 6) виробляють повну заміну трансформатора.

В даному прикладі представлена усереднена модель життєвого циклу трансформатора генератора. Варто зауважити, що зустрічаються випадки, коли число капітальних ремонтів для трансформатора генератора більше двох, а терміни проведення ремонтів можуть відрізнятися від представлених в прикладі.

На рисунку 1.2 зображена графічна модель життєвого циклу трансформатора при використанні методів технічного діагностування. У цьому прикладі для аналізу впливу застосування методів технічного діагностування на життєвий цикл обладнання були розглянуті дані, отримані в результаті тепловізійної діагностики.

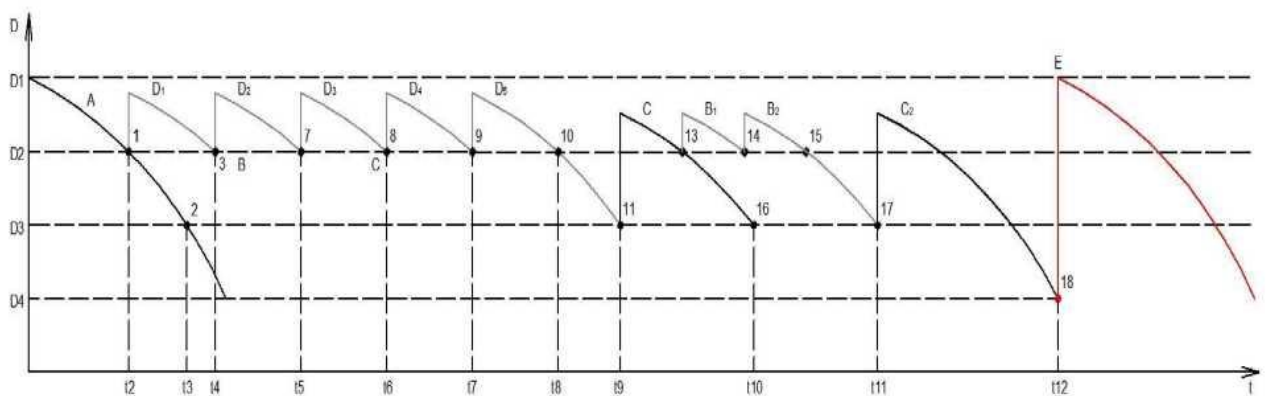


Рисунок 1.2 - Життєвий цикл обладнання при використанні методів технічного діагностування

Діагностування обладнання проводиться на більш ранньому етапі - в проміжку між станами обладнання D1 - D2 (точка 1), а не в передбачуваний момент виявлення серйозного дефекту D3 (точка 2). Тому на експлуатацію,

описувану кривими Б, на відміну від попереднього випадку, ми виходимо, починаючи з точки 1, і не допускаємо досягнення стану D3.

Можливо сказати, що основне завдання технічної діагностики - підтримувати стан обладнання в інтервалі D1 - D2 шляхом оцінки його технічного стану і визначення місця і виду несправностей. Технічне діагностування проводиться в середньому 1 раз в (4...5) років, тому на графіку зображено середнє число проведених діагностик, рівне 5 (в точках 1, 3, 7, 8, 9).

Як і на попередньому рисунку в певній точці обладнання знову досягає стану D2 (точка 10), коли вже економічно недоцільно проводити діагностування трансформатора, і після досягнення стану D3 (точка 11) проводиться капітальний ремонт.

Після капітального ремонту експлуатація описується кривою С, поновлюється діагностування обладнання, що описується кривими D1 і D2. Час експлуатації до першого капітального ремонту і між першим і другим капітальним ремонтом значно збільшується.

Основною перевагою використання методів технічного діагностування є істотне збільшення граничного експлуатаційного терміну електричного обладнання. А дані технічного діагностування дозволяють отримати досить повну картину технічного стані більшу частину устаткування ЕС та ЕП.

Використання методів діагностування для оцінки технічного стану робить можливим не тільки коригування життєвого циклу обладнання, але і продовжує його, значно підвищуючи надійність роботи обладнання.

Як уже зазначалося, основною проблемою електричного обладнання в Україні є висока ступінь його зносу. Знос обладнання ЕС та ЕП перевищує 48 %, в тому числі обладнання ЕП - 60 %, ліній електропередачі - 41,9 % [14]. Тому питання оцінки технічного стану такого обладнання повинні вирішуватися в першу чергу.

В рамках магістерського дослідження проводилося обстеження обладнання Дніпровської ГЕС-1, де знаходяться в експлуатації три головних трансформатори ГТ-1, ГТ-2, ГТ-5, трансформатори власних потреб (ТВП) Т-1 та

T-2 термін експлуатації яких понад 50 років, ГТ-9 та АТ-1 - понад 25 років, елегазові вимикачі відпрацювали більш ніж 20 років та наближаються до термінів капітального ремонту.

Аналіз стану трансформаторів виявив, що термін експлуатації, перевищує нормативний. За цією категорією обладнання повинні бути налаштовані посилений контроль стану, що ще раз підкреслює актуальність представленої магістерської роботи.

1.3 Дослідження ефективності застосування моделей оцінювання технічного стану електрообладнання

Сучасні системи оцінки технічного стану електричного обладнання є автоматизовані експертні системи, спрямовані, в основному, на вирішення двох видів завдань - визначення стану обладнання з метою виявлення дефектів і несправностей і оптимізація управляючих впливів на об'єкти головної схеми Дніпровської ГЕС з метою підвищення надійності роботи цього обладнання та продовження терміну експлуатації [16].

Європейські системи, на відміну від Українських, не ставлять своїм завданням продовження терміну служби електроустановки, оскільки зарубіжна практика передбачає заміну обладнання після закінчення його терміну служби. Також існують досить великі відмінності в нормативній документації по обслуговуванню, діагностиці, випробувань, складу обладнання та його експлуатації, які не дозволяють використовувати закордонні системи оцінки технічного стану обладнання для української енергосистеми.

В Україні подібних експертних систем, використовуваних на реальних енергооб'єктах, вкрай мало і більшість з них спрямовані в основному на вирішення завдання оцінки стану окремих одиниць обладнання, наприклад, тільки трансформаторів або тільки вимикачів.

У сучасній практиці в залежності від обсягу і повноти вихідних даних, а також області застосування для аналізу даних технічної діагностики

використовуються математичні методи, більш детально описані в [1]:

- логічні методи розпізнавання кривих;
- методи поділу в просторі ознак;
- методи, засновані на визначенні цінності ознак;
- методи, засновані на теорії ймовірності;
- методи, засновані на теорії інформації;
- статистичні методи розпізнавання і ін.

Кожен з методів має як достоїнствами, так і недоліками. Однак використання більшості з них в реальних експлуатаційних системах важко, так як при комплексній оцінці стану всіх видів устаткування на станції потрібно вирішувати по суті багатокритеріальному завданню прийняття рішень про подальшу експлуатацію обладнання на основі існуючої, часто різномірної і неповної, інформації.

Аналіз функціональних можливостей сучасних експертних систем і принципи їх побудови для діагностики стану високовольтного маслонаповненого обладнання розглянуті в [18].

Розроблена в рамках магістерської роботи система позиціонується як експертна система для оцінки стану різних видів електричного обладнання (не тільки маслонаповненого), також призначена для аналізу стану практично будь-якого виду обладнання головної схеми Дніпровської ГЕС.

В рамках магістерського дослідження було виконано аналіз стану силового трансформатора на основі даних технічної діагностики для оцінки можливості реалізації системи, що використовує метод Байеса.

Згідно [1], використовуючи метод Байеса, стан об'єкта і фактор k_i , який асоціюється з даними станом, можуть бути виражені через ймовірності прояви фактору і ймовірність стану наступним чином

$$P(D_i/k_i) = P(D_i) \frac{P(k_i/D_i)}{P(k_i)}, \quad (1.1)$$

де $P(k_i/D_i)$ - ймовірність прояву факторе k_i у об'єкта в стані D_i ; $P(D_i)$ -

апріорна ймовірність стану D_i ; $P(k_i)$ - апріорна ймовірність прояву факторе k_i на будь-якому об'єкті; $P(k_i/D_i)$ - апостеріорна ймовірність стану при прояві фактора k_i .

Основна ідея методу Байеса полягає в оцінці ймовірнісної характеристики виявлення стану $P(k_i/D_i)$ на основі доступних для аналізу факторів. При послідовному розгляді різних комбінацій факторів збільшення значення $P(k_i/D_i)$ свідчить про високу ймовірність події, а зниження - про його практичної нереалізації.

Для визначення станів силового масляного трансформатора 150 кВ введемо класифікацію станів електроустаткування які наведені в таблиці 1.1, що містить чотири позиції, в залежності від стану показника (його відповідності або невідповідності нормального стану) і наявності дефекту.

Таблиця 1.1 - Статус обладнання

Стан	Показник в межах норми	Наявність дефекту
D1	Так	Ні
D2	Так	Так
D3	Ні	Так
D4	Ні	Ні

Далі визначаються апріорні ймовірності вихідних станів за допомогою експертних оцінок.

Будемо вважати, що ознаки є незалежними. У цьому випадку стан силового трансформатора описується комплексом незалежних ознак K , кожен з яких є двох розрядний

$$K = (k_1, k_2), \quad (1.2)$$

де k_1 - прояв ознаки K ; а k_2 – невияв ознаки.

Ймовірності прояви і/або невияву можуть бути представлені функціями розподілу, наведені на рисунку 1.3. На рисунку представлені функції прояву

ознак станів: $D1 - \mu_1(x)$, $D2 - \mu_2(x)$, $D3 - \mu_3(x)$ і $D4 - \mu_4(x)$, які можуть бути визначені на інтервалі $X = \{0 \dots 3\}$.

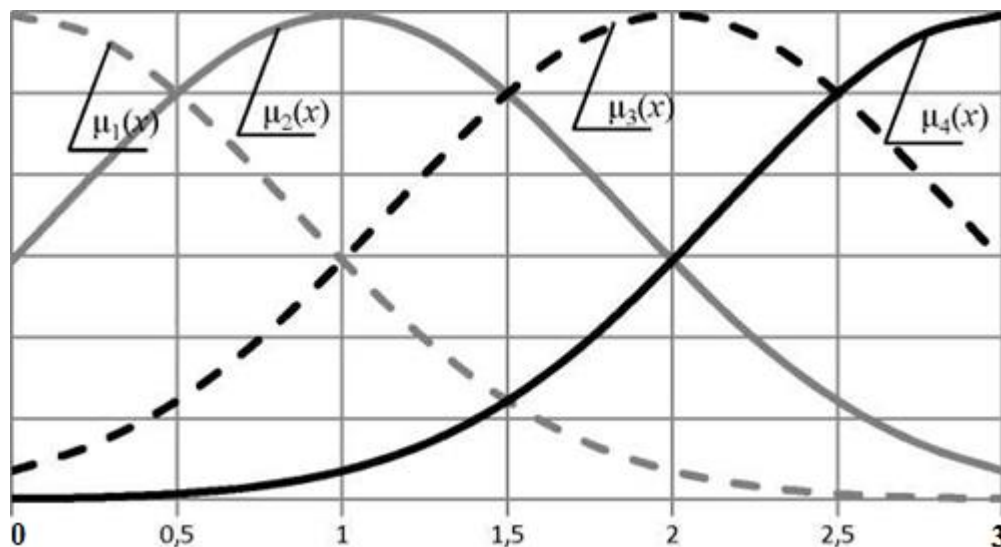


Рисунок 1.3 - Функції розподілу прояву ознак станів

Значення незалежної змінної характеризує ранг стану об'єкта дослідження.

Узагальнені лінеаризовані представлення функцій сильного $\mu_1(x)$ та нормального $\mu_2(x)$, прояви ознак дають імовірнісні характеристики прояви якої-небудь ознаки $\mu_p(x)$, одночасно з цим, як узагальнені лінеаризовані представлення функцій слабого проявлення $\mu_3(x)$ і його відсутності $\mu_4(x)$, дають імовірні характеристики невияву ознак $\mu_N(x)$.

Характеристичні функції $\mu_p(x)$, і $\mu_N(x)$ дозволяють виявити розподіл імовірностей прояву ознак для певного діагнозу D_i наведені на рисунку 1.4.

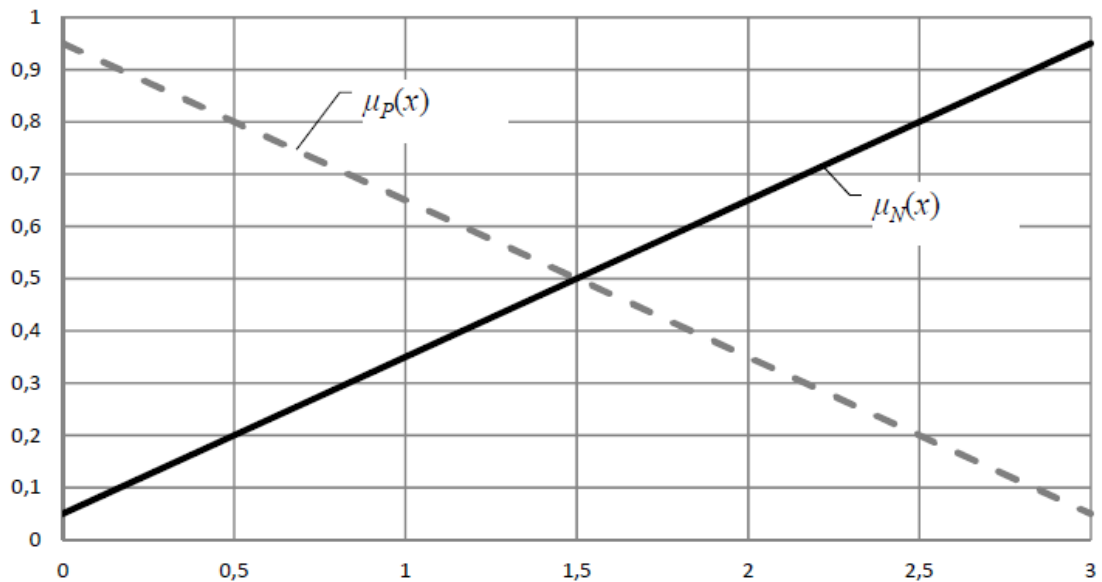


Рисунок 1.4 – Характерні функції імовірнісного прояву ознак

Аналогічні функції мають бути визначені для всіх ознак що діагностуються для кожного стану об'єкта дослідження, які наведені в таблиці 1.1.

Імовірність кожного можливого стану при різних поєднання ознак може бути визначена за формулою Байеса

$$P(D_i/K) = \frac{P(D_i)P(K/D_i)}{\sum_{s=1}^n P(D_s)P(K/D_s)}, \quad (1.3)$$

де K - безліч дворозрядних ознак $\{ k_1, k_2, k_3, \dots k_v \}$; n – число діагнозів стану; $P(D_i)$ - попередня ймовірність діагнозу D_i ; $P(K/D_i)$ - ймовірність прояву ознак в діагнозі D_i , яка визначається відповідно до виразу

$$P(K/D_i) = P(k_1/D_i)P(k_2/D_i) \dots P(k_v/D_i), \quad (1.4)$$

де K - безліч дворозрядних ознак $\{ k_1, k_2, k_3, \dots k_v \}$.

Такий аналіз дозволяє отримати кількісну характеристику поєднання ознак, що діагностуються за належністю того чи іншого стану.

Хроматографічний аналіз розчинених газів в маслі (ХАРГ) (див. табл. 1.2.) - метан (CH_4), вуглекислий газ (CO_2), етилен (C_2H_4), ацетилен (C_2H_2), етан (C_2H_6), водень (H_2), чадний газ (CO).

Таблиця 1.2 - Діагностична матриця Байеса для ХАРГ

Ознака Кj	Ймовірності не перевищення (+) і перевищення (-) граничних значень ознак для діагнозів D1							
	D1		D2		D3		D4	
	+	-	+	-	+	-	+	-
CH_4	0,998	0,002	0,024	0,976	0,021	0,979	0,001	0,999
CO_2	0,990	0,010	0,022	0,978	0,002	0,998	0,001	0,999
C_2H_4	0,940	0,060	0,044	0,956	0,004	0,996	0,004	0,996
C_2H_2	0,895	0,105	0,097	0,903	0,009	0,991	0,003	0,997
C_2H_6	0,821	0,179	0,032	0,968	0,003	0,997	0,002	0,998
H_2	0,804	0,196	0,028	0,972	0,003	0,997	0,001	0,999
CO	0,990	0,010	0,026	0,974	0,002	0,998	0,001	0,999

З метою підтвердження проведених досліджень було виконано розрахунок ймовірностей станів на основі даних ХАРГ силового трансформатора з використанням функцій належності, а також ймовірностей проявів і невияв ознак для кожного газу окремо. Розрахунок ймовірностей станів силового трансформатора для ряду сполучень ознак наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Діагностична матриця Байеса для ХАРГ

Ознака	Діагноз							
	D_1		D_2		D_3		D_4	
	+	-	+	-	+	-	+	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CH ₄	P(k ₁₁ /D ₁)	P(k ₁₂ /D ₁)	P(k ₁₁ /D ₂)	P(k ₁₂ /D ₂)	P(k ₁₁ /D ₃)	P(k ₁₂ /D ₃)	P(k ₁₁ /D ₄)	P(k ₁₁ /D ₄)
CO ₂	P(k ₂₁ /D ₁)	P(k ₂₂ /D ₁)	P(k ₂₁ /D ₂)	P(k ₂₂ /D ₂)	P(k ₂₁ /D ₃)	P(k ₂₂ /D ₃)	P(k ₁₁ /D ₄)	P(k ₁₁ /D ₄)
C ₂ H ₄	P(k ₃₁ /D ₁)	P(k ₃₂ /D ₁)	P(k ₃₁ /D ₂)	P(k ₃₂ /D ₂)	P(k ₃₁ /D ₃)	P(k ₃₂ /D ₃)	P(k ₁₁ /D ₄)	P(k ₁₁ /D ₄)
C ₂ H ₂	P(k ₄₁ /D ₁)	P(k ₄₂ /D ₁)	P(k ₄₁ /D ₂)	P(k ₄₂ /D ₂)	P(k ₄₁ /D ₃)	P(k ₄₂ /D ₃)	P(k ₁₁ /D ₄)	P(k ₁₁ /D ₄)
C ₂ H ₆	P(k ₅₁ /D ₁)	P(k ₅₂ /D ₁)	P(k ₅₁ /D ₂)	P(k ₅₂ /D ₂)	P(k ₅₁ /D ₃)	P(k ₅₂ /D ₃)	P(k ₁₁ /D ₄)	P(k ₁₁ /D ₄)
H ₂	P(k ₆₁ /D ₁)	P(k ₆₂ /D ₁)	P(k ₆₁ /D ₂)	P(k ₆₂ /D ₂)	P(k ₆₁ /D ₃)	P(k ₆₂ /D ₃)	P(k ₁₁ /D ₄)	P(k ₁₁ /D ₄)
CO	P(k ₇₁ /D ₁)	P(k ₇₂ /D ₁)	P(k ₇₁ /D ₂)	P(k ₇₂ /D ₂)	P(k ₇₁ /D ₃)	P(k ₇₂ /D ₃)	P(k ₁₁ /D ₄)	P(k ₁₁ /D ₄)

Потім був виконаний розрахунок ймовірності діагнозу D_1 при відповідно всього комплексу ознак $K = k_{11} \wedge k_{21} \wedge k_{31} \wedge k_{41} \wedge k_{51} \wedge k_{61} \wedge k_{71}$, представлених в таблиці 1.3, нормальним граничним умовам, відповідно до виразу (1.3):

$$\begin{aligned}
 P(D_1 / K) &= (0,5 \cdot 0,998 \cdot 0,990 \cdot 0,940 \cdot 0,895 \cdot 0,821 \cdot 0,804 \cdot 0,990) / \\
 & / (0,5 \cdot 0,998 \cdot 0,990 \cdot 0,940 \cdot 0,895 \cdot 0,821 - 0,804 \cdot 0,99 + \\
 & + 0,3 - 0,001 - 0,001 - 0,004 - 0,003 - 0,002 - 0,001 - 0,001) = 0,9999.
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

Значення ймовірностей діагнозів представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Вірогідність приналежності станам

Ймовірності діагнозів P (D _i)			
D_1	D_2	D_3	D_4
0,5	0,1	0,1	0,3

У разі невідповідності всіх ознак які були діагностуванні до допустимих значень, тобто коли $\bar{K} = k_{12} \wedge k_{22} \wedge k_{32} \wedge k_{42} \wedge k_{52} \wedge k_{62} \wedge k_{72}$, ймовірність

нормального стану вкрай мала і згідно з розрахунками становить

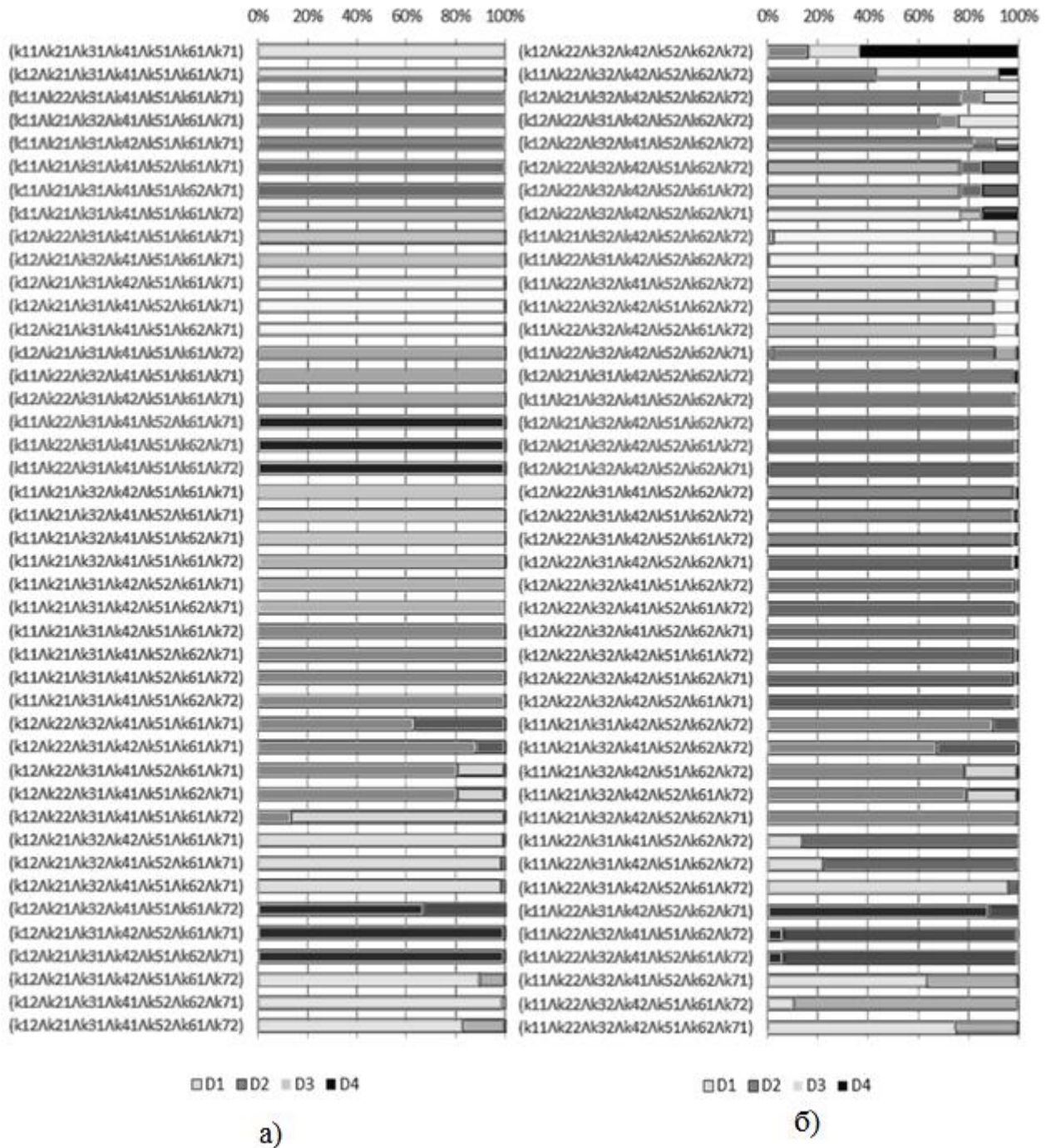
$$P(D_1/\bar{K}) = 0,5 \cdot 0,002 \cdot 0,010 \cdot 0,060 \cdot 0,105 \cdot 0,179 \cdot 0,196 \cdot 0,010) / \\ / (0,5 \cdot 0,002 \cdot 0,010 \cdot 0,060 \cdot 0,105 \cdot 0,179 \cdot 0,196 \cdot 0,010 + \\ + 0,3 \cdot 0,999 \cdot 0,999 \cdot 0,996 \cdot 0,997 \cdot 0,998 \cdot 0,999 \cdot 0,999) = 0,04 \cdot 10^{-9}. \quad (1.6)$$

Розрахунок ймовірностей для інших ознак представлений на рисунку 1.5. При невиконанні вимог за трьома діагностуються показниками ймовірність приналежності до нормального стану різко знижується і супроводжується одночасним зростанням ймовірності приналежності до стану D_2 . Прикладом є одночасне відхилення показників CO та CO₂ за граничні значення, що відповідає комбінації показників $\bar{K} = k_{12} \wedge k_{22} \wedge k_{32} \wedge k_{42} \wedge k_{52} \wedge k_{62} \wedge k_{72}$, наведені на рисунку 1.5 (а). При такій комбінації показників імовірнісна приналежність до D_1 становить близько 13 %, а до D_2 - 87 %.

Ця тенденція зберігається - зростання числа відхилень діагностованих показників від норми призводить до переважання негативних діагнозів, які свідчать про наявність дефекту в силовому обладнанні. Результати, представлені на рисунку 1.5 (б), свідчать про це.

Для комбінації показників $\bar{K} = k_{12} \wedge k_{22} \wedge k_{32} \wedge k_{42} \wedge k_{52} \wedge k_{62} \wedge k_{72}$, що наведені на рисунку 1.5 (б), ймовірність D_3 становить 20 %, а D_4 перевищує 63 %. Такий стан вимагає негайного вжиття заходів по відновленню або заміні обладнання.

Проведені розрахунки наочно свідчать про адекватність використаного підходу до оцінки стану головної схеми Дніпровської ГЕС, але реалізація системи оцінки стану обладнання Дніпровської ГЕС, заснована на такому підході, вимагає великого обсягу попередньої інформації, в тому числі на увазі, що апріорне розподіл відомо до початку спостережень. Іншими словами, при використанні даного методу попередньо повинна бути виконана велика робота з аналізу статистичних даних та визначення всіх ймовірностей.



а) при відповідно більшості критеріїв граничним значенням (4 і більш);
 б) при невідповідності більшості критеріїв граничним значенням (4 і більше).

Рисунок 1.5 - Результати розрахунку ймовірностей приналежності станам

Крім того, одним з основних мінусів методу Байеса є «пригнічення» діагнозів, що рідко зустрічаються, що накладає певні обмеження на використання даного методу для оцінки стану електричного обладнання, так як відсоток відмови обладнання головної схеми Дніпровської ГЕС досить малий, а отже, висока ймовірність пропуску «рідкісного» діагнозу.

На підтвердження сказаного слід зауважити, що питомий число відмов трансформаторів в середньому становить близько 2 %, тобто близько 56 % парку можуть мати критичні дефекти, що ведуть до раптових відмов [19].

Незважаючи на всі безумовні переваги існуючих систем оцінки стану електричного обладнання, вони мають ряд суттєвих недоліків:

- орієнтовані на вирішення конкретного завдання певного власника (під конкретні схеми, конкретне обладнання тощо) і, як правило, не можуть використовуватися на інших об'єктах без серйозних переробок [20];

- використовують різномасштабних інформацію різної точності, що може призводити до недостовірності оцінки [21];

- не враховують динаміку зміни критеріїв оцінки технічного стану обладнання, тобто системи не здатні навчатися.

Все це свідчить про недостатню універсальності систем оцінки стану обладнання. А ситуація, що склалася в електроенергетиці, спонукає не стільки вдосконалювати існуючі, скільки шукати нові методи моделювання таких систем.

Іншими словами, потрібні нові інструментарії якісної і кількісної оцінки технічного стану електричного обладнання Дніпровської ГЕС, що володіють наступними функціями:

- збір статистики про дефекти і відмови обладнання, її аналіз і пошук закономірностей;

- використання різних методів діагностики і випробувань, включаючи застосування інформаційних технологій, для визначення оптимальних рішень по експлуатації та ремонту устаткування;

- можливість використання для визначення технічного стану для різного

електричного обладнання без серйозних переробок (універсальність);

- облік зміни критеріїв оцінки стану обладнання з урахуванням експлуатаційного досвіду (здатність до навчання).

У даній роботі запропоновано реалізація системи аналізу даних технічного діагностування, отриманої в ході експлуатації цього обладнання, на основі нейро-нечіткого логічного висновку, який забезпечує представлену систему оцінки технічного стану усіма перерахованими властивостями.

У розробленій системі оцінки технічного стану в якості вхідних параметрів може використовуватися будь-яка доступна інформація про аналізованому об'єкті, причому не тільки в числовому, а й в лінгвістичному вигляді. Наприклад, для оцінки технічного стану електрообладнання на Дніпровській ГЕС крім даних діагностики та випробувань можуть застосовуватися (при їх наявності) схемно-режимні параметри, паспортні дані обладнання, інформація про ремонти, дані з датчиків і систем моніторингу і т.п.

2 ФОРМАЛІЗОВАНИЙ ОПИС ЗАДАЧІ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ГЕС

2.1. Особливості функціонування та технічного стану основного обладнання ГЕС

При розробці будь-якої технічної системи необхідно спочатку визначити її основні функції і тільки потім принципи її організації і структуру.

Розроблена модель системи оцінки технічного стану обладнання є математичною моделлю інтелектуальної системи прийняття рішень, яка дозволить коректувати ремонтні цикли обладнання головної схеми Дніпровської ГЕС і приймати ефективні рішення щодо його подальшої експлуатації. Згідно [22] система підтримки прийняття рішень призначена для прийняття багатокритеріальних рішень в складній інформаційному середовищі. Основне завдання зводиться до пошуку оптимального рішення за сукупністю одночасно розглядаються критеріїв великого обсягу даних різної природи.

У даній магістерській роботі реалізація системи підтримки прийняття рішень полягає у визначенні оптимального рішення (з урахуванням ранжирування можливих рішень) щодо подальшої експлуатації електричного обладнання на основі оцінки його стану на базі доступною агрегованою інформації про об'єкт дослідження за допомогою нейро-нечіткого логічного висновку [23], розробленого Янгом [24] більш детально описаного в третьому розділі. Варто підкреслити, що розроблена система відноситься до класу не оперативних, а стратегічних систем, які дозволяють використовувати великі обсяги даних, отриманих в умовах високого ступеня невизначеності. Дана система виступає «порадником», надаючи вже оброблені дані, тому у такої системи в пріоритеті буде не зменшення часу прийняття рішень, а підвищення їх точності.

Структуру системи прийняття рішень можна представити у вигляді взаємодії п'яти окремих підсистем (див. рис. 2.1).

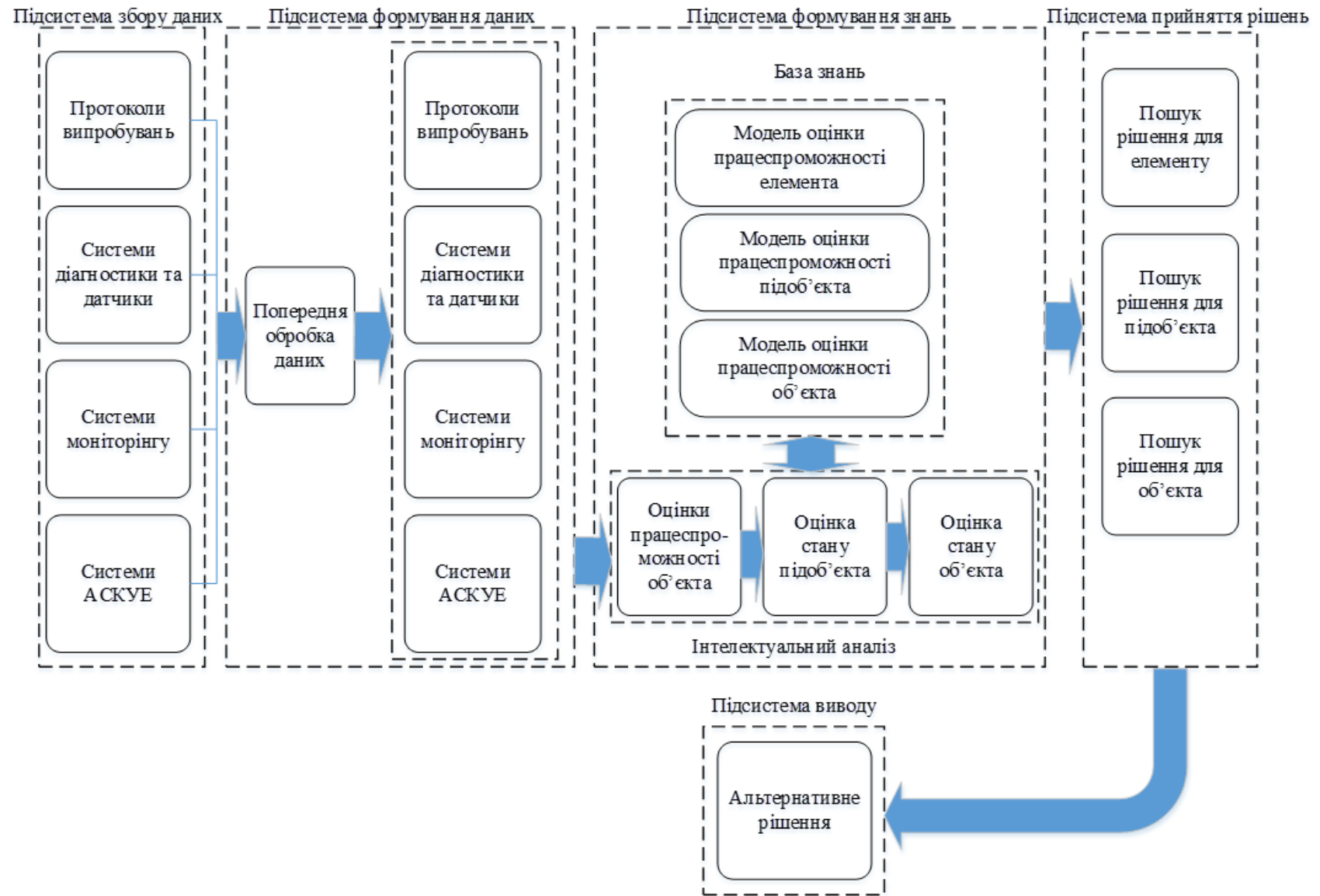


Рисунок 2.1 - Структура системи прийняття рішень

- збору даних;
- формування даних;
- формування знань;
- прийняття рішень;
- виведення.

На етапі збору даних визначаються всі можливі джерела даних. Даний блок потрібно для оцінювання обсягу даних, визначення порядку їх надходження і необхідного обсягу сховища для формування бази даних на наступному етапі. Джерела даних можуть бути наступні:

- протоколи діагностики та випробувань;
- системи діагностики і датчики;
- системи моніторингу.

