

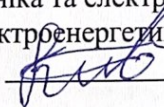
Вінницький національний технічний університет

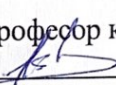
Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська дипломна робота на тему:

Методи та засоби діагностування турбогенераторів ТВВ-1000

Виконав: студент 4 курсу, групи 2ЕЕ-206
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електроенергетика та електротехніка»,
Буток К.А. 

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

«__» _____ 2024 р.

Рецензент: К.Т.Н. доцент каф. ЕСС ЕМ
(наук. ступінь, вч. звання, назва кафедри)

Войтюк ІО.П

«__» _____ 2024 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.


«12» 06 2024 р.

Вінниця ВНТУ 2024 рік

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

« // » 13 2024 р.

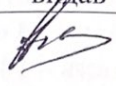
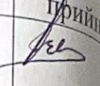
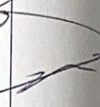
З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Бутку Костянтину Андрійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Методи та засоби діагностування турбогенераторів ТВВ-1000»
Керівник роботи к.т.н., проф. професор каф. ЕСС Рубаненко О.Є.
затверджена наказом вищого навчального закладу від 11.03.2024р. № 80.
2. Термін подання студентом роботи 8 червня 2024 року
3. Вихідні дані до роботи: "Condition monitoring, overhauling, electromechanical repair and rewinding of high voltage rotating machines.". Available: <https://www.electromotores.com/predictive/condition-monitoring>. [Accessed: 23- Jul-2019]. "Power generator protection and control." 2019. Available: <https://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation/numerical-relays/power-generator-protection-and-control> [Accessed: 05- Jul-2019].
4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Типові підстанції різних класів напруги. 2. Пропозиції щодо вдосконалення при відбудові або реконструкції підстанцій. 3. Охорона праці. 5. Висновки. 6. Список використаних джерел. 7. Додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу 1. Вступ. 2. Проблеми забезпечення надійності експлуатації турбогенераторів типу ТВВ-1000 на АЕС України. 3. Використання математичних теорій для діагностування турбогенераторів. 4. Приклад розробки методу аналізу технічного стану турбогенератора ТВВ-1000-2УЗ. 6. Виконання розділу охорона праці. 7. Оформлення пояснювальної записки. 8. Підготовка доповіді і презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконав прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Рубаненко О.Є., к.т.н., проф., професор кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О. В. д. пед. н., професор, зав. каф. БЖДПБ		

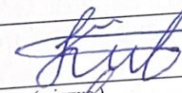
7. Дата видачі завдання 16 січня 2024 року

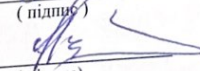
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Прізвище, ініціали
		початок	кінець	
1	Формування та затвердження завдання БДР	16.01.2024	18.01.2024	
2	Вступ. Огляд літературних джерел	20.01.2024	25.01.2024	
3	Проблеми забезпечення надійності експлуатації турбогенераторів типу ТВВ-1000 на АЕС України	27.01.2024	13.02.2024	
4	Використання математичних теорій для діагностування турбогенераторів	14.02.2024	03.03.2024	
5	Приклад розробки методу аналізу технічного стану турбогенератора ТВВ-1000-2УЗ	05.03.2024	11.03.2024	
6	Виконання розділу охорона праці	13.03.2024	01.04.2024	
7	Оформлення пояснювальної записки	05.04.2024	08.04.2024	
8	Підготовка доповіді і презентаційного матеріалу	07.05.2024	10.05.2024	

Студент

Керівник роботи


(підпис)


(підпис)

Буток К.А.

Рубаненко О.Є.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.311.1

Буток К.А. «Методи та засоби діагностування турбогенераторів ТВВ – 1000». Бакалаврська кваліфікаційна робота – Вінниця: ВНТУ, 2024. – с 65., таблиць 13, рисунків 22, бібліографія 31.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі було досліджено причини пошкоджень турбогенераторів та розроблено математичну модель його залишкового ресурсу.

У першому розділі аналізується проблеми забезпечення надійності експлуатації турбогенераторів типу ТВВ-1000 на АЕС України та світовий досвід онлайн-діагностика турбогенераторів.

У другому розділі розглядаються можливості застосування математичної теорії для діагностики синхронних генераторів.

У третьому розділі ми розробили методику аналізу технічного стану синхронних генераторів з використанням нейро-нечіткого моделювання

Також був доповнений розділ з охорони праці, в якому аналізувалися умови праці співробітників електростанцій, зайнятих експлуатацією і ремонтом синхронних генераторів.

Ключові слова: турбогенератор, синхронний генератор, дерево пошкоджень, нейро - мережеве моделювання, технічний стан обладнання, онлайн-діагностика.

ABSTRACTS

Butok K.A. "Methods and means of diagnostics of turbogenerators TVV - 1000". Bachelor's qualification work - Vinnytsia: VNTU, 2024. -p 65., tables 13, figures 22, bibliography 31.

In the bachelor's thesis, the causes of damage to turbine generators were investigated and a mathematical model of their residual life was developed.

The first chapter analyses the global experience of online diagnostics of synchronous generators.

The second section discusses the possibilities of applying mathematical theory to diagnose synchronous generators.

In the third section, we have developed a methodology for analyzing the technical condition of synchronous generators using neuro-fuzzy modelling.

We also added a section on labor protection, which analyzed the working conditions of power plant employees involved in the operation and repair of synchronous generators.

Keywords: turbogenerator, synchronous generator, fault tree, neural network modelling, technical condition of equipment, online diagnostics.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ ТИПУ ТВВ-1000 НА АЕС УКРАЇНИ.....	6
1.1 Загальні відомості про турбогенератори.....	6
1.2 Дослідження пошкоджуваності синхронних турбогенераторів.....	6
1.3 Роль удосконалення існуючих турбогенераторів.....	9
1.4 Методи діагностування ТГ компанії Siemens.....	11
1.4.1 Метод контролю часткових розрядів.....	12
1.4.2 Контроль міжвиткових замкнень обмотки ротора.....	15
1.4.3 Виявлення та моніторинг несправностей генераторів (Wolbank).....	18
1.4.4 Визначення стану турбогенератора.....	21
Висновки до першого розділу.....	22
2 ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ ТЕОРІЙ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ.....	23
2.1 Застосування теорії ідентифікації дефектів турбогенераторів.....	23
2.1.1 Використання теорії ідентифікації ядра Вольтерра.....	23
2.1.2 Метод ідентифікації ядер Вольтерра третього порядку.....	26
Висновки до другого розділу.....	39
3.ПРИКЛАД РОЗРОБКИ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТВВ-1000-2УЗ	30
3.1 Побудова дерева несправності	30
3.2 Визначення залишкового ресурсу синхронного генератора.....	30
3.2.1 Обґрунтування доцільності використання методів нейро-нечіткого моделювання.....	30
3.3.2 Формування таблиці початкових даних.....	36
3.3.3 Розробка структурної схеми діагностичної моделі даних.....	37
3.3.4 Розробка математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу.....	38
3.3.5 Визначення параметрів математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу.....	41
Висновки до третього розділу.....	54

4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	54
4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту.....	54
4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць в пожежонебезпечних зонах.....	54
4.1.2 Електробезпека.....	56
4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії.....	59
4.2.1 Мікроклімат.....	59
4.2.2 Склад повітря робочої зони.....	59
4.3 Виробниче освітлення.....	60
4.4 Виробничий шум.....	61
4.4.1 Пожежна безпека.....	62
ВИСНОВКИ	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66
ДОДАТКИ.....	70

ВСТУП

Проблема забезпечення надійності роботи таких турбогенераторів, як ТВВ-1000-2МУЗ і ТВВ-1000-4УЗ, що працюють на атомних електростанціях України, є однією з найважливіших науково-технічних проблем енергетичної галузі та електромашинобудування. Це пов'язано з багатьма факторами. Час роботи турбогенераторів, таких як ТВВ-1000-2МУЗ і ТВВ-1000-4УЗ, перевищив гарантійний термін експлуатації встановлений заводом виробником. Це впливає на подальший термін служби ТГ. Серед генераторів ТВВ-1000 частіше пошкоджується ТГ ТВВ – 1000 – 2МУЗ в той же час причиною пошкодження є пошкодження, які не проявляються напочатку роботи ТГ.

До них також відносяться: підвищення вібраційної активності в торцевій області елементів конструкції статора, зокрема руйнування стяжних призм, що які утримують осердя статора в стиснутому стані; руйнування зубців 7 крайніх пакетів статора; поява тріщин у з'єднувальних шинах обмотки статора, через які витікає охолоджувальний дистилат, здатний зволожити і замкнути вивідні кінці обмотки статора і викликати її коротке замикання з усіма наслідками, що випливають. Збільшення вібрації статора ТГ, викликане електромагнітним і механічним індукованим вібраційним зусиллям затиску, викликане ослабленням ущільнення стрижня статора в пазі, ослабленням статора в канавці, фіксацією передньої частини обмотки статора, забрудненням, зносом і змінами фізико-хімічних властивостей ізолятора.

Актуальність теми. Актуальність роботи зумовлена пошкоджуваністю турбогенераторів під час експлуатації, а також зумовлена вдосконалення існуючих методів діагностування ТГ.

Мета роботи.

Покращення якості експлуатації турбогенераторів ТВВ – 1000 шляхом вдосконалення методів та засобів діагностування ТГ ТВВ – 1000.

За результатами аналізу статистичних даних щодо відмов турбогенератора типу ТВВ-1000-2УЗ, який встановлено на «ВП «Південноукраїнська АЕС», в роботі потрібно вирішити наступні задачі: дослідити проблеми забезпечення

надійної експлуатації турбогенераторів ТВВ – 1000; дослідити математичні теорії для діагностування турбогенераторів; на прикладі показати метод аналізу технічного стану ТГ ТВВ -1000 – 2УЗ; дослідити технічні рішення з безпечної експлуатації АЕС.

Відповідно де мети в роботі розглядаються наступні задачі:

- проаналізувати сучасні методи діагностування турбогенераторів;
- довести на прикладах методи теорії ідентифікації;
- довести, що замикання в обмотці ротора СГ, виявляються шляхом контролю відсоткової різниці між нелінійною напругою нульової послідовності статора в струмом нульової послідовності;
- довести те, що просте моделювання побудоване за допомогою теорії хаосу може бути використане для отримання неперіодичних результатів діагностування;
- побудувати дерево несправностей ТГ ТВВ-1000-2УЗ,
- розробити математичну модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ та її параметри;
- розвинути метод визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ, який шляхом використання нейро-нечіткого моделювання дозволить визначати технічний стан ТГ в умовах неповноти поточних значень діагностичних параметрів.

Об’єкт дослідження. Процеси зміни технічного стану ТГ ТВВ-1000-2МУЗ.

Предмет дослідження. Дефекти та пошкодження конструкції турбогенератора типу ТВВ-1000-2УЗ та методи діагностування ТГ.

Методи дослідження. Для визначення дефектів синхронних генераторів використовуються теорія ідентифікації, теорія хаосу і теорія кінцевих елементів, а методи нейро-нечіткого моделювання використовуються для визначення коефіцієнту залишкового ресурсу СГ.

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

1 ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ ТИПУ ТВВ-1000 НА АЕС УКРАЇНИ ТА РОЛЬ ДІАГНОСТУВАННЯ У ЇХ ВИЯЛЕННІ ТА ПОПЕРЕДЖЕННІ

1.1 Загальні відомості про турбогенератори

Генератор є трифазною неявнополюсною електричною машиною і призначений для перетворення механічної енергії обертання турбіни в електричну. Він складається з нерухомої частини (статора), що включає в себе осердя і обмотку, і частину, що обертається (ротор), на якому розташована обмотка збудження, яка живиться постійним струмом. Механічна енергія, що передається від валу турбіни на вал ротора генератора, перетворюється на електричну електромагнітним шляхом: за рахунок протікання електричного струму в обмотці ротора утворюється постійне електромагнітне поле, при обертанні ротора електромагнітне поле перетинає обмотку статора під впливом якого в обмотці статора наводиться електрорушійна сила та електричний струм.

Тепло, що виділяється в обмотках ротора і статора, в магнітопроводах (сердечнику статора, валу ротора), а також від тертя ротора в газовому середовищі (вентиляційні втрати) і тертя в підшипниках та ущільненнях валу, відводиться дистильованою водою (з обмотки статора), воднем (з обмотки та валу ротора, з сердечника статора), маслом (з підшипників та ущільнень вала).

1.2 Дослідження пошкоджуваності синхронних турбогенераторів

Турбогенератор ТВВ-1000-2МУЗ, який встановлений на «ВП «Південноукраїнська АЕС», призначений для вироблення електроенергії в тривалому номінальному режимі роботи при безпосередньому з'єднанні з паровою турбіною і встановлений в закритому приміщенні на атомних електростанціях, та відноситься до основного обладнання АЕС, що не впливає на безпеку.

Зміна технічного стану генератора в процесі експлуатації обумовлена взаємодією різних робочих факторів, які в свою чергу, можуть призвести до

пошкодження елементів і вузлів ТГ, в результаті виникнення дефектів. з аналізу досвіду експлуатації потужних ТГ можна констатувати наступне. Значну частину пошкоджень спричиняють дефекти ізоляції обмоток статора (ОС) і ротора, які виникають внаслідок старіння, зволоження, а також в результаті механічних впливів. Відмови в роботі генератора через пошкодження ОС відбуваються вдвічі частіше, а відмови через пошкодження активної сталі статора вдесятеро рідше, ніж пошкодження обмотки ротора. У той же час, пошкодження ОС відбуваються через пошкодження ізоляції. Зони з найвищою ймовірністю виходу з ладу пов'язані з дефектами виробництва та монтажу, і збільшуються під час експлуатації електричної машини.

Руйнування ізоляції в пазах статора спричинене вібрацією сталі осердя через низьку якість пресування. Недостатня якість кріплення торцевих частин обмоток призводить до їх деформації та виникнення тріщин в ізоляції. Рух обмотки при ослабленому кріпленні призводить до стирання ізоляції і пошкодження міді.

Основною причиною пошкодження активної сталі осердя статора в основному пов'язана з ослабленням її стиснення. Під час роботи ТГ сили магнітного притягання та крутного моменту можуть призвести до деформації сталі осердя, контактної корозії та ослаблення кріплення сталі. Факторами, що сприяють послабленню стиснення активної сталі, є ослаблення гайок (за допомогою яких анкерні призми кріпляться до притискної пластини), деформація притискної пластини, деформація анкерних призм, деформація натискних штифтів і руйнування лакофарбового покриття лакофарбового покриття сегментів.

Велика кількість пошкоджень виникає у вузлі паза ротора, де розвиваються тріщини і корозія, а однією з основних причин пошкодження обмотки ротора генератора є її зсув в умовах температурних перепадів і, як наслідок, виникнення короткого замикання обмоток і засмічення каналів охолодження. Наводяться такі найчастіші дефекти які спостерігалися під час експлуатації ТГ, на атомних електростанціях:

Пошкодження сальників, ослаблення кріплення теплоносія в канавках і на їх торцях пошкодження внутрішніх елементів системи охолодження активної зони і газоохолоджувачів, технологічні дефекти ізоляції стрижнів активної зони, обрив елементарних провідників в активній зоні, ослаблення обтиску сталевго осердя магнітопроводу статора, руйнування ізоляції активних сталевих листів у зубцях зовнішніх пакетів статора, розтріскування і викришування сегментів активної сталі, тріщини в паяних з'єднаннях напірного і розвантажувального колекторів, дефекти контактних кілець і щіток. Ці пошкодження і дефекти дуже небезпечні, оскільки призводять до катастрофічних збоїв в роботі гідроелектростанції з максимальними збитками та не виробництвом електроенергії.

На рисунку 1.1 наведено загальну статистику пошкоджень найбільш важливих елементів ТГ. З цієї статистики видно, що майже половина всіх пошкоджень тепловиділяючих збірок припадає на ротор і статор (близько 40 %), зокрема 14 % - на ротор і 23 % - на статор. У статорі пошкоджуються осердя, затискачі осердя, шини, системи охолодження і системи охолодження і кріплення.