Підсистема формування даних складається з двох послідовних етапів - попередньої обробки даних і формування бази даних. Наявність попереднього етапу обробки даних обумовлено необхідністю масштабування, нормування даних, а також виключення з їх числа викидів [25].

На основі обробленої інформації формується набір даних про об'єкт дослідження, що зберігається деяким впорядкованим способом (базою даних). У базі даних можуть зберігатися такі відомості про об'єкт дослідження:

- паспортні данні;
- дані про експлуатацію і ремонтах;
- дані діагностики та випробувань;
- дані моніторингу.

Підсистема формування знань складається з двох блоків - «інтелектуальний аналіз» і «база знань». Під інтелектуальним аналізом розуміється підсистема аналізу даних на основі методу нейронечіткого логічного висновку, що дозволяє за допомогою блоку «база знань» отримати сукупну диференційовану оцінку стану обладнання ЕС, ЕП. Блок «база знань» повинен здійснювати не тільки функції зберігання, взаємодії різних моделей.

Підсистема формування знань складається з двох блоків - «інтелектуальний аналіз» і «база знань». Під інтелектуальним аналізом розуміється підсистема аналізу даних на основі методу нейро нечіткого логічного висновку, що дозволяє за допомогою блоку «база знань» отримати сукупну диференційовану оцінку стану обладнання Дніпровської ГЕС. Блок «база знань» повинен здійснювати не тільки функції зберігання, взаємодії різних моделей (оцінки працездатності елемента, підоб'єкту, об'єкта), перевірки існуючих знань, а й отримання нових.

В ході аналізу виконується оцінка стану за принципом «від часткового до загального» (докладно описаного в наступному підрозділі):

- оцінка стану кожного з елементів підоб'єкту;
- оцінка стану підоб'єкту на базі оцінки стану сукупності його елементів;
- оцінка стану об'єкта на базі оцінки стану сукупності всіх його підоб'єктів.

Складність об'єктів ЕС змушує розбивати об'єкт на сукупність підоб'єктів, а їх, у свою чергу, на сукупність елементів, так як в кожному підоб'єкті протікають різні взаємопов'язані процеси, що істотно ускладнює визначення технічного стану обладнання головної схеми Дніпровської ГЕС при вирішенні завдання.

Як відомо, для вирішення завдань системного аналізу найбільш ефективним способом є метод декомпозиції [26], тому і було прийнято рішення скористатися ним для розробки структури системи оцінка технічного стану.

У свою чергу кожен з елементів сукупності характеризується певним набором даних. В якості мінімального набору вихідних даних для визначення стану обладнання, як було описано в першому розділі роботи, необхідні дані технічного діагностування об'єкту.

У загальному випадку під базою знань розуміють сукупність станів і правил виведення, що допускають логічний висновок і обробку даних [27], де стан описується наступною записом

$$S = \{N, K, I, L, M\}, \quad (2.1)$$

де N - найменування стану; K - значення с тану, яке визначається на чисельної або лінгвістичної шкалою на базі функцій належності; I - ступінь належності обладнання ЕС, ЕП до станів працездатності; L - безліч зв'язків стану з іншими знаннями; M - множина допустимих функцій перетворень, операцій і т.п. [44].

На основі отриманих оцінок стану виконується аналіз рішень в підсистемі прийняття рішень. Результат у вигляді ранжируваних альтернатив рішення через підсистему виведення потрапляє на призначений для користувача інтерфейс. Остаточний вибір залишається за особою, яка приймає рішення.

Механізм роботи системи оцінки технічного стану обладнання ЕС, ЕП (в складі системи прийняття рішень) вимагає окремого розгляду, так як ефективність експлуатації обладнання багато в чому залежить від її структури. Для виявлення оптимальних рішень щодо подальшої експлуатації електричного обладнання ЕС, ЕП необхідно визначити не тільки оптимальну структуру системи оцінки технічного стану, а й сукупність критеріїв, на основі яких буде виконуватися ця оцінка.

Структура системи оцінки технічного стану електричного обладнання на ЕС розроблена відповідно до структури системи розподілу електричної енергії. Згідно [28] електрична станція - це установка, яка виробляє електричну енергію і складається з трансформаторних конструкцій та інших перетворювальних пристроїв, а також керуючої системи, пристроїв розподілу і інших конструкцій.

В рамках дослідження була розроблена структура системи оцінки технічного стану електрообладнання Дніпровської ГЕС, яка організована таким чином, що завдання оцінки стану обладнання розбивається на ряд окремих завдань за оцінкою стану кожного окремого виду обладнання. У свою чергу оцінка стану кожного окремого виду обладнання розбивається на ряд підзадач по оцінці стану його основних елементів.

Таким чином, оцінки стану, що формуються в ході рішення підзадач, складають показники більш високого рівня узагальнення, які в свою чергу служать базою для завдань наступного рівня ієрархії. Іншими словами, завдання оцінки технічного стану обладнання ЕС, ЕП можна охарактеризувати як завдання ієрархічної декомпозиції, в ході якої для вирішення кожної з підзадач формуються свої адаптивні системи нейро-нечіткого логічного висновку.

Інтегральна оцінка технічного стану обладнання виконується за сукупністю оцінок стану простих об'єктів (підоб'єктів), таких як:

- силовий трансформатор;
- трансформатор власних потреб;
- система релейного захисту та автоматики (РЗіА);
- вимикач;
- роз'єднувач;
- секції шин;
- вимірювальні трансформатори (струму і напруги);
- обмежувачі перенапруги тощо.

Математично оцінку стану обладнання можна уявити в наступному вигляді

$$SS = TR \cup OHL \cup CL \cup TSN \cup R \cup BUS \cup TA \cup TV, \quad (2.2)$$

де TR - множина оцінок стану (ОС) силових трансформаторів; OHL - множина ОС трансформаторів власних потреб; CL - множина ОС вимикачів; TSN - множина ОС роз'єднувачів; R - множина ОС секцій шин; Q - множина ОС вимірювальних трансформаторів; QR - множина ОС роз'єднувачів; BUS - множина ОС систем збірних шин; TA - множина ОС вимірювальних трансформаторів струму; TV - множина ОС вимірювальних трансформаторів напруги і т. д.

Для кожного простого об'єкта (підоб'єкту) проводиться своя оцінка стану за сукупністю оцінок стану його елементів. Наприклад, для силового вимикача

це:

- контактна система;
- дугогасильні камери;
- привід;
- корпус;
- вводи;
- внутрішня ізоляція;
- блок керування.

Математично оцінку стану простого об'єкта силовий вимикач (Q) можна представити в наступному вигляді

$$Q = CS \cup DK \cup M \cup T \cup B \cup P \cup CB, \quad (2.3)$$

де CS - ОС контактної системи; DK - ОС дугогасильні камери; M - ОС приводу; T - ОС корпусу; B - множина ОС вводів; P - ОС внутрішньої ізоляції; CB - ОС блоку управління і т.д.

Нейро-нечіткий логічний висновок в системі оцінки технічного стану обладнання ЕС, ЕП формується для оцінки технічного стану елементів простого об'єкта і вже на базі сукупності оцінок стану його елементів формується власна оцінка технічного стану простого об'єкта.

Усередині кожного виду обладнання підрозділяється на типи, для яких характерне різноманіття марок з різними характеристиками [29, 30].

Незважаючи на таку розгалужену ієрархію всередині кожного виду необхідність створювати окремі структури для кожного типу або марки обладнання окремо відсутня. Досить виділити всередині кожного виду кілька базових типів обладнання, принципово відрізняються один від одного за конструкцією, і далі на підставі вирішального правила визначати приналежність обладнання до існуючих типів при «вході» в систему оцінки стану.

Правило за допомогою якого приймають рішення - це алгоритм, за допомогою якого можна приймати рішення про належність об'єкта до класу за

певним безлічі наборів ознак і відповідного йому безлічі рішень, який в даному випадку є методом розпізнавання образу типу обладнання. Розробка вирішальних правил для різних типів обладнання є окремим завданням, що вимагає знань в області теорії розпізнавання образів і кібернетики, і в рамках даної магістерської роботи не розглядається.

Так як розроблена система оцінки стану на базі нейронечіткого логічного висновку відноситься до класу самонавчального і самоналаштованих систем, то в разі істотних відмінностей «вхідного» типу обладнання від базових вона, ґрунтуючись на них, самостійно формує власні типи і нову систему знань для них.

Наприклад, силові трансформатори можна класифікувати наступним чином:

- за типом силових трансформаторів:

- 1) автотрансформатори;
- 2) двох обмоточні трансформатори і двох обмоточні трансформатори з розщепленими обмотками нижчої напруги;
- 3) трьох обмоточні трансформатори.

- за типом електричних мереж:

- 1) мережі до 1 кВ;
- 2) розподільні мережі середньої напруги 6-35 кВ;
- 3) мережі високої напруги 110-220 кВ;
- 4) мережі надвисокої роздільної і ультрависокої напруги 330 кВ і вище.

- за типом системи охолодження:

- 1) сухі силові трансформатори;
- 2) маслонаповнені трансформатори з природною циркуляцією масла і природним обдувом;
- 3) маслонаповнені трансформатори з природною циркуляцією масла і примусовим обдувом;
- 4) маслонаповнені трансформатори з примусовою циркуляцією

масла і природним обдувом;

5) маслонаповнені трансформатори з примусовою циркуляцією масла та примусовим обдувом.

- за потужністю силових трансформаторів:

- 1) малої потужності;
- 2) середньої потужності;
- 3) великої потужності.

Слід зазначити, що зазначена вище класифікація представлена рядом ознак, що не відповідають вимогам незалежності категорій, оскільки між типом трансформатора, класом напруги мережі (від НН до ВН), системою охолодження і потужністю простежується пряма кореляція. На рисунку 2.2 показана узагальнена класифікація силових трансформаторів.

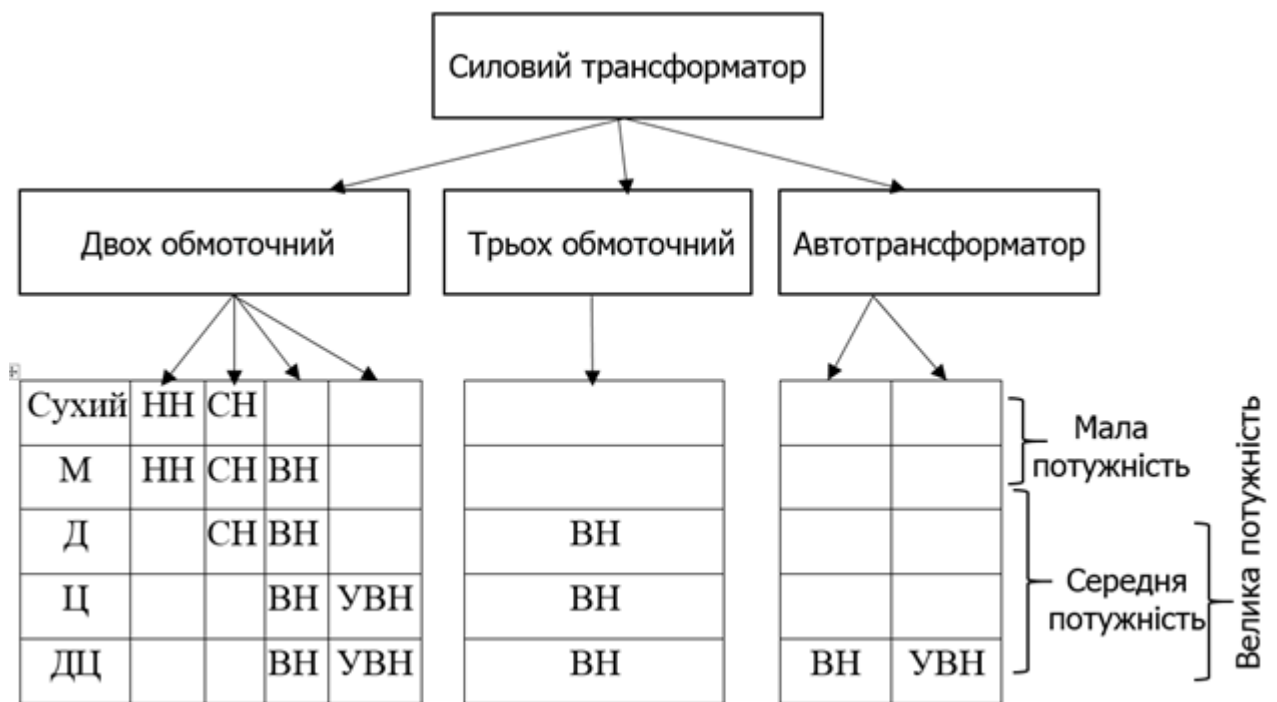


Рисунок 2.2 - Класифікація силових трансформаторів

Розподіл всіх трансформаторів по типу прийнято відповідно до особливостей конструкції їх активної частини і процесами передачі електричної енергії між обмотками. Однотипністю конструкції пояснюється об'єднання двох

обмоточних і двох обмоточних з розщепленням силових трансформаторів в одну групу.

Приналежність трансформаторів до типу електричної мережі дозволяє врахувати особливості режиму роботи нейтралі та її поведінку в аварійних режимах, клас ізоляції, а також особливості вихідної інформації про схемо-режимних параметрах електричної мережі, яка для різних класів напруги істотно відрізняється за обсягом і достовірністю.

Такі класифікаційні категорії як система охолодження і потужність силових трансформаторів необхідні для визначення їх електричного навантаження на і, як наслідок, оцінки відносної швидкості зносу і/або відносного зносу ізоляції, а також пов'язаних з цим питань оцінки резерву потужності при вирішенні задач оцінки стану. Крім того, вид системи охолодження багато в чому визначає доступний набір вихідної діагностичної інформації та вид застосовуваного інструментарію для оцінки технічного стану силового обладнання та його елементів.

Глибина деталізації об'єкта в розробляється характеризується станом сукупності елементів, що обумовлено призначенням розроблюваної системи і достатністю уявлення про основні властивості системи.

Деталізація розробленої системи виконана до рівня, коли для кожного елемента можуть бути визначені залежності його вихідних показників від вхідних параметрів, істотних з точки зору працездатності або непрацездатності обладнання.

Одним з можливих критеріїв (ознак) непрацездатного стану елемента (підоб'єкту), згідно з [31], є наявність несправностей (дефектів). Тому для визначення деталізації розробленої системи необхідно визначити можливі несправності для кожного елемента підоб'єкту, а також методи їх технічного діагностування.

Визначення сукупності елементів підоб'єкту на прикладі силового трансформатора 150 кВ. В рамках магістерського дослідження було виконано аналіз можливих видів несправностей силових трансформаторів, а також методів

їх діагностування з урахуванням сучасних вимог нормативної документації [32], описаних в [5, 35], на основі статистичних даних (аналіз трансформаторів Дніпровської ГЕС в період з 2003 по 2018 рр.). Результати зведені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 - Основні дефекти силових трансформаторів і методи їх визначення

Елемент	Вид дефекту	Метод діагностування
Магнітна система	Порушення лакової ізоляції між пластинами магнітопроводу	Вимірювання втрат холостого ходу; вимір рівня часткових розрядів
	Порушення ізоляції між магнітопроводом і елементами кріплення	Вимірювання втрат холостого ходу; вимір рівня часткових розрядів
	Порушення ізоляції між магнітопроводом і обмоткою нижчої напруги	Вимірювання опору ізоляції, ємності по зонам
	Обрив заземлення магнітопроводу	
	Несиметрія магнітної системи внаслідок деформації обмоток	Вимірювання втрат холостого ходу
Обмотка	Зрушення і деформація витків котушок	Вимірювання опору короткого замикання; Віброакустичний контроль
	Порушення з'єднань відводів обмоток	Вимірювання опору постійному струму
	Порушення з'єднань між обмотками	Вимірювання опору постійному струму
Тверда ізоляція	Пробій поздовжньої ізоляції (міжвитковий, міжкатушечний, міжшаровий)	Випробування ізоляції індуктуються напругою підвищеної частоти (100...250 Гц); опит холостого ходу

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
Тверда ізоляція	Знос	Зміна каламутності масла
	Зволоження	Оцінка вологості твердої ізоляції (не визначається за умови вологовмісту масла не більше 10 г / т)
Тверда ізоляція	Часткові розряди	Хроматографічний аналіз олії
	Зниження індексу полімеризації	Оцінка за наявності фуранових сполук в маслі і оцінка за ступенем полімеризації
Масло	Вологовмісткість	Хроматографічний аналіз масла і фізико-хімічний аналіз масла
	Вміст механічних домішок	
	Зміст шламу	
	Зміна електричних характеристик масла (пробивну напругу; тангенс кута діелектричних втрат)	
	Зміна кислотного числа	
	Зміна температури спалаху в закритому тиглі	
	Зміна тангенса кута діелектричних втрат	
	Зміна змісту водорозчинних кислот і лугів	
	Вміст іонола	
	Зміна вміст газ	
Система охолодження	Пошкодження ізоляції обмотки статора двигуна електронасоса	Вимірювання опору ізоляції після відключення
	Знос підшипників електронасосів	Прослуховування і вимір рівнів шумів і вібрацій
	Забруднення трубок охолоджувачів	Вимірювання перепаду температури масла на охолоджувачі

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
Високовольтні і вводи	Тріщини і відколи фарфорових ізоляторів	Тепловізійний контроль
	Забруднення зовнішньої поверхні ізоляторів	
	Текти масла (герметичність)	Випробування надлишковим тиском
	Зміна складу і змісту масла в вводах	Тепловізійний контроль
	Зміна електричних характеристик (тангенс кута діелектричних втрат, ємності)	Хроматографічний аналіз масла; фізико-хімічний аналіз масла
	Часткові розряди	
	Збільшення ємності основної ізоляції (С1)	Контроль під робочою напругою
Бак і допоміжні системи	Протікання бака по зварних швах і ущільнень	Випробування бака на щільність; тепловізійний контроль
	Підвищене нагрівання складових частин	Тепловізійний контроль
	Наявність короткозамкнених контурів	Вимірювання опору ізоляції між складовими частинами і баком
	Корозія, порушення лакофарбового покриття	Зовнішній огляд
	Дефекти ланцюгів захисної і контрольно-вимірювальної апаратури, встановленої на трансформаторі	Випробування захисної і контрольно-вимірювальної апаратури, встановленої на трансформаторі
Система регулювання під навантаженням	Протікання масла	Тепловізійний контроль; вимір рівня масла
	Погіршення характеристик масла і зволоження ізоляції	Визначення вмісту вологи масла

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
Система регулювання під навантаженням	Порушення контактів	Вимірювання опору постійному струму
Зовнішні контактні з'єднання	Нагрів контактів в місцях кріплення (з'єднання) до введення	Тепловізійний контроль

На основі представленого аналізу підтверджується правильність обраної деталізації підоб'єкту трансформатор 150 кВ, так як для кожного можливого виду несправності існує метод його діагностування, що дозволяє виконати оцінку кожного елемента підоб'єкту, і на основі сукупності оцінок всіх елементів виконати оцінку стану підоб'єкту.

2.2 Нечітке та нейро-нечітке моделювання технічного стану електрообладнання ГЕС

Нейро-нечіткий логічний висновок - один з небагатьох методів, який допускає неточність, невизначеність і неповну істинність оброблюваних даних і реалізується на основі узагальненого використання методів нечіткої логіки і методів штучних нейронних мереж (ШНМ).

Застосування методів нечіткої логіки обумовлено прикладним характером завдання оцінки технічного стану обладнання, коли необхідно оперувати не тільки чисельними даними, але і лінгвістичними, наприклад, такими як «стан обладнання» і т.п. Крім того, використання апарату нечітких множин дозволяє адекватно формалізувати знання експертів.

Використання методів ШНМ обумовлено їх основною перевагою - можливістю навчання (самонавчання), що дозволяє шляхом об'єднання в навчальній вибірці експертних знань і аналітичних залежностей ідентифікувати

неоднозначні параметри (діагнози) електрообладнання. Така структура дозволяє скористатися перевагами обох методів при вирішенні завдання ОТС обладнання.

Застосування методів ШНМ і нечіткої логіки в енергетиці України на даний момент, як правило, вичерпується прогнозуванням навантаження і оцінкою стійкості енергосистем. Тим часом використання нейро-нечіткого логічного висновку для вирішення даної задачі є досить обґрунтованим.

В даний час найбільш поширені види нейро-нечіткого логічного висновку, створені Мамдані, Такагі-Сугено, Цукамото, і Ларсена.

Для моделювання багатопараметричних задач, до яких відноситься і задача ОТС обладнання, доцільно використовувати алгоритм Такагі-Сугено. При цьому експертна складова забезпечує змістовну інтерпретацію моделі, а аналітичні залежності «входи-вихід» роблять її компактною. Також загально визнано, що алгоритм Такагі-Сугено є універсальним апроксиматором функцій, що при великій кількості вхідних параметрів також стає перевагою даного методу в порівнянні з іншими алгоритмами нейро-нечіткого логічного висновку.

Висновки правил в нечіткому логічному висновку Такагі-Сугено подаються не у вигляді належності вихідної змінної до нечітким множинам, а в формі функціональних залежностей

$$R^{(k)}: \text{если } (x_1 \text{ есть } D_1^k \text{ И... И } x_N \text{ есть } D_N^k), \text{ то } y = f^{(k)}(x_1, \dots, x_N), \quad (2.4)$$

де $R^{(k)}$ нечіткі правила, а $k = 1, \dots, K$; K - кількість нечітких правил; D_i^k - нечітка множина, где $D_i^k \in X_i \subset \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, N$; $x_1 \dots x_N$, - вхідні змінні; y - вихідна змінна, яка представляє собою функцію вхідних змінних. В результаті використання даної моделі була реалізована мережа необхідної структури.

У логічному висновку Такагі-Сугено в якості заключного правила використовується лінійна функція від вхідних змінних

$$y_i(x) = p_{i0} + \sum_{j=1}^N p_{ij}x_j, \quad (2.5)$$

де N - кількість параметрів безлічі X ; $p_{i0}, p_{i1}, \dots, p_{iN}$ - параметри полінома Такагі-Сугено.

Формування функцій приналежності

При формуванні системи нейро-нечіткого виводу на основі алгоритму Такагі-Сугено для кожної вхідної змінної задається діапазон значень за допомогою функції приналежності (ФП). В даному випадку кожна змінна x визначається ФП. Залежно від типу елемента, види граничних значень, методу діагностування і т.п. тип і кількість ФП можуть бути різними. Визначення оптимального виду і числа ФП є окремим завданням в рамках завдання ОТС електрообладнання.

Формування навчальної вибірки

Як уже згадувалося, однією з переваг ШНМ є можливість навчання. Для цього в системі нейро-нечіткого виводу формується навчальна вибірка. Обсяг навчальної вибірки і її якість також впливають на результати роботи системи, тому, перш ніж перейти до використання нейро-нечіткого виводу, необхідно виконати попередній аналіз навчальної вибірки на повноту і репрезентативність.

Формування вихідної навчальної вибірки для будь-якого завдання, в тому числі і завдання ОТС обладнання, зводиться до оптимізації цієї вибірки. Розглянемо задачу формування навчальної вибірки на прикладі використання діагностичних даних про стан обладнання. В цьому випадку навчальна вибірка - це сукупність даних, отриманих в ході експлуатації обладнання за участю експертів для постановки діагнозів. Вона включає результати випробувань, діагностування і т.п. і дані нормативної документації про регламентованих значеннях параметрів обладнання. Дані нормативної документації в розробленій моделі виражаються у вигляді нечітких продуктивних правил («якщо A є умова ...», «то B є висновок»), в яких умови і укладення правил представлені в формі

нечітких висловлювань щодо значень відповідних змінних.

Для будь-якого виду обладнання існує кілька варіантів формування вихідної навчальної вибірки:

1. У разі відсутності ретроспективної інформації у вигляді діагностичних даних про даному об'єкті (неповна і недостовірна інформація) вибірка формується на основі діагностичних даних по аналогічних об'єктів порівнянної потужності і однотипної конструкції;

2. При наявності діагностичних даних про даному об'єкті (неповна достовірна інформація) вибірка формується на основі наявних діагностичних даних з використанням діагностичних даних по аналогічних об'єктів порівнянної потужності і однотипної конструкції;

3. У разі, коли ретроспективна інформація представлена не у вигляді діагностичних даних, а у вигляді даних вимірювань без постановки діагнозів, наприклад з датчиків (повна недостовірна інформація), таку інформацію необхідно попередньо перевірити на наявність «викидів». Фільтрація даних дозволяє вважати даний вид інформації повної і достовірної.

На основі численних розрахунків в ході виконання магістерського дослідження було визначено, що оптимальним методом для фільтрації викидів в часі ряду є метод змінного середнього. Для визначення викидів в простій незалежної статистичної вибірці оптимальним для вирішення представленої задачі є критерій «3σ». Тільки після обробки вхідних даних (виключення викидів для третього варіанту вибірки) можна використовувати навчальну вибірку в сукупності з діагностичними даними по аналогічних об'єктів порівнянної потужності і однотипної конструкції.

Представлений принцип формування навчальної вибірки застосуємо для будь-якої доступної інформації про аналізованому об'єкті.

Структура нейро-нечіткого виводу і алгоритм її роботи

На рисунку 2.3 представлена узагальнена структура нейро-нечіткого логічного висновку для ОТС обладнання. На вхід системи надходить набір параметрів $X_n = (x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nk})$ про аналізованому об'єкті, що

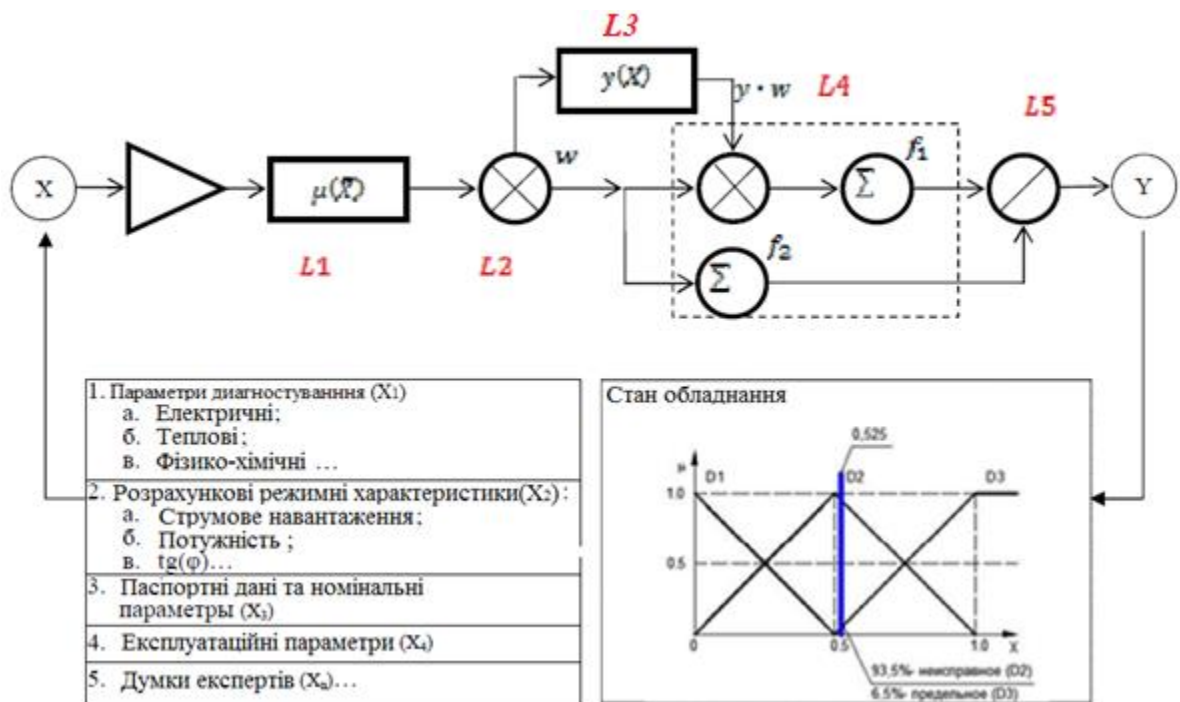


Рисунок 2.3 - Узагальнена структура нейро-нечіткого логічного висновку рішення і дії, що управляють

визначаються Z_n методом, в ході якого отримано даний набір параметрів X_n (діагностика, випробування, дані АСКОВЕ, телевимірювань і т.д.). При цьому нейро-нечіткий логічний висновок формується тільки на етапі ОТС кожного елемента об'єкта. Згідно з розробленою технологією для кожної групи параметрів підбирається свій набір функцій приналежності $\mu(\bar{X})$.

У відповідності до системи нейро-нечіткого виводу на основі алгоритму Такагі-Сугено мережу буде складатися з 5 шарів.

На першому шарі виконується фазифікація вхідних параметрів обладнання. Перетворення вхідних даних в нечіткі змінні здійснюється за допомогою ФП, механізм визначення числа і виду ФП описаний вище.

На другому шарі здійснюється агрегування підумови, тобто визначення ступеня істинності умов для кожного правила в системі нейро-нечіткого виводу - мінімізація значень всіх підумови. Характеристичні функції $\mu(\bar{X})$ визначають

вагові коефіцієнти w .

Третій шар містить алгоритм навчання, в ході якого коригуються ваги полінома. У даній моделі використовується метод гібридного навчання, що поєднує метод зворотного поширення помилки з методом найменших квадратів. Також на третьому шарі визначається вихідна агрегована функція $y(X)$, згідно виразу (2.5), що характеризує безліч параметрів X . В ході дії алгоритму $y(X)$ підлягає коригуванню за допомогою зміни вагових коефіцієнтів w , визначених на попередньому шарі.

Четвертий шар складається з двох нейронів-суматорів: перший відповідає за активацію або композицію підзаключень (перехід від умов до підзаключень і визначення ступеня істинності кожного з підзаключень), другий - за акумулювання нечітких правил.

На п'ятому шарі виконується дефазифікація вихідних параметрів - перехід від ФП вихідний лінгвістичної змінної до її числовим значенням. Підсумковий результат агрегується шляхом розрахунку середньозважених функцій $y(X)$ з урахуванням безлічі w відповідно до виразу (2.6), в результаті формується ОТС елемента обладнання

$$y(x) = f_1/f_2 = \frac{\sum_{i=1}^N w_i y_i(x)}{\sum_{i=1}^N w_i}, \quad (2.6)$$

В результаті ОТС кожного елемента обладнання на основі розрахунку середньозважених оцінок і за допомогою ФП формується підсумкова ОТС для визначення стану підоб'єкту.

Далі представлений загальний принцип формування ОТС простого об'єкту. В даному випадку ФП трикутної форми: $\mu_i(x) \in R \rightarrow [a; c]$, де R - безліч дійсних чисел, $[a; c]$ - діапазон зміни параметрів змінної, b - найбільш можливе значення змінної, яке задається аналітичною формулою

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (2.7)$$

У цьому завданні в результаті ОТС підоб'єкту визначається приналежність підоб'єкту до одного з трьох станів, які наведені рисунку 2.4. Як правило, можна виділити три можливих стану обладнання:

- справний стан D_1 , коли підоб'єкти повністю відповідає всім технічним вимогам (працездатне);

- несправне, але працездатний стан D_2 , коли технічним вимогам відповідають лише ті властивості підоб'єкту, які характеризують його здатність виконувати задані функції;

- граничний стан D_3 , при якому його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна з різних причин.

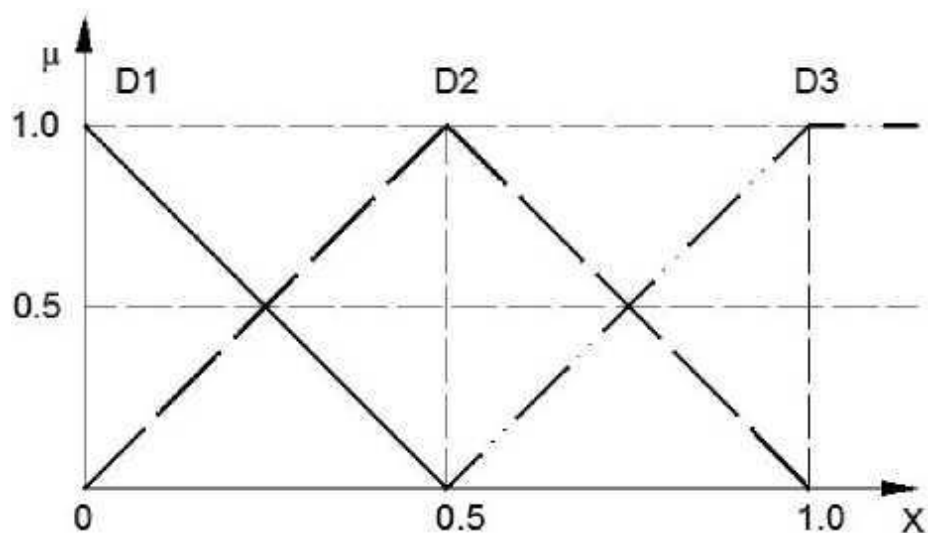


Рисунок 2.4 - ФП стану обладнання

У розробленій системі ОТС обладнання алгоритм Такагі-Сугено використовується для попередньої класифікації несправностей елемента або

визначення його стану. Слід зазначити, що оскільки розроблена система позиціонується як «помічника-радника» для персоналу, то будь-яка підсумкова ОТС підоб'єкту відповідає певним ранжируваною альтернативам рішень щодо його подальшої експлуатації. Можливі рішення визначаються з використанням ФП, наведені рисунку 2.5 і можуть бути наступними:

- залишити в експлуатації (E_1);
- провести додаткові випробування або вимірювання (E_2);
- виконати ремонт (E_3);
- вивести з експлуатації (E_4).

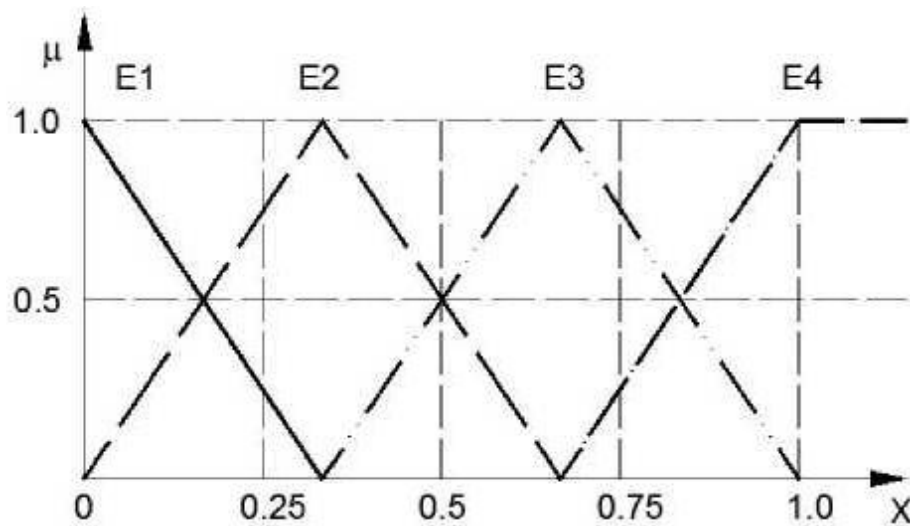


Рисунок 2.5 - ФП сукупності рішень

Іншими словами, другий етап можна класифікувати як нечітку багатокритеріальне завдання аналізу безлічі приватних рішень $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, що містить n елементів (груп параметрів), які отримані на попередньому етапі.

3 РОЗРОБЛЕННЯ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

3.1 Визначення структури нейро-нечіткої моделі оцінювання технічного стану електрообладнання ГЕС

Використання стандартних математичних методів на жорсткій алгоритмічній основі для розв'язання задачі оцінки технічного стану електричного обладнання та прийняття рішень про їх подальшу експлуатацію може дати незадовільні результати. Це пов'язано зі складністю аналізованих об'єктів і тим, що при вирішенні поставлених завдань доводиться оперувати великим обсягом вхідних даних не тільки числового формату, а й лінгвістичного, для яких характерні невизначеність, неповнота і відсутність можливості формальної структуризації.

Для вирішення поставлених завдань необхідні методи, здатні реалізувати таку функцію людського інтелекту, як вибір оптимального рішення на основі раніше отриманого досвіду і раціонального аналізу всієї доступної інформації про об'єкт дослідження. Існують різні інтелектуальні системи, але найбільш поширеними можна назвати наступні:

- штучні нейронні мережі (ШНМ) - математична модель біологічних нейронних мереж і нейронів людського мозку, що описує принципи їх організації та функціонування [39];

- системи евристичного пошуку (генетичні алгоритми) - це алгоритми, використовувані для вирішення завдань оптимізації та моделювання, засновані на генетичних процесах, аналогічних для біологічних організмів [40];

- системи, засновані на знаннях (експертні системи; системи логічного висновку), тобто системи, побудовані на правилах, що зберігаються в базі знань, за допомогою яких на основі сукупності вихідних фактів здійснюється пошук рішень і висновків з цих фактів.

Серед перерахованих методів найбільший інтерес для поставлених в роботі задач являють системи, засновані на знаннях, оскільки мова йде про

необхідність висновків з вихідних фактів і пошуки рішень для контролю обладнання ГЕС.

Системи логічних висновків умовно можна розділити на два основних напрямки - чіткі і нечіткі висновки [41]. Чіткі логічні висновки побудовані на теорії чітких множин. Нечіткі логічні висновки (нейро-нечіткі логічні висновки) побудовані на теорії нечіткої логіки, і являють собою процеси отримання нечітких висновків за допомогою нечітких умов або передумов про об'єкт дослідження на основі інформації про його поточний стан [42]. Нечітка безліч - це математична формалізація нечіткої інформації, представлена безліччю елементів, що володіють загальною властивістю в різного ступеня і належать до даного безлічі з різним ступенем.

Нейро-нечіткий логічний висновок - один з небагатьох методів, який допускає неточність, невизначеність і неповну істинність оброблюваних даних і реалізується на основі узагальненого використання методів нечіткої логіки і методів штучних нейронних мереж (ШНМ).

Застосування методів нечіткої логіки обумовлено прикладним характером завдання оцінки технічного стану обладнання, коли необхідно оперувати не тільки чисельними даними, але і лінгвістичними, наприклад такими, як «стан обладнання» і т.п. Класифікація станів, їх кількість і уявлення можуть відрізнитися в залежності від призначення.

Крім того, використання апарату нечітких множин дозволяє адекватно формалізувати знання експертів, які можуть бути неповними і/або суб'єктивними.

Використання методів ШНМ обумовлено їх основною перевагою - можливістю навчання (самонавчання), що дозволяє шляхом об'єднання в навчальній вибірці експертних знань і аналітичних залежностей при оцінці стану ідентифікувати неоднозначні параметри (діагнози) електрообладнання.

Така структура дозволяє скористатися перевагами обох методів при вирішенні задачі оцінки технічного стану обладнання.

Застосування методів ШНМ і нечіткої логіки в енергетиці на даний

момент, як правило, вичерпується прогнозуванням навантаження (електроспоживання) [43], оцінкою стійкості енергосистем. Тим часом використання нейро-нечіткого логічного висновку для вирішення даної задачі є досить обґрунтованим і актуальним.

В даний час найбільш поширені наступні види нейро-нечіткого логічного висновку: Мамдані, Такагі-Сугено, Цукамото і Ларсена. Алгоритми цих нейро-нечітких логічних висновків розрізняються видом використовуваних правил, методом дефазифікації і формою результату.

Для моделювання багатофакторних задач, до яких відноситься і задача оцінки технічного стану обладнання, доцільно використовувати алгоритм Такагі-Сугено. Саме цей алгоритм дозволяє об'єднати в моделі експертні знання та аналітичні залежності при оцінці технічного стану обладнання Дніпровської ГЕС. Експертна складова забезпечує змістовну інтерпретацію моделі, а аналітичні залежності «входи - вихід» роблять її компактною.

Також загально визнано, що алгоритм Такагі-Сугено є універсальним апроксиматором функцій, що при великій кількості вхідних параметрів також стає перевагою даного методу в порівнянні з іншими алгоритмами нейро-нечіткого логічного висновку.

Висновки правил в нечіткому логічному висновку Такагі-Сугено подаються не у вигляді належності вихідної змінної до нечітким множинам, а в формі функціональних залежностей

$$R^{(k)}: \text{якщо } (x_1 \in D_1^k \text{ I } \dots \text{ I } x_N \in D_N^k), \text{ то } y = f^{(k)}(x_1, \dots, x_N), \quad (3.1)$$

де $R^{(k)}$ - нечіткі правила, а $k = 1, \dots, K$; k - кількість нечітких правил; D_i^k - нечіткі множини, $D_i^k \in X_i \subset \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, N$; x_1, \dots, x_N - вхідні змінні; y - вихідна змінна, що представляє собою функцію вхідних змінних.

В результаті застосування даної моделі була реалізована нечітка нейронна мережа необхідної конструкції.

У логічному висновку Такагі-Сугено в якості заключного правила

використовується лінійна функція від вхідних змінних

$$y_i(x) = p_{i0} + \sum_{j=1}^N p_{ij}x_j, \quad (3.2)$$

де N - кількість параметрів множини x ; $p_{i0}, p_{i1}, \dots, p_{iN}$ - параметри полінома Такагі-Сугено.

3.2 Синтез нейро-нечіткої моделі оцінювання технічного стану електрообладнання ГЕС

Нейро-нечіткий логічний висновок формується на етапі оцінки технічного стану кожного елемента підоб'єкту. На рисунку 3.1 представлена узагальнена структура нейро-нечіткого логічного висновку для оцінки технічного стану електричного обладнання.

На вхід гібридної системи надходить вектор параметрів (будь-яких доступних) $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ аналізованого підоб'єкту, який визначається методом отримання $Z = \{z_1, \dots, z_n\}$ (діагностика, випробування, дані телевимірювань і т.п.). Формується база правил $K = \{k_1, \dots, k_n\}$ системи нечіткого логічного висновку на основі нечітких правил продукції, описаних (10).

Згідно з розробленою технологією для кожної групи параметрів підбирається колекція функцій приналежності $\mu(\bar{X})$.

У відповідності до системи нейро-нечіткого виводу на основі алгоритму Такагі-Сугено мережу буде складатися з 5 шарів, як представлено на рисунку 3.1.

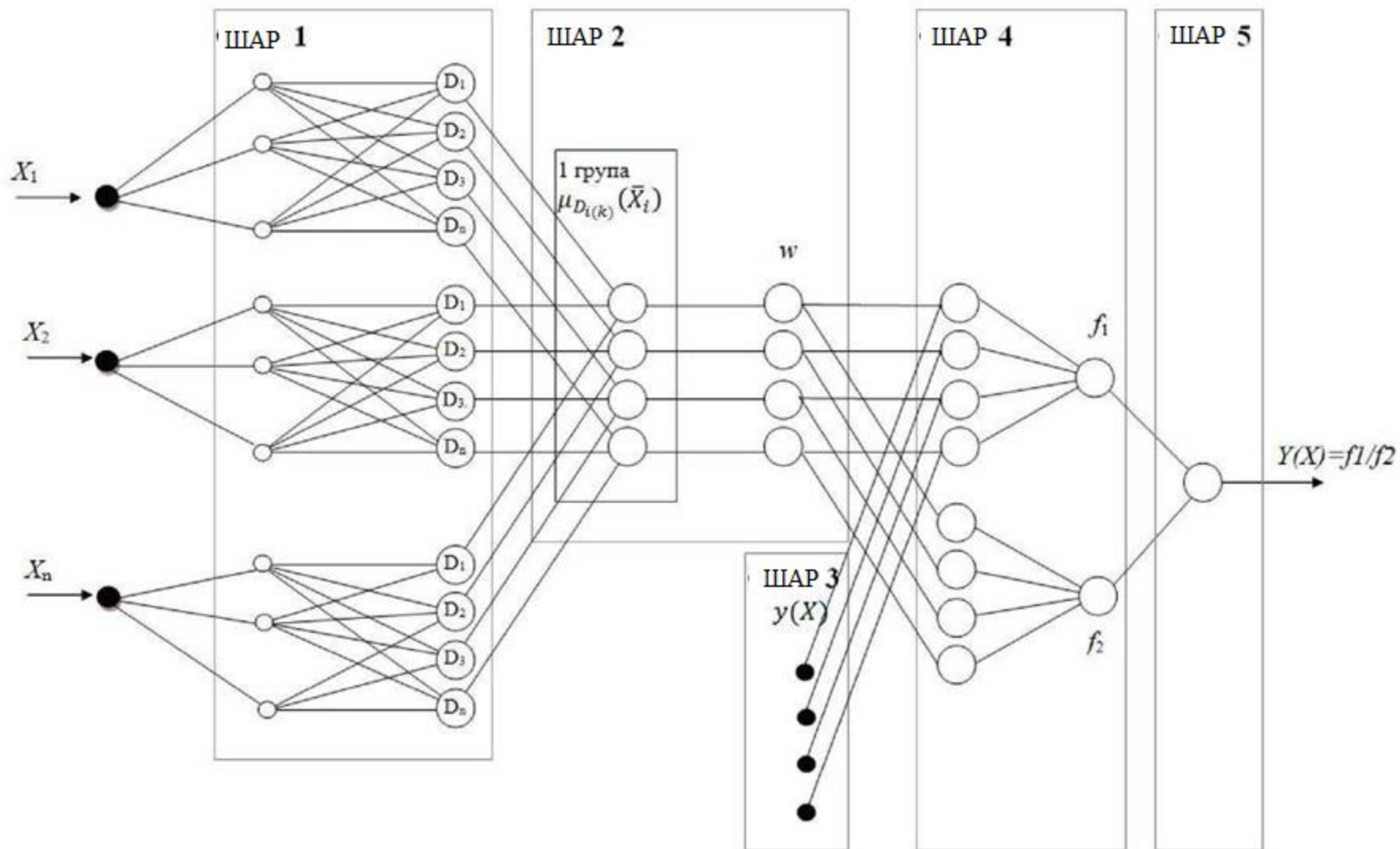


Рисунок 3.1 - Узагальнена структура нейро-нечіткого логічного висновку

На першому шарі виконується фазифікації вхідних параметрів обладнання - перетворення вхідних даних в нечіткі змінні за допомогою функцій належності для визначення відповідності вхідних даних термам лінгвістичних змінних.

На другому шарі здійснюється агрегування підумов, тобто визначення ступеня істинності умов для кожного правила в системі нейро-нечіткого виводу - мінімізація значень всіх підумов. На другому шарі визначається результуюче значення коефіцієнта приналежності $w_i = \mu_{D_i(k)}$. Характеристичні функції $\mu(\bar{X})$ визначають вагові коефіцієнти w .

Третій шар містить алгоритм навчання, в ході якого коригуються ваги полінома. У даній моделі використовується метод гібридного навчання, що поєднує метод зворотного поширення помилки з методом найменших квадратів. У методі зворотного поширення помилки відбувається поширення помилки від виходів мережі до входів, в напрямку, протилежному поширенню сигналів у нормальному режимі роботи. Метод найменших квадратів - математичний метод, застосовуваний для вирішення різних завдань, який заснований на мінімізації відхилень суми квадратів деяких функцій від шуканих змінних.

Також на третьому шарі визначається вихідна агрегована функція $y(X)$, що характеризує безліч параметрів X . В ході дії алгоритму функція $y(X)$ підлягає коригуванню за допомогою зміни вагових коефіцієнтів w , визначених на попередньому шарі.

Четвертий шар складається з двох нейронів-суматорів: перший відповідає за активацію або композицію підзаключень (перехід від умов до підзаключень і визначення ступеня істинності кожного з підзаключень), другий - за акумулювання нечітких правил продукції (процес знаходження нейро-нечіткої множини або їх об'єднання для кожної з вхідних змінних всіх ступенів істинності підзаключень для отримання функції приналежності кожної з вихідних змінних).

На п'ятому шарі виконується дефазифікація вихідних параметрів - перехід від функції належності вихідної лінгвістичної змінної до її чіткому (числовому) значенням.

Іншими словами, підсумковий результат агрегується шляхом розрахунку середньозважених функцій $y(x)$ з урахуванням безлічі ваг w відповідно до вираження

$$y(x) = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i y_i(x)}{\sum_{i=1}^N w_i}, \quad (3.3)$$

в результаті чого і формується оцінка технічного стану елемента обладнання.

Як вже говорилося, на першому шарі системи нейро-нечіткого виводу на основі алгоритму Такагі-Сугено для кожної вхідної змінної задається діапазон значень за допомогою функції приналежності (фазифікації вхідних параметрів). У нечіткої логіки функція приналежності характеризує ступінь приналежності кожного члена простору міркування до даного нечітких множин, таким чином, в даному випадку кожна змінна X визначається функцією приналежності.

Залежно від типу об'єкта, виду граничних значень (односторонній або двосторонній діапазон), методу діагностики тощо тип і кількість функцій належності можуть бути різними. Визначення оптимального виду і числа функцій приналежності - окремі завдання оцінки технічного стану електрообладнання.

База нечітких продукційних правил системи нечіткого виведення - це система нечітких продукційних правил, що відображає знання експертів про методи управління об'єктом в різних ситуаціях, характер його функціонування в різних умовах і т.п., тобто містить формалізовані людські знання.

Найпростіший варіант правила нечіткої продукції, який найбільш часто використовується в системах нечіткого виведення, може бути записаний у наступній формі

$$\text{«Якщо } \beta_1 \in \alpha' \text{ », тоді } \beta_2 \in \alpha \text{»}, \quad (3.4)$$

де нечітке висловлювання « $\beta_1 \in \alpha'$ » є умовою даного правила нечіткої

продукції, а нечітке висловлювання « $\beta_2 \in \alpha$ » - нечітке закінчення даного правила. При цьому вважається, що $\beta_1 \neq \beta_2$.

Для кожного параметра, що описує стан аналізованого об'єкта, важливо визначити кількість функції приналежності (діапазонів значень), найкращим чином характеризує даний параметр. Для цього необхідно виходити з даної задачі і необхідної точності опису в розглянутій задачі.

Для кожного параметра, що описує стан аналізованого об'єкта, також важливо визначити вид функції приналежності, найкращим чином характеризує даний параметр.

Розглянемо так звані стандартні функції приналежності. Стандартні функції приналежності легко застосовні до вирішення більшості завдань.

Виділяють такі типові функції приналежності:

- кусково-лінійні - набір відрізків прямих ліній, що утворюють безперервну або кусково-неперервну функцію;
- гаусові - визначені на основі гаусового розподілу;
- сигмовидні криві і т. д.

Приклади кусково-лінійних функцій приналежності наведені на рисунку 3.2, де трикутна (а) і трапецієвидна (b).

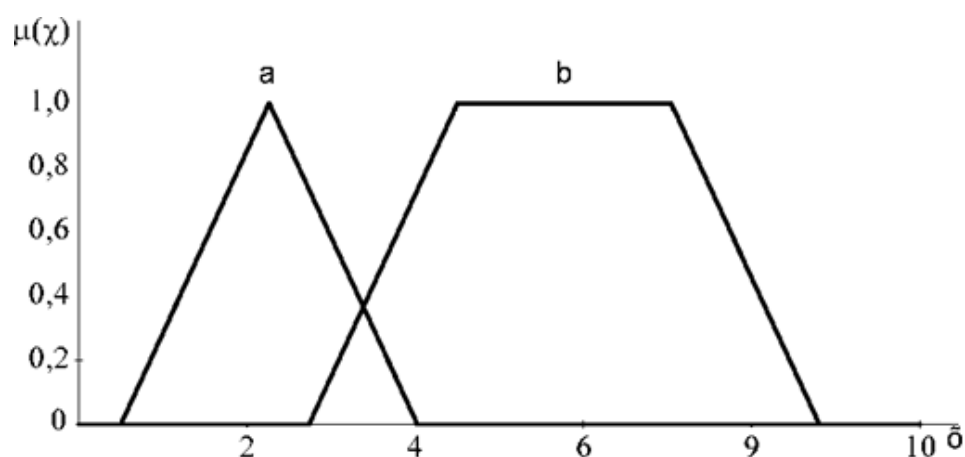


Рисунок 3.2 - Кусково-лінійні функції приналежності

У загальному вигляді трикутні функції приналежності аналітично можна представити таким чином

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}, \quad (3.5)$$

де a, b, c - довільні значення, за умови, що $a \leq b \leq c$.

У загальному вигляді трапецієподібні функції приналежності аналітично можна представити таким чином

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}, \quad (3.6)$$

де a, b, c, d - довільні значення, за умови, що $a \leq b \leq c \leq d$.

Z-образна (c) і S-образна (d) функції приналежності являють собою сплайн-функції (див. рис. 3.3).

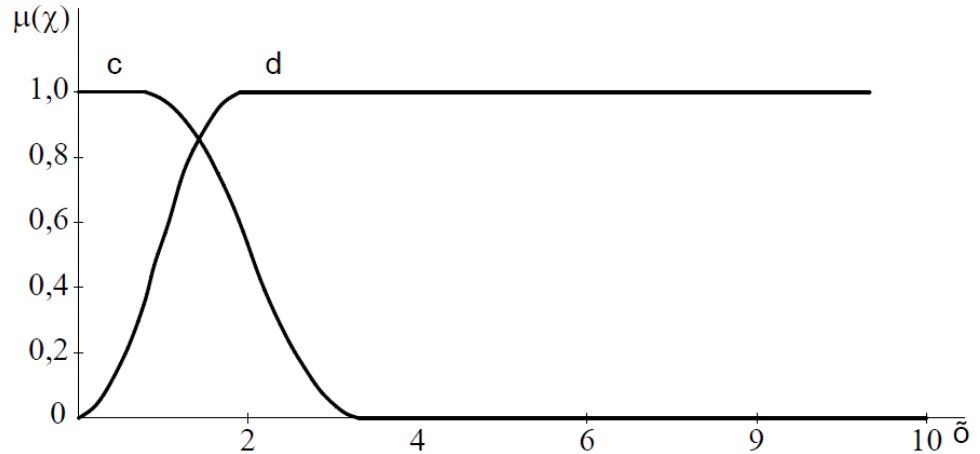


Рисунок 3.3 - Z-образна і S-образна функції приналежності

У загальному вигляді Z-образну функцію приналежності аналітично можна представити таким чином

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x-a}{b-a} \pi\right), & a \leq x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases}, \quad (3.7)$$

де a, b - довільні значення, за умови, що $a < b$.

S-образну функцію приналежності в аналітичному вигляді можливо представити таким чином

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x-b}{b-a} \pi\right), & a \leq x \leq b \\ 1, & x > b \end{cases}, \quad (3.8)$$

де a, b - довільні значення, за умови, що $a < b$.

Окремими випадками Z-образної і S-образної функцій приналежності є їх лінійні функції. Лінійна S-образна функція в аналітичному вигляді

представляється як

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \geq x \end{cases}, \quad (3.9)$$

де a, b - довільні значення, за умови, що $a < b$.

Лінійна Z-образна функція в аналітичному вигляді представляється як

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & b \leq x \end{cases}, \quad (3.10)$$

де a, b - довільні значення, за умови, що $a < b$.

Трикутні і трапецієподібні функції приналежності можуть бути побудовані за допомогою лінійних Z-образної і S-образної функцій приналежності.

До окремої групи можна віднести П-подібні функції приналежності: дзвоноподібну, наведену на рисунку 3.4 і гаусові функції приналежності, що наведена на рисунку 3.5.

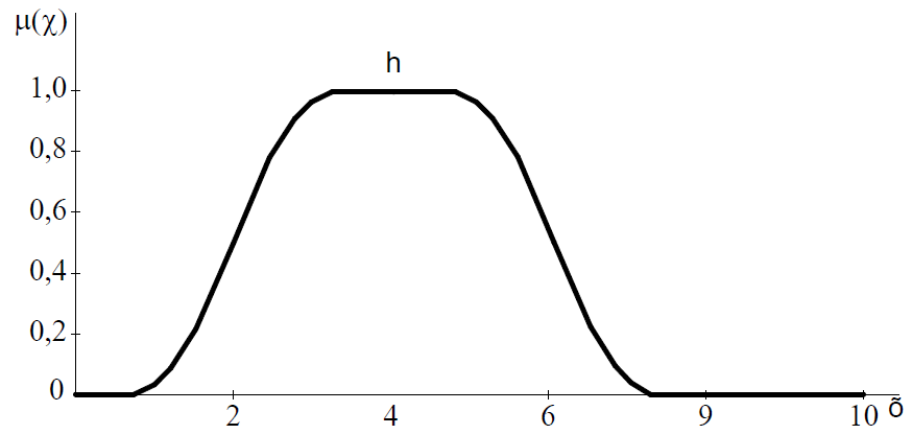


Рисунок 3.4 - Дзвоноподібна функція приналежності

Загалом вигляді дзвоноподібна функція приналежності можна представити таким чином

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}}, \quad (3.11)$$

де a, b, c - довільні значення, за умови, що $a < b < c$ і $b > 0$.

Також П-подібні функції приналежності можуть бути побудовані за допомогою Z-образної і S-образної функцій приналежності.

Гаусові функції приналежності бувають двох видів - симетрична гаусова (e) і двостороння гаусова (f). Вони формуються з використанням гаусова розподілу.

Аналітично симетричну гаусову функцію приналежності можна представити таким чином

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}. \quad (3.12)$$

Двосторонню гаусову функцію (див. рис. 3.5) приналежності аналітично можливо уявити як

$$\mu(x) = \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(\frac{(x-c_1)^2}{(-2a_1^2)^2}\right), x < c_1 \\ 1, c_1 \leq x \leq c_2 \\ \exp\left(\frac{(x-c_2)^2}{(-2a_2^2)^2}\right), x > c_2 \end{array} \right\}, \quad (3.13)$$

де a_1, a_2, c_1, c_2 - довільні значення, за умови, що $c_1 < c_2$.

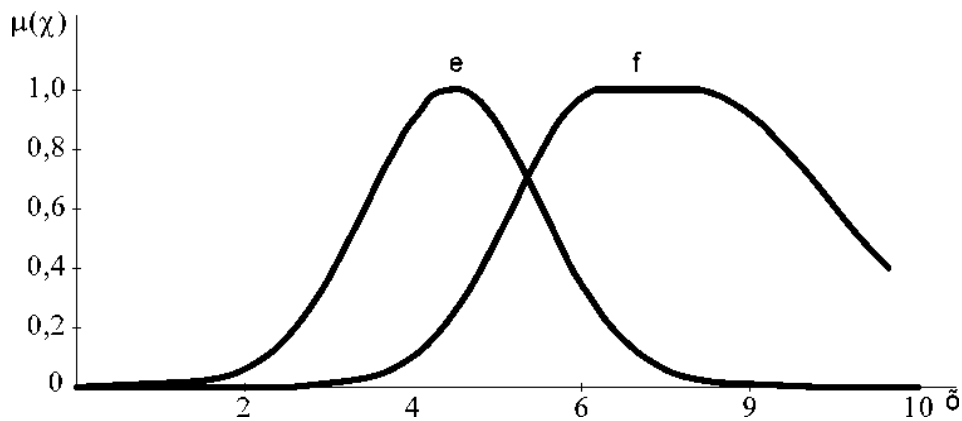


Рисунок 3.5 - Гаусові функції приналежності

За допомогою двосторонньої гаусової функції приналежності можна використовувати асиметричні функції приналежності.

Якщо $c_1 < c_2$, то гаусову функцію приналежності аналітично можна представити таким чином

$$\mu(x) = \left\{ \begin{array}{l} \exp\left(\frac{(x-c_1)^2}{(-2a_1^2)^2}\right), x < c_2 \\ \exp\left(\frac{(x-c_1)^2}{(-2a_1^2)^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{(x-c_2)^2}{(-2a_2^2)^2}\right), c_2 \leq x \leq c_1 \\ \exp\left(\frac{(x-c_2)^2}{(-2a_2^2)^2}\right), x > c_1 \end{array} \right\}. \quad (3.14)$$

Сігмоїдна функція, що наведена на рисунку 3.6, будується з використанням сігмоїдної кривої. У загальному вигляді сігмоїдну функцію приналежності (n) можна представити таким чином

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (3.15)$$

Добуток двох сігмоїдних функцій (n) приналежності виглядає наступним чином

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + e^{-a_1(x-c_1)}} \cdot \frac{1}{1 + e^{-a_2(x-c_2)}} \quad (3.16)$$

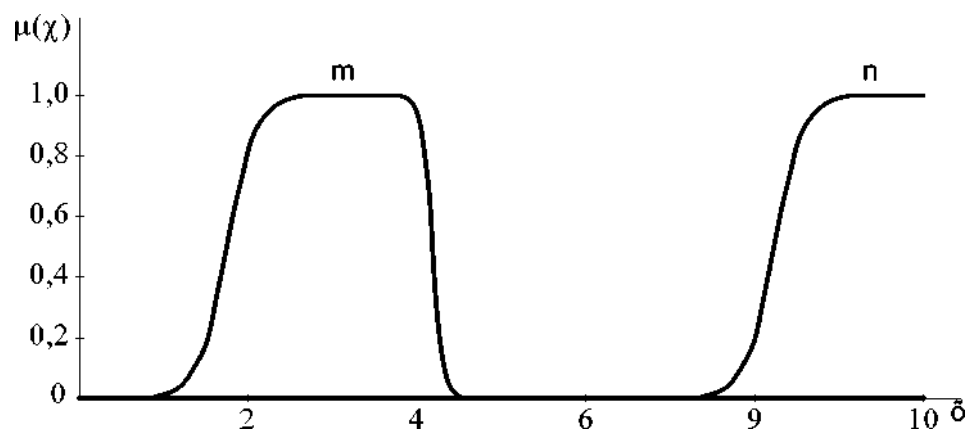


Рисунок 3.6 - Сігмоїдні функції приналежності

Однак якщо доведеться вирішувати специфічне завдання, можна вибрати і більш відповідну форму функції приналежності, при цьому можна добитися кращих результатів роботи системи, ніж при використанні функцій стандартного виду.

Всі методи побудови функцій приналежності умовно можна розділити на два види: прямі і непрямі. Прямі методи реалізуються на основі експертного завдання виду функцій приналежності. До прямих методів можна віднести метод

статистичної обробки експертної інформації. Істотними недоліком такого методу є його орієнтація на переважно суб'єктивну інформацію про процес і/або явище і обов'язковому прийнятті припущень при перетворенні даної інформації в ступені належності нечітких множин.

Непрямі методи передбачають вибір функцій приналежності, заздалегідь які відповідають сформульованим умовам. Слід зазначити, що експертна інформація має статус первинної, що передбачає подальшу обробку, в тому числі з урахуванням додаткових умов. Додаткові умови можуть накладатися як на вигляд одержуваної інформації, так і на процедури її обробки. Найбільш поширеним серед непрямих є метод парних порівнянь, в результаті застосування якого формується матриця парних порівнянь. Основним недоліком даного методу є складність виконання порівнянь в разі оцінювання великого числа варіантів.

Крім методу парних порівнянь в ряді випадків представляє інтерес метод ідентифікації функцій приналежності на базі визначення за експериментальними даними нечітких моделей типу «входи - вихід». Такий метод дозволяє вирішити задачу формалізації вихідної інформації, хоча висуває підвищені вимоги до навчальної вибірки і моделі типу «вхід-вихід» [45, 46].

В окрему групу можна виділити методи визначення функцій приналежності за допомогою кластеризації. У загальному випадку під кластеризацією мається на увазі об'єднання об'єктів в групи (кластери) на основі однотипності будь-яких ознак для об'єктів однієї групи і відмінностей цих ознак між групами. Більшість існуючих алгоритмів кластеризації не вимагає прийняття припущень, властивих, наприклад, статистичних методів.

Завдання кластеризації полягає у визначенні природного розбиття даних на класи незалежно від суб'єктивного судження експерта. Найважливішою особливістю методів кластеризації є їх використання в умовах відсутності будь-якої інформації про закони розподілу даних [46]. Слід зазначити, що кластеризація може бути виконана для об'єктів як з якісними, так і кількісними або навіть змішаними ознаками.

Методи кластеризації діляться на чіткі і нечіткі. Завдання чітких методів кластеризації полягає в розбитті безлічі вихідних об'єктів X на кілька непересічних множин $Yx \in X \rightarrow umY$. Слід зазначити, що кожен об'єкт $x \in X$ належить тільки одному кластеру umY . У свою чергу нечіткі методи кластеризації допускають приналежність одного і того ж об'єкта одночасно до кількох кластерам з відповідними ступенями приналежності на інтервалі $[0,1]$. У деяких випадках використання методів нечіткої кластеризації більш обґрунтовано, ніж чіткої, особливо при аналізі об'єктів, що знаходяться поблизу кордонів кластерів.

Наприклад, в задачі оцінки технічного стану силового обладнання нечітка кластеризація допускає, що стан будь-якого об'єкта, що діагностується дослідження одночасно належить всім кластерам (діагнозами), але з різним ступенем приналежності. Якщо об'єкт, що діагностується описується однією ознакою, то функція належності нечіткої кластера повинна відповідати функції приналежності нечіткого безлічі. За умовами нормальності і опуклості визначаються нечіткі множини підлягають апроксимації параметричними функціями належності.

В рамках магістерського дослідження було проаналізовано два можливих методу визначення функцій приналежності за допомогою двох найбільш часто використовуваних методів кластеризації - методу потенціалів і методу нечіткої кластеризації [47], описаних нижче.

В основу методу потенціалів покладені ідеї методу гірської кластеризації, що не вимагає апріорного завдання певної кількості кластерів. Даний метод запропонований Д. Фільовим і Р. Ягером в 1993 році. Слід зазначити, що кластеризація по гірському методу не є нечіткою, але часто її використовують як інструмент для визначення нечітких правил на основі апріорної інформації [45].

Основне поняття методу гірської кластеризації - «потенціал точки», який є числовим значенням, що показує щільність вхідних експериментальних даних в її околиці. Потенціал точки характеризує її близькість до центру кластера [46]. Визначення потенціалу точки $y_i (i = \overline{1, v})$ виконується відповідно до виразу

$$pot_i = \sum_{j=1, \bar{v}} \exp(-4\alpha^2(y_i - y_j)^2), \quad (3.17)$$

де $\alpha > 0$ - коефіцієнт, що визначає ступінь компактності кластеру.

При використанні (3.17) експериментальні дані слід нормалізувати на інтервалі $[0, 1]$. Ступінь приналежності нечіткій множині у визначаються на базі величин потенціалів відповідно до вираження

$$\mu_y(y_i) = \frac{pot_i}{\max_{j=1, \bar{v}}(pot_j)}. \quad (3.18)$$

3.3 Налагодження нейро-нечіткої моделі оцінювання технічного стану електрообладнання ГЕС

3.3.1 Алгоритм навчання розробленої нейро-нечіткої моделі

Налаштування розробленої моделі полягає у визначенні оптимальної структури нейро-нечіткого логічного висновку, яка в свою чергу безпосередньо залежить від виду і числа функцій приналежності для кожного з вхідних параметрів, а також якості формування навчальної вибірки. Тому для вирішення поставленого завдання необхідно визначити число і вид функцій приналежності і сформулювати навчальну вибірку.

Визначення виду функцій приналежності здійснюється, як було описано в підрозділі 3.2, для кожного з методів (потенціалів і нечіткої кластеризації) на прикладі визначення виду функцій приналежності в задачах оцінки стану силових масляних трансформаторів напругою 150 кВ порівнянної потужності і однотипної конструкції.

Важливо відзначити, що визначення виду функцій приналежності за допомогою методів потенціалів і нечіткої кластеризації є попереднім етапом, тому є потреба у додатковому аналізі по кожному з отриманих видів функцій

приналежності.

При аналізі трансформаторного масла визначаються концентрації етилу (C_2H_4 ацетилену (C_2H_2), метану (CH_4 водню (H_2) і етилену (C_2H_6). Розраховуються концентрації пар газів: C_2H_2 / C_2H_4 (A), CH_4 / H_2 (B), C_2H_4 / C_2H_6 (C) і за отриманими значеннями робиться висновок про можливий характер дефектів. Згідно [48] кожне зі сполучень співвідношень концентрацій пар газів відповідає певному дефекту, що наведені в таблиці 6. Визначення можливих видів функцій приналежності виконується для кожного з можливих дефектів.

Після попереднього визначення виду функцій приналежності виконувався розрахунковий аналіз в Matlab за допомогою інструментарію ANFIS і проводилася оцінка роботи системи з використанням певних функцій приналежності критерієм мінімальної помилки навчання мережі, для чого виконувались наступні дії:

1. Чи задавалися функції приналежності (тип і їх кількість) на основі попереднього вибору типу функцій на попередньому етапі. Згідно зі статистикою і, беручи до уваги можливі похибки вимірювань, граничні значення відносин концентрацій газів для всіх можливих видів дефектів в ANFIS приймалися на 10 % більше, ніж вказано в таблиці 3.1;

2. Були задані вхідні і вихідні параметри нейро-нечіткого логічного висновку;

3. Були задані нечіткі правила продукції виду "якщо ($x_1 \in D^k_1 \wedge \dots \wedge x_N \in D^k_N$), то ($y_1 \in A$)". Правила продукції формувалися також для кожної функції приналежності з урахуванням її граничних значень. Правила продукції для можливих видів дефектів на основі ХАРГ представлені в таблиці 3.1.;

4. Формувалася структура нейро-нечіткого логічного висновку;

5. Виконувався розрахунковий аналіз і оцінювалася робота системи.

Таблиця 3.1 - Можливі види дефектів на основі даних ХАРГ

Характер прогнозованого дефекту	Концентрації характерних газів			Обознач. функції
	А	В	С	
Нормальний стан (NF)	< 0,1	(0,1...1)	< 1	f ₁
Електричний дефект				
Часткові розряди з низькою щільністю енергії (LEPD)	< 0,1	< 0,1	< 1	f ₂
Часткові розряди з високою щільністю енергії (HEPD)	0,1-3	< 0,1	< 1	f ₃
Розряди малої потужності (LED)	> 0,1	(0,1...1)	(1...3)	f ₄
Розряди великої потужності (HED)	(0,1...3)	(0,1...1)	> 3	f ₅
Термічний дефект				
Термічний дефект низької температури (< 150) ° С (Т1)	< 0,1	(0,1...1)	(1...3)	f ₆
Термічний дефект в діапазоні низьких температур (150...300) ° С (Т2)	< 0,1	> 1	< 1	f ₇
Термічний дефект в діапазоні середніх температур (300...700) ° С (Т3)	< 0,1	> 1	(1...3)	f ₈
Термічний дефект високою температури (> 700) ° С (Т0)	< 0,1	> 1	> 3	f ₉

У розглянутому прикладі деякі значення відносин концентрацій характерних газів збігаються, тому необхідно виконати два рішення:

1) без об'єднання однакових значень в єдині функції приналежності (варіант 1, див. табл. 3.2).

2) з об'єднанням однакових значень в єдині функції приналежності (варіант 2, див. табл. 3.2).