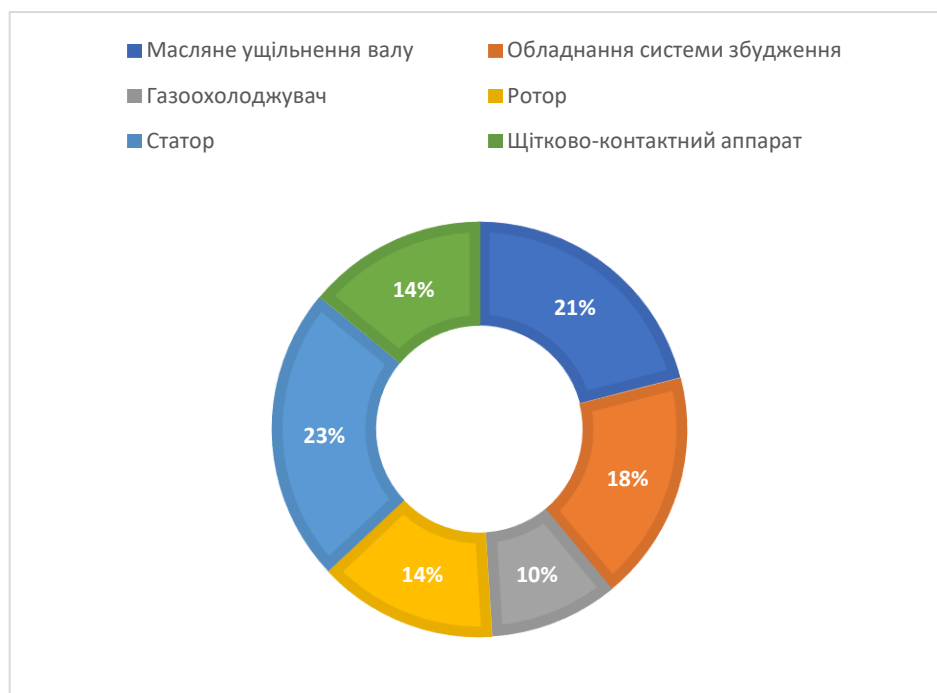


Рисунок 1.1 – Загальна статистика пошкоджень турбогенераторів атомних станцій

1.3 Роль удосконалення існуючих турбогенераторів

Економічне становище України означає, що пріоритетним має розглядатися рентабельність і конкурентоспроможність виробленої продукції, а також дотримання вимог екології та енергозбереження. Тому майбутні напрями промислового розвитку України повинні включати створення сучасної ТГ, як можливого експортного об'єкта України до багатьох країн світу. Таке рішення забезпечило б енергонезалежність країни і зберегло б значення української продукції на світовому ринку. Тому важливо досліджувати і впроваджувати нові рішення в областях, де продукція, вироблена національною промисловістю, все ще є глобальною і може конкурувати з продуктами провідних світових компаній. Це стосується, зокрема, виробництва великих синхронних генераторів для теплових (ТЕС, АЕС) і гідравлічних (ГЕС, ГАЕС) електростанцій.

З 1950-х років одинична потужність ТГ зросла в $7 + 7,5$ разів з 200 до 1500 МВт. Це збільшення супроводжувалося збільшенням розмірів і мас ТГ, що з певного моменту створило проблему виробництва і його транспортування залізницею, визначило завдання мінімізації цих показників. Розробка турбогенераторів базується на потребах електротехнічної промисловості та розробляється відповідно до можливостей сусідніх галузей. Потужні агрегати (ТГ) необхідні для теплових електростанцій і особливо для атомних електростанцій з тепловими і швидкодіючими нейтронними реакторами. У цьому випадку потужність ТГ може бути збільшена.

Шляхи збільшення потужності ТГ:

- інтенсифікація процесів охолодження обмоток статора і ротора, елементів сердечника статора і структури машини;
- використання кращих ізоляційних матеріалів, електричних сталей і роторних поковок з більшою намагнічуваністю та міцністю.

Також шляхами збільшення потужності ТГ є:

- використання новітніх матеріалів і способів кріплення обмоток як в площині, так і в торцевих частинах;
- проведення додаткових ресурсних досліджень матеріалів і комплектуючих для виробництва високонадійних машин;

- дослідження режимів роботи ТГ великої потужності в енергосистемах в номінальних і аварійних умовах.

Розробка високопродуктивних ТГ можлива тільки на основі комплексного вирішення наукових проблем, які безпосередньо пов'язані з машиною, а також з системами збудження, регулювання, контролю і захисту. Перспективна розробка і впровадження нових типів генераторів: синхронних генераторів, генераторів виготовлених з високотемпературними супергенераторами, що дозволить: знизити масу і габарити ТГ; підвищити його максимальну потужність і ефективність.

Згідно з «Оновленою енергетичною стратегією України на 2030 рік», основним завданням забезпечення енергетичної безпеки України є підвищення техніко-економічних характеристик ТГ: розширення робочого діапазону зміни своїх навантажень, продовження терміну їх експлуатації, використання нових конструкцій та теплоносіїв, підвищення якості ремонту, підвищення надійності та конкурентоспроможності.

В даний час удосконалення електротехнічної продукції, крім звичних вимог (підвищення надійності, зниження витрат при підвищенні потужності та ефективності в одиниці виконання шляхом впровадження нових технологій, матеріалів і т.д.), має враховувати наступні вимоги до енергозбереження та результати розробка нових напрямків вдосконалення ТГ.

Відомо, що попередні технології виробництва не були економічно вигідними. Зараз змінились вимоги до ефективності, якості та експлуатаційної безпеки АЕС.

ТГ вимагає досліджень в наступних напрямках:

- 1) Оптимізація структури торцевих зон сердечника статора, досконалість його фіксації в корпусі машини, фіксація обмотки статора в пазах і торцевих частинах;
- 2) Застосування сучасних систем ізоляції для обмоток статора ТГ, оцінка можливості генерації високої напруги ТГ і ТГ підвищеної потужності;
- 3) Оптимізація масогабаритних параметрів турбогенераторів ;
- 4) Заміна водневого охолодження повітрям ;

- 5) Впровадження сучасної діагностичної системи для оцінки теплового і вібраційного стану ТГ в онлайн-режимі і при плановому ремонті;
- 6) Підвищення стійкості ТЗ при роботі на електромережі зі зміненими експлуатаційними характеристиками; забезпечення більш високого рівня виробництва активної та реактивної енергії з можливістю низького споживання останньої частини електромережі. Для зниження генерації реактивної енергії в мережу рекомендується працювати з турбогенераторами АЕС з більш високими коефіцієнтами потужності (до 0,994-0,999).

Проведені дослідження в процесі обслуговування турбогенераторів виробництва ДП «Енергоатом» на АЕС показали, що робота в режимах частих пусків і зупинок призводить до пошкодження окремих елементів, по-перше, до руйнування статорних сердечників і системи кріплення «сердечника тіла» ТГ. Дослідження показали підвищені вібраційні значення статорів і тіл, причиною яких є втрата сердечником монолітності при перевірках, порушення жорсткого зв'язку «активної сталевий рами». Цікавим є той факт, що максимальна амплітуда вібрації спостерігалася в режимах поблизу режиму холостого ходу.

1.4 Методи діагностування ТГ компанії Siemens

Компанія Siemens розробила систему моніторингу та діагностики GenAdvisor для турбогенераторів. Діагностичні параметри можуть бути безперервно відстежені та локалізовані за допомогою систем GenAdvisor (рисунки 1.2) під час роботи генератора: ЧР, короткі замикання у роторі, вібрації в кінці обмотки статора, струми та напруги, що характеризують роботу СГ.

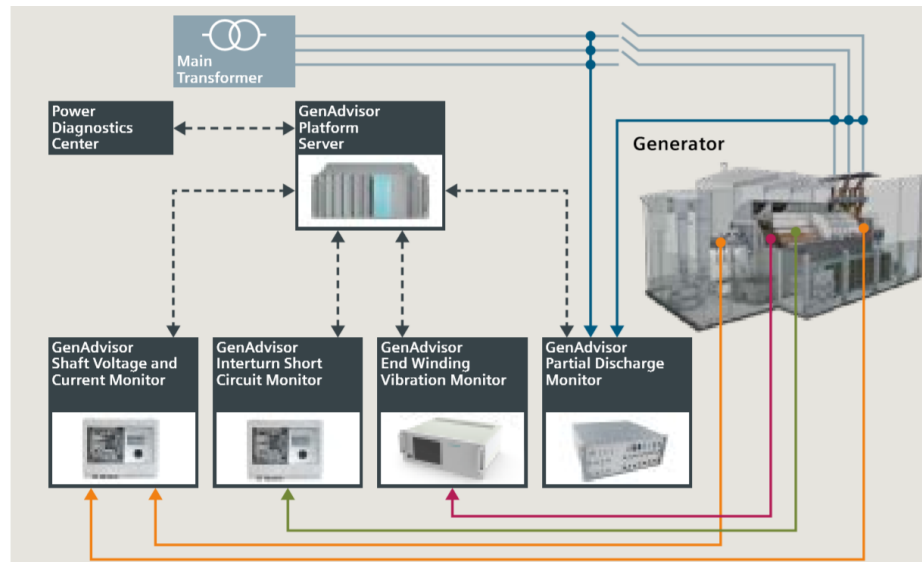


Рисунок 1.2 – Засоби для контролю за ротором і статором GenAdvisor

Особливості GenAdvisor моніторингу часткового розряду. Пошкодження ізоляції обмотки статора можна виявити, локалізувати та контролювати на ранній стадії за допомогою високочастотних методів, що дозволяє рекомендувати конкретні заходи для подальшої експлуатації [1-3].

Стан обмоток статора генератора, досліджується візуальним оглядом та випробувальними тестами. Якщо не вчасно проводити планові ремонти, то може знадобитися ремонту всього статора. Тому, моніторинг коливань кінців обмоток є корисним інструментом для оцінки технічного стану статора генератора і може допомогти мінімізувати необхідність в перемотуванні.

1.4.1 Метод контролю часткових розрядів

Сигнал ЧР може бути отриманий з різних джерел. Вхідний сигнал подається на одноканальний А/Д перетворювач зі швидкістю дискретизації 100 мс / с. Оцифрований сигнал відображається з можливістю збільшення та вибору часового вікна. ЧР характеризуються наступними параметрами :

- амплітуда;
- фаза (по відношенню до прикладеної напруги);
- час виникнення;
- тривалість часу;
- частота виникнення.

Ці параметри вхідних імпульсів зберігаються як описові для кожного зафіксованого розряду.

Найбільш інноваційна ініціатива – це використання кластерної техніки, заснованої на часових та частотних характеристиках імпульсів, що з'являються у муфті. Це метод, запозичений у галузі зв'язку, в якому кожен вхідний імпульс характеризується тривалістю та частотою виникнення. Еквівалентна ширина сигналу у часовій та частотній області, σ_T і σ_f , відповідно, задається виразами (1.1-1.2):

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (1.1)$$

$$\sigma_f = \sqrt{\int_0^\infty f^2 |\tilde{S}(f)|^2 df} \quad (1.2)$$

де $\tilde{S}(f)$ перетворення Фур'є $\tilde{s}(t)$, і t_0 - усереднений за часом центр нормованого сигналу. Впорядковуючи вхідні імпульси у просторі $[\sigma_T - \sigma_f]$, імпульси можна сортувати залежно від характерних форм.

Моделювання синхронного генератора на постійних магнітах. Ця система для розрізнення ЧР, що надходять від генератора, і шуму, що надходить із зовнішнього середовища, здійснює відокремлення за допомогою двох параметрів для розрізнення вхідних імпульсів у площині часу / частоти, щоб імпульси подібного типу групувались разом. Ці параметри ЧР визначаються таким чином, що вони не залежать від полярності та амплітуди.

Після того, як кластери імпульсів були визначені та відібрані, перші три характеристики ЧР використовуються для подальшої характеристики характеру вибранці підмножини розрядів у одному з трьох основних типів: 1. Корона (часткова розряд в точці посилення поля у вільному газоподібному середовищі) 2. Поверхневий розряд (повзучий та / або розряд на інтерфейсах, що приводяться в дію за допомогою тангенціального електричного поля) 3. Внутрішній розряд.

Це визначення проводиться за допомогою маркерів, витягнутих з розподілів відповідних параметрів, щоб сформулювати описи імпульсних характеристик, які потім використовуються в механізмі висновку для інтерпретації параметрів сигналів. П'ять нечітких множин використовуються для опису кожного ідентифікаційного параметра, тоді як нечітка ідентифікація

здійснюється за допомогою правил, виражених мовними термінами. Що стосується ідентифікації дефектів в обертових машинах, то ідентифікаційні маркери, які використовуються для визначення характеру джерел ЧР, включають:

- Параметр розподілу амплітуди Вейбулла (форма);
- кількість імпульсів;
- асиметричність імпульсного розряду;
- фазовий інтервал;

Для точного визначення тривалості розряду і зміни фази необхідні два параметри. При визначенні часу виникнення кожного розряду неможливо передбачити відповідну фазу, яка виникає через зміну еталонного значення 50/60 Гц. З іншого боку, фактичний час декомунізації не реєструється шляхом вимірювання фази, отже, кількість періодів між двома розрядами невідома. Інформація про фазу використовується для побудови схеми ЧР, а час виникнення використовується для оцінки тривалості ЧР під час розряду. Запропонована теорія вимагає, щоб розряд походив з одного і того ж місця, і в цьому випадку неможливо визначити цей метод і проаналізувати його на практиці. Після отримання декомунізації вихідного набору даних на кластери оцінювали як схему, так і гістограму часу між цифрами, щоб отримати розподіл, що відповідає набору згенерованих імпульсів. Класичний метод виявлення ЧР працює, але зрозуміло, що основна увага приділяється величині розряду, тоді як новий, більш складний алгоритм ідентифікації намагається ідентифікувати всі параметри ЧР. Властивість, що використовується для ідентифікації, є ідентифікатором у форматі ЧР. Щільність розподілу означає, що на вибрані визначальні характеристики певною мірою впливає абсолютне значення ЧР. Калібрування амплітуди ЧР в індуктивному пристрої є проблематичним через загасання, пов'язане з великим шляхом поширення, тому незалежність за величиною є важливою особливістю.

Експерименти, проведені в лабораторії, показують, що принаймні деякі з цих параметрів нечутливі до шляху поширення, що, звичайно, має значні

переваги, але це зовсім не відповідає необхідності відрізняти сигнали, що виходять від апарату, від сигналів, що знаходяться у зовнішньому середовищі.

Очевидно, що у випадку машин більш детальна ідентифікація дефектів, виявлених ЧР, є основою процесу автоматичного розпізнавання [5]. Однак деяку інформацію можна отримати, вивчивши полярність розряду і вивчивши детальну схему вимірювання, що виникає в результаті наступного етапу, наприклад, вивчивши момент більш високого порядку.

Слід також припустити, що дека імпульсу часткового розряду використовується для опису зворотного зв'язку між фазами, оскільки це можна зробити за допомогою послідовних вимірювань, але явно не існує при одночасному порівнянні фаз.

1.4.2 Контроль міжвиткових замкнень обмотки ротора

Математична модель синхронної машини з коротким замиканням в обмотці ротора описується наступними диференціальними рівняннями для врівноважених потенціалів в колах статора і ротора замкненого кола [6]:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_A(t)}{dt} = -R_A - U_A(t) \\ \frac{d\Psi_B(t)}{dt} = -R_B - U_B(t) \\ \frac{d\Psi_C(t)}{dt} = -R_C - U_C(t) \\ \frac{d\Psi_f(t)}{dt} = -R_f - U_f(t) \\ \frac{d\Psi_{kd}(t)}{dt} = -R_{kd} \cdot i_{kd}(t). \end{cases} \quad (1.3)$$

де U_A, U_B, U_C, U_f – напруга на клеммах обмоток статора і ротора; $\Psi_A(t), \Psi_B(t), \Psi_C(t), i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ – потокощеплення і струми обмоток статорної фази $\Psi_f(t), i_f(t)$ – потокощеплення і струми приводних обмоток $\Psi_{kd}(t), i_{kd}(t)$ – потокощеплення і струми замкнених кіл; $R_A, R_B, R_C, R_f, R_{kd}$ – опір міді фаз обмотки статора, обмотки ротора та замкнутого контуру. Напишемо основні вирази (1.4 -1.7) для складання дискретних математичних моделей, які можна успішно реалізувати на сучасних цифрових системах управління:

$$\begin{cases} s \cdot \Psi_A(s) = -R_A \cdot i_A(s) - U_A(s) \\ s \cdot \Psi_B(s) = -R_B \cdot i_B(s) - U_B(s) \\ s \cdot \Psi_C(s) = -R_C \cdot i_C(s) - U_C(s) \\ s \cdot \Psi_f(s) = -R_f \cdot i_f(s) - U_f(s) \\ s \cdot \Psi_{kd}(s) = -R_{kd} \cdot i_{kd}(t). \end{cases} \quad (1.4)$$

$$s = \frac{1}{T} \ln(z) = \frac{2}{T} \left[\frac{z-1}{z+1} + \frac{1}{3} \left(\frac{z-1}{z+2} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{z-1}{z+1} \right)^5 \right] \approx \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} = \frac{2}{T} \frac{1-1z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (1.5)$$

$$\begin{cases} \Psi_A(z) \frac{2}{T} \frac{1-1z^{-1}}{1+z^{-1}} = -R_A \cdot i_A(s) - U_A(s) \\ \Psi_B(z) \frac{2}{T} \frac{1-1z^{-1}}{1+z^{-1}} = -R_B \cdot i_B(s) - U_B(s) \\ \Psi_C(z) \frac{2}{T} \frac{1-1z^{-1}}{1+z^{-1}} = -R_C \cdot i_C(s) - U_C(s) \\ \Psi_f \frac{2}{T} \frac{1-1z^{-1}}{1+z^{-1}} = -R_f \cdot i_f(s) - U_f(s) \\ \Psi_{kd} \frac{2}{T} \frac{1-1z^{-1}}{1+z^{-1}} = -R_{kd} \cdot i_{kd}(t). \end{cases} \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} U_A(k) &= -R_A \cdot (i_A(k) - i_A(k-1)) - \frac{2}{T} (\Psi_A(k) - \Psi_A(k-1)) - U_A(k-1) \\ U_B(k) &= -R_B \cdot (i_B(k) - i_B(k-1)) - \frac{2}{T} (\Psi_B(k) - \Psi_B(k-1)) - U_B(k-1) \\ U_C(k) &= -R_C \cdot (i_C(k) - i_C(k-1)) - \frac{2}{T} (\Psi_C(k) - \Psi_C(k-1)) - U_C(k-1) \\ i_f(k) &= -\frac{1}{R_f} \cdot (U_f(k) - U_f(k-1)) - \frac{2}{T} (\Psi_f(k) - \Psi_f(k-1)) - i_f(k-1) \\ i_{kd}(k) &= -\frac{2}{T \cdot R_{kd}} \cdot (\Psi_{kd}(k) - \Psi_{kd}(k-1) - i_{kd}(k-1)). \end{aligned} \quad (1.7)$$

де L - коефіцієнт індукції; M - коефіцієнт взаємної індукції.

$$\begin{cases} \Psi_A(t) = L_A(t) \cdot i_A(t) + M_{AB}(t) \cdot i_B(t) + M_{AC}(t) \cdot i_C(t) + M_{Af}(t) \cdot i_f(t) + M_{Akd}(t) \cdot i_{kd}(t) \\ \Psi_B(t) = L_B(t) \cdot i_B(t) + M_{BA}(t) \cdot i_A(t) + M_{BC}(t) \cdot i_C(t) + M_{Bf}(t) \cdot i_f(t) + M_{Bkd}(t) \cdot i_{kd}(t) \\ \Psi_C(t) = L_C(t) \cdot i_C(t) + M_{CA}(t) \cdot i_A(t) + M_{CB}(t) \cdot i_B(t) + M_{fC}(t) \cdot i_f(t) + M_{Ckd}(t) \cdot i_{kd}(t) \\ \Psi_f(t) = L_f(t) \cdot i_f(t) + M_{fA}(t) \cdot i_A(t) + M_{fB}(t) \cdot i_B(t) + M_{fC}(t) \cdot i_C(t) + M_{fkd}(t) \cdot i_{kd}(t) \\ \Psi_{kd}(t) = L_{kd}(t) \cdot i_{kd}(t) + M_{kdA}(t) \cdot i_A(t) + M_{kdB}(t) \cdot i_B(t) + M_{kdc}(t) \cdot i_C(t) + M_{kdf}(t) \cdot i_f(t) \end{cases} \quad (1.8)$$

Перетворимо систему лінійних алгебраїчних рівнянь потокощеплення у вигляд (1.7-1.8):

$$\begin{cases} \Psi_A(k) = L_A(k) \cdot i_A(k) + M_{AB}(k) \cdot i_B(k) + M_{AC}(k) \cdot i_C(k) + M_{Af}(k) \cdot i_f(k) + M_{Akd}(k) \cdot i_{kd}(k) \\ \Psi_B(k) = L_B(k) \cdot i_B(k) + M_{BA}(k) \cdot i_A(k) + M_{BC}(k) \cdot i_C(k) + M_{Bf}(k) \cdot i_f(k) + M_{Bkd}(k) \cdot i_{kd}(k) \\ \Psi_C(k) = L_C(k) \cdot i_C(k) + M_{CA}(k) \cdot i_A(k) + M_{CB}(k) \cdot i_B(k) + M_{Cf}(k) \cdot i_f(k) + M_{Ckd}(k) \cdot i_{kd}(k) \\ \Psi_f(k) = L_f(k) \cdot i_f(k) + M_{fA}(k) \cdot i_A(k) + M_{fB}(k) \cdot i_B(k) + M_{fC}(k) \cdot i_C(k) + M_{fkd}(k) \cdot i_{kd}(k) \\ \Psi_{kd}(k) = L_{kd}(k) \cdot i_{kd}(k) + M_{kdA}(k) \cdot i_A(k) + M_{kdB}(k) \cdot i_B(k) + M_{kdC}(k) \cdot i_C(k) + M_{kdf}(k) \cdot i_f(k) \end{cases} \quad (1.9)$$

$$\begin{bmatrix} U_A(k) \\ U_B(k) \\ U_C(k) \\ U_f(k) \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{A}(k) \begin{bmatrix} i_A(k) \\ i_B(k) \\ i_C(k) \\ i_f(k) \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{B}(k-1) \begin{bmatrix} i_A(k-1) \\ i_B(k-1) \\ i_C(k-1) \\ i_f(k-1) \\ i_{kd}(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_A(k-1) \\ U_B(k-1) \\ U_C(k-1) \\ U_f(k-1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

$$\mathbf{A}(k) = \begin{bmatrix} A_{00}(k) & A_{01}(k) & A_{02}(k) & A_{03}(k) & A_{04}(k) \\ A_{10}(k) & A_{11}(k) & A_{12}(k) & A_{13}(k) & A_{14}(k) \\ A_{20}(k) & A_{21}(k) & A_{22}(k) & A_{23}(k) & A_{24}(k) \\ A_{30}(k) & A_{31}(k) & A_{32}(k) & A_{33}(k) & A_{34}(k) \\ A_{40}(k) & A_{41}(k) & A_{42}(k) & A_{43}(k) & A_{44}(k) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} A_{00}(k) &= -R_A - \frac{2L_A(k)}{T}; \quad A_{01}(k) = -\frac{2M_{AB}(k)}{T}; \quad A_{02}(k) = -\frac{2M_{AC}(k)}{T}; \\ A_{03}(k) &= -\frac{2M_{Af}(k)}{T}; \quad A_{04}(k) = -\frac{2M_{Akd}(k)}{T}; \quad A_{10}(k) = -\frac{2M_{BA}(k)}{T}; \\ A_{11}(k) &= -R_B - \frac{2L_B(k)}{T}; \quad A_{12}(k) = -R_B - \frac{2M_{BC}(k)}{T}; \quad A_{13}(k) = \frac{2M_{Bf}(k)}{T}; \\ A_{14}(k) &= \frac{2M_{Bkd}(k)}{T}; \quad A_{20}(k) = \frac{2M_{CA}(k)}{T}; \quad A_{21}(k) = \frac{2M_{CB}(k)}{T}; \quad A_{22}(k) \\ &= -R_f - \frac{2M_{CB}(k)}{T}; \\ A_{23}(k) &= \frac{2M_{Cf}(k)}{T}; \quad A_{24}(k) = \frac{2M_{Ckd}(k)}{T}; \quad A_{31}(k) = \frac{2M_{fB}(k)}{T}; \quad A_{32}(k) \\ &= -\frac{2M_{fC}(k)}{T}; \\ &\dots; \quad A_{44}(k) = -R_{kd} - \frac{2L_{kd}(k)}{T}; \end{aligned}$$

$$\mathbf{B}(k) = \begin{bmatrix} B_{00}(k-1) & B_{01}(k-1) & B_{02}(k-1) & B_{03}(k-1) & B_{04}(k-1) \\ B_{10}(k-1) & B_{11}(k-1) & B_{12}(k-1) & B_{13}(k-1) & B_{14}(k-1) \\ B_{20}(k-1) & B_{21}(k-1) & B_{22}(k-1) & B_{23}(k-1) & B_{24}(k-1) \\ B_{30}(k-1) & B_{31}(k-1) & B_{32}(k-1) & B_{33}(k-1) & B_{34}(k-1) \\ B_{40}(k-1) & B_{41}(k-1) & B_{42}(k-1) & B_{43}(k-1) & B_{44}(k-1) \end{bmatrix}$$

$$B_{00}(k-1) = -R_A - \frac{2L_A(k-1)}{T}, \dots, B_{44}(k-1) = -R_{kd} - \frac{2L_{kd}(k-1)}{T}$$

$$\mathbf{i}(k) = \mathbf{A}^{-1}(k) \cdot \mathbf{B}(k-1) \cdot \mathbf{i}(k-1) + \mathbf{A}^{-1}(k)(\mathbf{U}(k-1) + \mathbf{U}(k)) \quad (1.9)$$

Перетворить алгебраїчне рівняння (1.9) на рисунку 1.3.

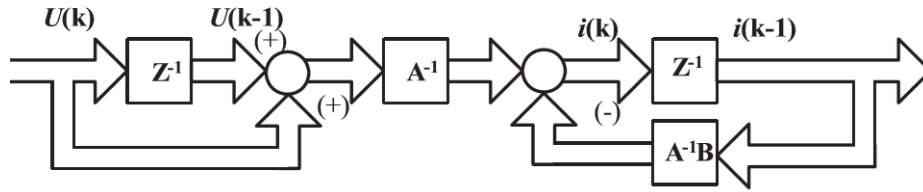


Рисунок 1.3 – Алгоритм розрахунку

З огляду на цю вимогу, на основі дволінійного перетворення синхронного двигуна з короткозамкненим ротором синтезується окрема математична модель. Автори [7] представляють базову структуру дискретних математичних моделей, адаптованих для застосування в діагностичних системах на основі цифрових сигнальних процесорів. Тестується дискретна математична модель, заснована на білінійному перетворенні синхронного генератора з короткозамкненою обмоткою ротора. Похибка інтегрування при розрахунку амплітудного струму не перевищує 7%, що підтверджує точність моделі і можливість її використання для побудови діагностичної системи на базі цифрового сигнального процесора.

1.4.3 Виявлення та моніторинг несправностей генераторів (Wolbank)

Автори Г. Стойчич, К. Пашанбегович, Т. М. Вулбанк представляє метод, що дозволяє виявляти пошкодження в генераторах змінного струму на основі лише електричних величин ротора та статора [8, 9]. Основною перевагою є використання тільки датчика струму ротора, а також статора.

Коли ротор збуджується коротким імпульсом напруги, ефект замкнутого циклу зменшується, а процедура обробки сигналу підтримується на низькому рівні, використовуючи лише основні математичні функції. Таким чином, представлений метод може бути легко застосований до існуючих систем з урахуванням не тільки температури нагріву, але і процесорів з контрольними точками в системі управління.

Метод, представлений в даному випадку, не може бути застосований під час роботи верстата, оскільки необхідний статор з коротким замиканням на клемах верстата. Таким чином, програма обмежена і використовується для тестування в початковий період. Однак ведуться подальші розробки та дослідження для відстеження в Інтернеті. Перші тести вже дали багатообіцяючі результати.

Основна ідея-використовувати механічні реакції для тимчасового збудження. Короткий імпульс напруги, що подається при перемиканні інвертора на клему машини, викликає реакцію струму, в якій переважає індуктивність. Порівняння поточних реакцій різних фаз дає інформацію про стан та асиметрію механізму.

Для симетричної машини справедливе рівняння (1.10):

$$\underline{u}_R = r_R \cdot \underline{i}_R + l_l \cdot \frac{d\underline{i}_R}{d\tau} + \frac{d\underline{\lambda}_S}{d\tau} \quad (1.10)$$

Напруга, що $\underline{u}_R$ генерується в будь-якому з активних станів $\frac{d\underline{i}_R}{d\tau}$ вихідного інвертора, призводить до зміни перехідного струму. Ця зміна потоку впливає на різні параметри. Крім індуктивності потоку також необхідно враховувати падіння напруги, а також електрорушійну силу від статора $\frac{d\underline{\lambda}_S}{d\tau}$, напругу постійного струму та вихідний стан інвертора. Щоб правильно визначити потік індуктивності, необхідно усунути небезпечний зворотний потік. Простий, але дуже ефективний метод - подати 2 коротких імпульсу напруги, які тривають кілька мікросекунд в протилежному напрямку АМІ. Через короткий час імпульсу напругу постійного струму та струм основної хвилі можна вважати постійними. Тривалість (1.10) під час кожного імпульсу може бути встановлена індивідуально. Потім усунення небезпечного падіння напруги виконується шляхом віднімання обох рівнянь імпульсів, як показано в (1.10). Оскільки збудження є тимчасовим, фактичний потік індуктивності додатково позначається як перехідна індуктивність витоків l_l , т яка відрізняється від індуктивності витоків основної хвилі:

$$\underline{v}_{R,I} - \underline{v}_{R,II} = r_R \cdot \underline{i}_{R,I} - r_R \cdot \underline{i}_{R,II} + l_{l,t} \cdot \frac{di_{R,I}}{d\tau} - l_{l,t} \cdot \frac{di_{R,II}}{d\tau} + \frac{d\lambda_{S,I}}{d\tau} - \frac{d\lambda_{S,II}}{d\tau} = l_{l,t} \cdot \left[\frac{di_{R,I}}{d\tau} - \frac{di_{R,II}}{d\tau} \right]. \quad (1.11)$$

Для несправної або тимчасово несправної синхронної машини індуктивність буде більше не скалярним, а просторовим комплексним значенням. Це впливає з того, що напрямок різниці напруги $\underline{v}_{R,I-II} = (\underline{v}_{R,I} - \underline{v}_{R,II})$ та поточна різниця похідних $\frac{di_{R,I-II}}{d\tau} = (\frac{di_{R,I}}{d\tau} - \frac{di_{R,II}}{d\tau})$ більше не будуть вирівнюватися. Перехідна індуктивність витoku тепер може бути розділена на дві частини, «зміщену» частину та «модульну» частину (1.12). Набір скалярних частин являє собою симетричну машину, тоді як складна модуляційна частина асиметрії, спричиненої несправністю (1.12):

$$\underline{l}_{l,t} = l_{offset} + \underline{l}_{mod}$$

$$\underline{l}_{mod} = l_{mod} \cdot e^{j2\gamma}. \quad (1.12)$$

Як наведено в (1.11), вимірювання нахилу вектору струму, який виникає - достатньо для обчислення кутового положення максимальної індуктивності. Це можна зробити, якщо (1.11) вставити в (1.12) і перевернути; як показано в (1.13). Фазу різниці напруги $\underline{v}_{R,I-II}$ можна вважати постійною протягом кожного періоду вимірювання. Це призводить до спрощення $\frac{di_{R,I-II}}{d\tau} \sim \underline{y}_{l,t}$. Таким чином, зрозуміло, що спостереження лише коефіцієнта фазової різниці похідних потоку є ефективним для оцінки перехідної індуктивності витoku. Крім того, кількість виконаних математичних операцій у режимі реального часу зводиться до мінімуму, оскільки потрібна лише вибірка по струму.

$$\frac{di_{R,I-II}}{d\tau} = \underline{y}_{l,t} \cdot \underline{v}_{R,I-II} = [\underline{y}_{offset} + \underline{y}_{mod}] \cdot \underline{v}_{R,I-II}. \quad (1.13)$$

Зсув спрямовий у напрямку фази різниці напруги $\underline{u}_{R,I-II}$. Однак слід підкреслити, що це справедливо у вищевказаних випадках. Важливо відзначити, що пропорційне співвідношення похідних фаз струмів статора і ротора достатньо для виявлення асиметрії в обох фазах.

Що стосується виявлення несправностей, важлива лише асиметрія або просторова модуляція індуктивності витоку, обидві похідні часу, що виникають в результаті фази напруги, можна вважати рівними у встановленому статором кадрі (1.14).

$$\frac{di_{R,I-II}}{dt} - \frac{di_{S,I-II}}{dt}. \quad (1.14)$$

Враховуючи дефект у роторі, асиметрія фіксується з рамкою, пов'язаною з ротором. Таким чином, параметр, яку слід дотримуватися у таких випадках несправності, є зміщення.

1.4.4 Визначення стану турбогенератора

Визначення стану турбогенератора на основі аналізу електричних параметрів. Аналіз електричних параметрів-це загальний термін, який використовується для позначення сигналів електричної напруги та струму в частотній області. Система на основі ESA збирає значення напруги та струму в машині, аналізує ці сигнали та порівнює отримані спектральні компоненти з відомими схемами відмов, які можуть спричинити несправності. Аналізуючи електричні діагностичні параметри та частоти окремих компонентів, що складають сигнали напруги та струму, ви можете розрізняти "справні" та несправні машини, а також виявляти типи несправностей, котрі можуть виникнути або вже виникають на ранніх стадіях. Це можливо через те, що електричні параметри несправної машини відрізняються від тих, які підлягають ремонту, і, отже, ТГ має певні несправності. Діагностична система ESA може застосовуватися до двигунів і генераторів. Що стосується синхронних генераторів, аналіз стану повинен бути зосереджений на сигналах напруги і корелювати зі значеннями струму. Якщо значення діагностичних

параметрів досліджуваного вузла більше струму (ЧР), то можна припустити пошкодження генератора.

У контексті моніторингу технічного стану використовується ряд методів для забезпечення процесу діагностики контрольованого обладнання, щоб моніторинг виявляв помилки в роботі ТГ. Основна ідея полягає в тому, щоб проводити технічне обслуговування ТГ тільки в тому випадку, якщо робочий стан обладнання погіршився.