Таблиця 3.2 - Можлива кількість функцій приналежності для різних відносин концентрацій характерних газів

Ставлення концентрацій газів	Число функцій приналежності для різних відносин концентрацій характерних газів		
	C_2H_2 / C_2H_4	CH_4 / H_2	C_2H_4 / C_2H_6
	Електричний дефект		
Варіант 1	5	5	5
Варіант 2	3	2	3
	Термічний дефект		
Варіант 1	5	5	5
Варіант 2	1	2	3

Об'єднання однакових значень в єдині функції приналежності відіб'ється не тільки на кількості функцій приналежності, але і на кількості правил продукції і в цілому на структурі нейро-нечіткого логічного висновку.

Перший варіант структури нейро-нечіткого виводу На основі статистичних даних за допомогою методу потенціалів і методу нечіткої кластеризації в програмному комплексі Matlab були побудовані функції належності, що наведені на рисунках 3.7, 3.8, для всіх можливих видів дефектів за результатами ХАРГ, описаних в таблиці 3.1.

За результатами розрахунків, рисунок 3.7, видно, що визначити тип функцій приналежності дуже складно, а метод потенціалів можна використовувати тільки при великих масивах вихідних статистичних даних, що для вирішення даного завдання не завжди представляється можливим.

При аналізі за допомогою методу нечіткої кластеризації отримані функції приналежності на рисунку 3.8 можна визначити як один з наступних можливих типів:

- симетрична гаусова, наведена на рисунках 3.9 – 3.14;
- пі-подібна, наведена на рисунках 3.14 – 3.20;
- дзвоноподібна, наведена на рисунках 3.21 – 3.26.

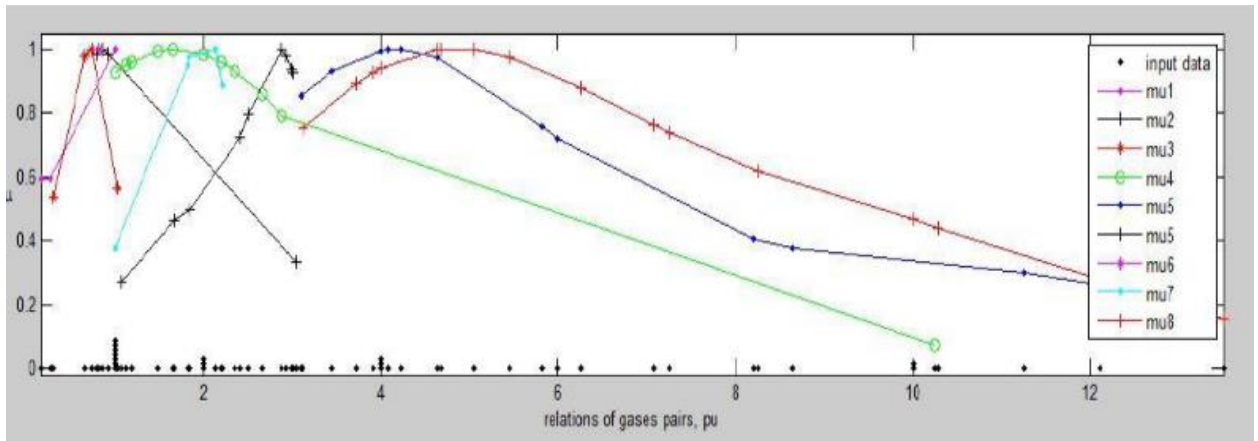


Рисунок 3.7 - Вид функцій приналежності на основі методу потенціалів

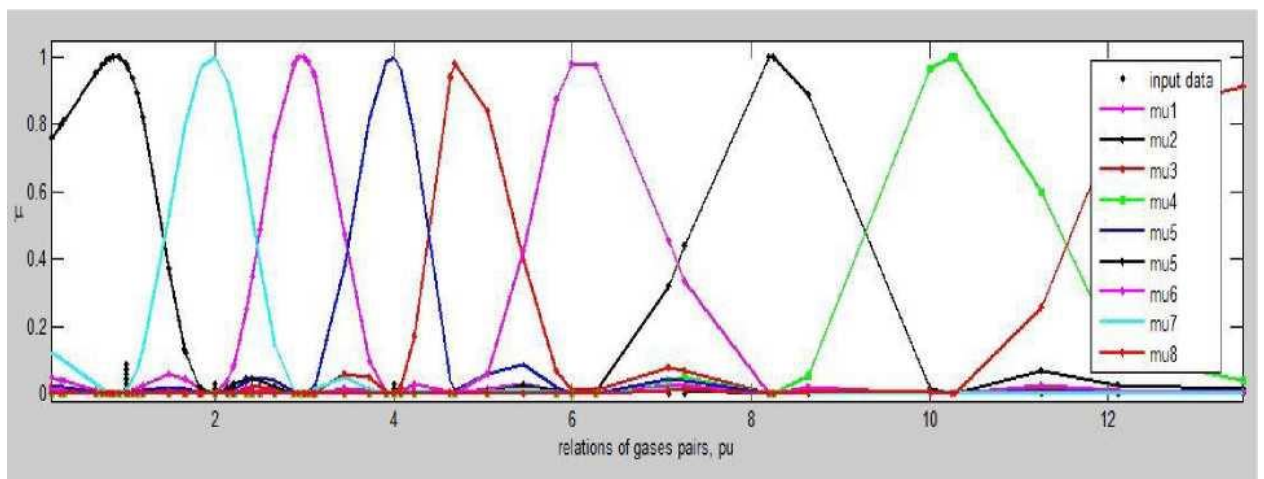


Рисунок 3.8 - Вид функцій приналежності на основі методу нечіткої кластеризації

В якості вхідних параметрів нейро-нечіткого логічного висновку в даному випадку виступають три відносини концентрацій газів C_2H_2 / C_2H_4 , CH_4 / H_2 і C_2H_4 / C_2H_6 , а в якості вихідного параметра - один з можливих видів дефектів. Для виявлення та термічного і електричного характеру дефектів формується однакова структура нейро-нечіткого логічного висновку (див. рис. 3.10), але для термічного характеру дефектів всередині структури використовуються функції приналежності (f1, f6-19, таблиця 3.1), а для електричного характеру дефекту функції приналежності (f1 - f5, таблиця 3.1).

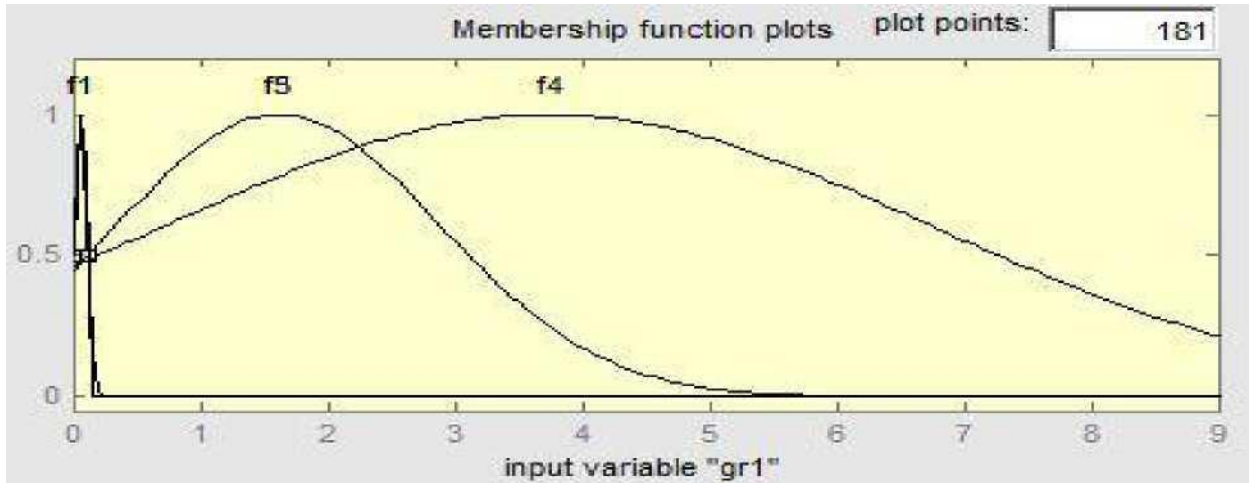


Рисунок 3.9 - Гаусові функції приналежності для електричного характеру дефекту для концентрацій пар газів C_2H_2 / C_2H_4

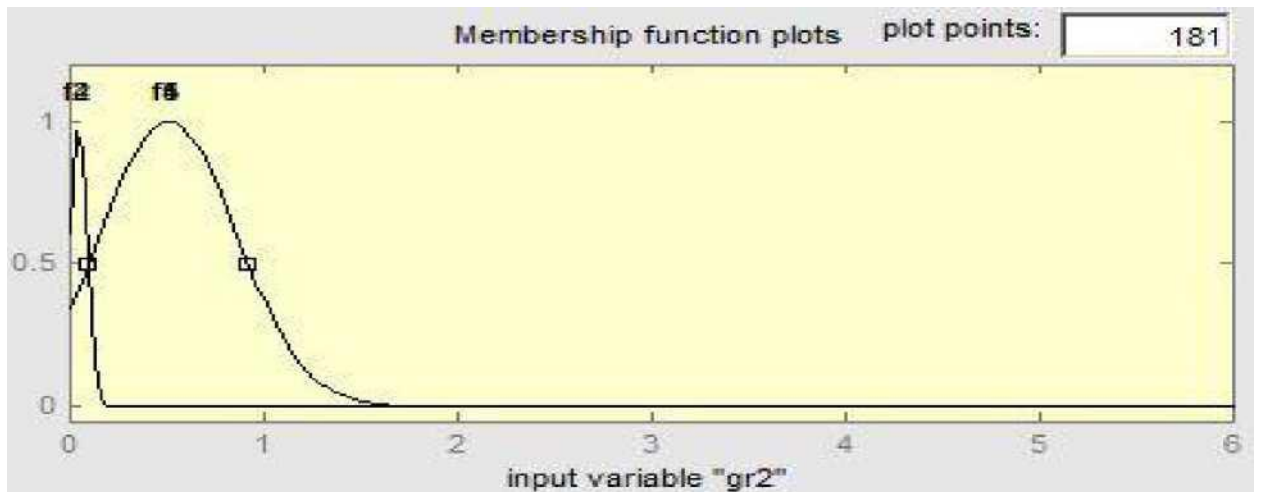


Рисунок 3.10 - Гаусові функції приналежності для електричного характеру дефекту для концентрацій пар газів CH_4 / H_2

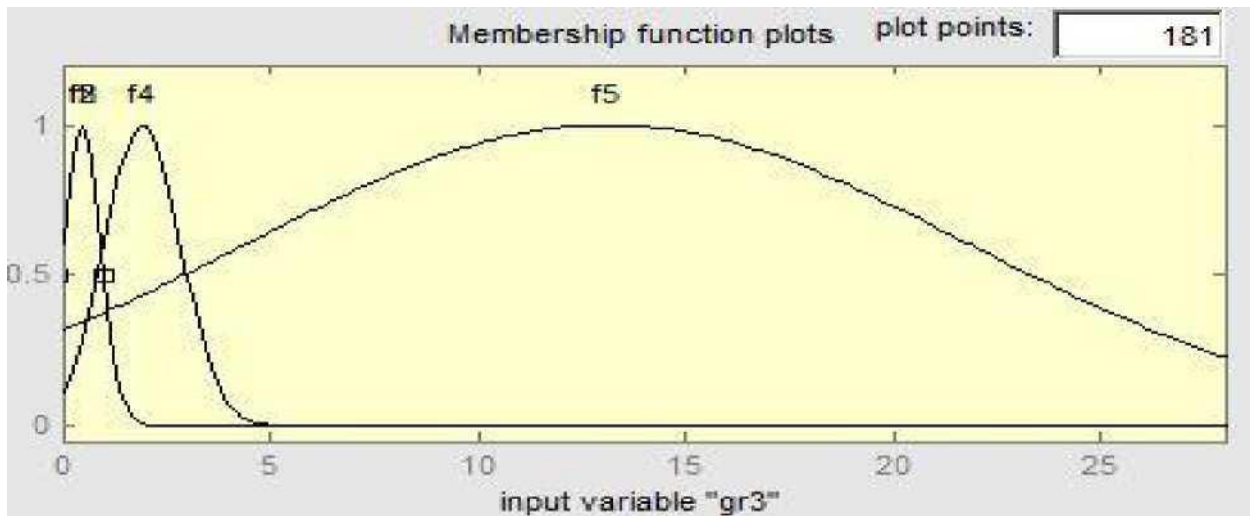


Рисунок 3.11 - Гаусові функції приналежності для електричного характеру дефекту для концентрацій пар газів C_2H_4 / C_2H_6

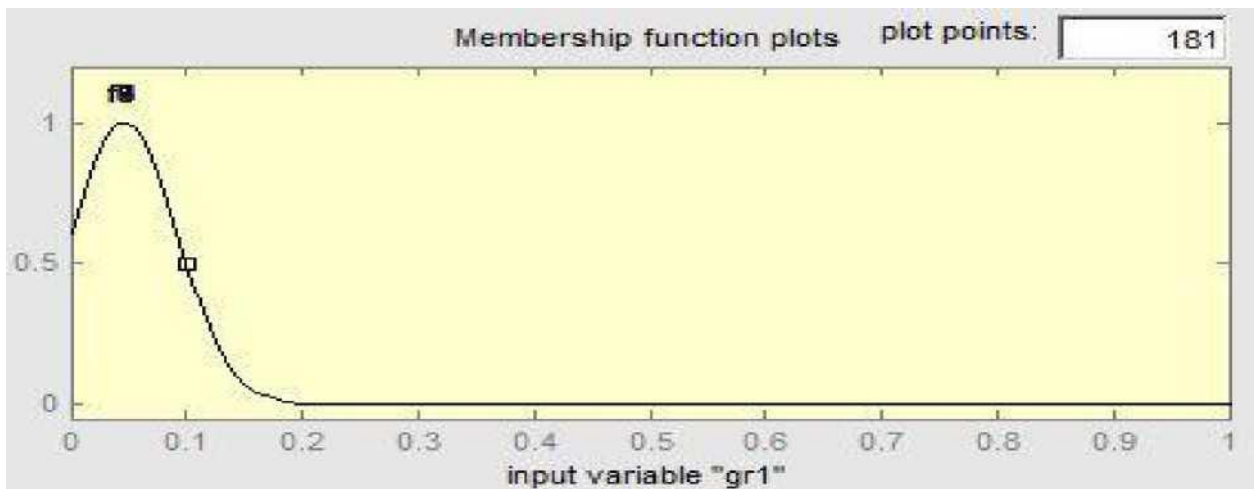


Рисунок 3.12 - Гаусові функції приналежності для термічного характеру дефекту для концентрацій пар газів C_2H_2 / C_2H_4

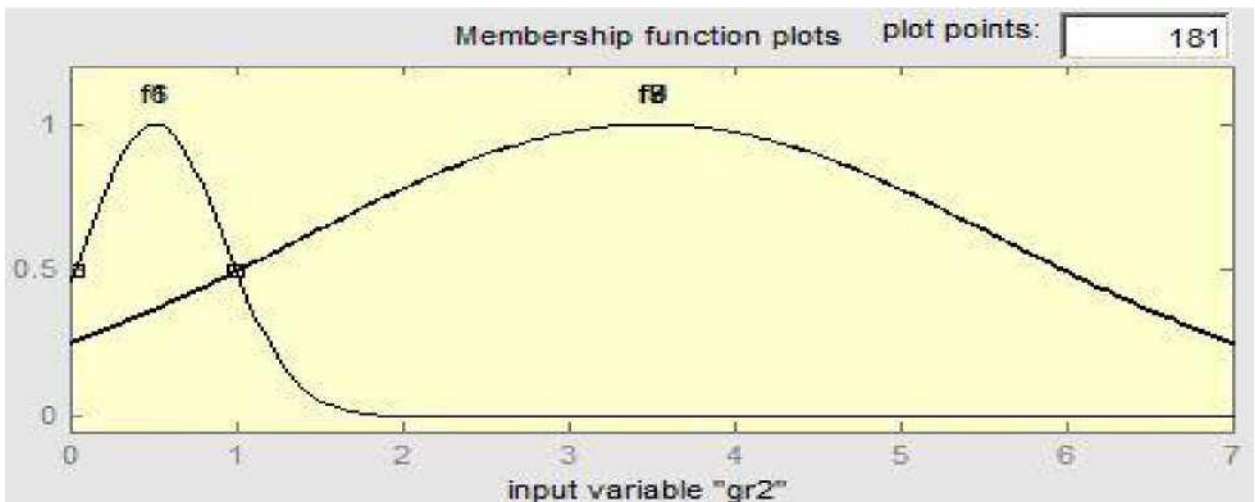


Рисунок 3.13 - Гаусові функції приналежності для термічного характеру дефекту для концентрацій пар газів CH_4 / H_2

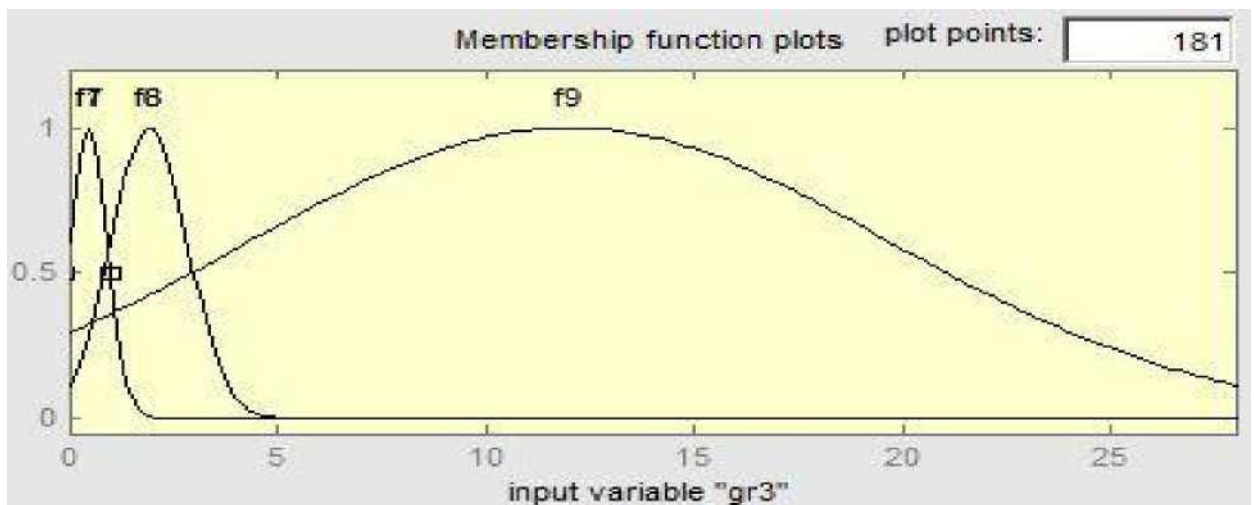


Рисунок 3.14 - Гаусові функції приналежності для термічного характеру дефекту для концентрацій пар газів $\text{C}_2\text{H}_4 / \text{C}_2\text{H}_6$

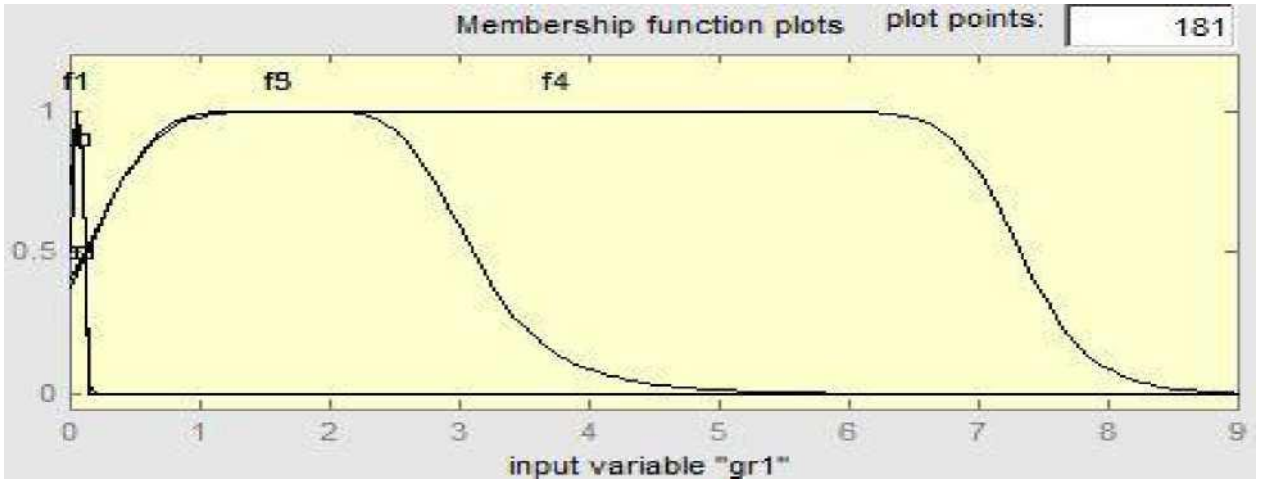


Рисунок 3.15 - Дзвоноподібна функція приналежності для електричного характеру дефекту для концентрацій пар газів C_2H_2 / C_2H_4

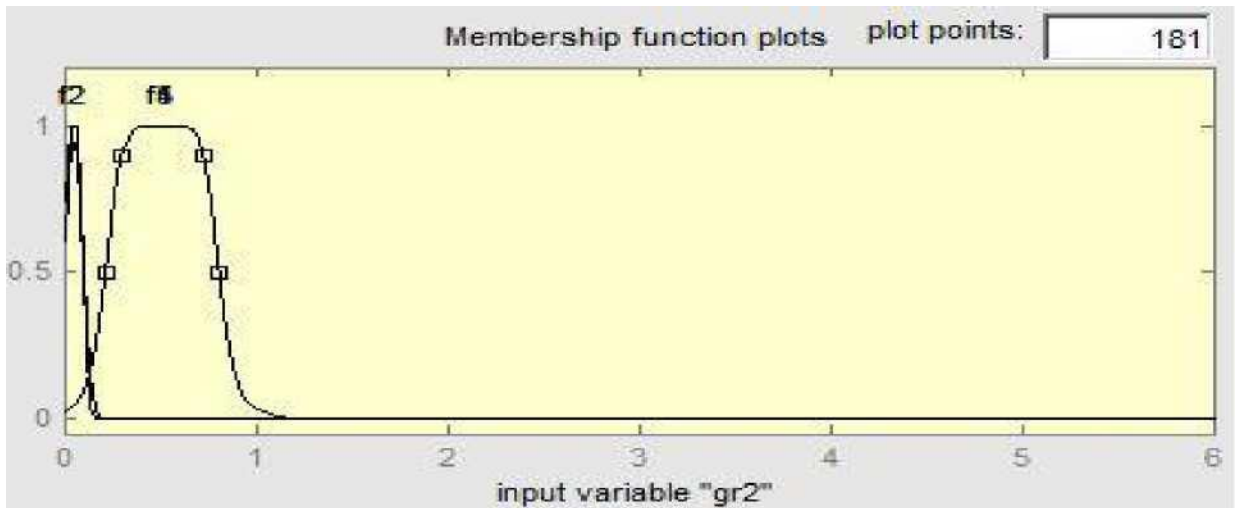


Рисунок 3.16 - Дзвоноподібна функція приналежності для електричного характеру дефекту для концентрацій пар газів CH_4 / H_2

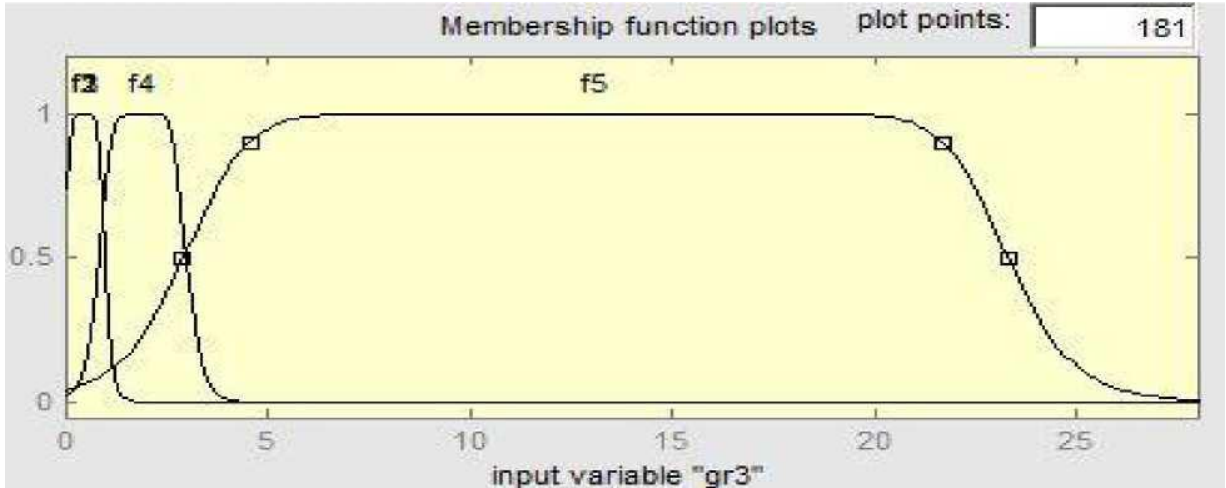


Рисунок 3.17 - Дзвоноподібна функція приналежності для електричного характеру дефекту для концентрацій пар газів C_2H_4 / C_2H_6

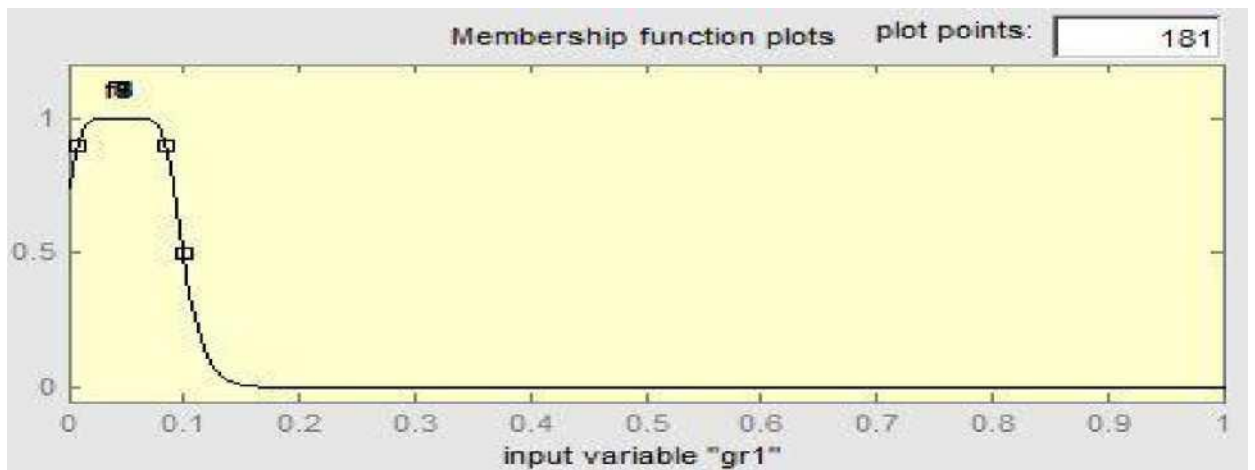


Рисунок 3.18 - Дзвоноподібна функція приналежності для термічного характеру дефекту для концентрацій пар газів C_2H_2 / C_2H_4

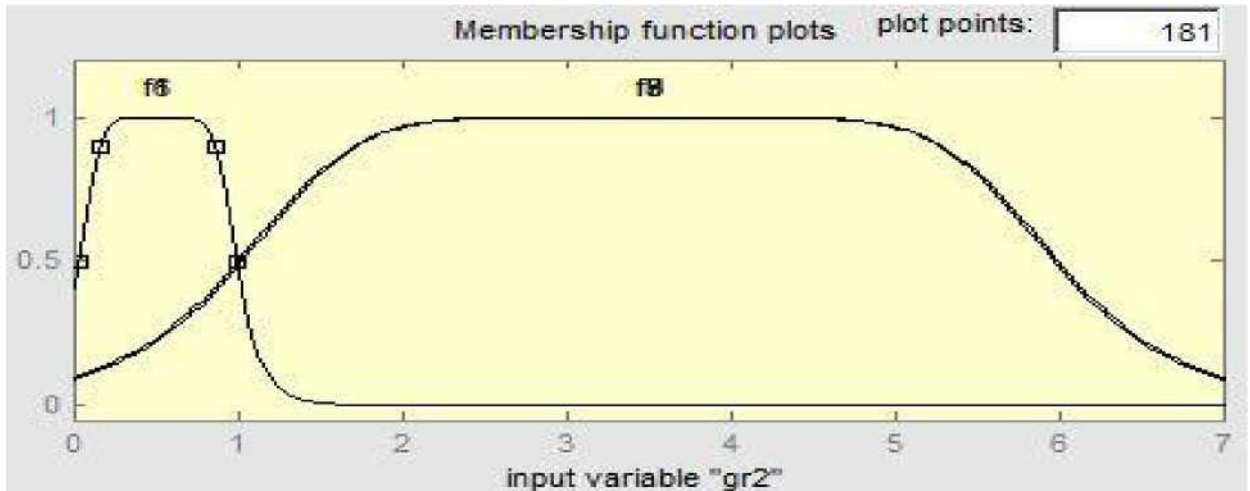


Рисунок 3.19 - Дзвоноподібна функція приналежності для термічного характеру дефекту для концентрацій пар газів CH_4 / H_2

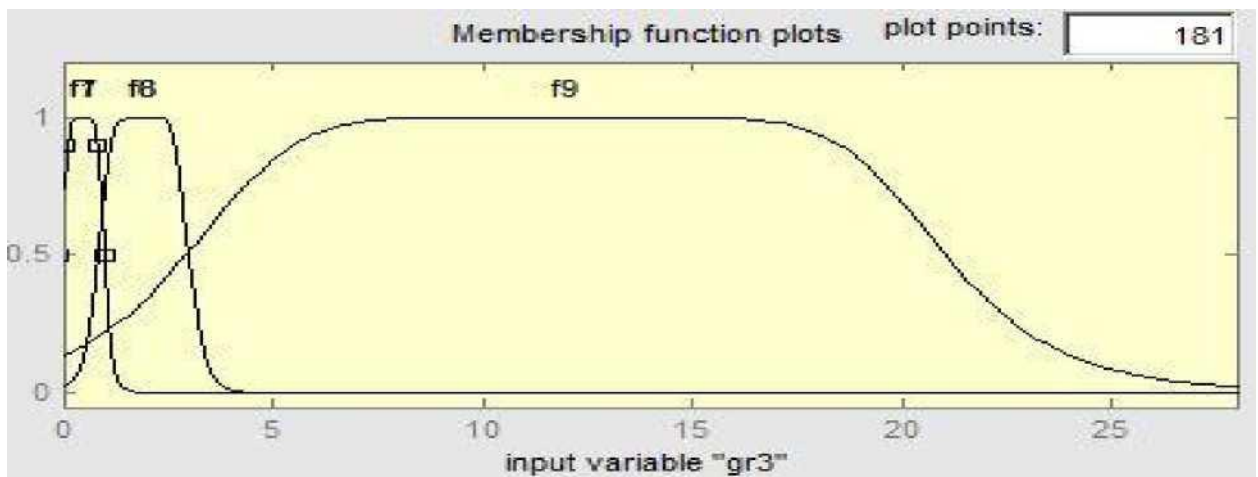


Рисунок 3.20 - Дзвоноподібна функції приналежності для термічного характеру дефекту для концентрацій пар газів $\text{C}_2\text{H}_4 / \text{C}_2\text{H}_6$

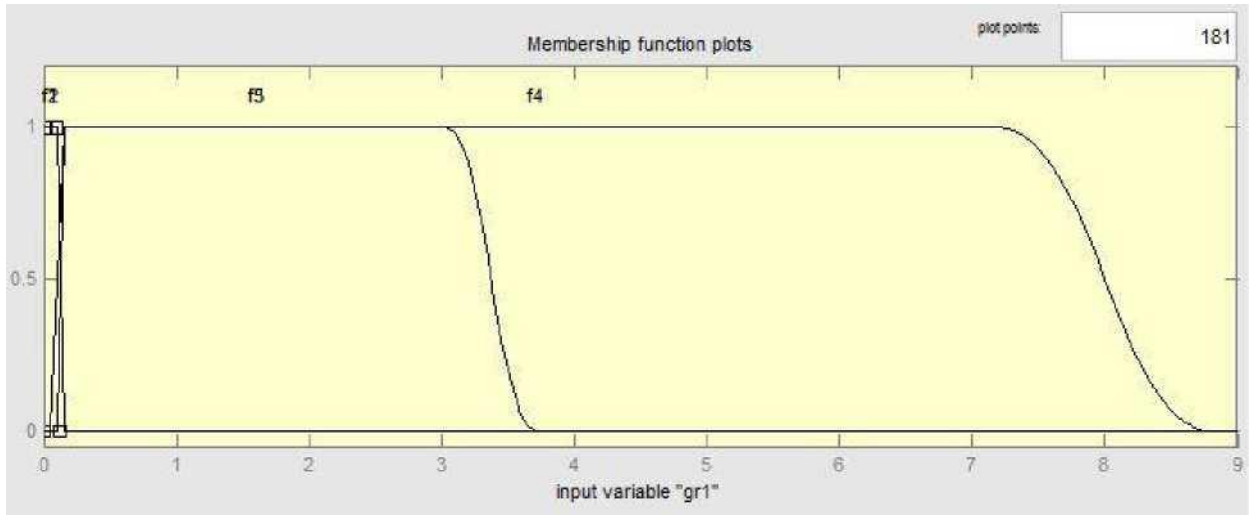


Рисунок 3.21 – Пі –подібна функція приналежності електричного характеру дефекту для концентрацій пар газів C_2H_2 / C_2H_4

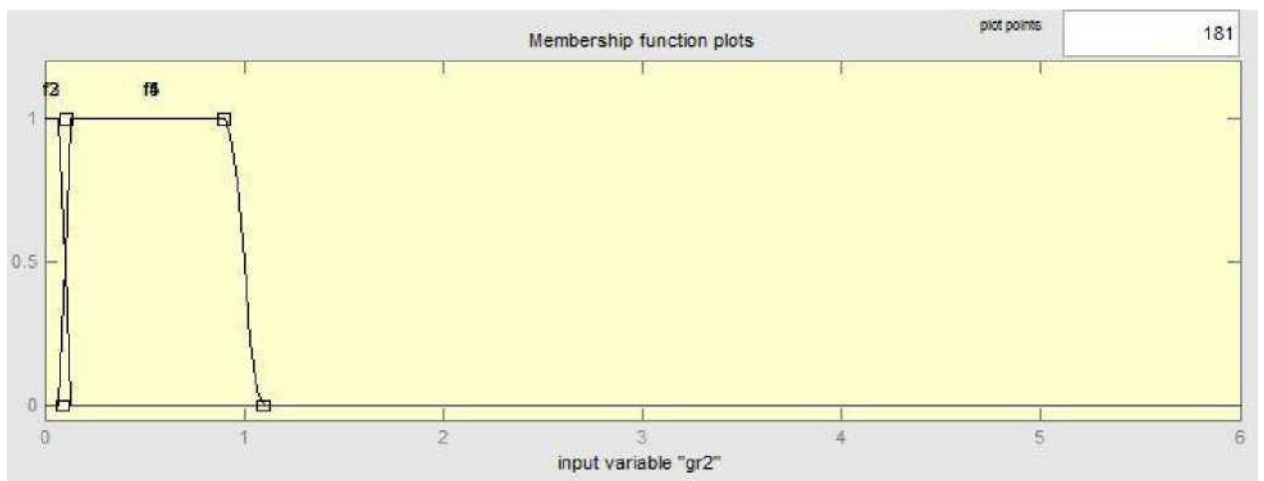


Рисунок 3.22 - Пі-подібні функції приналежності для електричного характеру дефекту для концентрацій пар газів CH_4 / H_2