Висновки до першого розділу

1. На основі аналізу літературних джерел було визначено, що основними вузлами синхронних турбогенераторів є: статор, ротор, збудник, система збудження, корпус статора, підшипники валу ротора, система охолодження. Загальні інформація про синхронні генератори
2. Шляхом дослідження пошкоджуваності синхронних генераторів доведено, що найчастіше пошкоджуваним вузлом синхронних турбогенераторів типу ТВВ-1000-2УЗ є статор.
3. Аналіз сучасних методів діагностування синхронних турбогенераторів свідчить про те, що до таких методів відносяться методи компанії Siemens, а саме: контроль вібрації обмоток статора; контроль часткових розрядів, контроль міжвиткових замкнень обмотки ротора, контроль напруги на валу та струму в шині заземлення генератора, моніторинг пружного кутового зсуву валу ротора.

2 ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ ТЕОРІЙ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ

2.1 Застосування теорії ідентифікації дефектів турбогенераторів

2.1.1 Використання теорії ідентифікації ядра Вольтерра.

Для виявлення дисбалансу статора вчені Л. Ванг, Ю. Лі та Дж. Лі запропонували використовувати теорію ідентифікації ядра Вольтерра.

Було виявлено, що при короткому замиканні в обмотці статора синхронного генератора генерується незбалансований струм в обмотці статора. Такий процес використовується для діагностики СГ для виявлення пошкоджень. Однак результати вимірювання діагностичних параметрів часто містять перешкоди. Тому на практиці дуже важко виявити замикання на землю в одній фазі і навіть по перехідному опору.

Відома математична модель Вольтерра, яка використовується для прогнозування незбалансованого струму статора. Коротке замикання обмоток ротора виявляється шляхом визначення різниці в роботі сердечника Вольтерра, тобто відсоткової різниці між нелінійною системою напруги статора і струмом нульової послідовності в нормальних або ненормальних умовах експлуатації. Ефективність цього методу була підтверджена шляхом моделювання однофазного короткого замикання обмоток статора синхронних генераторів. Метод дозволяє уникнути використання додаткового тестового обладнання і тому має широкий спектр застосувань, ніж метод, що використовує додатковий індуктивний зонд у вигляді котушки.

Коротке замикання обмотки ротора призводить до зміни напруги сердечника вольтера 3-го порядку на струм обмотки статора, тому метод діагностики, запропонований Л. Ванг, Ю. Лі та Дж. Лі, дозволяє виявити несправність на основі результатів трьох вимірів і володіє високою точністю діагностики. Аналіз змін сердечника Вольтера і струмів нульової послідовності в обмотках статора синхронних генераторів дозволяє зробити важливі висновки про коротке замикання ротора на ранніх стадіях виникнення цього пошкодження [10-11].

Коротке замикання ротора синхронного генератора моделюється у відповідному експерименті. Для експерименту використовувався спеціальний синхронний генератор. Параметри синхронного генератора наведені в таблиці 2.1. Він призначений для імітації несправностей з взаємно обертовими короткими замиканнями, що виникають і зникають під час роботи ТГ. На рисунку 2.1 показана принципова схема з'єднання обмоток ротора. Обмотка ротора має 3 клеми. Термінал L2 дозволяє змінювати 3% від загальної швидкості. L3 і L4 становлять 15% і 6% відповідно. Такий випробувальний стенд імітує різні декомутації короткого замикання або перехідні стани короткого замикання, змінюючи комбінацію з'єднань з цими клемами для перевірки точності цього методу, струм короткого замикання під час експерименту коливається від 3% до 15% від нормального струму. Помилка деякого струму короткого замикання в синхронному генераторі також була змодельована під час експерименту.

Експеримент виглядає наступним чином. Головний двигун приводить синхронний генератор в рух до швидкості синхронізації. Синхронні генератори підключаються до мережі і підтримують певний режим роботи. Підключення до клем ротора для імітації короткого замикання генератора і збору відповідних електричних параметрів виконується перед проектуванням експерименту. Встановіть частоту дискретизації на 10 кГц. Струм несиметрії статора та напруга несиметрії статора вимірюються при справному та несправному стані СГ. Хвилі струму у обмотках статора, випадковим чином виведені протягом декількох циклів (рисунк 2.2). На рисунку 2.2 а –показаний струм несиметрії статора синхронного генератора, коли обмотка ротора є справною. Рисунок 2.2 б – відповідає обриву обмотки, а тому і зникненню струму несиметрії статора. Відповідно до рисунку 2.3, струм статора містить спотворення синусоїди внаслідок дії завад.

Таблиця 2.1 – Відомості про ТГ

Повна потужність, кВА	7,5
Активна потужність, кВт	6
Номінальна лінійна трифазна напруга, В	400

Продовження таблиці 2.1

Номінальний струм, А	3,8
Стру нульової послідовності під час досліджень, А	1,4
Кількість обертів, об./хвил.	3000
$\cos(\varphi)$, в.о.	0,8
Частота, Гц	50
Схема з'єднань обмоток статора	Y

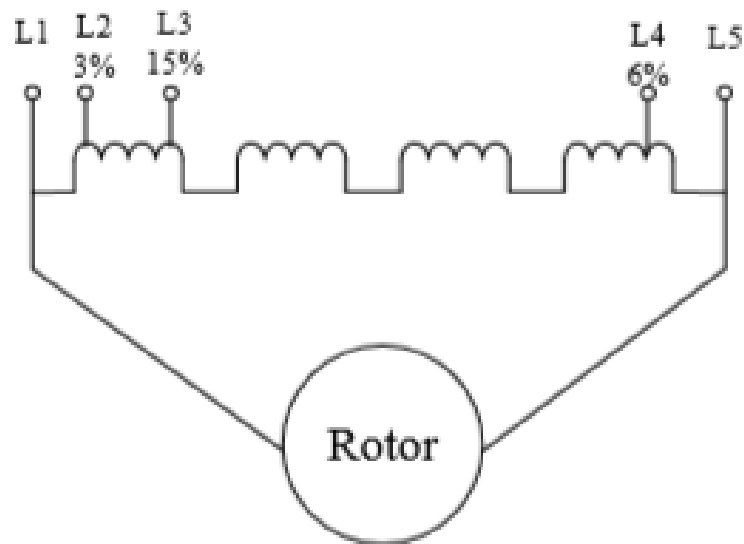
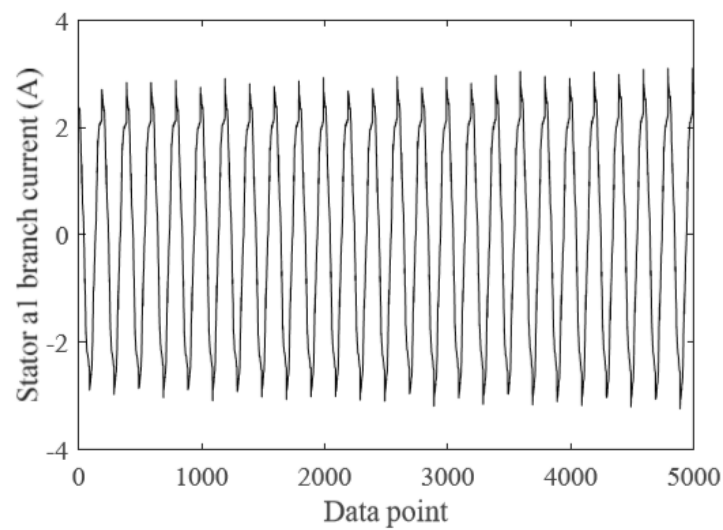
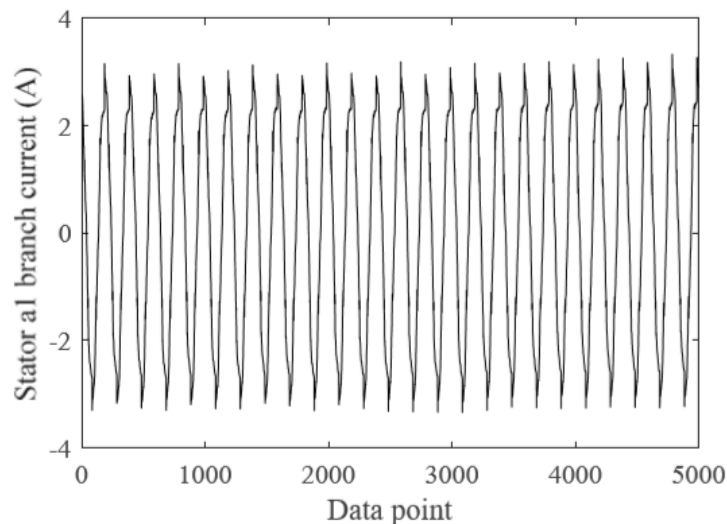


Рисунок 2.1 – Схема підключення клем до обмотки ротора СГ.



a



б

Рисунок 2.2 – Струм в обмотці статора експериментального генератора:

а – осцилограма в нормальному режимі;

б – під час замикання в обмотці ротора.

Традиційні методи діагностики не можуть точно виявляти зміни струму, а потім визначати несправність короткого замикання. На метод ідентифікації ядра Волтера менше впливають завади і тому цей метод може ідентифікувати притаманні СГ характеристики нелінійних систем.

2.1.2 Метод ідентифікації ядер Вольтерра третього порядку

Напруга і струм відгалуження статора приймаються за входи і виходи моделі Вольтерри відповідно. Комбінована система відліку напруги та струму може підвищити точність ідентифікації. Основна функція нелінійної моделі СГ обчислюється і визначається методом найменших квадратів.

Система рівнянь стану СГ для одного виходу з 1 входом може бути виражена наступним рівнянням:

$$y(t) = F[u(t)], \quad (2.1)$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_1(\tau)u(t-\tau) d\tau + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h_2(\tau_1, \tau_2)u(t-\tau_1) d\tau_1 d\tau_2 + \\ + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3)u(t-\tau_1) \dots u(t-\tau_3) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_3 + \dots = \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{k=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} h_k(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k) u(t - \tau_1) \dots u(t - \tau_k) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_k = \\
&= \sum_{k=1}^{\infty} y_k(t)
\end{aligned}$$

де $y_k(t)$ – відповідь на вихідний режим часу на k -порядку системи. h_k - це часова область ядра системи Вольтерра, а саме узагальнена функція імпульсного відгуку k -порядку на тестовий сигнал. Дискретизація рівняння (2.2) дозволяє отримати рівняння показане у вигляді формули (2.3):

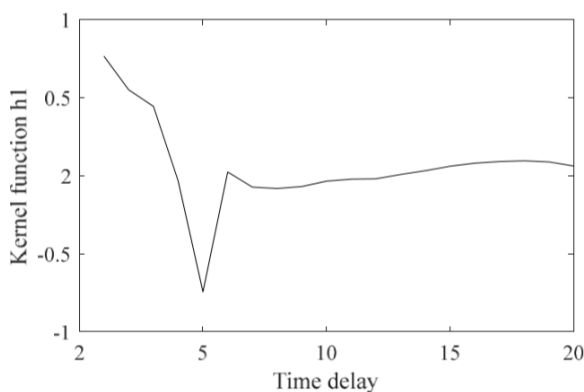
$$y(n) = y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l_1=1}^{\infty} \dots \sum_{l_k=0}^{\infty} h_k(l_1, l_2, \dots, l_k) \dots u(n - l_k). \quad (2.3)$$

У практичному застосуванні нескінченна серія Вольтерра повинна бути зведена до нескінченної кількості виразів.

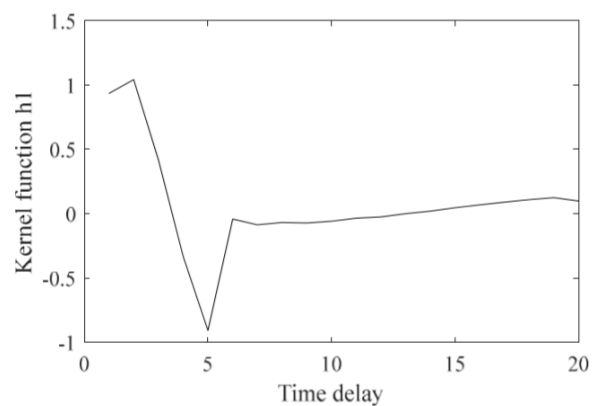
$$y(n) = y_0 + \sum_{k=1}^K \sum_{l_1=0}^{M_1-1} \dots \sum_{l_k=0}^{M_k-1} h_k(l_1, l_2, \dots, l_k) \prod_{m=1}^k u(n - l_m) + e(n). \quad (2.4)$$

Відповідно до алгоритму Вольтера в рівняннях (2.3) і (2.4) встановлюється M_k , тобто довжина пам'яті функції ядра третього порядку. Відповідно до несправності короткого замикання синхронного генератора, ядро часової області першого порядку, ядро часової області другого порядку та ядро часової області третього порядку нелінійної моделі передачі встановлюються на 20, 12 і 5 відповідно.

Результати ідентифікації ядра першого порядку показані на рисунку. 2.3



(a)



(б)

Рисунок 2.3 – Результати ідентифікації ядра першого порядку.

На рисунку 2.3 також показані: а – результат ідентифікації ядра першого порядку, коли обмотка статора немає пошкоджень; б – результат ідентифікації ядра першого порядку, коли обмотка містить коротке замикання. На рисунку 2.3 значення функції ядра з лівого боку фігури збільшується при виникненні несправності.

На рисунку 2.4 показані результати ідентифікації ядра другого порядку. На (рисунку 2.4 а) показаний результат ідентифікації ядра другого порядку, коли обмотка нормальна. На (рисунку 2.4 б) показаний результат ідентифікації ядра другого порядку, коли обмотка замкнена. Форма кривої ядра другого порядку сильно змінюється (нагадує вібрацію), а діапазон амплітуди відхилень до та після впливу завад – невеликий. Важко ідентифікувати несправність у вигляді короткого замикання безпосередньо шляхом прямого аналізу ядра Вольтерра другого порядку. З огляду на характеристики ядра Вольтерра третього порядку, його тривимірна поверхня показана на рисунку 2.5. Виходячи з цього, можливо діагностувати коротке замикання. Обмотка ротора поділяється на звичайне електричне коло збудження та на додаткове коло, яке викликане пошкодженням, коли в синхронному генераторі виникає несправність короткого замикання ротора [12-14].

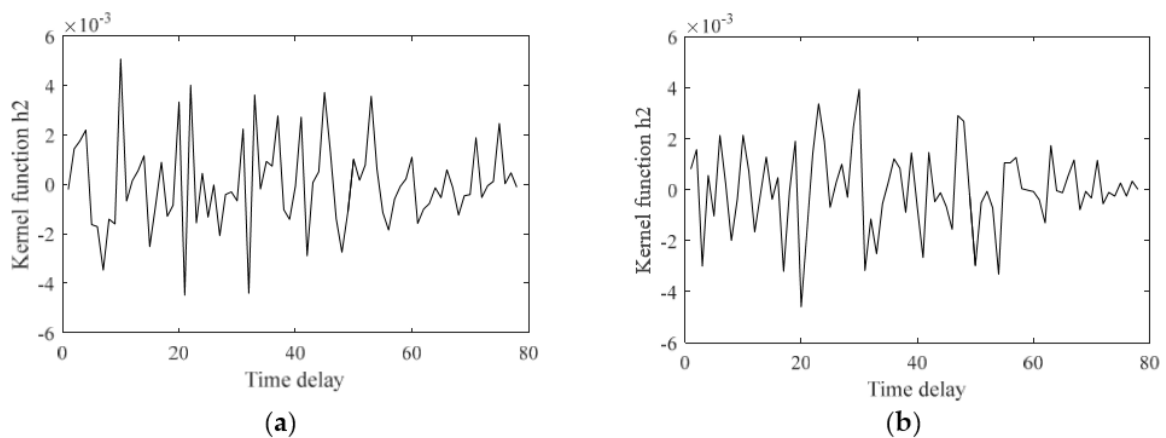


Рисунок 2.4 – Результати ідентифікації ядра першого порядку

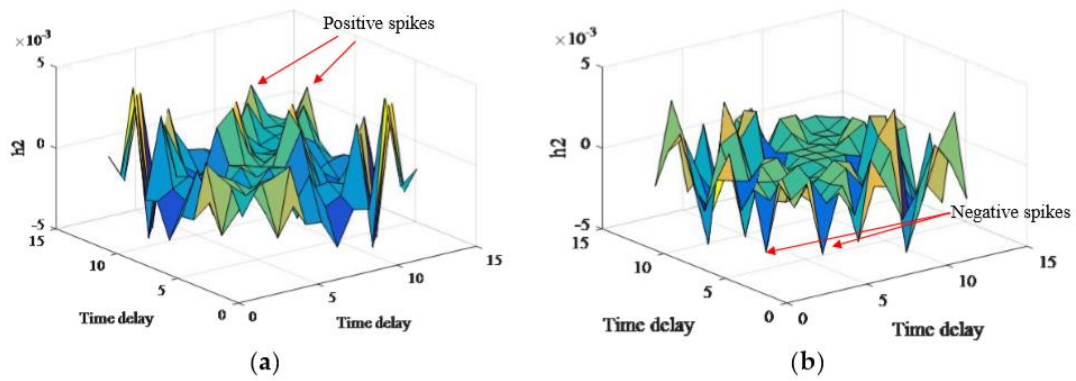


Рисунок 2.5 – Результати ідентифікації ядер третього порядку

Висновки до другого розділу

1. Шляхом застосування математичної моделі Вольтерра для аналізу струмів синхронного генератора під час замкнень в роторі, доведено, що замикання в обмотці ротора СГ, виявляються шляхом контролю відсоткової різниці між нелінійною напругою нульової послідовності статора і струмом нульової послідовності в нормальних або аномальних режимах експлуатації.

2. Важко ідентифікувати несправність у вигляді короткого замикання безпосередньо шляхом прямого аналізу ядра Вольтерра другого порядку тому, що на графіку мають місце значні та часті коливання досліджуваної функції Кернела

3. ПРИКЛАД РОЗРОБКИ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТВВ-1000-2УЗ

3.1 Побудова дерева несправності

Аналіз дерев відмов (ДН) – це ефективний підхід для визначення всіх причин, що завдають шкоди ТГ. ДН дає можливість врахувати безліч факторів та створити універсальну систему онлайн-діагностики, знайти зв'язок між елементами та випадками несправності СГ. Турбогенератор (ТГ) – це складна електрична машина, і прогнозувати поведінку деяких елементів дуже важко, тому що потрібно мати спільний математичний підхід. Але якщо є інформація про основні елементи, статистичні дані про пошкодження деяких елементів, мовні дані оперативного персоналу можна знайти причин.

Під час побудови ДН (Додаток Б), пропоную враховувати пошкодження наступних вузлів: основні компоненти ТГ: ротор, статор, збудник, щітковий контактний апарат, підшипники, система охолодження, ущільнення вала. Крім того, якщо інформація про технічний стан ТГ відсутня, то для створення дерева несправностей можуть використовуватися лише дані з паспорта, інструкції з експлуатації чи інших нормативних документів.

3.2 Визначення залишкового ресурсу синхронного генератора

3.2.1 Обґрунтування доцільності використання методів нейро-нечіткого моделювання

Проведення оперативного діагностування СГ в умовах неповноти даних на момент визначення поточного технічного стану пов'язано з необхідністю продовження експлуатації зношеного електрообладнання (ЕО)

Огляд зовнішнього стану (перший рівень оцінювання технічного стану СГ) забезпечує спрощене оцінювання. Він дозволяє виявити: зростання шуму, вібрацію, підвищену температуру та інші дефекти.

На другому рівні здійснюється контроль технічного стану не лише зовнішніх елементів СГ, а і внутрішніх складових, його вузлів і елементів (наприклад,

шляхом дослідження АЧХ обмоток статора), а також шляхом визначення технічного стану СГ в об'ємі міжремонтних випробувань.

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

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

Проаналізувавши літературні джерела створим схему, яка показує залежний або незалежний вплив діагностичних параметрів на коефіцієнт загального залишкового ресурсу ТГ (рисунок 3.2).

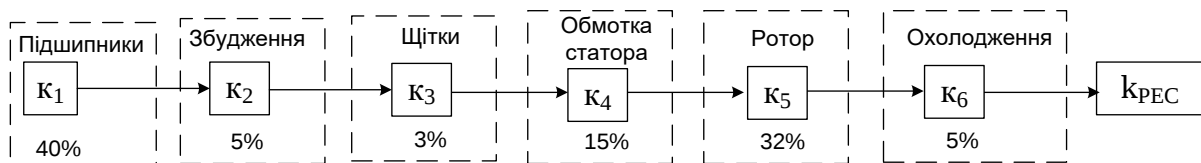


Рисунок 3.2 – Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ

На рисунку 3.2 показано відсоткову кількість виявлених дефектних вузлів за даним параметром, яка наведена у відсотках від загальної кількості дефектних вузлів.

На рисунку 3.2 послідовні позначені блоки з параметрами, відхилення яких від норми сприяло виведенню ТГ в ремонт за умови одночасного відхилення від норм цих параметрів, що зумовлено вимогами до надійності роботи ТГ.

Сформуємо таблицю початкових даних (Таблиця 3.1)

Таблиця 3.1 – Причини виведення в ремонт ТГ

№	Вузли генератора	Пошкоджуваність ТГ типу ТВВ-1000-2У3, в.о.	Позначення
1.	Підшипники ротора	0,4	к ₁
1.1	Ізоляція підшипників валу з двох сторін	0,011	R ₁
1.2	Заземлення валу турбінного агрегату	0,35	R ₂
1.3	Ущільнення підшипників ротора	0,012	T ₁
2.	Система збудження	0,05	к ₂
2.1	Тиристори системи збудження	0,01	T ₂
2.2	Розрядник збудника	0,04	T ₃
2.3	Ізоляція ротора	0	R ₃
3.	Щітки ковзання	0,04	к ₃
4.	Обмотка статора	0,14	к ₄
4.1.	Магнітопровід статора	0,01	T ₄
4.2	Лобові частини обмотки статора	0,02	T ₅
4.3.	Елементні провідники в пазах статора	0	T ₆
4.4	Ізоляція статора	0	R ₃
4.5	Пакети сталі статора	0	T ₇
4.6	Інші пошкодження магнітопроводу статора	0,01	V ₁
4.7	Кінці обмоток та контакти	0,2	T ₈

№	Вузли генератора	Пошкоджуваність ТГ типу ТВВ-1000-2УЗ, в.о.	Позначення
5.	Ротор:	0,3	K ₅
5.1	Пакети роторного заліза	0,072	V ₂
5.2	Щітковий контактний апарат	0,05	R ₄
5.3	Обмотка ротора	0,2	R ₅
5.4	Бандажні кільця	0	V ₃
6.	Система охолодження	0,05	K ₆
6.1	Трубки системи охолодж. у лобових частинах статора	0	T ₉
6.2	Охолодження ротора	0,05	T ₁₀
6.3	Лопаті вентиляторів	0	V ₄
6.4	Утримуючі кільця	0	V ₅
6.4.1	Утримуюче кільце 1	0	V ₆
6.4.2	Утримуюче кільце 2	0	V ₇

З метою отримання узагальненого показника залишкового ресурсу ТГ, який вираховує значення всіх діагностичних параметрів та їх вплив, пропонується від відомих значень діагностичних параметрів перейти до відповідних цим значенням коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному діагностичному параметру. Ці коефіцієнти визначаються у відносних одиницях і тому характеризують сумарне напрацювання ТГ від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан, коли діагностичний параметр досягає граничного значення, тобто залишковий технічний ресурс. Коефіцієнт залишкового ресурсу k_i за i -м діагностичним параметром:

$$k_{i1} = \left| \frac{x_{i1,гран} - x_{i1,ном}}{x_{i1,гран} - x_{i1,поч}} \right|, \quad (3.1)$$

де $x_{il,gran}$ – граничне нормативне значення i_1 -го діагностичного параметра, $x_{il,nom}$ – значення i_1 -го діагностичного параметра на момент контролю, $x_{il,noc}$ – початкове значення i_1 -го діагностичного параметра (на момент введення в експлуатацію нового обладнання або після ремонту), i_1 – діагностичний параметр.

Так, для ТГ типу ТВВ-1000-2У3 потужністю 1000 МВт опір ізоляції обмотки статора R_3 – після ремонту дорівнював 1000 МОм, а на момент контролю дорівнював 600 МОм, граничне значення цього параметра – 0,5 МОм. Тому коефіцієнт залишкового ресурсу k_{R3} за діагностичним параметром R_3 визначається за виразом (3.2):

$$k_{R3} = 1 - \left| \frac{1000-600}{1000-0.5} \right| = 0.4 (\text{в. о.}). \quad (3.2)$$

Для послідовної частини схеми коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом (3.3):

$$k_{pec} = \prod_{\tau=1}^{\nu} k_{\tau}^{p_{\tau}}, \quad (3.3)$$

де k_{τ} – коефіцієнт залишкового ресурсу ТГ по τ -му діагностичному параметру, τ – τ -тий діагностичний параметр, ν – кількість блоків у послідовній частині схеми, p_{τ} – ймовірність відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра:

$$p_{\tau} = \frac{y_{\tau}}{m_2}, \quad (3.4)$$

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

Тому коефіцієнт загального залишкового ресурсу ТГ визначається за виразом:

$$k_{\text{заг.рес}} = K_{\kappa 1}^{p_{\kappa 1}} \cdot K_{\kappa 2}^{p_{\kappa 2}} \cdot K_{\kappa 3}^{p_{\kappa 3}} \cdot K_{\kappa 4}^{p_{\kappa 4}} \cdot K_{\kappa 5}^{p_{\kappa 5}} \cdot K_{\kappa 6}^{p_{\kappa 6}}, \quad (3.5)$$

де $K_{\kappa 1}, K_{\kappa 2}, K_{\kappa 3}, K_{\kappa 4}, K_{\kappa 5}, K_{\kappa 6}$, – відомі на момент розрахунку значення коефіцієнтів залишкового ресурсу відповідно по параметрах $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4, \kappa_5, \kappa_6$; $p_{\kappa 1}, p_{\kappa 2}, p_{\kappa 3}, p_{\kappa 4}, p_{\kappa 5}, p_{\kappa 6}$ – ймовірності відхилень значень діагностичних параметрів від гранично допустимих нормованих значень з урахуванням загальної кількості відхилень всіх діагностичних параметрів. Так, відповідно до табл. 3.6: $p_{\kappa 1} = 0,4$ в.о., $p_{\kappa 2} = 0,05$ в.о., $p_{\kappa 3} = 0,03$ в.о., $p_{\kappa 4} = 0,15$ в.о., $p_{\kappa 5} = 0,32$ в.о., $p_{\kappa 6} = 0,05$ в.о. Тоді, для ситуації, коли

$\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = \kappa_4 = \kappa_5 = \kappa_6 = 1$ в.о., $k_{\text{заг.рес. ТГ}} = 1$, при $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = \kappa_4 = \kappa_5 = \kappa_6 = 0,5$ в.о., $k_{\text{заг.рес. ТГ}} = 0,5$ в.о., а при $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = \kappa_4 = \kappa_5 = \kappa_6 = 0$, $k_{\text{заг.рес. ТГ}} = 0$ в.о.

Для створення математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ було використано параметри, за кожним з яких можна робити висновок про стан ТГ. Але жоден з даних параметрів не в повній мірі характеризує технічний стан уводу, він лише вказує на певні зміни технічного стану ТГ.

Якщо один з цих технічних параметрів виходить за нормовані межі, це зовсім не означає що ТГ повністю втратив свою роботоздатність.

Тому, задача полягає у знаходженні не завжди відомих, нечітких взаємовпливів різних технічних параметрів на загальний технічний стан ТГ і якомога точнішому прогнозуванні динаміки розвитку пошкоджень і їх впливу на загальний технічний стан.

На даному етапі розвитку сучасного комп'ютерного забезпечення використання для вирішення поставленої задачі, методів теорії нечітких множин є не складним завданням [39]. Це дає нам змогу врахувати значення різних діагностичних параметрів при діагностуванні ТГ і створити базу правил їх взаємодії, не знаючи математичного зв'язку між ними. За допомогою системи комп'ютерної математики – системи MATLAB – є можливість створити математичну модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ, використовуючи яку

відредагувати раніше створену ймовірнісну вибірку навчальних даних, за якими далі можна отримати аналітичну залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ від діагностичних параметрів у вигляді поліному. Ця залежність може бути використана у програмному забезпеченні сучасних мікропроцесорних пристроїв діагностування ТГ.

3.3.2 Формування таблиці початкових даних

Формування початкових навчальних даних було проведено таким чином. Для шести вхідних параметрів моделі, які змінювались випадковим чином від 0 до 1, було визначено коефіцієнт загального залишкового ресурсу ТГ (за виразом 3.8). Для зручності застосування даних і спрощення поточних розрахунків у системі комп'ютерної математики MATLAB вхідні параметри моделі зводились до відносних одиниць їх відхилення від норми.

Шість вхідних параметрів моделі – коефіцієнти залишкового ресурсу ТГ, які відповідають шести діагностичним параметрам. Кількість параметрів може бути більшою.

Дані були використані як навчальні дані при моделюванні в системі комп'ютерної математики MATLAB. Для цього використовувався пакет Fuzzy Logic Toolbox. За допомогою редактора ANFIS Editor)з використанням гібридного навчального алгоритму та використовуючи алгоритм нечіткого висновку Сугено [15] було отримано нейро-нечітку модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ ТВВ-1000-2УЗ.

Результат розрахунків наведено в табл. 3.2

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ

K_1 , в.о.	K_2 , в.о.	K_3 , в.о.	K_4 , в.о.	K_5 , в.о.	K_6 , в.о.	Коефіцієнт залишкового ресурсу ТГ
0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	0
1	0	1	1	1	1	0
...	...	...	...	...	...	...
0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,94

Продовження таблиці 3.2

1	1	1	1	1	0,07	0,68
1	1	1	1	1	0,07	0,71
1	1	1	1	1	1	0,2
1	1	1	1	1	1	0,27
1	1	1	1	1	1	0,93
1	1	1	1	1	1	0,95
1	1	1	1	1	1	0,95
...	...	...	...	...	...	...
0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,97
0,6	0,5	0,8	0,4	0,7	0,5	0,62
0,2	0,5	0,3	0,4	0,7	0,5	0,41
0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,7	0,46

3.3.3 Розробка структурної схеми діагностичної моделі даних

Для кожної вхідної змінної нейро-моделі використовувались по чотири лінгвістичних терми з гаусовими функціями належності (рис. 3.3) вираз (3.16) [15]:

$$k_{pec.il} = f(x_{il}; \sigma_{il}; c_{il}) = e^{\frac{-(x_{il}-c_{il})^2}{2 \cdot \sigma_{il}^2}}. \quad (3.6)$$

У виразі (3.6): σ_{il} та c_{il} – числові параметри, σ_{il}^2 в теорії ймовірності називається дисперсією розподілу [12], а другий параметр c_{il} – математичним сподіванням, i_l – вхідний параметр нейро-нечіткої моделі, який відповідає діагностичному параметру, x_{il} – значення i_l -го вхідного параметра моделі: $x_1=k_1$, $x_2=k_2$, $x_3=k_3$, $x_4=k_4$, $x_5=k_5$, $x_6=k_6$.

Структура отриманої нейро-мережі показана на (Додаток В).

Для знаходження значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу використовуємо нечітку нелінійну авторегресійну модель коефіцієнта загально залишкового ресурсу ТГ.

Ця модель встановлює нечітке нелінійне перетворення між значеннями коефіцієнтів залишкового ресурсу по діагностичних параметрах.

3.3.4 Розробка математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу

Це такі терми, як: «нормальні» значення діагностичного параметра, «незначні відхилення» значення діагностичного параметра, «передаварійні» значення діагностичного параметру, «аварійні» значення діагностичного параметра. Для знаходження значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу використовуємо нечітку нелінійну авторегресійну модель коефіцієнта загально залишкового ресурсу ТГ. Ця модель встановлює нечітке нелінійне перетворення між значеннями коефіцієнтів залишкового ресурсу по діагностичних параметрах та загальним коефіцієнтом залишкового ресурсу ТГ (3.7).

$$k_{\text{заг.зал.рес}} = F(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6) , \quad (3.7)$$

де F – нечітке функціональне перетворення.

Для визначення значення коефіцієнта загальнозалишкового ресурсу ТГ використовуємо модель логічного висновку Такагі-Сугено. В цій моделі нечіткі правила визначаються на основі заданої кількості значень «вхід-вихід» модельованого об'єкта у вигляді (3.8):

$$\text{ЯКЩО } x_1 \in A_1 \text{ ТА } x_2 \in B_2 \text{ ТА } \dots x_m \in V_i \text{ ТО } y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (3.8)$$

де A_1, B_2, V_m – нечіткі множини посилянь, а $y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ – чітка функція висновку, зазвичай $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ визначається у вигляді поліному вхідних змінних $x_1, x_2, \dots, x_m$. Математична модель коефіцієнта загального залишкового ресурсу є системою логічних рівнянь (3.9)

$$\left\{ \begin{array}{l}
\text{ЯКЩО } \kappa_1 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } \kappa_2 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } \kappa_3 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } \kappa_4 \in \text{"нормальне"} \\
\text{ТА } \kappa_5 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } \kappa_6 \in \text{"нормальне"} \text{ТО} \\
k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{11} \cdot \kappa_1 + a_{12} \cdot \kappa_2 + a_{13} \cdot \kappa_3 + a_{14} \cdot \kappa_4 + a_{15} \cdot \kappa_5 + a_{16} \cdot \kappa_6 \\
\text{ЯКЩО } \kappa_1 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } \kappa_2 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } \kappa_3 \in \text{"незначне відхилення"} \\
\text{ТА } \kappa_4 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } \kappa_5 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } \kappa_6 \in \text{"незначне відхилення"} \\
\text{ТО} \\
k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{21} \cdot \kappa_1 + a_{22} \cdot \kappa_2 + a_{23} \cdot \kappa_3 + a_{24} \cdot \kappa_4 + a_{25} \cdot \kappa_5 + a_{26} \cdot \kappa_6 \\
\text{ЯКЩО } \kappa_1 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } \kappa_2 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } \kappa_3 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } \kappa_4 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } \kappa_5 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } \kappa_6 \in \text{"передаварійне"} \\
\text{ТО} \\
k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{31} \cdot \kappa_1 + a_{32} \cdot \kappa_2 + a_{33} \cdot \kappa_3 + a_{34} \cdot \kappa_4 + a_{35} \cdot \kappa_5 + a_{36} \cdot \kappa_6 \\
\text{ЯКЩО } \kappa_1 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } \kappa_2 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } \kappa_3 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } \kappa_4 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } \kappa_5 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } \kappa_6 \in \text{"аварійне"} \\
\text{ТО} \\
k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{41} \cdot \kappa_1 + a_{42} \cdot \kappa_2 + a_{43} \cdot \kappa_3 + a_{44} \cdot \kappa_4 + a_{45} \cdot \kappa_5 + a_{46} \cdot \kappa_6 \\
\ldots
\end{array} \right. \quad (3.9)$$

Вихід моделі $k_{\text{заг.зал.рес.}}$ знаходиться як зрівноважена сума висновків (3.10) бази правил, записаних у вигляді системи логічних рівнянь (3.11).

$$k_{\text{заг.зал.рес}} = \sum_{j2=1}^{m3} w_{j2} \left(a_{j21} \cdot \kappa_1 + a_{j22} \cdot \kappa_2 + a_{j23} \cdot \kappa_3 + a_{j24} \cdot \kappa_4 + a_{j25} \cdot \kappa_5 + a_{j26} \cdot \kappa_6 + c_{j2} \right), \quad (3.11)$$

де $0 \leq w_{j2} \leq 1$ – ступінь виконання (вага) $j2$ -го правила, яка визначається відповідністю реальних змін діагностичних параметрів ТГ, що відображені у $j2$ -му правилі.