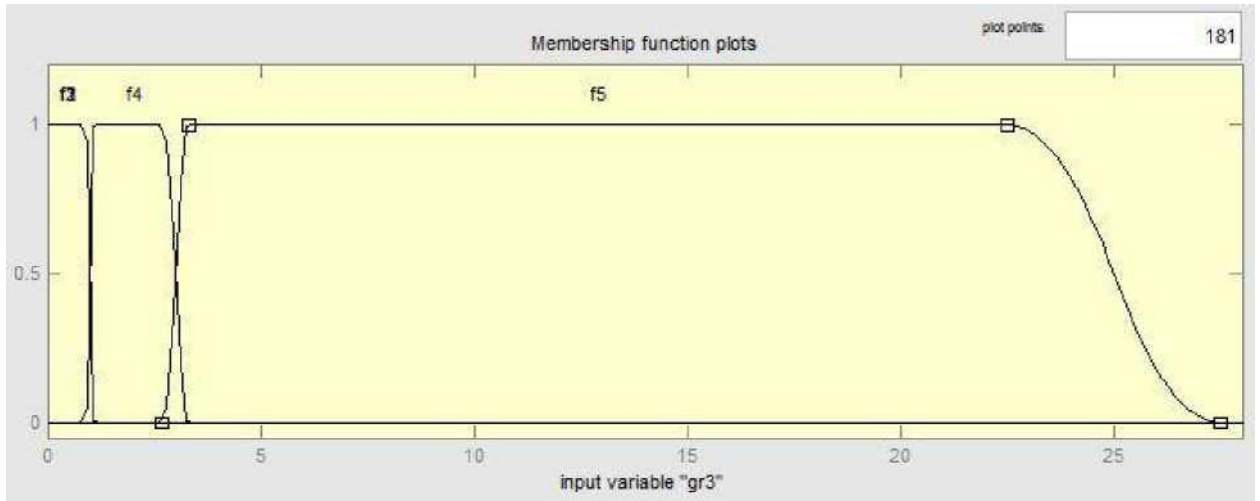


Рисунок 3.23 - Пі-подібні функції приналежності електричного характеру дефекту для концентрацій пар газів C_2H_4 / C_2H_6

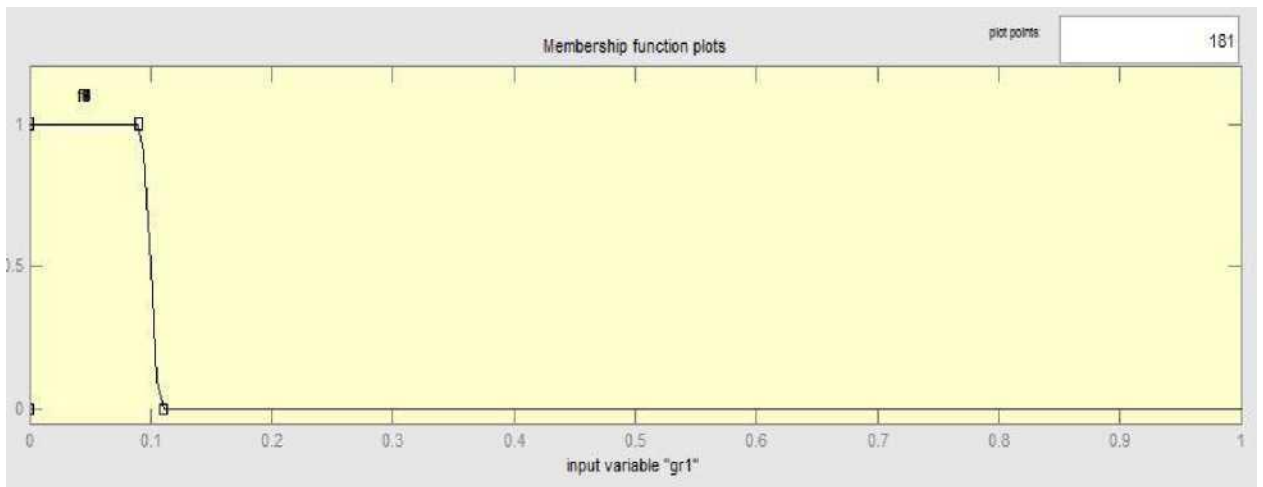


Рисунок 3.24 - Пі-подібні функції приналежності для термічного характеру дефекту для концентрацій пар газів C_2H_2 / C_2H_4

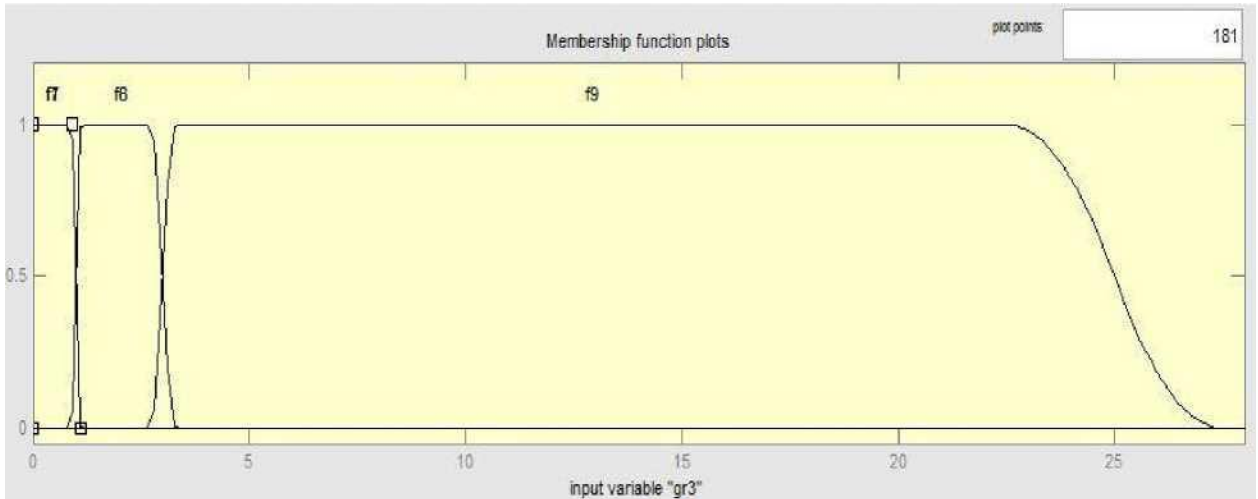


Рисунок 3.25 - Пі-подібні функції приналежності для термічного характеру дефекту для концентрацій пар газів CH_4 / H_2

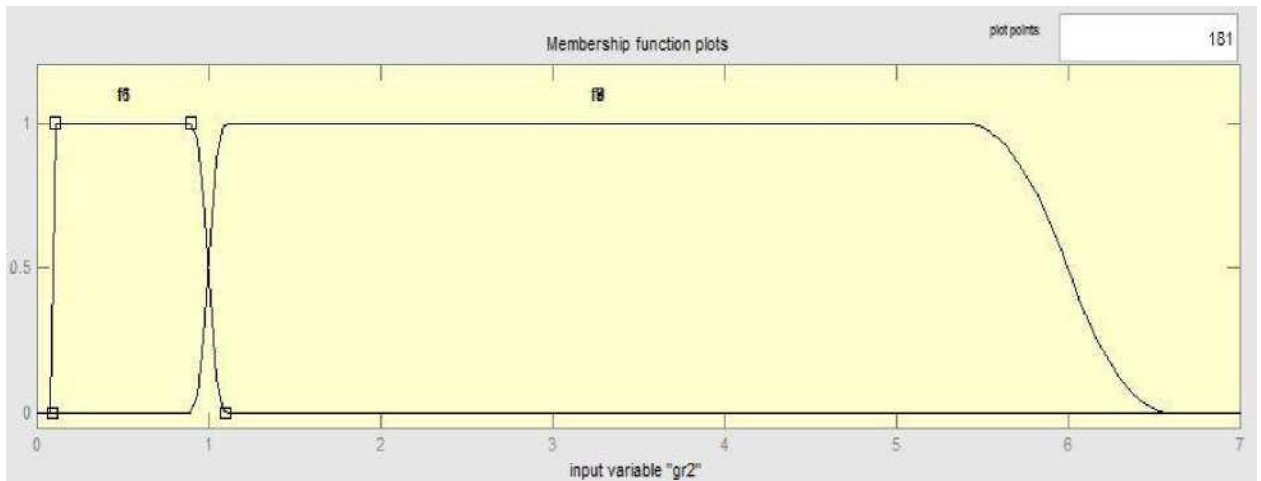


Рисунок 3.26 - Пі-подібні функції приналежності для термічного характеру дефекту для концентрацій пар газів $\text{C}_2\text{H}_4 / \text{C}_2\text{H}_6$

Правила нечіткого виведення також як і функції приналежності формуються для кожного виду дефекту і є формалізованими знаннями експертів (в даному випадку дані нормативної документації). Всі правила продукції представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Нечіткі правила продукції

№	Нечіткі правила продукції
1	if (gr1 is f1) and (gr2 is f1) and (gr3 is f1) then (outputl is NF)
Електричний дефект	
2	if (gr1 is f2) and (gr2 is f2) and (gr3 is f2) then (outputl is LEPD)
3	if (gr1 is f3) and (gr2 is f3) and (gr3 is f3) then (outputl is HEPD)
4	if (gr1 is f4) and (gr2 is f4) and (gr3 is f4) then (outputl is LED)
5	if (gr1 is f5) and (gr2 is f5) and (gr3 is f5) then (outputl is HED)
Термічний дефект	
6	if (gr1 is f6) and (gr2 is f6) and (gr3 is f6) then (outputl is T ₁)
7	if (gr1 is f7) and (gr2 is f7) and (gr3 is f7) then (outputl is T ₂)
8	if (gr1 is f8) and (gr2 is f8) and (gr3 is f8) then (outputl is T ₃)
9	if (gr1 is f9) and (gr2 is f9) and (gr3 is f9) then (outputl is T ₀)

Структура нейро-нечіткого логічного висновку для виявлення характеру дефекту в трансформатор на основі ХАРГ представлена на рисунку 3.27.

Навчальна вибірка для системи нейро-нечіткого логічного висновку, представленого на рисунку 3.27, складається з даних ХАРГ 19 силових масляних трансформаторів порівнянної потужності і однотипної конструкції, серед яких 2 представлені з дефектом електричного характеру, 3 - з дефектом термічного характеру і 14 представлені нормальним станом. Таким чином, навчальна вибірка для виявлення кожного виду дефекту містить 42 навчальних прикладу.

Повний склад навчальної вибірки представлений в Додатку А.

Результати розрахунків представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Результати розрахунків для визначення виду функцій приналежності

Дані	Значення		
Електричний дефект			
Тип функцій приналежності	Гаусова	Дзвоноподібна	Пі-подібна
Число пар в навчальній вибірці	42	42	42
Число вузлів	286	286	286
Кількість лінійних параметрів	500	500	500
Число нелінійних параметрів	60	60	60
Загальна кількість параметрів	560	560	560
Число нечітких правил	125	125	125
Середня помилка навчання, %	0,051	0,054	0,046
Термічний дефект			
Тип функцій приналежності	Гаусова	Дзвоноподібна	Пі-подібна
Число пар в навчальній вибірці	42	42	42
Число вузлів	286	286	286
Кількість лінійних параметрів	500	500	500
Число нелінійних параметрів	60	60	60
Загальна кількість параметрів	560	560	560
Число нечітких правил	125	125	125
Середня помилка навчання, %	0,053	0,054	0,047

В якості основного критерію, за яким виконуються порівняння результатів розрахунків моделі з використанням різних видів функцій приналежності, обрана середня помилка навчання. Це пояснюється необхідністю мінімізації емпіричного ризику - тобто необхідністю вибрати такий тип функцій приналежності в рамках заданої моделі, при якій значення середньої помилки на заданій навчальній вибірці було б мінімальним [49].

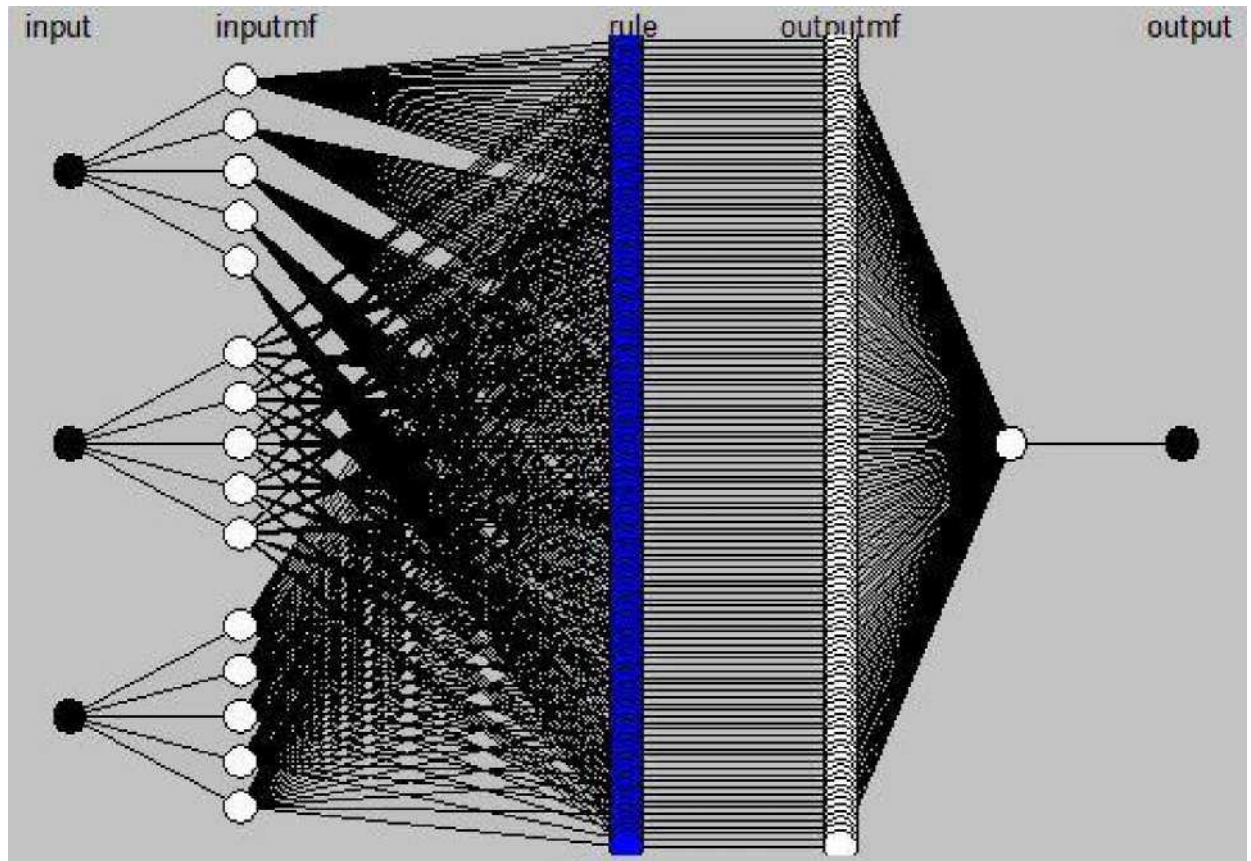


Рисунок 3.27 - Структура нейро-нечіткого логічного висновку для виявлення характеру дефекту в трансформатор на основі ХАРГ

За результатами розрахунків середня помилка навчання для електричного характеру дефектів при гаусом функції приналежності становить 0,051 %, при дзвоноподібній функції приналежності - 0,054 %, при пі-подібної функції приналежності - 0,046 %; для термічного характеру дефекту при гаусовій функції приналежності - 0,053 %, дзвоноподібної функції приналежності - 0,054 %, при пі-подібної функції приналежності - 0,047 %. Таким чином, найменша помилка навчання і для електричного і для термічного характеру дефектів виходить при використанні в моделі пі-подібних функцій приналежності.

За результатами розрахунків, виходячи з критерію мінімальної помилки навчання, для подальшого використання в моделі силового трансформатора 150 кВ для даних ХАРГ були прийняті пі-подібні функції приналежності.

Другий варіант структури нейро-нечіткого виводу.

Другим можливим варіантом структури нейро-нечіткого логічного висновку є варіант з об'єднанням однакових значень в єдині функції приналежності (варіант 2, таблиці 3.2).

За допомогою методу нечіткої кластеризації, як і в попередньому варіанті, вид функцій приналежності можна визначити як один з наступних можливих типів: симетрична гаусова; пі-подібна; дзвоноподібна. Кількість функцій приналежності для даного варіанту наведено в таблиці 3.5.

В якості вхідних параметрів даного нейро-нечіткого логічного висновку виступають, як і в попередньому випадку, три відносини концентрацій газів - C_2H_2 / C_2H_4 , CH_4 / H_2 і C_2H_4 / C_2H_6 , а в якості вихідного параметра - один з можливих видів дефектів. Так само, як і в попередньому випадку, для виявлення характеру дефектів формується своя структура нейро-нечіткого логічного висновку, яка наведена в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Можлива кількість функцій приналежності для різних відносин концентрацій газів

Відношення концентрацій	Число функцій приналежності		
	C_2H_2 / C_2H_4	CH_4 / H_2	C_2H_4 / C_2H_6
	Електричний дефект		
Варіант 2	3	2	3
	Термічний дефект		
Варіант 2	1	2	3

Нечіткі правила продукції, як і функції приналежності, формуються для кожного виду дефекту, що наведені в таблиці 3.6. Структура нейронечіткого логічного висновку для визначення термічного та електричного характеру дефектів в трансформаторі на основі ХАРГ представлена на рисунках 3.28, 3.29. Результати розрахунків представлені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.6 - Нечіткі правила продукції

№	Нечіткі правила продукції
1	if (gr1 is f1) and (gr2 is f1) and (gr3 is f1) then (output1 is NF)
Електричний дефект	
2	if (gr1 is f1) and (gr2 is f2) and (gr3 is fi) then (output1 is LEPD)
3	if (gr1 is f2) and (gr2 is f1) and (gr3 is f1) then (output1 is HEPD)
4	if (gr1 is f3) and (gr2 is f2) and (gr3 is f2) then (output1 is LED)
5	if (gr1 is f2) and (gr2 is f2) and (gr3 is f3) then (output1 is HED)
Термічний дефект	
6	if (gr1 is fi) and (gr2 is fi) and (gr3 is f2) then (output1 is T1)
7	if (gr1 is fi) and (gr2 is f2) and (gr3 is fi) then (output1 is T2)
8	if (gr1 is fi) and (gr2 is f2) and (gr3 is f2) then (output1 is T3)
9	if (gr1 is fi) and (gr2 is f2) and (gr3 is f3) then (output1 is T0)

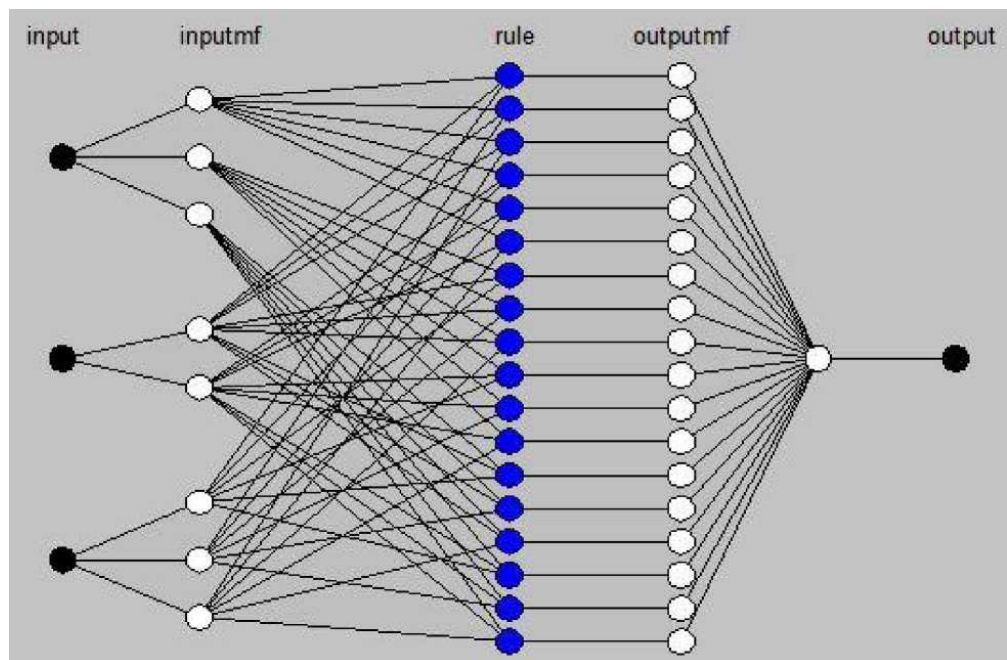


Рисунок 3.28 - Структура нейро-нечіткого логічного висновку для виявлення електричного характеру дефекту в трансформаторі

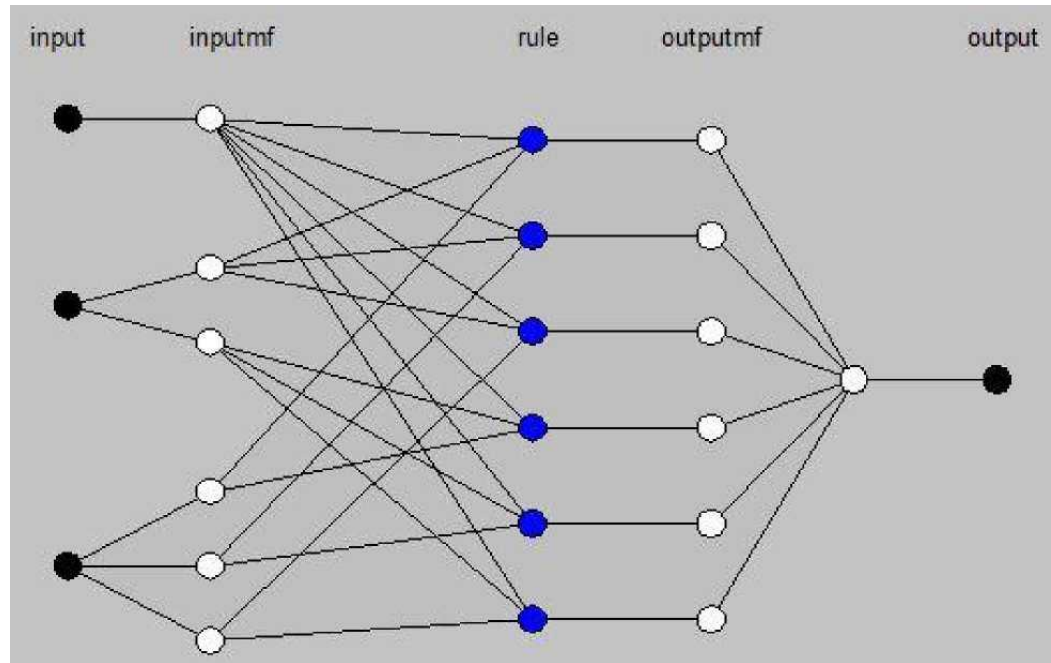


Рисунок 3.29 - Структура нейро-нечіткого логічного висновку для виявлення термічного характеру дефекту в трансформатора

Таблиця 3.7 - Результати розрахунку для визначення виду функцій приналежності

ANFIS дані	Значення		
Електричний дефект			
Тип функцій приналежності	Гаусова	Дзвоноподібна.	Пі - подібна
Число пар в навчальній вибірці	42	42	42
число вузлів	58	58	58
Кількість лінійних параметрів	18	18	18
Число нелінійних параметрів	32	32	32
Загальна кількість параметрів	42	42	42
Число нечітких правил	18	18	18
Середня помилка навчання, %	0,239	0,204	0,185

Продовження таблиці 3.7

ANFIS дані	Значення		
Термічний дефект			
Тип функцій приналежності	Гаусова	Дзвоноподібна.	Пі - подібна
Число пар в навчальній вибірці	42	42	42
Число вузлів	30	30	30
Кількість лінійних параметрів	6	6	6
Число нелінійних параметрів	24	24	24
Загальна кількість параметрів	30	30	30
Число нечітких правил	6	6	6
Середня помилка навчання, %	0,324	0,315	0,287

За результатами розрахунків середня помилка навчання для електричного характеру дефектів при Гаусовій функції приналежності становить 0,239 %, при дзвоноподібної функції приналежності - 0,204 %, при пі подібної функції приналежності - 0,185 %; для термічного характеру дефекту при гаусом функції приналежності - 0,324 %, дзвоноподібної функції приналежності - 0,315 %, при пі-подібної функції приналежності - 0,287 %.

У таблиці 3.8 представлені підсумкові значення середньої помилки навчання за різними варіантами використання числа і виду функцій приналежності.

Таким чином, найменша помилка навчання і для електричного і для термічного характеру дефектів виходить при використанні в моделі пі-подібних функцій приналежності. Тому для подальшого використання в моделі силового трансформатора 150 кВ для даних ХАРГ за результатами розрахунків за критерієм мінімальної помилки навчання були прийняті пі-подібні функції приналежності.

Таблиця 3.8 - Результати розрахунку по визначенню виду функцій

Відношення концентрації газів	Число функцій приналежності для різних відносин концентрацій газів		
	C_2H_2 / C_2H_4	CH_4 / H_2	C_2H_4 / C_2H_6
1	2	3	4
Електричний дефект			
Варіант 1	5	5	5
Середня помилка навчання, % (Гаусова функція)	0,051		
Середня помилка навчання, % (Дзвоноподібна. Функція)	0,054		
Середня помилка навчання, % (Пі-подібна функція)	0,046		
Варіант 2	3	2	3
Середня помилка навчання, % (Гаусова функція)	0,239		
Середня помилка навчання, % (Дзвоноподібна. Функція)	0,204		
Середня помилка навчання, % (Пі-подібна функція)	0,185		
Термічний дефект			
Варіант 1	5	5	5
Середня помилка навчання, % (Гаусова функція)	0,053		
Середня помилка навчання, % (Дзвоноподібна. Функція)	0,054		
Середня помилка навчання, % (Пі-подібна функція)	0,047		
Варіант 2	1	2	3
Середня помилка навчання, % (Гаусова функція)	0,324		
Середня помилка навчання, % (Дзвоноподібна. Функція)	0,315		
Середня помилка навчання, % (Пі-подібна функція)	0,287		

Найменша помилка навчання спостерігається в разі використання першого варіанту структури нейро-нечіткого логічного висновку (з кількістю 5 функцій приналежності для кожної пари газів).

Даний приклад демонструє можливість використання методу нечіткої кластеризації для визначення виду функцій приладдя в завданнях оцінки технічного стану обладнання електричної станції. Підсумки розрахунків характеризують метод нечіткої кластеризації як підходящий і дає хороші результати для визначення виду функцій приналежності в рамках даної задачі.

Тип функцій приналежності і їх кількість істотно впливає на результати роботи системи оцінки технічного стану обладнання ЕС та ЕП, тому для кожного об'єкта необхідно визначити, в тому числі розрахунковим шляхом, оптимальні вид і кількість функцій приналежності.

3.3.2 Формування навчальної вибірки

Як уже згадувалося, однією з переваг ШНМ є можливість навчання. Для цього в системі нейро-нечіткого виводу формується навчальна вибірка.

Репрезентативність (Структурованість) навчальної вибірки також впливає на результати роботи системи [50, 51], тому, перш ніж перейти до використання адаптивної системи нейро-нечіткого виводу, необхідно виконати попередній аналіз навчальної вибірки.

Формування навчальної вибірки для будь-якого завдання, в тому числі і завдання оцінки технічного стану обладнання, зводиться до оптимізації цієї вибірки [52]. Оптимальна навчальна вибірка повинна володіти трьома основними властивостями:

- бути достатньою - число навчальних прикладів має бути достатнім для навчання;
- бути різноманітною - мати велике число різноманітних комбінацій вхід-вихід при обліку, що всі класи, характерні для вихідного безлічі, будуть представлені;

- бути рівномірною - приклади повинні бути представлені приблизно в однакових пропорціях.

Розглянемо задачу формування навчальної вибірки на прикладі використання діагностичних даних про стан обладнання. В цьому випадку навчальна вибірка - це сукупність даних, отриманих в ході експлуатації обладнання за участю експертів для постановки діагнозів.

Для будь-якого виду обладнання існує три варіанти формування навчальної вибірки:

- у разі відсутності достатньої інформації у вигляді діагностичних даних про даному об'єкті (неповна і недостовірна інформація) навчальна вибірка формується на основі діагностичних даних по аналогічних об'єктів порівнянної потужності і однотипної конструкції;

- при наявності діагностичних даних про даному об'єкті (неповна достовірна інформація) навчальна вибірка формується на основі наявних діагностичних даних з використанням діагностичних даних по аналогічних об'єктів порівнянної потужності і однотипної конструкції;

- якщо інформація подається не діагностичними даними, а даними вимірів без постановки діагнозів, наприклад з датчиків (вібрації, вміст газу і вмісту вологи в маслі і т.п.) Без алгоритмів контролю параметрів (повна недостовірна інформація), то таку інформацію необхідно попередньо перевірити на наявність «викидів».

При обробці інформації, отриманої з різних вимірювальних приладів, часто доводиться мати справу з викидами - вимірами, які різко виділяються серед всієї сукупності і не підкоряються теоретичного нормального розподілу. Природа таких викидів може бути будь-яка - неточність приладів, неправильний спосіб вимірювання і т.д. Спостерігаються односторонні і двосторонні відхилення, відповідно в меншу і більшу сторони [53].

Кількість даних у вибірці заздалегідь невідомо, так як в залежності від об'єкта воно може варіюватися від десятків до сотень, тому аналіз впливу даних навчальної вибірки на результат роботи системи виконувався на основі декількох

найбільш часто використовуваних критеріїв:

1. Критерій Романовського

$$c = \frac{|\chi^2 - df|}{\sqrt{2df}}, \quad (3.19)$$

де χ^2 - критерій згоди Пірсона; $\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - f_i')^2}{f_i'}$, де k – число груп, на які розбиті емпіричні розподіли, f_i - спостережувана частота ознаки в i -й групі, f_i' - теоретична частота; df - число ступенів свободи.

2. Критерій Ірвіна

$$\lambda = \frac{|y(t) - y(t-1)|}{\sigma}, \quad (3.20)$$

де $y(t-1)$ - попереднє значення параметра в варіаційному ряду, σ - середньоквадратичне відхилення.

3. Критерій Колмогорова-Смирнова

$$\lambda = d_{\max} \sqrt{n}, \quad (3.21)$$

де d_{\max} - максимум модуля різниці між функцією розподілу для теоретичного $F(x)$ та емпіричного $W_n(x)$ розподілів, n - перші елементи вибірки.

4. Критерій «3 δ » в інтервалі

$$\bar{x} \pm 3\delta, \quad (3.22)$$

де $\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ середньоквадратичне відхилення, x_i - i -тий елемент вибірки; \bar{x} - середнє арифметичне вибірки; n - обсяг вибірки.

Критерій "трьох сигм" застосовується для результатів вимірювань, розподілених за нормальним законом.

В ході виконання магістерської роботи оцінювався вплив кожного з критеріїв на результат роботи системи нейро-нечіткого логічного висновку. Результати наведені в таблиці 3.9. Для аналізу були обрані дані, отримані з датчика вмісту газу в оливі силового трансформаторів потужністю 95000 МВА і напругою 150 кВ, що складаються з 78 вимірювань. В ході аналізу бралися до уваги наступні показники:

- кількість викидів в залежності від критерію;
- число пар випадків у вибірці після виключення викидів (навчальна вибірка);
- число елементів в тестовій вибірці;
- помилка навчання і помилка тестування.

Таблиця 3.9 - Вплив різних критеріїв на систему нейро-нечіткого логічного висновку

№	Критерій	Викиди, шт.	Число пар в вибірці після виключ. викидів, шт.	Число пар що тестуються в вибірці, шт.	Помилка навчаний., %	Помилка тест., %
1	Романовського	12	66	40	0,00006	0,83
2	Ірвіна	1	77	40	0,05570	1,47
3	Смирнова	7	71	40	0,00360	0,97
4	ЗД	7	71	40	0,00360	0,97
5	Вихідна вибірка		78	40	0,05640	2,23

Тестова вибірка складалася з 40 випадків з датчика вмісту газу в маслі силового трансформаторів потужністю 95000 МВА напругою 150 кВ. Крім перерахованих критеріїв розглядалася також первісна вибірка вихідних значень.

Аналіз впливу різних критеріїв на оцінку фактичного стану електрообладнання показує, що кращі результати по налаштуванню системи

(найменша помилка навчання) і при перевірці тестової вибірки спостерігаються при використанні критерію Романовського.

Найгірші результати, як і очікувалося, спостерігаються при використанні вихідної вибірки без застосування будь-яких критеріїв, що ще раз наголошує на необхідності попередньої роботи з даними перед використанням в системі оцінки фактичного стану.

Аналіз впливу різних критеріїв на результати роботи системи нейронечіткого логічного висновку виявив найбільшу кількість «помилкових» вимірювань в навчальній вибірці при використанні критерію Романовського. Тому, незважаючи на найменші помилки тестування і навчання при розрахунку, даний критерій не є оптимальним. При виключенні «помилкових» вимірювань і аналізі отриманої навчальної вибірки стало ясно, що вона не задовольняє вимогам рівномірності і показності.

Наступними значеннями, що дають задовільні результати за критерієм найменших помилок навчання і тестування, є значення, отримані в ході використання критеріїв Смирнова і «Зδ». Аналіз навчальних вибірок, отриманих після виключення «помилкових» вимірювань, наведений для обох критеріїв, виявив, що тільки при використанні критерію «Зδ» вибірка задовольняє всім трьом вимогам - показності, рівномірності і несуперечності. Відповідно до викладеного, для подальших розрахунків приймався критерій «Зδ». Ще раз нагадаємо, що властивість рівномірності характеризує рівномірність розподілу даних в навчальній вибірці за діагнозами, властивість суперечливості - кількість однакових об'єктів, що належать до різних класів, властивість показності є не тільки критерієм наявності достатнього числа даних по кожному з діагнозів, але і критерієм відсутності повторюваних даних.

Все вище сказане говорить про те, що не можна використовувати в якості критерію найкращого рішення тільки помилки тестування і навчання нейронечіткого логічного висновку. Додатково необхідно проаналізувати, які саме вимірювання система розпізнає як «помилкових» і чи задовольняє отримана

вибірка (після виключення «викидів») всім перерахованим вимогам.

Видалення даних після обробки навчальної вибірки виконується тільки для даних третього типу, які відносяться до класу «повна недостовірність» інформація, так як ця інформація є сукупністю даних, які не мають конкретного діагнозу (висновку) по кожному набору даних. Два інших типи інформації не потребують перевірки на наявність викидів, так як умовно ми приймаємо, що ця інформація вже оброблена експертами і викиди вже були видалені раніше, а кожного набору даних присвоєні свої діагнози.

Представлений принцип формування навчальної вибірки застосуємо для будь-якої доступної інформації про аналізованому об'єкті.