Налаштування моделі полягає у визначенні параметрів функцій належності і рівнянь висновку. Терми значень лінгвістичних змінних задаються у вигляді гаусових функції належності. Необхідно визначити середньоквадратичне відхилення $\sigma_{\kappa_1}, \sigma_{\kappa_2}, \sigma_{\kappa_3}, \sigma_{\kappa_4}, \sigma_{\kappa_5}, \sigma_{\kappa_6}$ та математичне очікування $c_{\kappa_1}, c_{\kappa_2}, c_{\kappa_3}, c_{\kappa_4}, c_{\kappa_5}, c_{\kappa_6}$ гаусових функції належності, параметри рівнянь висновку ($a_{11} - a_{44}, c_1 - c_4$).

Для полегшення налаштування та адаптації структури розробленої моделі до реальних параметрів конкретного ВУ модель реалізується у вигляді адаптивної нейронечіткої багатошарової мережі прямого розповсюдження ANFIS.

ANFIS являє собою найпростішу мережу прямого розповсюдження, яка містить адаптивні вузли, використовуючи правила навчання параметри цих вузлів налаштовуються так, щоб мінімізувати похибку між реальним виходом моделі $k_{\text{заг.зал.рес.мод.}}$ та реальним коефіцієнтом загально залишкового ресурсу $k_{\text{заг.зал.рес.}}$ ТГ (3.12) [2]:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{k_3=0}^{N_1-1} (k_{\text{заг.зал.рес.мод.к}_3} - k_{\text{заг.зал.рес.к}_3})^2} \rightarrow \min, \quad (3.12)$$

де N_1 – кількість рядків у навчальній вибірці, k_3 – номер рядка в навчальній вибірці, починаючи з рядка з порядковим номером «0».

Використовується гібридний навчальний алгоритм, кожна епоха якого складається з прямого та зворотного оптимізаційних розрахунків. При прямому розрахунку початкова інформація про значення вектора входу $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ та виходу $k_{\text{заг.зал.рес}}$ використовується для визначення параметрів висновку $a_{1,1} - a_{4,4}$ та $c_{1,1} - c_{4,4}$ методом найменших квадратів.

Модель загального залишкового ресурсу ВУ реалізована у вигляді ANFIS-мережі з використанням прикладних програм Fuzzy Logic Toolbox системи MathLab.

Структура ANFIS-мережі з врахуванням субкластеризації показана на рисунку 3.4.

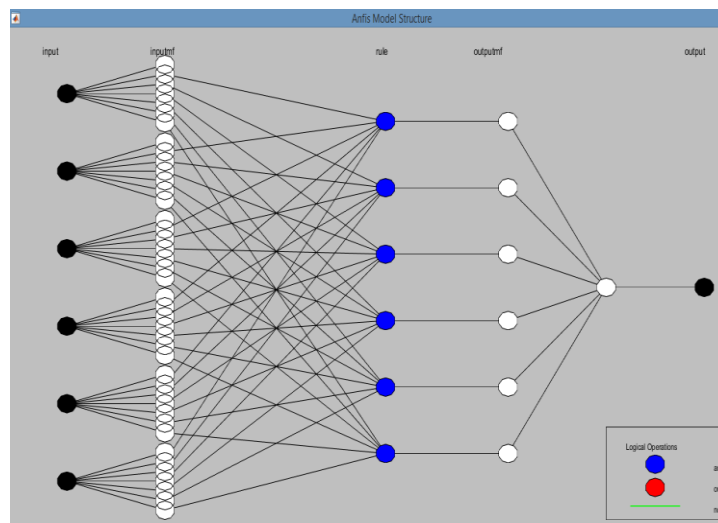


Рисунок 3.4 – Структура ANFIS-мережі з врахуванням субкластеризації

3.3.5 Визначення параметрів математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу

Використовуючи варіантний метод за критерієм мінімізації середньоквадратичної похибки навчання нейро-мережі для термів вибрані (таблиця 3.3) гаусові функції належності (3.12).

Функції належності описуються такими виразами:

– для «трикутної» (trimf) функції належності

$$\mu = f_{\Delta}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}, \quad (3.13)$$

– для «трапецеподібної» (trapmf) функції належності

$$\mu = f_{\Delta}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{a-x}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}, \quad (3.14)$$

Таблиця 3.3 – Результати дослідження похибок нейро-моделей

Назва функції належності	Рівняння функції належності	Параметри рівняння	Похибка навчання, в.о.
1	2	3	4
trimf	(3.20)	a,b,c – довільні дійсні числа від 0 до1, $a \leq b \leq c$	0,042
gbellmf	(3.21)	a,c – довільні дійсні числа від 0 до1, $a < b < c$, але $b > 0$ та $b \leq 1$	0,014

Продовження таблиці 3.3

gaussmf	(3.14)	σ^2 – в теорії ймовірності називається дисперсією розподілу, а другий параметр c – математичним очікуванням	0,009
pimf	(3.22)	a, b, c, d – довільні дійсні числа від 0 до 1, $a \leq b < c \leq d$	0,024
Sigmf	(3.23)	a, b – довільні дійсні числа від 0 до 1, $a < b$	0,042
smf	(3.24)	a, b – довільні дійсні числа від 0 до 1, $a < b$	0,027
zmf	(3.25)	a, b – довільні дійсні числа від 0 до 1, $a < b$	0,031

– для «дзвоноподібної» (gbellmf) функції належності

$$\mu = f_{\Delta}(x; a, b, c) = \left\{ \frac{I}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2 \cdot b}} \right\}, \quad (3.15)$$

– для «сигмоїдальної» (sigmf) функції належності

$$\mu = f_{\Delta}(x; a, b) = \left\{ \frac{I}{1 + e^{-a(x-b)}} \right\}, \quad (3.16)$$

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

$$\mu = f_s(x; a, b) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq a \\ 2 \cdot \left(\frac{x - a}{b - a} \right)^2, & a \leq x \leq \frac{a + b}{2} \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{b - x}{b - a} \right)^2, & \frac{a + b}{2} < x < b \\ 1, & b \leq x \end{array} \right\}, \quad (3.17)$$

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

$$\mu = f_z(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \cdot \left(\frac{b-x}{b-a} \right)^2, & \frac{a+b}{2} < x < b \\ 0, & b \leq x \end{cases}, \quad (3.18)$$

– для «гаусова» (gaussmf) функція належності

$$\mu = f_{\pi}(x; a, b, c, d) = f_s(x; a, b) \cdot f_z(x; c, d). \quad (3.19)$$

Для навчання мережі використовувався гібридний алгоритм навчання. Після тридцяти епох навчання середньоквадратична похибка навчання склала 0,011 в.о. В результаті навчання були отримані параметри гаусових функцій належності, які в подальшому були використані при створенні нейро-нечіткої моделі ТГ.

Тому, наприклад, при подальшому моделюванні для коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ діагностичного параметра k_1 першого правила значення гаусової функції належності було взято такі значення параметрів: $\delta_{k1} = 0,34$ в.о., $C_W = 0,8621$ в.о.

Відповідно до виразу (3.11) було введено такі параметри рівнянь висновків правил (таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Параметри висновків правил нейро-нечіткої моделі ТГ

Номер правила, j_2	Параметри рівняння висновку						
	$a_{j2,1}$	$a_{j2,2}$	$a_{j2,3}$	$a_{j2,4}$	$a_{j2,5}$	$a_{j2,6}$	c_{j2}

Продовження таблиці 3.4

1	0.09943	0.009774	0.009213	0.09896	0.09896	0.09896	0.09896
2	16.66	-16.36	0.01225	0.09188	0.09188	0.09188	0.09188
3	-31.97	33.52	0.09652	0.06312	0.06312	0.06312	$1.74 \cdot 10^{-8}$
4	136.5	-0.6256	-1.699	0.1138	0.1138	0.1138	0.1138

З урахуванням проведених ітераційних обчислювальних експериментів визначено вектор параметрів функцій належності (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5 – Параметри функції належності

Діагностований вузол	Вхідні параметри моделі	Назва терму (нечіткої множини значень вхідних параметрів)	Номер правила	Параметри функцій належності	
				δ	C
1	2	3	4	5	6
Підшипники ротора	K ₁	нормальні	1	0,08898	0,6242
		незначні відхилення	2	0,09494	0,3541
		передаварійні	3	0,1119	0,0892
		аварійні	4	0,0907	-0,04994
Система збудження	K ₂	нормальні	1	0,2980	1,153
		незначні відхилення	2	0,2254	0,3669
		передаварійні	3	0,2785	0,2889
		аварійні	4	0,2710	0,9023

Продовження таблиці 3.5

Щітки ковзання	К ₃	Нормальні	1	0,2441	1,213
		незначні відхилення	2	0,287	1,0030
		передаварійні	3	0,2870	1,0030
		аварійні	4	0,2870	0,9956
Обмотка статора	К ₄	нормальні	1	0,2828	1,0000
		незначні відхилення	2	0,2828	1,0000
		передаварійні	3	0,2831	0,3650
		аварійні	4	0,2830	0,9259
Ротор	К ₅	нормальні	1	0,2830	1,0580
		незначні відхилення	2	0,2830	0,9180
		передаварійні	3	0,2831	0,3383
		аварійні	4	0,2830	0,9848
Система охолодження	К ₆	нормальні	1	0,2830	0,9814
		незначні відхилення	2	0,2830	1,0630
		передаварійні	3	0,2511	0,3159
		аварійні	4	0,3150	1,0590

З урахуванням даних таблиць (з формул 3.9, 3.10, 3.12 отримуємо математичну модель коефіцієнта загально залишкового ресурсу у вигляді (3.20)

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{ЯКЩО } k_1 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_2 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_3 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_4 \in \text{"нормальне"} \\
 \text{ТА } k_5 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_6 \in \text{"нормальне"} \text{ ТО} \\
 k_{\text{заг.зал.рес}} = 0,09943k_1 + 0,009774k_2 + 0,009213k_3 + 0,09896k_4 + 0,09896k_5 + 0,09896k_6 + 0,09896 \\
 \text{ЯКЩО } k_1 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_2 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_3 \in \text{"незначне відхилення"} \\
 \text{ТА } k_4 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_5 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_6 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТО} \\
 k_{\text{заг.зал.рес}} = 16,66k_1 + -16,36k_2 + 0,01225k_3 + 0,09188k_4 + 0,09188k_5 + 0,09188k_6 + 0,09188 \cdot \\
 \text{ЯКЩО } k_1 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_2 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_3 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } \\
 k_4 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_5 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_6 \in \text{"передаварійне"} \text{ ТО} \quad (3.20) \\
 k_{\text{заг.зал.рес}} = -31,97k_1 + 33,52k_2 + 0,09652k_3 + 0,06312k_4 + 0,06312k_5 + 0,06312k_6 + 1,74 \cdot 10^{-8} \cdot \\
 \text{ЯКЩО } k_1 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_2 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_3 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_4 \in \text{"аварійне"} \\
 \text{ТА } k_5 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_6 \in \text{"аварійне"} \text{ ТО} \\
 k_{\text{заг.зал.рес}} = 136,5k_1 - 0,6256k_2 - 1,699k_3 + 0,1138k_4 + 0,1138k_5 + 0,1138k_6 + 0,1138 \\
 \dots
 \end{array} \right.$$

На рисунку 3.5 показано фрагмент віконної заставки редактора адаптивної мережі системи нечіткого висновку (ANFIS Editor) пакету Fuzzy Logic Toolbox системи комп'ютерної математики MATLAB. Ця мережа має шість входів, один вихід та передбачає використання алгоритму нечіткого висновку Сугено.

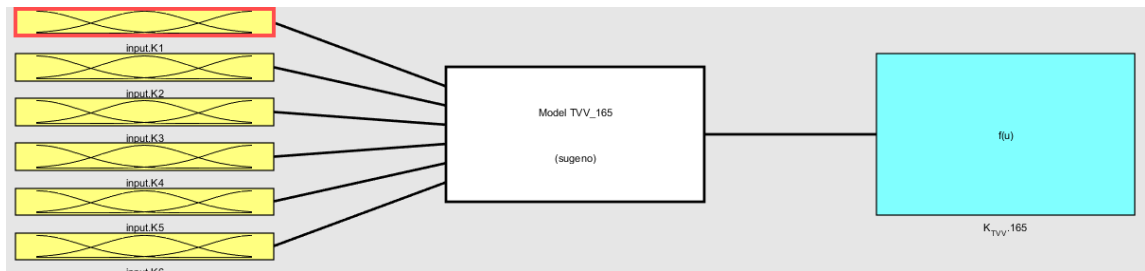


Рисунок 3.5 – Фрагмент віконної заставки редактора ANFIS.

На рисунку 3.6 показано, що ступінь належності значення коефіцієнта k_1 залишкового ресурсу за параметром «коефіцієнт залишкового ресурсу першого вузла ТГ» до підмножини «аварійні» значення визначається рівнянням гаусової функції $\mu(k_1) = f(k_1, \sigma, c)$ (3.14) з параметрами $\sigma = 0,0907$ в.о. та $c = -0,04993$ в.о., $k_w \in 0,1$ в.о. та $\mu(k_w) \in 0,1$ в.о.

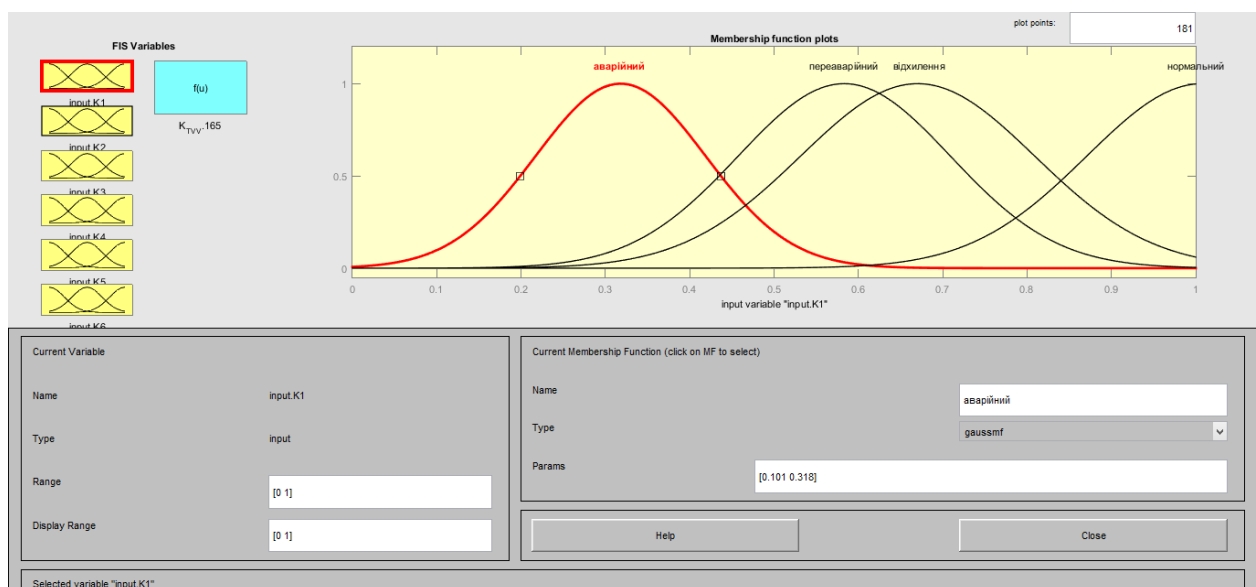


Рисунок 3.6 – Зчитування або введення параметрів функції належності

В таблицю вводимо параметри рівнянь висновків правил (рисунок 3.7), які дозволяють обчислити коефіцієнт загального залишкового ресурсу ТГ.

На рисунку 3.7 показано: діапазон можливих значень коефіцієнта загального залишкового ресурсу ВУ $k_{заг.рес} = 0 \div 1$ в.о., параметри рівняння висновку першого правила: 0.09943, 0.009774, 0.009213, 0.09896, 0.09896, 0.09896, 0.09896, 0.09896, 0.09896, 0.09896, 0.09896.

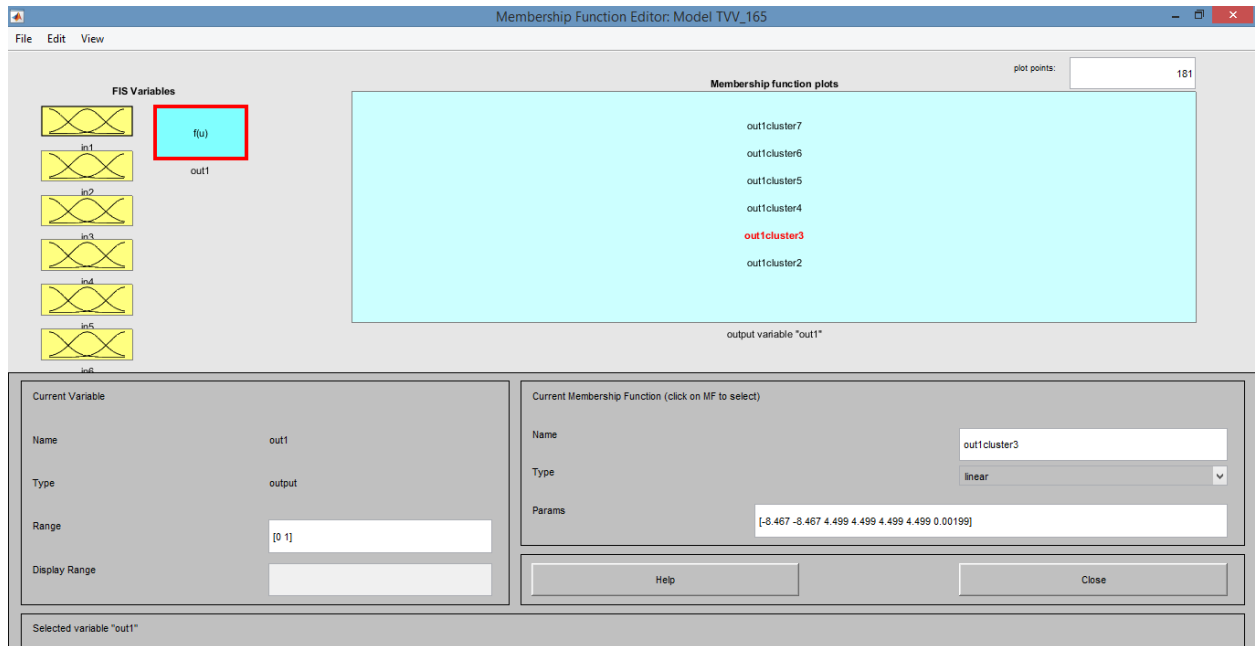


Рисунок 3.7 – Введення параметрів рівняння висновку правила

Далі навчаємо модель. Навчання передбачає 30 епох. Результати навчання показані на рисунку 3.8.

Ознакою припинення навчання є незмінність середньоквадратичної похибки навчання. На рисунку 3.8 показано, що середньоквадратична похибка навчання, яке тривало 30 епох, дорівнює 0,0056 в.о.

Отримана нейро-нечітка модель дозволяє визначити значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу високовольтного уводу залежно від значень вхідних параметрів — коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному з контрольованих діагностичних параметрів. Так, якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 0,5 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу дорівнює 0,514 в.о. (рисунку 3.9),

якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 1 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу (з похибкою 0%) дорівнює 1,00 в.о. (рисунку 3.10), якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати ≈ 0 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу (з похибкою ≈ 0 %) дорівнює ≈ 0 в.о. (рисунку 3.11).

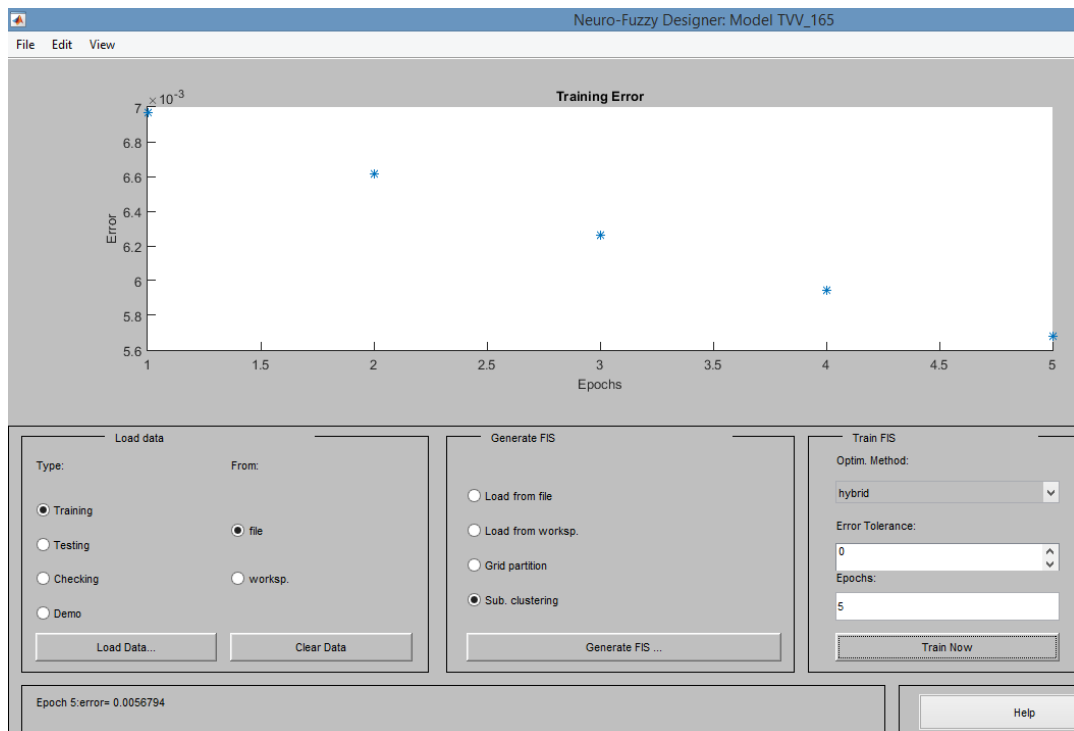


Рисунок 3.8 – Навчання моделі ТГ

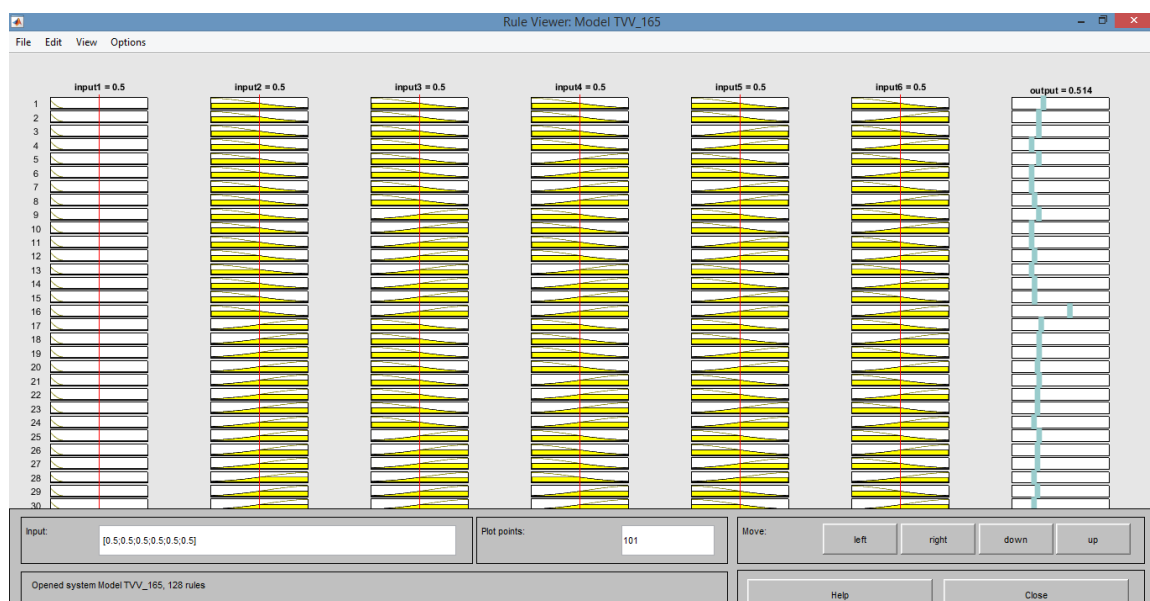


Рисунок 3.9 – Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ при значеннях всіх вхідних параметрів 0.5 в.о



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

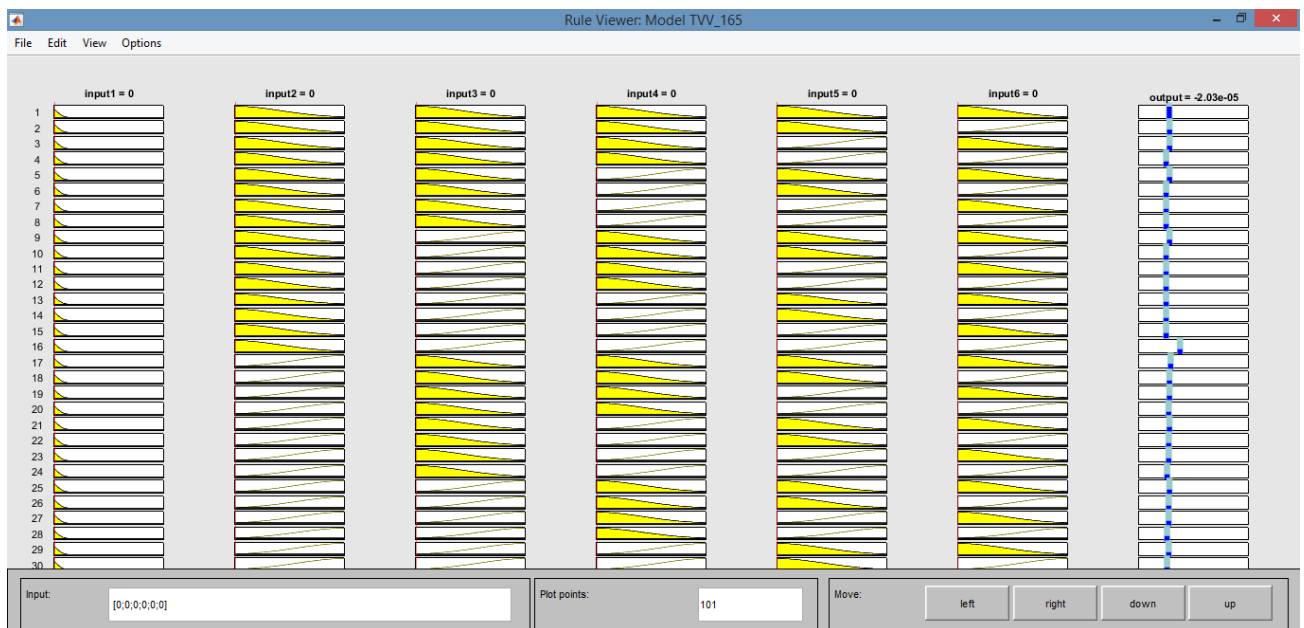


Рисунок 3.11 – Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ВУ при значеннях всіх вхідних параметрів 0 в.о

Складність залежностей вихідного параметра розробленої моделі від сукупності вхідних параметрів підтверджують графіки поверхонь цих залежностей, які показані на рисунках 3.12 – 3.13.

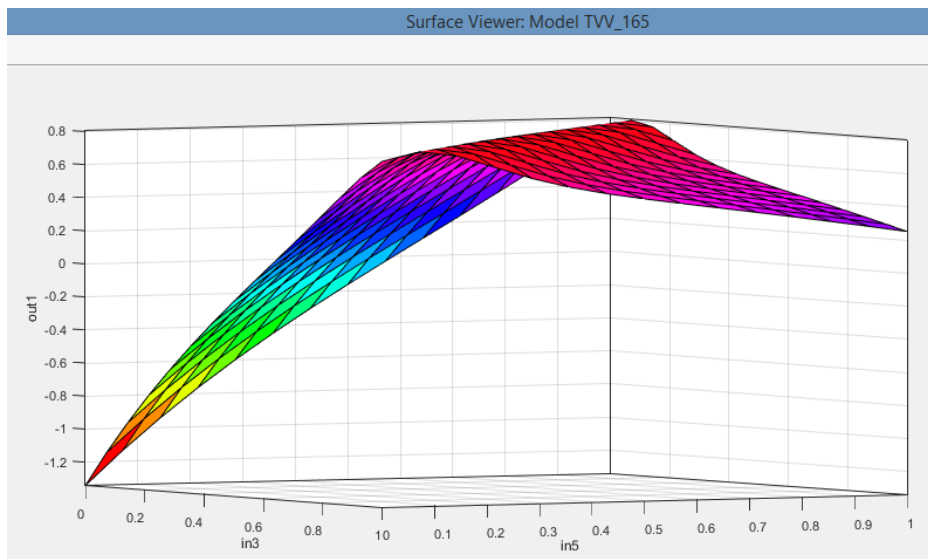


Рисунок 3.12 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ ТВВ-165-2 від κ_3 та κ_5 .

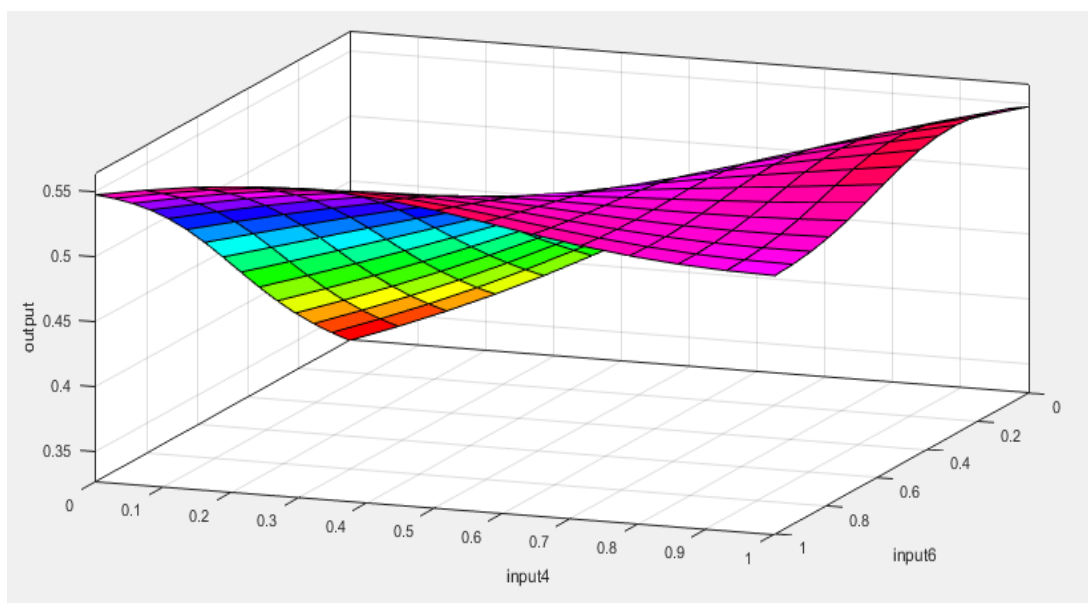


Рисунок 3.13 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ від κ_4 та κ_6 .