3.3.3 Визначення результуючої оцінки технічного стану обладнання електричної схеми ГЕС

З метою оцінки ефективності функціонування розробленої системи нейро-нечіткого логічного висновку реалізовано альтернативне рішення, засноване на штучній нейронній мережі типу тришарового персептрона. В якості вхідних параметрів прийняті відносини концентрацій пар газів, визнані в якості основних узагальнених критеріїв стану силових трансформаторів. Кодування вхідних сигналів x_1, x_2, \dots, x_n відбувається по допустимим діапазонів відносин пар газів в залежності від їх прояву або не прояву в певному діагнозі працездатності (технічного стану). Діагностична карта включає дев'ять діагнозів, в тому числі, один діагноз, що характеризує стан як нормальний, чотири діагнозу, пов'язаних з електричними дефектами, і чотири діагнозу, що ідентифікують термічні дефекти.

В якості функції активації використовується сигмовидна функція активації в наступному вигляді

$$f(s) = \frac{1}{1+e^{-2ks}}, \quad (3.23)$$

де S - вихідний сигнал суматора нейрона; b - константа, коефіцієнт стиснення функції. Перевагою сигмовидної функції активації є її зручність в застосуванні на практиці за рахунок простого визначення похідної в аналітичному вигляді [54]

$$f'(s) = f(s)(1 - f(s)). \quad (3.24)$$

Вихідний сигнал суматора кожного нейрона є скалярна величина сумарно зваженого вхідного сигналу

$$s = f(s) \left(\sum_{i=1}^M u_i w_i \right), \quad (3.25)$$

де M - кількість входів; u_i - вхідний сигнал з входу i ; w_i - вага входу i . Підсумком роботи нейронної мережі є нелінійна модель наступного виду

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n, W^1, W^1 \dots W^K), \quad (3.26)$$

де K - кількість матриць вагових коефіцієнтів зв'язків між нейронами різних верств.

При наявності V пар вхідних і вихідних параметрів, що представляють собою навчальну вибірку завдання, навчання нейронної мережі зводиться в рішення оптимізаційної задачі мінімізації суми квадратичних відхилень

$$\sum_{v=1}^V (F(x_1^v, x_2^v, \dots, x_n^v, W^1, W^1 \dots W^K) - \hat{y}^v)^2 \rightarrow \min, \quad (3.27)$$

де \hat{y}^v - необхідний еталонне значення вихідного сигналу [55].

Оптимізація виконана методом градієнтного спуску шляхом визначення

збільшень простору вагових коефіцієнтів і руху в напрямку протилежному градієнту.

Показники ефективності застосування системи нейро-нечіткого логічного висновку та нейронної мережі наведені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 - Показники ефективності роботи системи нейро-нечіткого логічного висновку та нейронної мережі

Ставлення концентрацій газів	Нейро-нечіткий логічний висновок		Нейронна мережа	
	Середня помилка навчання, %		Середня помилка навчання, %	
	Елект. дефект	Тримаючи. дефект	Елект. дефект	Тримаючи. дефект
C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	0,046	0,047	1,300	0,900
CH ₄ / H ₂				
C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆				

Як видно з таблиці 3.10 найменша помилка навчання спостерігається у разі використання в розробленій моделі структури нейро-нечіткого логічного висновку (як у випадку визначення електричного, так і термічного дефектів в трансформаторі). Розрахункові показники свідчать про перевагу використання нейро-нечіткого логічного висновку над методом штучних нейронних мереж.

В результаті оцінки технічного стану кожного елемента обладнання на основі розрахунку середньозважених оцінок і за допомогою функцій належності формується підсумкова оцінка для визначення стану підоб'єкту.

Розглянемо загальний принцип формування оцінки технічного стану підоб'єкту. В даному випадку функції приналежності LR-типу (трикутної форми): $\mu_1(x) \in R \rightarrow [a; c]$, де R - множина дійсних чисел, $[a; c]$ – діапазон вимірювання параметрів змінної, b - найбільш можливе значення змінної, яке задається аналітичною формулою

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (3.28)$$

В результаті оцінки стану об'єкта визначається приналежність об'єкта до одного з трьох станів (див. рис. 3.30):

- справний стан D1, коли об'єкт повністю відповідає всім технічним вимогам, справний стан завжди є працездатним;

- несправне, але працездатний стан D2, коли технічним вимогам відповідають лише ті властивості об'єкта, які характеризують його здатність виконувати задані функції;

- граничний стан D3 - стан об'єкта, при якому його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна з причин небезпеки, економічним або екологічним [50].

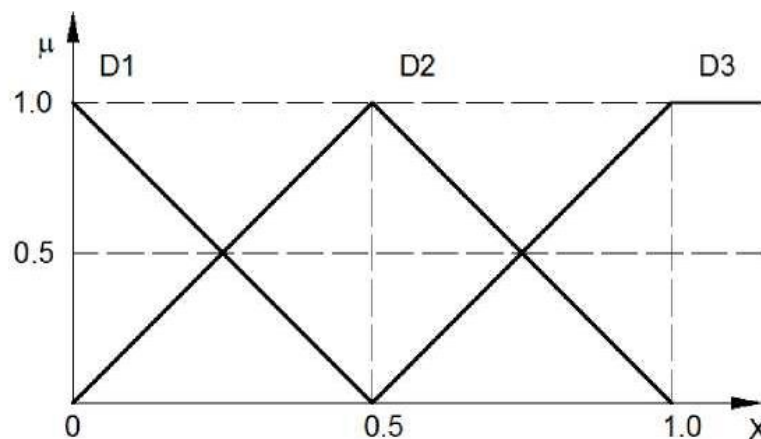


Рисунок 3.30 - Стан обладнання

У розробленій системі оцінки стану обладнання алгоритм Такагі-Сугено використовується для попередньої класифікації несправностей об'єкта або визначення його стану. Узагальнена оцінка стану підоб'єкту визначається на основі середньозваженої бальної оцінки його елементів із застосуванням шкали відносної важливості Сааті $\{1, 3, 5, 7 \dots\}$ з використанням функцій належності.

Слід зазначити, що оскільки розроблена система позиціонується в якості експертної та грає роль «помічника-радника» для персоналу, то будь-яка підсумкова оцінка стану підоб'єкту відповідає певним ранжируванню альтернативам рішень щодо його подальшої експлуатації. Можливі рішення визначаються з використанням функцій належності, наведені на рисунку 3.31 і можуть бути наступні:

- залишити в експлуатації (E1);
- провести додаткові випробування або вимірювання (E2);
- виконати ремонт (E3);
- вивести з експлуатації (E4).

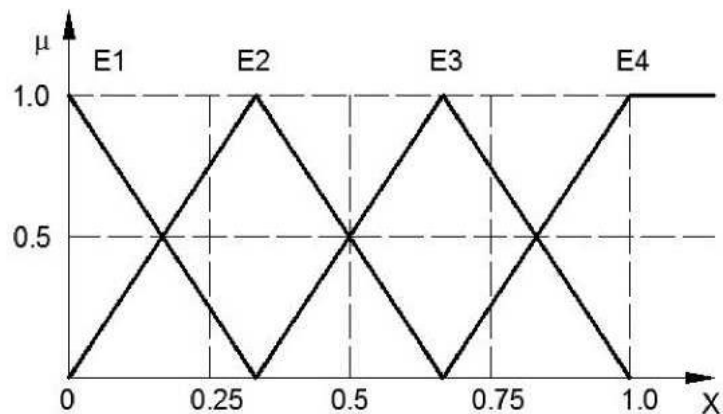


Рисунок 3.31 - Сукупність можливих рішень

Іншими словами, другий етап системи оцінки технічного стану обладнання ЕС, ЕП можна класифікувати як нечітке завдання з багатьма критеріями аналізу безлічі приватних рішень $Y = \{ y_1, y_2, \dots, y_n \}$, що містить n елементи (груп параметрів), які отримані на першому етапі.

В даному випадку реалізація системи підтримки прийняття рішень буде полягати у визначенні оптимального рішення (з урахуванням ранжирування можливих рішень) щодо подальшої експлуатації обладнання на основі оцінки його стану на базі доступною агрегованої інформації про об'єкт дослідження за допомогою нейро-нечіткого логічного висновку.

4 МОДЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ГОЛОВНОЇ СХЕМИ ДНІПРОВСЬКОЇ ГЕС

Первинними джерелами енергії на гідроелектростанціях є гідротурбіни які приводять до обертів синхронні генератори. Генерована потужність виходить на ВРП 150 кВ, яка має схему з трьох систем збірних шин.

Схема має такі приєднання:

- 1 секція - блоки генератор-трансформатор ГТ-1, ГТ-2, ГТ-3, лінії Л-3, Л-8А, АТ-1/1, трансформатор власних потреб Т-1.

- 2 секція - блоки генератор-трансформатор ГТ-4, ГТ-5, ГТ-6, лінії Л-4, Л-9В, Л-7.

- 3 секція - блоки генератор-трансформатор ГТ-7, ГТ-8, ГТ-9, лінії Л-8, Л-9, Л-10, Л-11, АТ-1/3, трансформатор власних потреб Т-2.

Власні потреби Дніпровської ГЕС-1 живляться від ТВП Т-1 (1секція) та ТВП Т-2 (3 секція) ВРП 150 кВ.

Також власні потреби за необхідності можуть отримати живлення від генератора власних потреб Г-10 або від дизель генератора приєданого до збірки власних потреб ГГ-7, ГГ-8, ГГ-9.

ВРП 150 кВ має наступне комутаційне та вимірювальне обладнання:

- трансформатори струму ТФЗМ-150 «ЗЗВА», ІМВ-170 «АВВ» Швеція;
- трансформатори напруги CVE-170 «HAEFELY-TRENCH» Франція, СРА-170 «АВВ» Швеція;
- роз'єднувачі ALPHA Швейцарія, AREVA Італія;
- обмежувачі перенапруг 3EL2 SIEMENS Швеція;
- елегазові вимикачі GEC ALSTHOM HGF 100/1 Швейцарія.

ВРП 330 кВ має наступне комутаційне та вимірювальне обладнання:

- трансформатори струму IOSK 362 SR «HAEFELY-TRENCH» Франція;
- трансформатори напруги CVE-362 «HAEFELY-TRENCH» Франція;
- роз'єднувачі AREVA Італія;
- елегазові вимикачі GECALSTHOM HGF 100/2 Швейцарія.

Аналізуючи склад силового, вимірювального та комутаційного обладнання Дніпровської ГЕС можна зробити висновок, що відбулася заміна старого на більш нове обладнання, але ще залишилося обладнання, яке застаріло технічно і морально і потребує заміни. Необхідно заміна трансформаторів генераторів ГГ-1, ГГ2, ГГ-5 а також трансформаторів власних потреб (Т-1, Т-2), обладнання власних потреб (ЦРП 3,15 кВ), включаючи щити власних потреб генераторів (ГГ1...ГГ9). Тому дослідження стану силового обладнання головної схеми Дніпровської ГЕС дозволить прогнозувати дефекти обладнання і виконувати попереджувальні ремонти.

Дефекти обладнання головної схеми ГЕС (Додаток Б).

Для елегазових вимикачів в процесі їхньої експлуатації визначились найбільш характерні дефекти:

- сліди електричних розрядів на ізоляторах;
- недостатня затяжка ущільнень струмопровідних частин між суміжними газоізолюваними відсіками;
- пошкодження резинових прокладок кільцевих ущільнень з витоком елегазу;
- збільшення опору головного струмопровідного контуру;
- разрегулювання механічної системи (приводу) елегазового вимикача;
- порушення ізоляції або контактних з'єднань у вторинних колах елегазових вимикачів.

Аналізуючи відмови та технічні порушення в роботі роз'єднувачі були виявлені наступні:

- збільшення перехідного опору головного контакту;
- збільшення опору поворотного контакту;
- недовключення головного контакту;
- сліди електричних розрядів на ізоляторах;

Аналіз відмов та технічних порушень в роботі трансформаторів показав, що найбільш частими пошкодженнями потужних силових трансформаторів є наступні:

- в обмотках:

1) вигорання витків внаслідок токів КЗ на боці НН які тривало не вимикаються, що призводить до руйнування ізоляції;

2) деформації при КЗ внаслідок недостатній динамічній стійкості, яке також призводить до руйнування ізоляції;

3) зволоження та забруднення внаслідок негерметичності трансформатора, яке призводить до зниження електричної міцності ізоляції і її пробою;

4) знос та зниження механічної міцності, зниження електричної міцності та пробій ізоляції; деякі дефекти виготовлення;

- в магнітопроводі:

1) перегрів осердя при виникненні короткозамкненому контурі, що може призвести до «пожару» в залізі;

- в системі охолодження:

1) порушення роботи внаслідок пошкодження маслонасосів, крім перегріву обмоток це призводить к забрудненню масла механічними домішками;

2) забруднення трубок охолоджувача, що призводить до перегріву трансформатора;

- в пристрої РПН:

1) порушення контактів, що призводить до іскріння, підгару контактів та до відмови РПН;

2) порушення ізолюючої РПН перегородки, що викликано дефектом виготовлення яке призводить до забруднення продуктами піролізу масла в баку трансформатора, що ускладнює діагностику ізоляції по хроматографічному аналізу масла;

3) механічні дефекти РПН внаслідок зносу вузлів кінематичної схеми, що призводить до обгорання контактів РПН;

4) розгерметизація пристрою РПН;

5) розгерметизація пристрою РПН при зволоженні бакелітового циліндру, що призводить до дугового КЗ в РПН;

- в інших вузлах:

- б) перегрів контактих з'єднань внаслідок дефектів монтажу;
- 7) протікання масла внаслідок дефектів;
- 8) зволоження та забруднення негерметичних вводів;
- 9) відкладання осаду на внутрішніх поверхнях герметичних вводів, що призводить до поглинання вологи та пробом ізоляції;
- 10) старіння масла в герметичних вводах з утворенням колоїдних частинок, окисленням масла та наступним пробом ізоляції;

4.1 Оцінювання технічного стану блочного трансформатора за допомогою нейро-нечіткої моделі

У розрахунковому прикладі в якості вхідних параметрів для роботи гібридної нейронної мережі були обрані всі доступні дані за результатами технічного діагностування аналізованих об'єктів.

Ефективність запропонованої моделі підтверджується розрахунками, виконаними в програмному середовищі Matlab за допомогою системи нейронечіткого логічного висновку (adaptive neuro fuzzy inference system - ANFIS).

Розглянутий підоб'єкт - «силовий масляний трансформатор 150 кВ» - складається з наступної сукупності елементів:

- магнітопровід (ярма і стрижні; стяжні шпильки; елементи кріплення магнітопроводу);
- обмотка (обмотки ВН, НН; відводи обмоток; деталі кріплення обмоток);
- тверда ізоляція (виткового ізоляція; міжшарова ізоляція; міжкотушкова ізоляція; бар'єри);
- трансформаторне масло (в баку трансформатора);
- система охолодження (трубки охолоджувачів; електронасос; двигун електронасоса; шафа управління);
- високовольні вводи (остов вводу; масло вводу; пристрій ПІН);

покришка);

- бак (корпус, кришка, розширювач, фільтр розширювача).

Кожен елемент характеризується своїми можливими видами дефектів і/або несправностей і приналежністю до якого-небудь стану, які визначаються на основі параметрів, отриманих в ході експлуатації або діагностики (випробувань).

У зв'язку з великою розмірністю розв'язуваної задачі була виконана на основі даних діагностики та випробувань наступних елементів:

- трансформаторного масла (в баку трансформатора) - за даними хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів;

- магнітопроводу - за даними вимірів неробочого ходу;

- високовольтних вводів - за даними вимірів опору, ємності та тангенсу кута діелектричних втрат вводів;

- загального стану обмоток - за даними омичних опорів обмоток, вимірів опору ізоляції обмоток, а також за роком випуску трансформатора і року проведення його капітального ремонту (Дані експлуатаційного ресурсу).

Для кожного елемента була розроблена своя конструкція нейронечіткого логічного висновку Такагі-Сугено, які наведені на рисунку 4.1-4.3. Точність настройки розробленої системи оцінювалася на основі навчальної вибірки, що складається з даних по 19 силовим масляним трансформаторів 150 кВ порівнянної потужності і однотипної конструкції; точність роботи системи оцінювалася на основі тестових вибірок.

4.2. Оцінювання стану елементів блочного трансформатора

4.2.1 Підсистема оцінювання стану трансформаторного масла

Масло в трансформаторі є рідкої ізоляцією і тепловідводним середовищем і являє собою очищену фракцію нафти [56].

Висновок про стан трансформатора і його можливі несправності можна зробити на основі аналізу трансформаторного масла, а точніше на основі хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів.

У розрахунковому прикладі аналіз трансформаторного масла проводився за даними хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів на основі аналізу співвідношення концентрацій пар газів: C_2H_2 / C_2H_4 (ацетилен / етил) (позначимо X), CH_4 / H_2 (метан / водень) (Y), C_2H_4 / C_2H_6 (етіл / етілен) (Z). За значеннями співвідношення концентрацій цих трьох пар робився висновок про впливах, яким піддавалося масло, і можливий характер дефектів в трансформаторі.

Практика показує, що ймовірність збігу прогнозованого і існуючого дефекту трансформатора при використанні ХАРГ становить 95 %, тому в даній системі на основі результатів ХАРГ передбачалося не просто визначити приналежність до стану, а визначити вид дефекту.

Всі можливі дефекти, діагностуються при використанні ХАРГ (див. табл. 4.1), умовно були розділені на дві групи - електричні та термічні. З метою виявлення дефектів кожної групи в розроблену модель оцінки технічного стану інтегрувалися окремі структури нейро-нечіткого логічного висновку, сформовані за індивідуальними правилами. Кожна структура в своєму складі в якості базової характеристики містила нормальний стан обладнання.

В результаті аналізу були визначені три можливих види функцій приналежності:

- гаусова;
- пі-подібна;
- дзвоноподібна.

Слід зазначити, що деякі значення відносин концентрацій газів, які наведені в таблиці 4.1, збігаються. З метою визначення можливості оцінки станів однотипними і/або універсальними функціями належності був виконаний аналіз двох можливих рішень таблиці 3.7:

- варіант за допомогою об'єднання однакових значень в єдині універсальні функції приналежності;
- варіант з п'ятьма функціями належності для кожної вхідної змінної.

Таблиця 4.1 - Можливі види дефектів на основі ХАРГ

Характер прогнозованого дефекту	Ставлення концентрацій характерних газів			Позначення функції
	X	Y	Z	
Нормальний стан (NF)	$< 0,1$	$(0,1...1)$	≤ 1	f_1
Електричний дефект				
Часткові розряди з низькою щільністю енергії (LEPD)	$< 0,1$	$< 0,1$	< 1	f_2
Часткові розряди з високою щільністю енергії (HEPD)	$(0,1...3)$	$< 0,1$	< 1	f_3
Розряди малої потужності (LED)	$> 0,1$	$(0,1...1)$	$(1...3)$	f_4
Розряди великої потужності (HED)	$(0,1...3)$	$(0,1...1)$	> 3	f_5
Термічний дефект				
Термічний дефект низької температури (< 150) °C (T_1)	$< 0,1$	$(0,1...1)$	$(1...3)$	f_6
Термічний дефект в діапазоні низьких температур ($150...300$) °C (T_2)	$< 0,1$	> 1	< 1	f_7
Термічний дефект в діапазоні середніх температур ($300...700$) °C (T_3)	$< 0,1$	> 1	$(1...3)$	f_8
Термічний дефект високої температури (> 700) °C (T_0)	$< 0,1$	> 1	> 3	f_9

В ході розрахунків і при налаштуванні системи було визначено, що оптимальним є другий варіант - з п'ятьма функціями належності для кожної вхідної змінної. На основі положень, зазначених в третьому розділі магістерської роботи, розроблені нечіткі правила продукції, які представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Нечіткі правила продукції для оцінки стану трансформатора на основі ХАРГ

№	Нечіткі правила продукції
1	if (gr1 is f1) and (gr2 is f1) and (gr3 is f1) then (output1 is NF)
електричний дефект	
2	if (gr1 is f1) and (gr2 is f2) and (gr3 is f1) then (output1 is LEPD)
3	if (gr1 is f2) and (gr2 is f1) and (gr3 is f1) then (output1 is HEPD)
4	if (gr1 is f3) and (gr2 is f2) and (gr3 is f2) then (output1 is LED)
5	if (gr1 is f2) and (gr2 is f2) and (gr3 is f3) then (output1 is HED)
термічний дефект	
6	if (gr1 is f1) and (gr2 is f1) and (gr3 is f2) then (output1 is T ₁)
7	if (gr1 is f1) and (gr2 is f2) and (gr3 is f1) then (output1 is T ₂)
8	if (gr1 is f1) and (gr2 is f2) and (gr3 is f2) then (output1 is T ₃)
9	if (gr1 is f1) and (gr2 is f2) and (gr3 is f3) then (output1 is T ₀)

Сформована структура нейро-нечіткого логічного висновку для оцінки стану трансформаторів на основі даних ХАРГ представлена на рисунку 4.1. Основні характеристичні параметри мережі нейро-нечіткого логічного висновку на основі даних ХАРГ і результати розрахунків наведені в таблиці 4.3.

Використання такого критерію, як середня помилка навчання, вже проаналізованого в третьому розділі, в якості основного критерію порівняння (оцінювання) результатів розрахунків моделі з використанням різних видів функцій приналежності ще не гарантує мінімізацію помилки на вибірці що тестувалася - помилки тестування. Помилка тестування характеризує здатність моделі до узагальнення, т. е. процедуру навчання [57]. Тому зіставлення результатів роботи моделі при використанні різних видів функцій приналежності виконані на базі комплексної характеристики з урахуванням як помилки навчання, так і помилки тестування.

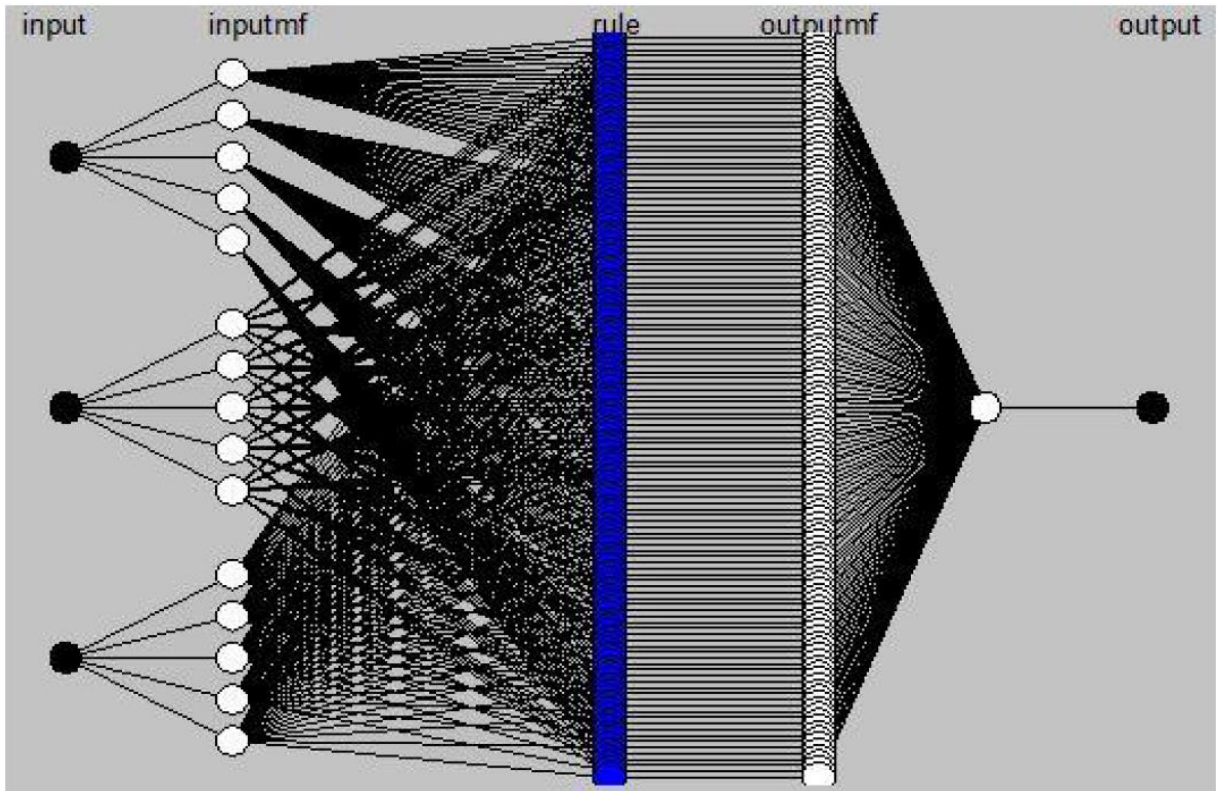


Рисунок 4.1 - Структура нейро-нечіткого логічного висновку для оцінки стану трансформатора на основі даних ХАРГ

Крім того, необхідно оцінити не просто розмір помилок навчання і тестування, а виявити серед них помилки першого роду - відмова від правильної гіпотези «помилковий дефект» - і другого роду - прийняття неправильної гіпотези «пропуск дефекту» [58]. Це пов'язано з тим, що гранично допустиме значення параметра має розсіювання на граничних областях, і одні і ті ж значення можуть відповідати як одному, так і іншому станом.

Помилка першого роду призводить до додаткових попереджувальних робіт, а помилка другого роду тягне за собою витрати, які включають не тільки аварійний ремонт, але і знос обладнання і т.п.

Таблиця 4.3 - Основні характеристичні параметри мережі для оцінки стану трансформатора на основі ХАРГ

ANFIS дані	Значення		
Електричний дефект			
Тип функцій приналежності	Гаусова	Дзвоно- подібна	Пі-подібна
Число пар в навчальній вибірці	42	42	42
Число пар в тестованій вибірці	40	40	40
Число вузлів	286	286	286
Кількість лінійних параметрів	500	500	500
Число нелінійних параметрів	60	60	60
Загальна кількість параметрів	560	560	560
Число нечітких правил	125	125	125
Середня помилка навчання, %	0,051	0,054	0,046
Середня помилка тестування, %	6,8	7,5	4,9
Помилки першого роду, шт.	2	2	2
Помилки другого роду, шт.	1	1	0
Термічний дефект			
Тип функцій приналежності	Гаусова	Дзвоно- подібна	Пі-подібна
Число пар в навчальній вибірці	42	42	42
Число пар в тестованій вибірці	40	40	40
число вузлів	286	286	286
Кількість лінійних параметрів	500	500	500
Число нелінійних параметрів	60	60	60
Загальна кількість параметрів	560	560	560
Число нечітких правил	125	125	125
Середня помилка навчання, %	0,053	0,054	0,047
Середня помилка тестування, %	7,0	7,9	5,2
Число помилок першого роду	2	3	2
Число помилок другого роду	1	1	0

В результаті розрахунку і аналізу основних характеристичних параметрів

мережі для оцінки стану трансформатора на основі ХАРГ визначено, що оптимальною функцією, як видно з таблиці 4.3, є пі подібна функція приналежності. Що також підтверджується найменшими помилками навчання і тестування: 0,046 % і 4,9 % для електричного дефекту і 0,047 % і 5,2 % для термічного дефекту відповідно.

Аналіз помилок першого і другого роду на тестовій вибірці з 40 пар (при аналізі і електричного і термічного дефектів) також підтвердив ефективність використання пі-подібних функцій приналежності, при цьому з двох помилково певних несправностей в силових трансформаторах обидві помилки відносяться до помилок першого роду («помилковий дефект»).

Проведений аналіз характеризує систему як досить достовірну і 5 % помилок у визначенні стану трансформаторів в даному випадку можна вважати хорошим результатом.

4.2.2 Підсистема оцінювання стану магнітопроводу трансформатора

Оцінка стану магнітопровід у трансформатора на базі розробленої моделі виконана на основі вимірів втрат холостого ходу. Збільшення втрат неробочого ходу в трансформаторі, як і зміна вмісту газу в маслі, може свідчити про несправності і, відповідно, характеризувати стан магнітопровід у трансформатора.

Розрахунки оцінки стану магнітопровід виконувалися для тих же силових масляних трансформаторів 154 кВ, що і в попередньому підрозділі 4.1, на основі даних пофазних вимірювань втрат холостого ходу для кожного з трьох випадків - замкнутої накоротко обмотки кожної з фаз а, б, с відповідно.

Відмінність вихідних і виміряних при експлуатації значень втрат холостого ходу не повинна перевищувати 30 % [59], тому число функцій приналежності (описують приналежності до станів D_1 і D_2) для кожної з фаз дорівнює двом (D_1 відповідає нормального стану, а D_2 - несправного, але працездатного стану). В ході виконання магістерської роботи за допомогою

методу нечіткої кластеризації було визначено два можливих виду функцій приналежності - прямокутні і пі-подібні.

Основні характеристичні параметри мережі на основі даних втрат неробочого ходу і результати розрахунків наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Основні характеристичні параметри мережі для оцінки стану магнітопровід у трансформатора

ANFIS дані	Значення	
	Прямокутна	Пі-подібна
Тип функцій приналежності	Прямокутна	Пі-подібна
Число пар в навчальній вибірці	74	74
Число пар в тестовій вибірці	70	70
Середня помилка навчання, %	0,092	0,084
Середня помилка тестування, %	5,2	4,7
Помилки першого роду, шт.	2	2
Помилки другого роду, шт.	2	1

Розроблена структура нейро-нечіткого логічного висновку для оцінки стану магнітопровід у трансформатора на основі даних втрат неробочого ходу представлена на рисунку 4.2.

В результаті розрахунку і аналізу основних характеристичних параметрів мережі для оцінки стану магнітопровід у трансформатора на основі даних втрат неробочого ходу було визначено, що оптимальною функцією приналежності для оцінки стану магнітопровід у силових трансформаторів за даними втрат неробочого ходу, як видно з таблиці 4.3, є пі-подібна функція приналежності.

Вибір на користь варіанту використання пі-подібних функцій приналежності підтверджується найменшими помилками навчання (0,084 %) і тестування (4,7 %).

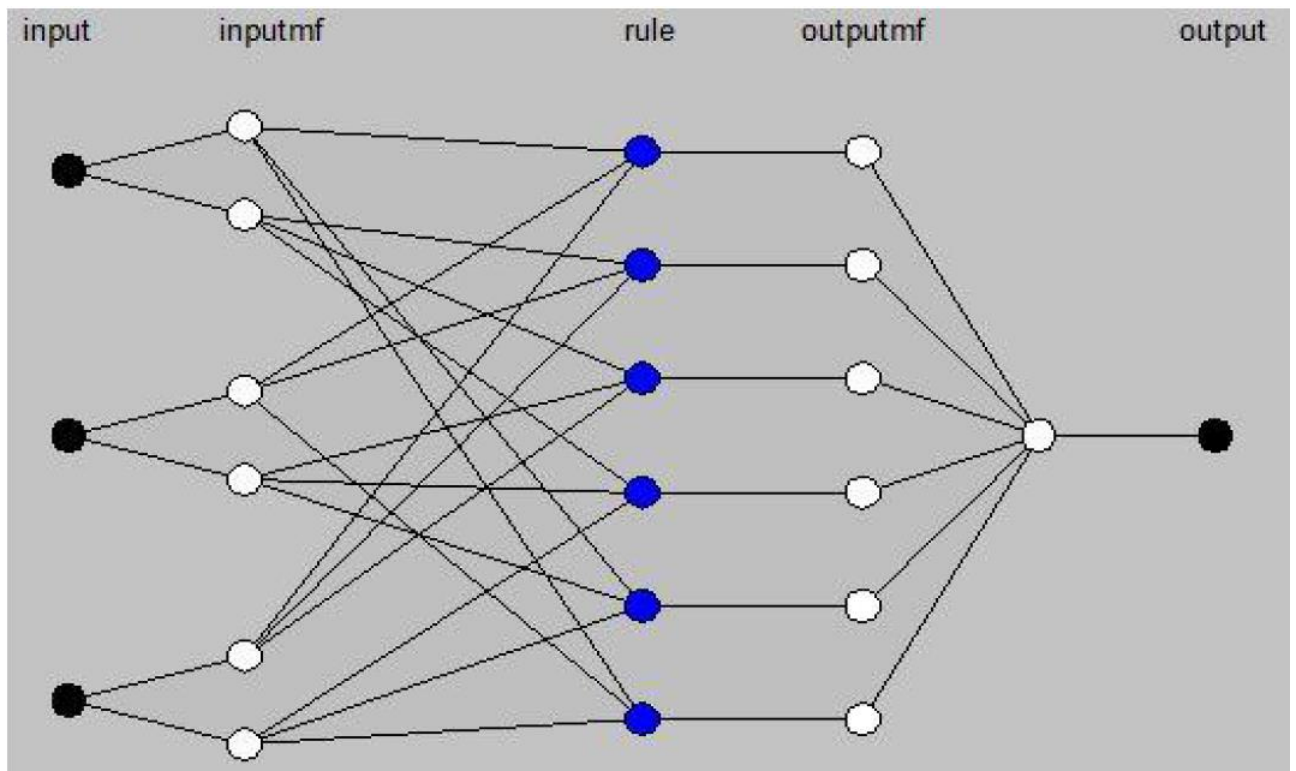


Рисунок 4.2 - Структура нейро-нечіткого логічного висновку для оцінки стану магнітопровід у на основі даних втрат неробочого ходу

Аналіз помилок першого і другого роду на тестовій вибірці з 70 пар також підтвердив ефективність використання пі-подібних функцій приналежності, при цьому з трьох помилково певних несправностей магнітопровідну дві помилки ставилися до помилок першого роду («помилковий дефект») і одна помилка була помилкою другого роду («пропуск дефекту»).

4.2.3 Підсистема оцінювання стану обмоток трансформатора

Загальний стан його обмоток, можна визначити за даними омичних опорів постійному струму обмоток. Опору окремих фаз не повинні відрізнятися більш ніж на 2 %.

За допомогою методу нечіткої кластеризації було визначено два можливих виду функцій приналежності - прямокутні і пі-подібні. Результати

розрахунків для кожного з варіантів представлені в таблиці 4.5. Сформована структура нейро-нечіткого логічного висновку представлена на рисунку 4.3.

Таблиця 4.5 - Основні характеристичні параметри мережі для ОТС обмоток трансформатора за даними омічних опорів

ANFIS дані	Значення	
	Прямокутна	Пі-подібна
Тип функцій приналежності	Прямокутна	Пі-подібна
Число пар в навчальній вибірці	64	64
Число пар в тестованій вибірці	70	70
Середня помилка навчання, %	0,09	0,08
Середня помилка тестування, %	4,5	3,6
Помилки першого роду, шт.	1	2
Помилки другого роду, шт.	2	1

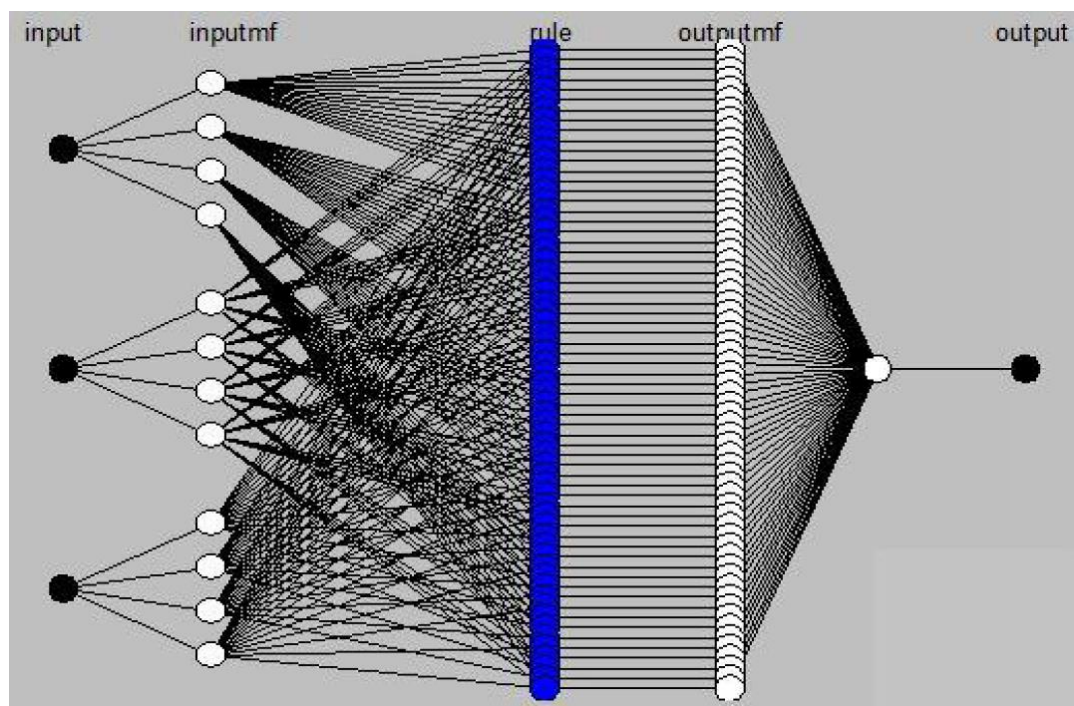


Рисунок 4.3 - Структура нейро-нечіткого логічного висновку для оцінки стану обмоток трансформатора на основі даних омічних опорів

В результаті розрахунку і аналізу основних характеристичних параметрів

мережі для оцінки стану обмоток трансформатора на основі даних омичних опорів, як видно з таблиці 4.5, було визначено, що оптимальною, також як і у всіх попередніх випадках, є пі-подібна функція приналежності. Цей висновок підтверджується найменшими помилками навчання (0,089 %) і тестування (4,1 %).

Аналіз помилок першого і другого роду на тестовій вибірці з 70 пар також підтвердив ефективність використання пі-подібних функцій приналежності, при цьому з трьох помилково певних несправностей обмоток дві помилки ставилися до помилок першого роду («помилковий дефект») і одна помилка була помилкою другого роду («пропуск дефекту»).

Численні дослідження технічного стану силового обладнання і зокрема силових трансформаторів свідчать про наявність прямої кореляції між терміном служби і зростанням аварійності в результаті зростаючого зносу. При тривалій експлуатації об'єктів ГЕС обладнання піддається тривалому впливу струмових навантажень, що надають руйнівну термічне і електродинамічне дію на контакти, ізоляцію і елементи конструкції, високої напруги, а також впливу навколишнього середовища. Капітальний ремонт обладнання надає йому нові експлуатаційні властивості, підвищує експлуатаційний ресурс і/або уповільнює процес старіння.

Стан трансформатора, в тому числі загальний стан його обмоток, можна визначити за даними про рік його введення в експлуатацію (термін експлуатації) та дату капітального ремонту, в ході якого, наприклад, була виконана заміна обмоток трансформатора. Дані показники введені в модель оцінки технічного стану електрообладнання в якості непрямого узагальненого додаткового критерію працездатності (експлуатаційного ресурсу) через відсутність прямих показників оцінки працездатності.

За допомогою методу нечіткої кластеризації для показника експлуатаційного ресурсу були визначені два можливих види функцій приналежності - прямокутні і пі-подібні. Основні характеристичні параметри мережі на основі даних про експлуатаційний ресурсі трансформатора і

результати розрахунків наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 - Основні характеристичні параметри мережі для обмоток на основі даних про експлуатаційний ресурсі

ANFIS дані	Значення	
	Прямокутна	Пі-подібна
Тип функцій приналежності	Прямокутна	Пі-подібна
Число пар в навчальній вибірці	74	74
Число пар в тестовій вибірці	70	70
Середня помилка навчання, %	0,0958	0,093
Середня помилка тестування, %	7,3	6,1
Помилки першого роду, шт.	3	3
Помилки другого роду, шт.	2	1

Розроблена структура нейро-нечіткого логічного висновку для оцінки стану обмоток трансформатора на основі показника експлуатаційного ресурсу представлена на рисунку 4.4.

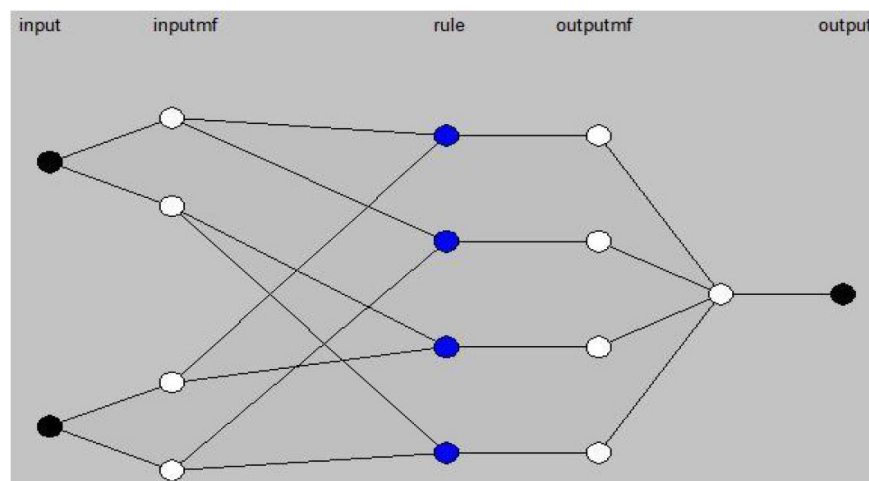


Рисунок 4.4 - Структура нейро-нечіткого логічного виводу для оцінки стану обмоток трансформатора на основі даних про експлуатаційному ресурсі

В результаті розрахунку і аналізу основних характеристичних параметрів

мережі для оцінки стану обмоток трансформатора на основі даних про рік випуску і рік капітального ремонту (експлуатаційного ресурсу), як видно з таблиці 4.5 було визначено, що оптимальною, також як і у всіх попередніх випадках, є пі-подібна функція приналежності. Цей висновок підтверджується найменшими помилками навчання (0,093 %) і тестування (6,1 %).

Аналіз помилок першого і другого роду на тестовій вибірці з 70 пар також підтвердив ефективність використання пі-подібних функцій приналежності, при цьому з чотирьох помилково певних несправностей обмоток три помилки ставилися до помилок першого роду («помилковий дефект») і одна помилка була помилкою другого роду («пропуск дефекту»).

З наведеного вище аналізу для оцінки кожного з чотирьох елементів силових трансформаторів найоптимальнішими функціями належності за критеріями середньої помилки навчання та середньої помилки тестування виявилися пі-подібні функції приналежності. Але варто зауважити, що розроблена система передбачає аналіз стану і інших елементів трансформатора, і інших типів трансформаторів різних класів напруги, а також іншого виду обладнання підстанції і абсолютно неочевидно, що для кожного з елементів різних підоб'єктів пі-подібні функції приналежності будуть оптимальними.

Для визначення оптимальних структур нейро-нечіткого логічного висновку необхідно виконувати аналіз виду і числа функцій приналежності для вирішення кожної конкретної задачі оцінки стану елементів.

Налагодження та тестування розробленої моделі були виконані на різних вибірках для 19 трансформаторів. Наведена в даному розділі настройка моделі оцінки технічного стану обладнання на прикладі силових трансформаторів виконана з метою адаптації математичної моделі до реального об'єкту, при цьому розбіжності між розрахунковими значеннями на основі представленої моделі і фактичними (реальними) значеннями були мінімальними.

Тестування розробленої моделі передбачає перевірку гіпотези про структуру і вигляді розробленої моделі, а також аналіз спроможності розробленої системи до узагальнення даних.

4.2.4 Підсистема оцінювання стану високовольтних вводів

Основними характеристиками високовольтних вводів силового трансформатора 154 кВ є опір ізоляції, ємність ізоляції та тангенс кута діелектричних втрат. Тому в даній моделі оцінка стану високовольтних вводів силового трансформатора виконувалася за даними вимірів однохвилинного опору ізоляції трансформатора R_{60} (випробувань постійним струмом). Згідно [59] найменший опір ізоляції обмоток трансформатора R_{60} , наведене до 20 °С, при схемах вимірювання ВН – СН + НН + К, СН – НН + ВН + К і НН - ВН + СН + К не повинно зменшуватися в порівнянні з попереднім виміром більш ніж в два рази.

Виходячи зі сказаного, число функцій приналежності (описують приналежності до станів D_1 і D_2) для кожного опору ізоляції дорівнює двом (D_1 відповідає нормального стану, а D_2 - несправного, але працездатного стану). В ході виконання магістерської роботи за допомогою методу нечіткої кластеризації було визначено два можливих виду функцій приналежності - прямокутні і пі-подібні.

Розроблена структура нейро-нечіткого логічного висновку для оцінки стану високовольтних вводів трансформатора на основі даних вимірювань опору ізоляції обмоток трансформатора представлена на рисунку 4.5.

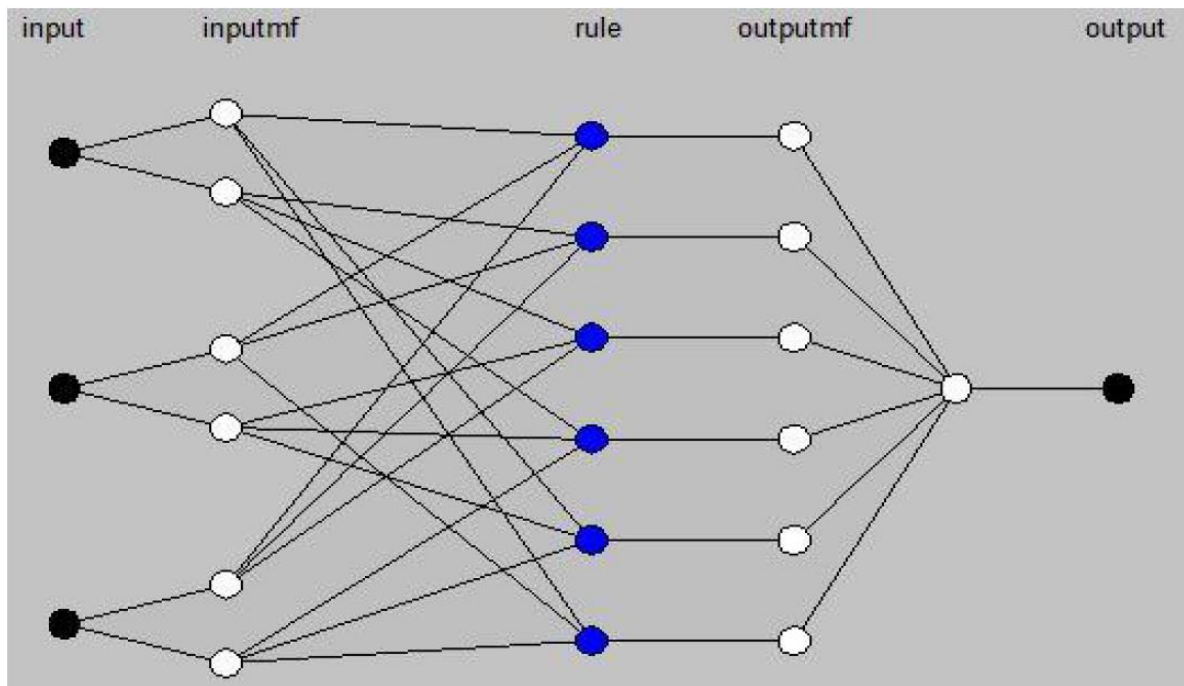


Рисунок 4.5 - Структура нейро-нечіткого логічного висновку для оцінки стану високовольтних вводів на основі даних вимірювань опору ізоляції R_{60}

Основні характеристичні параметри мережі на основі даних вимірювань опору ізоляції обмоток трансформатора і результати розрахунків наведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 - Основні характеристичні параметри мережі для твердої ізоляції трансформатора

ANFIS дані	Значення	
	Прямокутна	Пі-подібна
Тип функцій приналежності	Прямокутна	Пі-подібна
Число пар в навчальній вибірці	74	74
Число пар в тестовій вибірці	70	70
Середня помилка навчання, %	0,054	0,050
Середня помилка тестування, %	4,0	3,5
Помилки першого роду, шт.	2	3
Помилки другого роду, шт.	1	0

В результаті розрахунку і аналізу основних характеристичних параметрів мережі для оцінки стану високовольтних вводів трансформатора на основі даних вимірювань опору ізоляції R_{60} було визначено, що оптимальною функцією приналежності, як видно з таблиці 4.7, є пі-подібна функція приналежності. Вибір на користь варіанту використання пі-подібних функцій приналежності підтверджується найменшими помилками навчання (0,050 %) і тестування (3,5 %).

Аналіз помилок першого і другого роду на тестовій вибірці з 70 пар також підтвердив ефективність використання пі-подібних функцій приналежності, при цьому з трьох помилково певних несправностей твердої ізоляції всі помилки ставилися до помилок першого роду («помилковий дефект»).

4.3 Результиуюча оцінка стану блочного трансформатора ГЕС

В даному підрозділі на основі розробленої моделі оцінки технічного стану нейро-нечіткого логічного висновку пропонується більш детально розглянути роботу системи на конкретному прикладі.

Розрахунковий приклад був виконаний для оцінки технічного стану силового масляного трансформатора ТДЦ-95000/154/13,8 кВ по зрізу часу за квітень-травень місяці 2018 г. Аналіз технічного стану трансформатора був виконаний на основі всієї доступної інформації з даного підоб'єкту, представленої в таблиці 4.8.

Оцінка технічного стану трансформатора ТДЦ-95000/154/13,8 виконувалася на основі оцінки стану його елементів:

- трансформаторного масла (в баку трансформатора) - за даними хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів;
- магнітопроводу - за даними вимірів неробочого ходу;
- високовольтних вводів - за даними вимірів опору ізоляції вводів;
- загального стану обмоток - за даними омичних опорів обмоток, а також за роком випуску трансформатора і року проведення його капітального ремонту

(дані про експлуатаційний ресурсі).

На основі даних, представлених в таблиці 4.8, за допомогою системи нейро-нечіткого логічного висновку формувалися приватні оцінки по кожному з елементів підоб'єкту, що характеризують стан елемента в розглянутий проміжок часу.

Таблиця 4.8 - Вихідні дані для оцінки технічного стану силового трансформатора ТДЦ-90000/154/13,8 кВ

Хроматографічний аналіз газів							
Газ	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Дата	
% об	0,000304	0,000395	0,00167	0,0000548	0,00391	12.04.18	
% об	0,000376	0,00044	0,00183	0,0000574	0,00454	27.04.18	
% об	0,000546	0,000501	0,00193	0,0000566	0,00498	03.05.18	
Втрати неробочого ходу							
фаза	При введенні в експлуатацію			Останній вимір			Дата
	AB	BC	CA	AB	BC	CA	
ΔP _{xx} , Вт	9,2	9,3	11,4	10,5	11,0	15,5	27.04.18
Опір ізоляції							
схема	При введенні в			останній вимір			Дата
	ВН-СН + НН+ К	СН- НН + ВН +К	НН-ВН + СН + К	ВН-СН + НН +К	СН-НН + ВН + К	НН- ВН + СН + К	
R ₆₀ , Ом	3000	2500	3000	4600	4100	3900	27.04.18
R ₆₀ , Ом	3000	2500	3000	2400	2100	3300	03.05.18
Рік.	1963						
Кап.	2009						

Після цього за допомогою шкали відносної важливості Сааті формувалися узагальнені оцінки технічного стану по кожному з елементів

підоб'єкту за всі аналізовані проміжки часу. Шкала Саати {0; 1; 3; 5; 7} використовувалася для обліку інтенсивності прояву тих чи інших властивостей об'єктів електричної мережі. Бал 0 відповідає відсутності будь-якої значущості характеристики об'єкта дослідження, 1 - дуже слабкою значимості, 3 - слабкою значимості, 5 - більш-менш суттєвою значущості, 7 - сильної значимості оцінки [60].

Після визначення узагальненої оцінки по кожному з елементів підоб'єкту формувалася середньозважена оцінка - оцінка стану.

Обчислення середньозваженої нормалізованої оцінки для кожного підоб'єкту виконується за наступним виразом

$$C_{kj} = \frac{\sum_{l=1}^L b_{lj} X_{kjl}^H}{\sum_{l=1}^L b_{lj}}, \quad (4.1)$$

де X_{kjl}^H - нормалізована оцінка показника l щодо елементу j підоб'єкту k ; отримана в результаті роботи гібридної мережі, L - загальна кількість показників працездатності елемента, b_{lj} - бальна оцінка за шкалою відносної важливості Сааті характеристичного показника l щодо елемента j .

Слід зазначити, що будь-яка підсумкова оцінка стану підоб'єкту відповідає певним ранжируванню альтернативам рішень щодо його подальшої експлуатації.

Результати розрахунків, отримані на основі розробленої системи оцінки технічного стану електрообладнання на прикладі силового масляного трансформатора ТДЦ-95000/154/13,8 кВ, представлені в таблиці 4.9.

В результаті обробки інформації, отриманої при використанні системи оцінки, стан масляного силового трансформатора ТДЦ-95000/154/13,8 кВ можна характеризувати наступним чином: як несправне, але працездатний стан D_2 з ймовірністю 74,4 %; як граничний стан D_3 - з ймовірністю 26,6 %, представлено на рисунку 4.6.

Таблиця 4.9 - Результати оцінки технічного стану силового трансформатора ТДЦ-95000/154/13,8 кВ

№	Елемент трансформатора	Дані	Оцінка стану	Бал
1	Характеристика трансформаторного масла як хар-ка загального стану трансформатора	ХАРГ (Електро. дефект)	0,83	5
		ХАРГ (Терм. дефект)	0	1
2	Магнітопровід	Втрати холостого ходу	0	1
3	Високовольтні вводи	Опір ізоляції	0,79	5
4	Загальний стан обмоток	Омічний опір	0,3	3
		Рік випуску і рік кап. ремонту	0	1
Оцінка стану трансформатора			0,628	
Кількісна характеристика рішення			0,706	

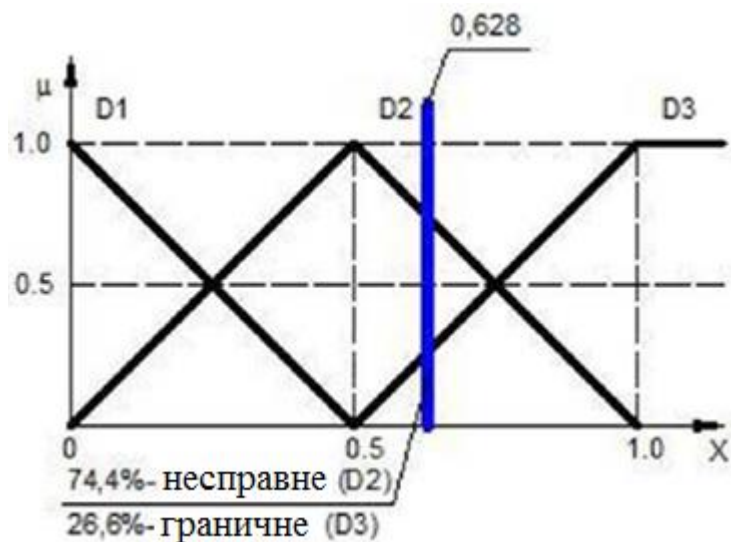


Рисунок 4.6 - Оцінка стану силового трансформатора ТДЦ-95000/154/13,8

4.4 Аналіз отриманих результатів

За результатами отриманої оцінки технічного стану силового масляного трансформатора ТДЦ-95000/154/13,8 кВ можуть бути прийняті наступні рішення, що наведені на рисунку 4.7:

- виконати ремонт (ймовірність прийняття даного рішення складає 88,3 %);
- вивести з експлуатації (ймовірність прийняття даного рішення складає 11,7 %).

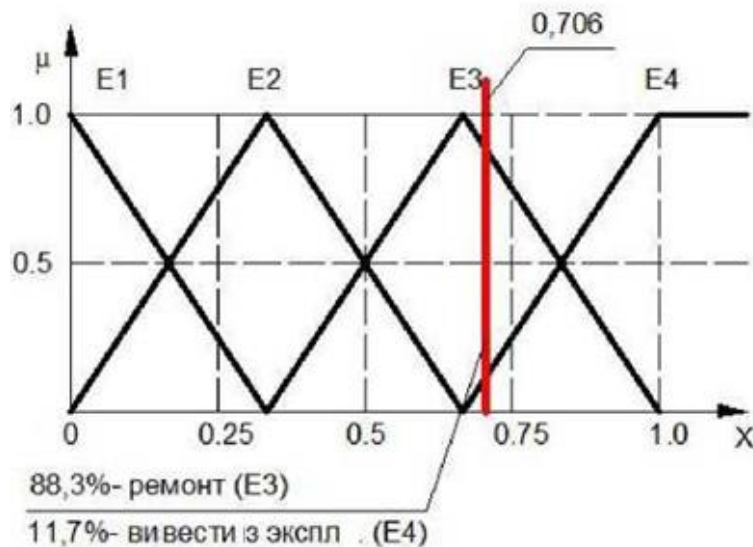


Рисунок 4.7 - Рішення на основі оцінки силового трансформатора ТДЦ-95000/154/13,8

Незважаючи на переважання ймовірності прийняття рішення про ремонт аналізованого трансформатора, кінцеве рішення про переведення обладнання в потрібне стан залишається за персоналом (людиною).

Для перевірки результату оцінки стану трансформатора ТДЦ-95000/154/13,8, виконаного за допомогою розробленої системи, було проведено аналіз даного підоб'єкту, за висновком якої також був зафіксований дефект електричного характеру та надано рекомендації про виведення

трансформатора в ремонт, що підтверджує коректність розробленої моделі оцінки технічного стану масляного трансформатора 154 кВ на основі нейро-нечіткого логічного висновку та її налаштування.

Розроблена система є «порадником» і виконує агрегування доступної інформації про об'єкт дослідження, а також дозволяє формалізувати експертні знання для визначення технічного стану обладнання з урахуванням експлуатаційного досвіду.

В рамках апробації розробленої моделі виконана оцінка технічного стану такого об'єкта електричної мережі як силовий трансформатор. Тестування розробленої моделі передбачає перевірку гіпотези про структуру і вигляді розробленої моделі, а також аналіз спроможності розробленої системи до узагальнення даних. З цією метою сформована база знань, заснована на принципах діагностики силового маслонаповненого обладнання, експлуатаційному досвіді, і допустимих межах технічних показників, і база даних - для настройки і тестування розробленої моделі, що включає різні вибірки технічних показників для 70 силових трансформаторів.

Для кожного елемента силового трансформатора - обмоток, магнітопроводу, масляної і твердої ізоляції, які в сукупності утворюють комплексний об'єкт, визначена оптимальна структура нейро-нечіткого логічного висновку, що полягає у визначенні типу функцій належності та їх числа.

Результатом роботи системи оцінки стану визначена якісна, що характеризує приналежність до якого-небудь стану працездатності з рекомендацією щодо його подальшої експлуатації.

Узагальнена оцінка технічного стану визначається з використанням середньозваженої бальної оцінки. Підсумковий результат свідчить про наявність дефекту електричного характеру, що визначає стану як несправне з рекомендацією щодо виведення обладнання в ремонт.

Коректність розробленого походу на основі нейро-нечіткого логічного висновку підтверджується адекватністю результату в порівнянні з аналогічним системним підходом оцінки технічного стану.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА ГЕС

5.1 Основні небезпечні фактори на підприємстві

Під шкідливими факторами розуміють умови виробничого середовища, технологічного та виробничого процесів, які за нераціональної організації праці впливають на стан здоров'я працівників та їх працездатність.

Шкідливі виробничі фактори за характером впливу поділяються на фізичні (токсичні речовини, пил, пара, газ, електрика), хімічні (параметри повітря у приміщенні (температура, вологість, швидкість руху повітря), вібрація, шум, нетоксичний пил, газ, пара, різні види випромінювань, освітленість), біологічні (мікроорганізми, бактерії, інфекції) та психологічні (фізичні та нервово-психічні перенавантаження, монотонність праці, емоційне перенавантаження).

5.1 Основні небезпечні фактори на підприємстві.

Залежно від характеру походження виробничі шкідливі фактори поділяються на три групи:

- фактори, пов'язані з трудовим процесом. Вони зумовлені нераціональною організацією праці;

- фактори, пов'язані з виробничим процесом. Вони створюються за рахунок технічних недоліків виробничого обладнання. Майже всі вони нормуються шляхом установлення стандартів, санітарних норм і кількісно оцінюються;

- фактори, пов'язані із зовнішніми обставинами праці і виробництва.

Наслідком дії виробничих шкідливих факторів можуть бути:

- професійні захворювання або посилення захворювання, які вже має працівник;

- зниження працездатності та продуктивності праці.

Виробничий шум – це хаотична суміш різних за силою і частотою звуків,

що виникають у середовищі і безпосередньо впливають на працездатність персоналу.

Джерела шуму: всі види транспорту, насоси, промислові об'єкти, пневматичні та електричні інструменти, верстати, будівельна техніка тощо. Вимірювання шуму на робочих місцях здійснюється вимірювачами шуму та аналізаторами спектра шуму. Рівень шуму на робочих місцях потрібно контролювати не менше 1 раз на рік. Зниження шуму можна досягти шляхом заміни металу іншими матеріалами – пресованим текстолітом, капроном та різними пластмасами.

На Дніпровській ГЕС досить високий рівень шуму спостерігається у машинному залі. Це обумовлено роботою гідротурбін, які і призводять до виникнення шуму.

5.2 Класи зон за вибухо- та пожежонебезпечністю електроустановок

Для вибору і улаштування електрообладнання (машин, апаратів, пристроїв, мереж) з відповідним рівнем або ступенем захисту на виробництвах, у приміщеннях, у просторі біля технологічних установок і комунікацій визначаються вибухонебезпечні та пожежонебезпечні зони.

Вибухонебезпечна зона - приміщення або обмежений простір у приміщенні, біля зовнішньої установки, в якому є або можуть утворитися вибухонебезпечні суміші (ПУЕ85).

Пожежонебезпечна зона - простір усередині або поза приміщеннями, в межах якого постійно або періодично обертаються горючі (спалимі) речовини і в якому вони можуть знаходитися при нормальному технологічному процесі або при його порушеннях (ПУЕ85).

При визначенні вибухонебезпечних зон враховується, що:

- вибухонебезпечна зона в приміщенні займає весь об'єм

приміщення, якщо об'єм вибухонебезпечної суміші перевищує 5 % вільного об'єму приміщення;

- вибухонебезпечною вважається зона в приміщенні в межах до 5 м по горизонталі й вертикалі від технологічного апарата, з якого можливе виділення горючих газів або парів ЛЗР, якщо об'єм вибухонебезпечної суміші дорівнює або менше 5 % вільного об'єму приміщення. Приміщення за межами вибухонебезпечної зони слід вважати вибухобезпечним, якщо немає інших факторів, які створюють у ньому вибухонебезпеку.

Визначення класу зон за вибухо- та пожежонебезпечністю здійснюється шляхом послідовної перевірки їх належності до класу від вищого (VI, III) до нижчого (VIIa, IIII).

5.3 Електробезпека при роботі в електроустановках

Електробезпека – система організаційних заходів і технічних засобів, що забезпечують захист людей від шкідливої та небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електричного поля й статичної електрики.

Електротравма – травма, спричинена дією на організм людини електричного струму і (або) електричної дуги.

Електротравматизм – явище, що характеризується сукупністю електротравм.

Електроустановки – обладнання (разом зі спорудами і приміщеннями, в яких вони розташовані), призначене для виробництва, перетворення, трансформації, передачі, розподілу електричної енергії та її перетворення.

Електроприміщення – приміщення, або відгорожені, наприклад, сітками їх частини, доступні тільки для кваліфікованого персоналу, в яких розміщені електроустановки. Відкриті або зовнішні електроустановки – електроустановки, не захищені від атмосферного впливу. Закриті або внутрішні електроустановки – установки, захищені будівлею від атмосферного впливу. Електроустановки,

захищені тільки навісами, сітковими огороженнями і т. ін., розглядаються як зовнішні.

Електроустановки за напругою розділяються на дві групи: до 1000 В та понад 1000 В, що обумовлює відповідні правила. Практика свідчить, що електротравми, як показано вище, частіше трапляються в електроустановках з напругою до 1000 В.

Статистичні дані щодо електротравматизму свідчать, що більшість електротравм пов'язані з дотиком до струмовідних частин електроустановок (близько 55%). Якщо в установках до 1000 В небезпека електротравм пов'язана, переважно, з дотиком до неізольованих струмовідних елементів електроустановок, то за напруги більше 1000 В електро-травми можливі і при дотику до ізольованих струмовідних частин. Основними заходами забезпечення недоступності струмовідних частин є застосування захисних огорожень, закритих комутаційних апаратів (пакетних вимикачів, комплектних пускових пристроїв, дистанційних електромагнітних приладів управління споживачами електроенергії тощо), розміщення неізольованих струмовідних частин на недосяжній для ненавмисного доторкання до них інструментом висоті, різного роду пристосуваннями тощо, обмеження доступу сторонніх осіб в електротехнічні приміщення.

Допуск до роботи в діючих електроустановках.

До електротехнічного персоналу відносяться особи, які зайняті на обслуговуванні та експлуатації електроустановок. їх умовно поділяють на такі групи:

- адміністративно - технічний персонал (начальники служб, цехів, майстри);
- оперативний персонал (черговий персонал, який безпосередньо обслуговує електроустановки);
- ремонтний персонал (працівники ремонтно—налагоджувальних служб з обслуговування електроустановок);
- ремонтно - оперативний персонал особи, які оперативно обслуговують

електроустановки, де немає чергового персоналу).

До роботи в електроустановках допускаються особи відповідних кваліфікаційних груп з електробезпеки із оформленням наряду - допуску або за розпорядженням, фіксованим письмово, де визначаються: місце, допуск до роботи; нагляд під час роботи; оформлення перерви в роботі; переведень на інші робочі місця і закінчення роботи.

Відповідальними за безпеку роботи є особи, які видають розпорядження або наряд-допуск.

Особи, які допускаються до роботи в електроустановках, проходять медичний огляд при влаштуванні на роботу і мають посвідчення на право роботи, що підтверджується періодично один раз на рік при обслуговуванні діючих електроустановок.

Наряд-допуск - це письмове розпорядження на роботу, в якому визначене місце роботи, час початку і закінчення роботи, склад бригади, особи, відповідальні за безпеку роботи.

До роботи з електрикою не допускаються особи, молодші 18 років.

Кваліфікаційні групи з електробезпеки електротехнічного персоналу.

До електротехнічного персоналу належать особи, які обслуговують і експлуатують діючі електроустановки. Від кваліфікації електротехнічного персоналу, його знань та навичок істотно залежить безпека при експлуатації та обслуговуванні електроустановок.

Для електротехнічного персоналу встановлено п'ять кваліфікаційних груп з електробезпеки.

I група. Група присвоюється особам, які не мають спеціальної електротехнічної підготовки, але мають елементарну уяву про небезпеку ураження електричним струмом і заходи електробезпеки при роботі на обслуговуваній ділянці, електроустановці. Для I групи стаж роботи в електроустановках не нормується.

II група. Особи цієї групи повинні отримати елементарне технічне знайомство з електроустановками, чітко уявляти небезпеку ураження

електрострумом, наближення до струмопровідних частин, знати основні заходи безпеки при роботі на електроустановках, вміти надати першу допомогу.

III група. Особи, що належать до цієї групи, мають: знати будову електричних установок та вміти їх обслуговувати; мати уявлення про небезпеку під час обслуговування електричних установок; знати загальні правила безпеки, правила допуску до роботи в електричних установках, напругою до 1000 В, спеціальні правила безпеки з тих видів робіт, які входять до кола обов'язків цієї особи; вміти здійснювати нагляд за тими, хто працює з електроустановками, та надавати першу допомогу.

IV група. Особи цієї групи повинні: володіти знаннями з електротехніки в обсязі спеціалізованого профтехучилища; мати повне уявлення про небезпеку під час роботи на електроустановках; знати повністю правила технічної експлуатації (ПТЕ) та правила техніки безпеки (ПТБ) при експлуатації електроустановок; знати установку настільки, щоб вільно орієнтуватись у тому, які саме елементи мають бути вимкненими для безпечного виконання робіт; перевіряти виконання необхідних вимог безпеки; вміти організовувати безпечне виконання робіт та здійснювати нагляд за ними в електричних установках, напругою до 1000 В; знати схему та обладнання своєї ділянки; вміти навчати персонал інших груп правилам безпеки і наданню першої допомоги потерпілому.

V група. Особи цієї групи повинні: знати всі схеми та обладнання своєї ділянки; знати Правила безпечної експлуатації електроустановок. Правила будови електроустановок, Правила експлуатації електрозахисних засобів. Знати, чим викликана та чи інша вимога правил; вміти організувати безпечне виконання робіт та здійснювати нагляд в електричних установках будь – якої напруги; вміти навчати персонал інших груп правил безпеки і наданню першої допомоги потерпілому.

Склад бригади

Чисельність бригади та її склад з урахуванням груп з електробезпеки повинні зумовлюватись виходячи з міри безпеки виконання робіт, а також можливості забезпечення нагляду за членами бригади з боку керівника робіт

(наглядача).

Член бригади повинен мати групу II. У разі виконання роботи під напругою член бригади повинен мати групу III, за винятком робіт на ПЛ, зазначених в пункті 16.4.5 цих Правил, виконувати які повинен член бригади з групою IV.

До складу бригади на кожного її члена з групою III дозволяється залучати одного працівника з групою I, але загальна кількість членів бригади з групою I не повинна перевищувати трьох.

Дозволяється працювати одноособово:

- за розпорядженням;
- у порядку поточної експлуатації;

Змінювати склад бригади дозволяється працівнику, який видає наряд, або іншому працівнику, який має право видавати наряд для роботи в цій електроустановці. Вказівки щодо зміни складу бригади можна передавати по телефону, радіо або з нарочним керівнику робіт або допускачу, які у наряді за власним підписом вказують прізвище та ініціали працівника, який дав вказівки щодо змін.

Керівник робіт повинен проінструктувати працівників, введених до складу бригади, про заходи щодо безпечного виконання робіт.

5.4 Випробування з подаванням підвищеної напруги

До проведення випробувань слід допускати лише тих працівників, які пройшли спеціальну підготовку та перевірку знань. Керівник робіт, крім того, повинен пройти стажування протягом місяця під контролем досвідченого працівника.

Працівники, допущені до проведення випробувань, повинні мати запис у посвідченні про перевірку знань.

Випробування електрообладнання, в тому числі і за межами електроустановки (в недіючих електроустановках, на складах, території

підприємства, в полі тощо), що проводяться з використанням пересувної випробної установки, слід виконувати за окремим нарядом на випробування. Наряд на випробування видає працівник, який прийняв рішення про необхідність їх проведення та має право видавати наряд. Допуск до випробувань в електроустановках здійснює оперативний або оперативно-виробничий працівник, який має такі права. У недіючих електроустановках, на складах, території підприємств, у полі тощо допуск до випробувань здійснює керівник робіт за нарядом.

В електроустановках до 1000 В випробування допускається виконувати за розпорядженням.

Випробування проводить бригада, в якій керівник робіт повинен мати групу IV, член бригади - групу III, а працівник, виставлений для охорони, - групу II. До складу бригади, яка проводить випробування, можуть входити виробничі працівники, які залучаються до виконання підготовчих робіт та нагляду за обладнанням.

Допуск за нарядами, виданими на проведення випробувань та підготовчих робіт до них, слід здійснювати тільки після того, як інші бригади, які працюють на обладнанні, що підлягає випробуванню, виведені з робочих місць та їхні наряди здані допускатчу.

У разі необхідності слід виставити охорону зі складу членів бригади з групою II для запобігання наближенню сторонніх осіб до випробної установки, з'єднувальних проводів та до обладнання, що випробовується. Члени бригади, які виставлені для охорони, повинні знаходитись зовні огороження та вважати, що випробне обладнання перебуває під напругою. Залишити пост ці працівники можуть тільки з дозволу керівника робіт.

У разі проведення випробувань кабельної лінії, коли протилежний її кінець розташований в замкненій камері, у відсіку КРУ або в приміщенні, на дверях чи огороженні слід вивішувати плакат "Випробування. Небезпечно для життя!".

Якщо двері і огороження не замкнені або випробуванню підлягає кабель

з розробленими на трасі жилами, то крім плакатів, що вивішуються біля дверей, огорожень та розроблених жил кабелю, слід виставити охорону з включених до складу бригади працівників з групою II або чергових працівників.

Роботи з мегомметром та електровимірювальними приладами

Вимірювання опору ізоляції мегомметром в діючих електроустановках слід проводити тільки після виконання необхідних організаційних та технічних заходів щодо підготовки робочого місця.

Вимірювати опір ізоляції мегомметром може один працівник з групою III.

В тому разі, коли це вимірювання є складовою частиною робіт, обумовлювати його в наряді або розпорядженні не вимагається.

Вимірювання опору ізоляції мегомметром здійснюється тільки на вимкнених струмовідних частинах, з яких знято залишковий заряд шляхом попереднього їх заземлення. Заземлення зі струмовідних частин слід знімати тільки після підімкнення мегомметра.

Забороняється у разі проведення робіт з мегомметром доторкатися до струмовідних частин, до яких він приєднаний. Після закінчення робіт необхідно зняти зі струмовідних частин залишковий заряд шляхом їх короткочасного заземлення.

Приєднувати та від'єднувати прилади, що потребують розривання електричних кіл, які перебувають під напругою до 1000 В, необхідно після того, як напругу з цих кіл знято. Приєднання і від'єднання приладів, що не потребують розривання електричних кіл, допускається виконувати під напругою із застосуванням електрозахисних засобів.

Нещасні випадки та їх уникнення.

Головна схема ГЕС виконана за умови безпечного виконання технічних та технологічних заходів її експлуатації.

Більша частина електричних уражень фактично відбувається через низький рівень організації робіт, грубих порушень правил, у тому числі:

- безпосереднього дотику до відкритих струмоведучих частин і проводів;
- дотику до струмопровідних частин, ізоляція яких ушкоджена;

- дотику до струмоведучих частин за допомогою предметів з низьким опором ізоляції;
- відсутності або порушення захисного заземлення;
- впливу крокової напруги та ін.

Ступінь важкості електричного враження залежить від багатьох факторів: стану, величини опору організму, тривалості дії, природи й частоти струму, шляхи струму в організмі, умов зовнішнього середовища.

Результат електровраження залежить і від фізичного стану людини. Якщо він хворий, стомлений або перебуває в стані сп'яніння, пригніченості, то дія струму особливо небезпечна.

У якості профілактики електровражень виконуються різні заходи. Нижче розглядаються способи захисту людей від враження електричним струмом у випадку виникнення напруги на обладнанні, що не перебуває під напругою.

Захисне заземлення. Так називається електричне з'єднання обладнання із землею за допомогою заземлювачів. Воно виконується з метою зниження напруги до безпечної. Відповідно до правил опір захисного заземлення не має перевищувати 4 Ом. Заземленню підлягають - корпуси електричних машин, трансформаторів, апаратів, світильників; приводи електричних апаратів; вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів; каркаси розподільних щитів керування, щитків і шафи; металеві конструкції розподільних пристроїв, металеві кабельні конструкції, металеві корпуси кабельних муфт; металеві оболонки й броні контрольних і силових кабелів, проводів; сталеві труби електропроводки й інші металеві конструкції, пов'язані з установкою електрообладнання; арматури світильників, металеві корпуси пересувних і переносних електроприймачів і ін.

Захисне занулення. Занулення - захисний захід, застосовуваний тільки в мережах із заземленою нейтраллю напругою до 380/220 В. Воно, як і заземлення, призначено для захисту людей, шляхом відключення обладнання.

Конструктивне занулення - приєднання підлягаючого захисту об'єкта до нульового проводу мережі.

Захисне відключення. Так називається система захисту, заснована на автоматичному відключенні струмоприймача у випадку, якщо на його металевих частинах, що не перебувають під напругою, з'являється струм. Захисне відключення виконується за допомогою автоматичних вимикачів або контакторів, оснащених спеціальним реле захисного відключення від мережі ушкодженого приймача струму. Перевага захисного відключення в його миттєвій (приблизно 0,02 с) дії. Крім того, захисне відключення може спрацювати навіть на самому початку появи ушкодження.

Електрозахисні засоби (ЕЗЗ) – це переносні або перевізні вироби, що служать для захисту людей, що працюють з електроустановками, від ураження електричним струмом, дії електричної дуги і електромагнітних полів.

Для персоналу, що працює в електроустановках застосовуються такі захисні засоби: ізолюючі штанги, кліщі, діелектричні рукавички і рукавиці, діелектричні боти і калоші; ізолюючі килимки і доріжки ізолюючі підставки, покажчики напруги, струмовимірювальні кліщі, переносні заземлення, окуляри, монтерський інструмент.

Електрозахисні засоби поділяються на ізолювальні (ізолювальні штанги, кліщі, накладки, діелектричні рукавички тощо), огорожувальні (огороження, щитки, ширми, плакати) та запобіжні (окуляри, каски, запобіжні пояси, рукавиці для захисту рук).

Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові.

Основні ізолювальні електрозахисні засоби розраховані на напругу установки і при дотриманні вимог безпеки щодо користування ними забезпечують захист працівників.

Додаткові електрозахисні засоби навіть при дотриманні функціонального їх призначення не забезпечують надійного захисту працюючих і застосовуються одночасно з основними для підвищення рівня безпеки. У разі застосування основних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб. При захисті працівників від напруги кроку досить використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів.

ВИСНОВКИ

Розглянуті існуючі моделі оцінювання технічного стану електрообладнання головної схеми Дніпровської ГЕС. Визначена необхідність створення нових підходів до якісної і кількісної оцінки технічного стану обладнання, здатних не тільки виконувати аналіз стану на базі доступної інформації про об'єкт дослідження з урахуванням експлуатаційного досвіду, але і на її основі визначати рішення щодо подальшої експлуатації цього обладнання.

Визначено, що в основі узагальненої оцінки технічного стану об'єкта електричної схеми ГЕС, належить комплексне дослідження, яке має на увазі одночасне і узгоджене вивчення показників по кожному з сукупності підоб'єктів і їх елементів, які є складовими елементами головної схеми ГЕС. Кожен показник характеризує той чи інший фізичний процес, який впливає на стан підоб'єкту (елемента) в процесі функціонування ГЕС. Визначено та обґрунтовано рішення задачі комплексної ОТС електричного обладнання ГЕС на основі нейро-нечіткого логічного висновку.

Розроблено нейро-нечітку модель оцінки технічного стану і визначено базу знань для пошуку можливих несправностей (дефектів) обладнання головної схеми Дніпровської ГЕС з метою вибору рішень для забезпечення необхідного технічного стану. Принцип декомпозиції, використаний в даній роботі для оцінки окремих підоб'єктів і їх складових елементів, дає можливість визначення індивідуальних характеристик працездатності кожного з них.

Визначено способи вирішення завдання вдосконалення системи оцінки технічного стану обладнання головної схеми Дніпровської ГЕС на основі діагностичної інформації відповідно до діючих вимог та з урахуванням формалізованих знань і досвіду експертів. Реалізація розробленої системи за допомогою OLAP-технологій дозволить інтегрувати дані різних об'єктів (від елементарних до комплексних), проектувати звіти без участі програмістів, аналізувати дані по будь-яким категоріям і показниками в темпі процесу на будь-якому рівні деталізації, робити моніторинг і прогнозування ключових показників

працездатності електричної схеми ГЕС.

Виконана реалізація розробленої моделі на базі програмного комплексу Matlab на прикладі оцінки технічного стану силових трансформаторів 154 кВ, яка показала достатню для практичної реалізації точність оцінки.

Розроблена модель оцінки технічного стану для електричного обладнання ГЕС може бути використана для створення інтелектуальної системи нагляду за технічним станом обладнання всієї енергосистеми та прийняття рішень щодо подальшої експлуатації обладнання або його заміни, ремонту чи модернізації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер - М.: Машиностроение, 1978.- 240 с.
2. Ключев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В. В. Ключев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др. - М.: Машиностроение, 2003. - 657 с.
3. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 240 с.
4. Б. Б. Бандурян, Г. М. Федоренко, Л. Б. Остапчук, В. О. Саратов Контроль та діагностика технічного стану основного електротехнічного та теплового обладнання АЕС, ТЕС і ГЕС на основі тепловізійних технологій // Проблеми безпеки атомних електростанцій та Чорнобиля, -2006 -№4 -с.125-131.
5. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання Міністерство палива та енергетики України Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики» - Київ, 2007. -264 с.
6. Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій [Текст]: монографія / О. О. Матусевич. - Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. - 295 с.
7. Моделі розрахунку надійності розподільних електричних мереж, Київ., Зб. наукових праць ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського, 2018. - 380с.
8. Єрмолаєв С.О. Експлуатація енергообладнання та засобів автоматизації в системі АПК: Підручник/ С.О. Єрмолаєв, В.О. Мунтян, В.Ф. Яковлев; под ред. С.А. Ермолаєва. - К.: Мета. 2003. - 543 с.
9. Пушкар, М.С. Проектування систем автоматизації: навч. посібник / М.С. Пушкар, С.М. Проценко - Д.: НГУ, 2013, -268 с.

10. Давиденко И. В. Структура экспертно-диагностической и информационной системы оценки состояния высоковольтного оборудования / И. В. Давиденко, В. П. Голубев, В. И. Комаров, В. Н. Осотов // Электрические станции: ежемесячный производственно-технический журнал. - 1997. - №6. - С. 25-27.

11. ГОСТ 18353 – 79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. 1.11.79. - М., 1979. -18 с.

12. Khalyasmaa A. I. Electrical equipment life cycle monitoring / A. I. Khalyasmaa, SA Dmitriev, DA Glushkov, DA Baltin, NA Babushkina // Advanced Materials Research. - 2014. - Vol. 1008-1009 - P. 536-539.

13. Проблеми загальної енергетики. Національна академія наук України інститут загальної енергетики, вип. 1, 2014, - 74 с.

14. Бондаренко В.Е., Щапов Е.Ф., Шутенко О.В Повышение эффективности эксплуатационного контроля трансформаторных масел - Харьков, НТУ “ХПИ”, 2007. - 452 с.

15. Хальясмаа А. И. Вопросы реализации оценки технического состояния силового оборудования на электрических подстанциях / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, М. В. Осотова // Вопросы современной науки и практики. - 2013. - №1(45). - С. 289 - 300.

16. Тюрюмина А. В., Батрак А. П., Секацкий В. С. Современное состояние вопроса диагностики силовых трансформаторов в зарубежных странах // Молодой ученый. - 2016. - №8. - С. 321-325.

17. Методичні рекомендації з оцінки технічного стану силових трансформаторів напругою від 35 кВ до 750 кВ Міненерговугілля України наказом від 28.10. 2014 року № 761.

18. Давиденко И. В. Структура экспертно-диагностической и информационной системы оценки состояния высоковольтного оборудования / И. В. Давиденко, В. П. Голубев, В. И. Комаров, В. Н. Осотов // Электрические станции. - 1997. - №6. - С. 25-27.

19. Шутенко О. В. Анализ функциональных возможностей экспертных

систем, используемых для диагностики состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования [Электронный ресурс] / О. В. Шутенко, Д. В. Баклай, // Вестник НТУ «ХПИ». - 2010. - С. 179-193.

20. Моделювання і оцінка ризику відмови силового трансформатора при збуреннях в зовнішній електричній мережі / Є. І. Бардик, М.П. Болотний // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. -2015. -Вип. 5. - С.56-63.

21. Швороб І. Б. Методи та засоби екстракції та аналізу слаботекстурованих текстових даних на основі документо-орієнтованого графа: дис. канд. техн. наук: - Львівська політехніка. – 2018, - 176 с.

22. Конспект лекцій з курсу “Системи прийняття рішень” для студентів напряму підготовки 6.030502 “Економічна кібернетика”, спеціальності 051 “Економіка” / С. В. Гринчуцька - Тернопіль, ТНТУ імені І. Пулюя, 2017, -130 с.

23. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Вінниця, 1999. - 320 с.

24. Jang J.-SR ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System / J.SR Jang // IEEE Trans. Systems & Cybernetics. - 1993. - № 23. - С. 665 - 685.

25. Ларичев О. И. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития / О. И. Ларичев, А. В. Петровский // Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика. - 1987. - Т.21. - С. 131-164.

26. Нейронні мережі в Matlab. Попередня обробка даних [електронний ресурс]: офіц. сайт. - Режим доступу: <http://neural-networks.ru/Predvaritelnaya-obrabotka-dannyh-59.html>. - Загл. з екрану (дата звернення 10.01.2018).

27. Лагутін, В. М. Експлуатація електричних станцій. Ч.І. Технічне обслуговування електричних машин та трансформаторів : навчальний посібник / В. М. Лагутін, О. Б. Бурикін, В. В. Тептя. - Вінниця : ВНТУ, 2013. - 93 с.

28. ГОСТ 19431 – 84 Энергетика и электрификация. Термины и определения: 27.03.84. - М., 1986. - 73 с.

29. Васильев А. А. Электрическая часть станций и подстанций: Учебник

для вузов / А. А. Васильев, И. П. Крючков, Е. Ф. Наяшкова и др. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 576 с.

30. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные данные для курсового и дипломного проектирования: Учеб. Пособие для вузов / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 608 с.

31. Глушков В. М. Энциклопедия кибернетики: в 2 т. / В. М. Глушков, Н. М. Амосов, И. А. Артеменко. - Киев: Главная редакция украинской советской энциклопедии, 1974. 2 т. - 624 с.

32. Конспект лекцій з дисципліни «Надійність і діагностика електрообладнання» для студентів за напрямом 6.050702 “ Електромеханіка”/ Укл.: к.т.н., доцент Ключев О.В. - Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013, 143 с.

33. Національний стандарт України Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і (або) експлуатації в умовах малої статистики відмов. ДСТУ. Видання офіційне Київ ДП «УкрНДНЦ» -2015.

34. «Методика оцінки технічного стану силових трансформаторів напругою від 35 кВ до 750 кВ» від 11.10.2012 № 788 (СОУ-Н МЕВ 40.1-21677681-71:2012).

35. Берко А.Ю., Верес О.М., Пасічник В.В. Системи баз даних та знань. Навчальний посібник - Видавництво: Магнолія, 2006 -456с.

36. Емельянов С. Л. Основы построения баз данных: Учебно-методическое пособие / Емельянов С. Л., Якутко В. Ф., Логинова Н. И. – Одесса: Юридична література, 2006. – 248 с.

37. Яцишин А. Ю. Інформаційна технологія побудови розподілених сховищ даних гібридного типу: дис. канд. техн. наук: / Яцишин Андрій Юрійович Національний технічний університет України, Київський політехнічний інститут. -2016 -192с.

38. Світличний О.О., Плотницький С.В. Основы геоинформатики: Навчальний посібник / За заг. ред. О.О. Світличного. - Суми: ВТД

«Університетська книга», 2006. - 295 с.

39. Автоматика / Automatics – 2011 : матеріали 18 Міжнар. конф. з автомат. упр., 28-30 верес. 2011 р. / МОНМС України, НАН України, Ін-т кібернетики, Міжнар. ННЦ інформ. технологій і систем, Ін-т косм. дослідж. НАН України і ДКА України, Укр. асоц. з автомат. керування, Нац. ком. Росії з автомат. упр., Моск. держ. ун-т ім. М.В. Ломоносова, Нац. ун-т “Львів. політехніка”. – Львів, 2011. – 428 с.

40. Беркинблит М. Б. Нейронные сети / М. Б. Беркинблит - М.: МИРОС и ВЗМШ РАО, 1993. - 96 с.

41. Експертні системи в медицині: Навчальний посібник / Продеус А. М., Синєкоп Ю. С., Швець Є. Я., Кісельов Є. М., Баран М. М. - Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 2014. - 332 с.

42. Тэрано Т. Прикладные нечеткие системы / Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно - М.: Мир, 1993.- 368 с.

43. Лежнюк, П. Д. Оперативне прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з використанням їх фрактальних властивостей : монографія / П. Д. Лежнюк, Ю. А. Шулле. - Вінниця : ВІТУ, 2015. - 104 с.

44. Штовба С. Д., Моделювання надійності людини-оператора за допомогою нечіткої бази знань Сугено, Автоматика і телемеханіка, 2009, № 1. - С. 180-187.

45. Недашківська Н.І. Метод узгоджених парних порівнянь при оцінюванні альтернатив рішень за якісним критерієм. System Research & Information Technologies. 2013, № 4, - 234 с.

46. Yager RR Essentials of Fuzzy Modeling and Control / RR Yager, DP Filev - USA: John Wiley & Sons, 1994. - 387 с.

47. Чейлитко А.О. Математичне моделювання та оптимізація процесів тепломасообміну / А.О. Чейлитко; ЗДІА Запоріжжя: ЗДІА, 2018. – 146 с.

48. Babuska R. Fuzzy Modeling for Control / R. Babuska - Boston, Kluwer

Academic Publishers. - 257 с.

49. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 Діагностика маслonaповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. Методичні вказівки - 524 с.

50. Кобзарь Л. В. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников - М.: Физматлит, 2006.- 814 с.

51. М.Л. Новотарський, Б.Б. Нестеренко. Штучні нейронні мережі: обчислення // Праці Інституту математики НАН України. - Т50. - Київ: Ін-т математики НАН України, 2004. - 408 с.

52. Ротштейн А. П. Інтелектуальні технології ідентифікації: нечітка логіка, генетичні алгоритми, нейронні мережі / А. П. Ротштейн. - Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. - 320 с.

53. Елисеєва И. И. Общая теория статистики / И. И. Елисеєва, М. М. Юзбашев - М.: Финансы и статистика, 2002.- 256 с.

54. Розенблат Ф. Принципы нейродинамики. Перцептроны и теория механизмов мозга / Ф. Розенблат. - М.: Мир, 1965. - 478 с.

55. Тимощук П. В., Лобур М. В. Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2007. 328 с.

56. Брай И. В. Регенерация трансформаторных масел / И. В. Брай, - М.: Химия, 1972.- 168 с.

57. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин, - М.: Вильямс, 2006.- 1104 с.

58. Костюк В. О. Прикладна статистика: навч. посібник / В. О. Костюк; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. - Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. - 191 с.

59. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. - ОАО “ЛьвовОРГРЭС”, ГДП “ДонОРГРЭС”, Львів, 2002 - 341 с.

60. Саати Т. Принятие решений /Т.Саати - М.: Радио и связь, 1993 - 278 с.

Головна схема Дніпровської ГЕС

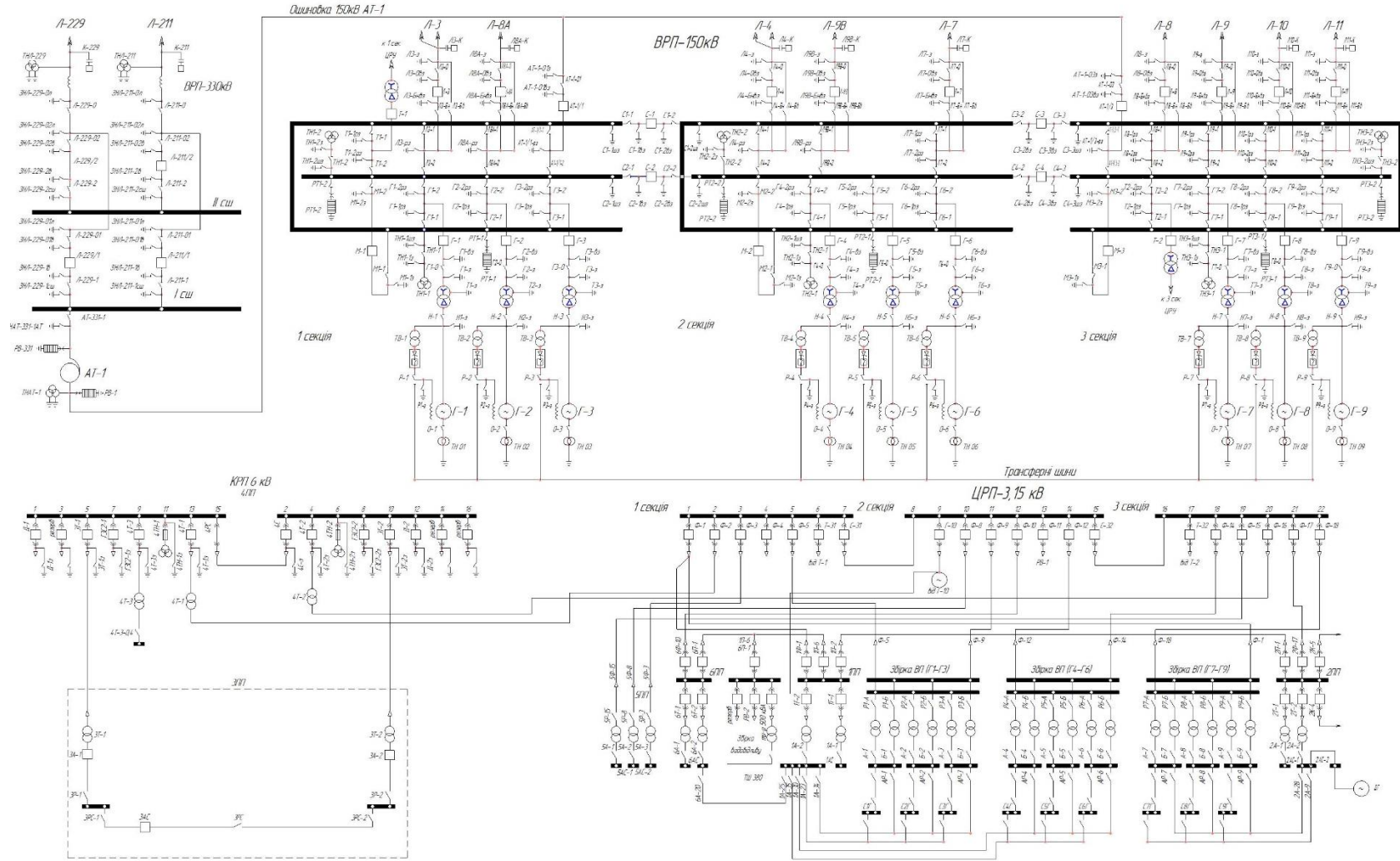
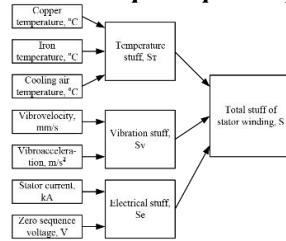


Рисунок А.1 - Головна схема Дніпровської ГЕС

Аналіз методів і моделей стану електрообладнання ГЕС

Генератор

Структура дворівневої нечіткої моделі для оцінювання ТС обмотки статора гідрогенератора

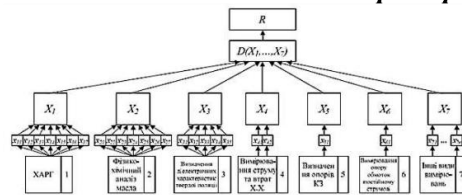


Вхідні параметри

температура міді обмотки статора (t_c°); температура сталі статора (t_A°); температура охолоджувального повітря (t_A°); віброшвидкість (v); віброприскорення (a); струм статора (I_S); складова напруги нульової послідовності ($3U_0$); температурний стан (S_T); вібраційний стан (S_V); електричний стан (S_E).

Трансформатор

Ієрархічна структурна схема нечіткого логічного виводу про технічний стан масляного трансформатора



Вхідні параметри

хроматографічний аналіз розчинених газів (ХАРГ) (x_1); фізико-хімічний аналіз масла (x_2); вимірювання по визначенню стану твердої ізоляції (x_3); вимірювання в досліді неробочого ходу (x_4); визначення опорів при досліді короткого замикання (x_5); випробування по вимірюванню опору вимірювання опорів обмоток постійному струму (x_6); інші види вимірювань і випробувань (x_7);

Турбіна

Залишковий ресурс гідротурбінного обладнання

$$n = \left(\frac{N}{N_e} - 1 \right) \cdot L$$

де

$$N = N_0 \left(\frac{\gamma \cdot \epsilon_0 \cdot \beta_\sigma}{k_\sigma} \sigma_{-10} \sqrt{1 - \frac{\sigma_{me} + \sigma_{mm}}{\sigma_B}} \right)^m$$

N_e - кількість циклів навантаження за період експлуатації;

L - кількість років роботи конструкції;

N_0 - базове число циклів;

σ_{-10} - межа витривалості зразка при базовому числі симетричних циклів в повітрі;

$\gamma, \epsilon_0, \beta_\sigma, k_\sigma$ - коефіцієнти впливу води, масштабного фактора, стану поверхні і концентрації напружень відповідно;

σ_B - межа міцності.

Вимикач

Структурна схема нечіткої моделі для оцінки ТС повітряного вимикача



Залишковий комутаційний ресурс вимикача після відключення n струмів короткого замикання

$$R_{ком} = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i}; N_i = N_{ном} \cdot \frac{I_{кз}^i}{I_{кз}^{ном}}$$

Залишковий механічний ресурс

$$R_{мех} = \frac{M_0 - M}{M_0}$$

$P_{пов}$ - значення тиску стиснутого повітря; $Isol$ - оцінка стану ізоляторів.

Рисунок Б.1 – Аналіз методів і моделей стану електрообладнання ГЕС

Таблиця В1 - Навчальна вибірка для оцінки стану силових масляних трансформаторів 154 кВ

№	Хроматографічний аналіз газів			Втрати ХХ при введенні в експлуатацію			Втрати ХХ виміряні			Опір ізоляції		Рік Виготовлення.
	C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	CH ₄ / H ₂	C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆	a	b	c	a	b	c	R ₆₀ пуск	R ₆₀ послід.	
1	0,068	1,925	7,083	39,16	45,13	38,02	43,47	60,92	42,20	1100	7050	1973
2	0,717	0,191	5,823	10,13	13,82	11,28	12,26	16,72	13,65	10000	10000	1977
3	0,038	1,358	10,280	70,94	93,33	66,72	78,74	103,60	74,06	50000	2820	1970
4	0,172	2,057	10,000	66,18	89,17	54,55	80,08	107,90	70,91	47000	10000	1971
5	0,012	3,407	3,912	102,91	276,32	123,78	130,70	214,20	137,40	30000	3620	1946
6	0,020	0,200	2,500	6,40	9,20	6,30	6,44	9,22	6,37	40000	2000	1947
7	0,000	0,068	1,853	6,10	4,86	6,08	6,40	5,10	6,38	56000	2625	1981
8	0,485	0,149	1,478	5,14	4,95	7,38	5,50	5,30	7,90	38000	6500	1973
9	0,000	0,091	0,863	25,50	25,50	34,00	25,50	25,50	34,00	70000	2820	2000
10	0,075	0,084	0,930	9,60	13,40	10,00	9,60	13,40	10,00	1700	4913	2001
11	0,001	0,240	3,046	52,50	82,50	60,00	40,00	52,00	37,00	850	50000	1946
12	0,700	0,036	1,034	4,00	4,00	4,00	4,10	4,00	4,10	210	47000	1964
13	1,000	0,021	0,741	11,70	11,70	11,70	11,70	11,80	11,70	15500	30000	1974
14	0,000	0,200	3,000	49,90	68,00	49,80	49,90	68,00	49,80	1000	40000	1968
15	3,000	0,030	0,667	3,40	3,40	4,20	4,60	4,60	6,70	45000	56000	1977
16	0,750	0,017	0,316	7,50	7,50	10,80	8,44	8,00	11,80	3500	38000	1947
17	1,000	0,116	1,000	5,16	7,60	5,36	6,20	9,50	6,50	800	750	1950
18	0,005	0,525	6,261	51,20	63,30	50,80	51,20	63,30	50,80	5000	10000	1947
19	0,094	2,800	3,118	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	60000	45000	1947

Продовження таблиці В1

№	Хроматографічний аналіз газів			Втрати ХХ при введенні в експлуатацію			Втрати ХХ виміряні			Опір ізоляції		Рік виготовлення.
	C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	CH ₄ / H ₂	C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆	a	b	c	a	b	c	R ₆₀ пуск	R ₆₀ послід.	
20	0,066	1,589	1,589	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	50000	30500	1947
21	0,084	0,128	0,128	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	47000	24000	1947
22	0,086	1,571	1,571	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	30000	33000	1980
23	0,102	0,963	0,963	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	40000	23800	1947
24	0,102	0,299	0,299	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	56000	25400	1948
25	0,061	0,385	0,385	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	38000	50000	1947
26	0,097	1,589	2,444	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	70000	47000	1950
27	0,100	0,128	1,000	3,00	5,00	3,00	3,00	5,00	3,00	1700	30000	1950
28	0,100	1,571	1,000	3,00	5,00	3,00	3,00	5,00	3,00	2500	40000	1953
29	0,010	0,963	1,667	6,17	6,09	8,99	7,96	8,04	11,59	3600	56000	1960
30	0,013	3,609	5,455	16,50	20,00	16,50	17,00	25,00	18,00	4800	38000	1983
31	0,161	0,200	3,100	4,60	4,60	5,95	4,60	4,60	5,95	8850	10000	2007
32	0,004	0,117	0,269	6,75	6,75	9,75	6,80	6,60	9,20	7500	10000	2004
33	0,003	3,784	2,143	31,80	31,80	40,00	29,00	30,00	39,00	9483	11610	2009
34	0,033	0,156	1,084	30,00	29,00	41,00	64,00	62,00	90,00	1400	2700	1968
35	0,500	0,400	1,000	13,00	19,00	13,00	15,50	21,50	15,50	1500	2500	1974
36	0,125	0,100	4,000	17,40	23,50	17,40	14,00	23,00	14,50	50000	12000	1960
37	0,500	0,200	1,000	16,92	26,69	18,05	22,50	35,50	24,00	47000	13900	1973
38	0,884	0,433	8,636	4,50	6,50	4,50	4,50	6,50	4,50	30000	8580	1977
39	0,100	1,000	2,000	3,51	3,39	6,03	4,00	4,00	7,00	40000	3000	1987

Продовження таблиці В1

№	Хроматографічний аналіз газів			Втрати ХХ при введенні в експлуатацію			Втрати ХХ виміряні			Опір ізоляції		Рік виготовлення.
	C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	CH ₄ / H ₂	C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆	a	b	c	a	b	c	R ₆₀ пуск	R ₆₀ послід.	
40	0,030	8,250	0,623	31,80	70,08	69,00	69,00	89,00	54,33	3000	5800	1947
41	0,500	6,000	0,650	30,00	50,00	66,00	66,00	85,00	38,82	3000	2500	1948
42	0,037	13,500	0,210	13,00	10,61	9,30	9,30	14,00	7,21	3000	3500	1947
43	0,002	1,000	0,188	17,40	5,20	7,90	5,50	5,30	7,75	2000	3000	1950
44	0,002	4,632	2,429	16,92	15,00	17,00	16,00	24,00	10,63	984,2	984,2	1950
45	0,002	7,250	7,250	4,50	5,90	5,00	5,00	7,00	3,60	900	2250	1953
46	0,002	1,010	1,010	3,51	11,21	10,00	9,60	13,00	8,62	567	567	1960
47	0,012	4,689	4,689	5,20	5,90	5,00	5,00	7,00	3,60	32400	32400	1971
48	0,167	1,200	1,200	15,00	60,00	102,30	132,00	99,00	62,00	1046,5	1 610	1946
49	0,313	0,623	2,667	5,90	30,00	23,70	23,50	33,00	20,00	1 040	1600	1947
50	0,500	0,650	2,000	11,21	17,00	21,00	21,00	21,00	17,00	47000	36000	1981
51	0,556	0,210	11,250	20,00	16,00	20,00	20,00	20,00	16,00	46000	39000	1973
52	6,364	0,188	2,200	22,00	19,00	22,00	22,00	22,00	19,00	3500	34000	1971
53	0,002	2,429	3,722	36,00	44,00	36,00	36,00	50,00	32,00	3000	10000	1946
54	2,941	0,260	1,133	4,10	7,26	6,30	6,40	9,80	4,67	984,2	6000	1971
55	3,030	0,200	2,357	7,20	3,94	4,10	4,10	5,40	2,99	2250	10000	1946
56	0,818	0,533	4,231	1,10	8,64	7,00	7,20	9,50	6,36	567	5500	1947
57	1,062	0,611	4,629	0,90	1,18	1,10	1,10	1,10	1,05	7500	10000	1981
58	0,141	0,316	12,103	9,30	1,44	0,90	0,90	0,90	1,28	7000	10000	1973
59	1,594	0,811	4,085	5,50	0,96	1,20	1,17	1,20	0,96	7500	10000	1971

Продовження таблиці В1

№	Хроматографічний аналіз газів			Втрати ХХ при введенні в експлуатацію			Втрати ХХ виміряні			Опір ізоляції		Рік Виготовлення.
	C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	CH ₄ / H ₂	C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆	a	b	c	a	b	c	R ₆₀ пуск	R ₆₀ послід.	
60	0,431	0,815	1,656	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	6500	3500	1950
61	0,000	0,459	2,938	9,00	12,00	9,00	10,00	13,00	10,00	8000	3000	1950
62	3,196	0,766	10,240	6,00	8,00	6,00	7,00	10,00	7,00	700	984,2	1953
63	0,002	2,016	1,825	7,00	10,00	7,00	6,00	9,00	6,00	3000	2250	1960
64	0,081	0,924	2,879	4,00	4,00	3,00	5,30	5,30	6,80	1950	567	1983
65	0,001	0,083	0,794	43,50	41,50	43,50	6,00	8,00	6,00	10000	70000	2007
66	0,002	1,000	0,833	0,25	0,36	0,26	0,12	0,17	0,10	3000	10200	2004
67	0,002	1,000	4,000	0,25	0,36	0,26	0,26	0,40	0,26	1350	1450	2009
68	0,002	0,333	0,167	0,18	0,23	0,19	0,18	0,25	0,20	1520	1600	1968
69	0,034	1,769	4,000	22,00	16,72	22,00	11,11	17,05	11,00	3500	1200	1974
70	0,486	0,412	3,111	32,00	7,50	32,00	6,00	8,00	5,50	3000	7000	1960
71	1,800	0,867	2,000	64,80	22,00	64,80	23,00	23,00	34,00	984,2	8700	1950
72	0,610	0,407	8,200	32,00	32,00	46,00	35,00	36,00	51,00	2250	2500	1950
73	0,005	1,000	10,000	49,06	64,80	49,06	62,30	82,30	62,30	1200	1100	1953
74	1,000	0,900	1,000	7,60	11,50	7,60	16,60	23,60	16,80	8800	14000	1960