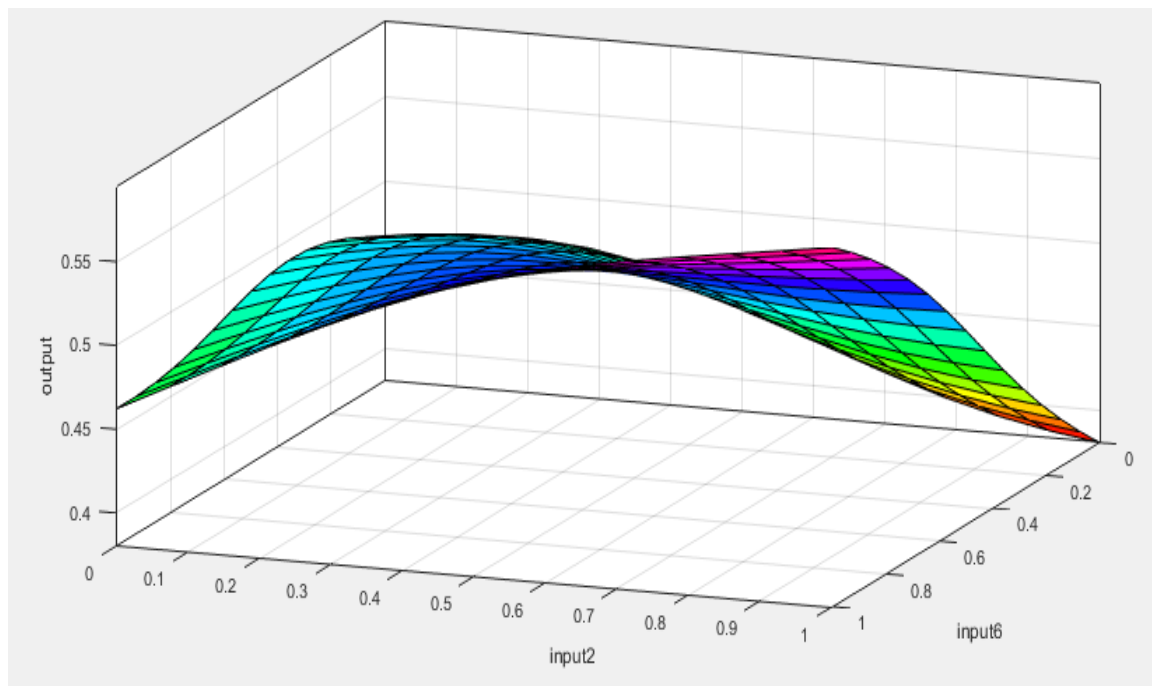


Рисунок 3.14 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ від K_2 та K_6 .

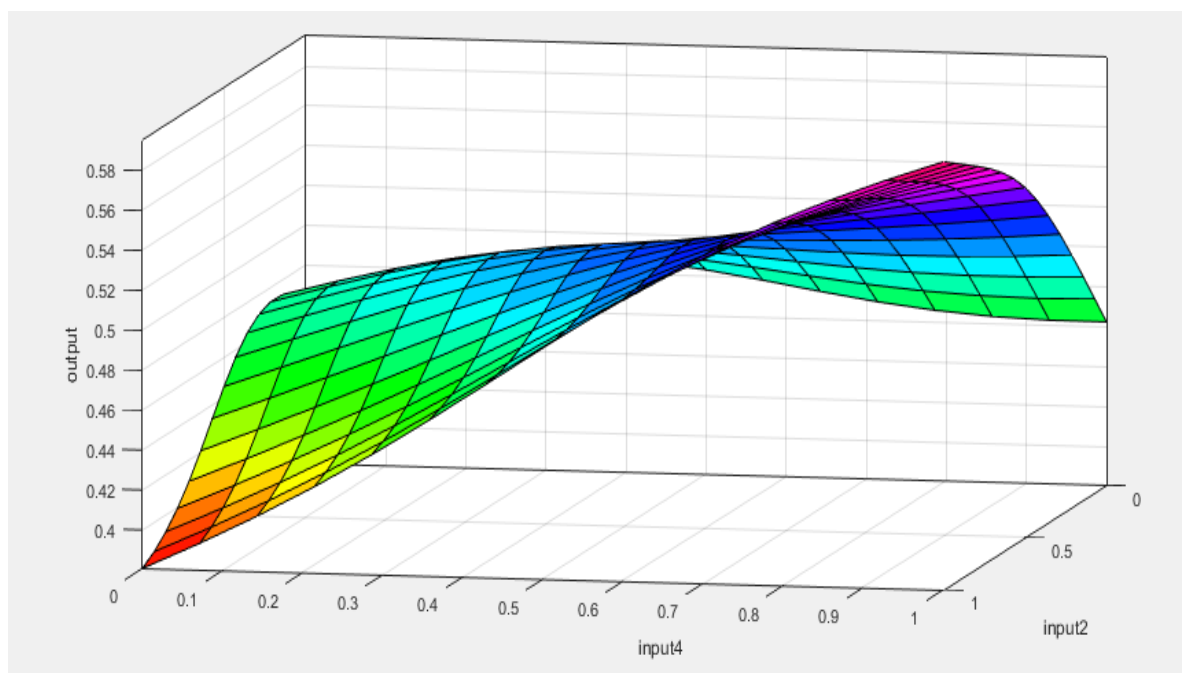


Рисунок 3.15 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ від K_4 та K_2 .

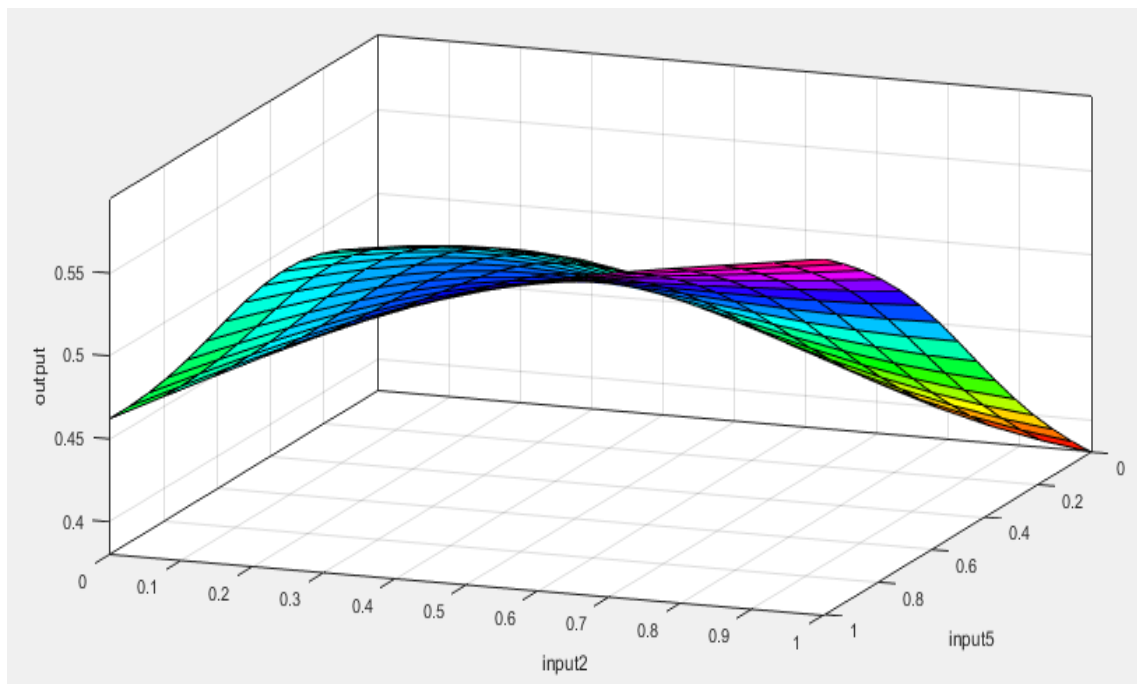


Рисунок 3.16 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ від K_2 та K_5 .

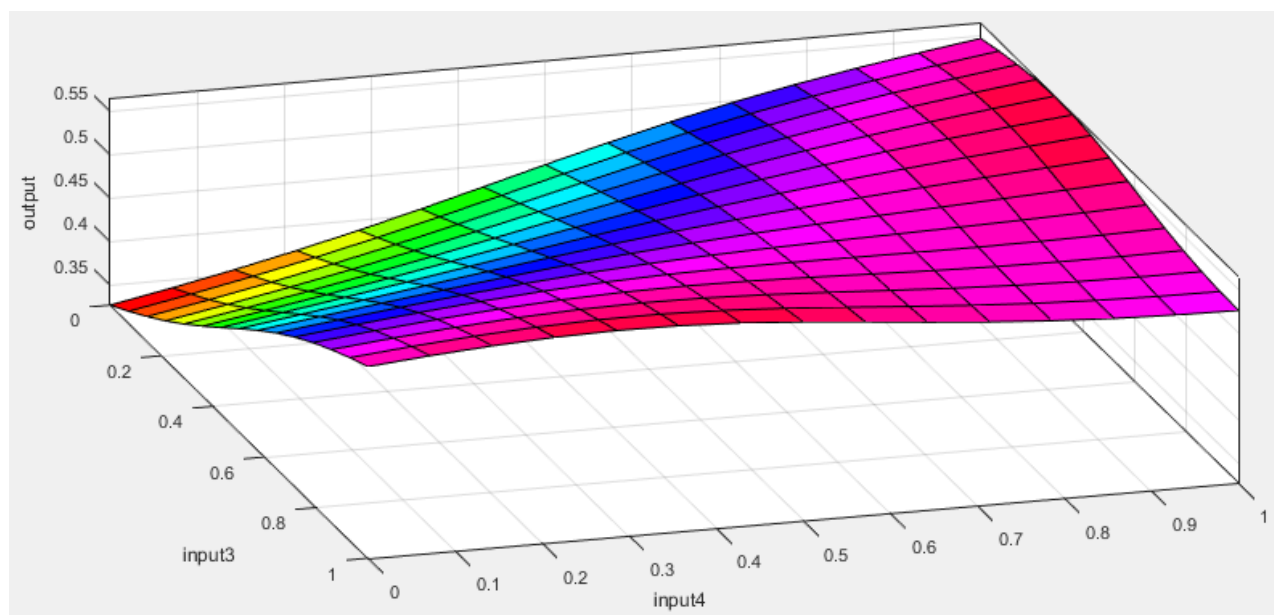


Рисунок 3.17 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ від K_3 та K_4 .

Незважаючи на складність залежностей, які показані на рисунках 3.12 – 3.17 математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ ТВВ-1000-2ЕЗ (3.27) може бути використана для програмування нечіткого контролера з метою

створення пристрою оперативного визначення стану ТГ шляхом аналізу величини коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ.

Висновки до третього розділу

- 1 Побудовано несправностей ТГ, яке дозволяє покращити якість визначення дефектів ТВВ-1000-2УЗ.
- 2 Запропоновано вираз для визначення ймовірності помилки під час діагностування.
- 3.Розроблено математичну модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ та її параметри.
4. Отримав подальший розвиток метод визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ, який шляхом використання нейро-нечіткого моделювання дозволяє визначати технічний стан ТГ в умовах неповноти поточних значень діагностичних параметрів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі бакалаврської роботи розробляються заходи з охорони праці під час організації обслуговування та діагностування статора гідрогенератора. Отже, на оперативно-ремонтний персонал АЕС, що здійснює обслуговування та діагностування статора Турбогенератора, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [16, 17]:

фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил); фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць в пожежонебезпечних зонах

Живлення обладнання для діагностування статора гідрогенератора та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В). Категорія умов по небезпеці електротравматизму – з підвищеною небезпекою, адже в цеху – струмопровідна підлога.

Вимоги поширюються на електроустановки, що розміщуються в пожежонебезпечних зонах всередині і зовні приміщень. До експлуатації в пожежонебезпечних зонах допускається електрообладнання, що відповідає

вимогам з урахуванням показників пожежо – вибухонебезпеки матеріалів (рідин, пилу, волокон) [18-20].

Електрообладнання з частинами, що іскрять під час нормальної роботи або нагріваються понад небезпечні температури (тобто є імовірними джерелами займання) рекомендується встановлювати поза межами пожежонебезпечних зон. Для забезпечення ступеня захисту оболонок електрообладнання від проникнення пилу на рівні IP54, кришки, інші з'ємні частини оболонки і місця вводу кабелів слід ущільнювати за допомогою еластичних (гумових) прокладок, ущільнювальних кілець, сальників тощо.

Відкриті частини електричних машин, які нормально іскрять (наприклад, контактні кільця), слід розташовувати на відстані не менше 1 м від місць розміщення горючих матеріалів, або відокремлювати від них екраном з негорючого матеріалу. Переносні електричні ручні машини (електрифікований інструмент), які застосовуються в пожежонебезпечних зонах, повинні мати ступінь захисту оболонок не менше IP44.

Електроустановки в пожежонебезпечних зонах будь-яких класів в разі необхідності повинні мати апарати, що відключають частково або повністю технологічне і сантехнічне устаткування у випадках аварій і пожеж. Обсяг відключення визначається технологами і сантехніками проектної організації і спеціалістами служб охорони праці, з урахуванням особливостей технологічного процесу. При використанні електронагрівальних приладів їх робочі частини, які нагріваються, слід захищати від контакту з горючими речовинами, а самі прилади встановлювати на поверхні із негорючих матеріалів і відділяти від горючих речовин екранами.

В пожежонебезпечних зонах всіх класів рекомендується використовувати силові і освітлювальні розподільчі пункти, що мають ступінь захисту оболонок IP54. Електрообладнання вантажопідіймальних механізмів (кранів, талей тощо), котрі перебувають в пожежонебезпечних зонах і зв'язані з технологічним процесом, повинне мати ступінь захисту оболонок згідно з ПВЕ (як для пересувних механізмів).

В пожежонебезпечних зонах слід використовувати світильники, що мають ступінь захисту не менший, ніж IP44. Світильники з лампами розжарювання не повинні мати відбивачів і розсіювачів з горючих матеріалів. В разі встановлення світильників, що не мають штепсельних роз'ємів, на металевих кронштейнах (стійках), заземлення кронштейна слід забезпечувати жорстким кріпленням до нього заземленого металевого корпусу. В свою чергу, заземлення корпусу світильника слід виконати за допомогою перемички між заземлювальним і нульовим затискачами всередині ввідного пристрою світильника.

Складські приміщення з пожежонебезпечними зонами будь-якого класу, які замикаються, повинні мати апарати для відключення із зовні силових і освітлювальних мереж незалежно від наявності апаратів для відключення всередині приміщень. В пожежонебезпечних зонах будь-якого класу складських приміщень забороняється застосування електронагрівальних приладів. В пожежонебезпечних зонах всіх класів крім захисту від струмів КЗ провідники освітлювальних мереж слід захищати від перевантажень. Крім того, від перевантажень слід захищати силові мережі, які прокладаються в пожежонебезпечних зонах складських приміщень, і в інших випадках, якщо перевантаження може виникнути за умовами технологічного процесу. В пожежонебезпечних зонах будь-якого класу кабелі і проводи повинні мати покриття і оболонку з матеріалів, що не розповсюджують горіння.

4.1.2 Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

- 1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
 - 2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.
- 1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:
- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;

- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмопровідні частини слід огороджувати;
- приєднати до "землі" переносні заземлення;
- перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмопровідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;
- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмопровідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;
- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмопровідні частини, що залишились під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. Залежно від місцевих умов струмопровідні частини огороджують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які повинні застосовуватись в електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірювальні кліщі, показчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (показчики напруги для фазування, показчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

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

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [18], а також іншими відповідними нормативними документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

Є неприпустимими:

- експлуатація кабелів та проводів з пошкодженою або такою, що втратила захисні властивості за час експлуатації, ізоляцією; залишення під напругою кабелів та проводів з неізольованими провідниками;
- застосування саморобних подовжувачів, які не відповідають вимогам до переносних електропроводок;
- застосування для опалення приміщення нестандартного (саморобного) електронагрівального обладнання або ламп розжарювання;
- користування пошкодженими розетками, розгалужувальними та з'єднувальними коробками, вимикачами та іншими електровиробами, а також лампами, скло яких має сліди затемнення або випинання.
- підвішування світильників безпосередньо на струмопровідних проводах, обгортання електроламп і світильників папером, тканиною та іншими горючими матеріалами, експлуатація їх зі знятими ковпаками (розсіювачами);
- використання електроапаратури та приладів в умовах, що не відповідають вказівкам (рекомендаціям) підприємств-виготовлювачів.

Металеві труби та гнучкі металеві рукави повинні бути заземлені. Заземлення повинно відповідати вимогам ДНАОП 0.00-1.21-98 "Правила безпечної

експлуатації електроустановок споживачів". Для підключення переносної електроапаратури застосовують гнучкі проводи в надійній ізоляції.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони. Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт) [21]. Параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях заводу наведено в таблиці 4.1,

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці технологічного персоналу передбачається [22]: в холодну пору року використання калорифера; в літню пору застосування вентиляторів обдуву; провітрювання приміщення.

Таблиця 4.1 – Нормування параметрів мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °C	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	Iб	22-28	55 при 28°C	0,1-0,2
Холодний	Iб	21-25	75 при 25°C	Не більше 0,1

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК [21] наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони оператора лінії

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0.5	0.15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено [22]: провітрювання приміщення; цілісність вікон для перешкоджання попадання пилу в приміщення під час роботи лінії; встановлення пиловловлюючих засобів.

4.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт – середньої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [23] розряд зорової роботи IV, підрозряд «г».

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра.

Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

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

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості. При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

4.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки» [24] (таблиця 4.4).

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

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі;
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

Таблиця 4.4 – Рівень звукового тиску

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

4.4.1 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [26, 27]. Пожежо - вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [28], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [29].

Основні виробничі приміщення аЕС за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В з зонами П-Іа в приміщеннях, де є тверді горючі речовини чи матеріали (оболонки електрообладнання).

Будівля, в якій розташовано приміщення машзали, характеризується III ступенем вогнестійкості.

До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку.

Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [30] наведено в таблиці 5.

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				колони	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	перекрыття між поверхів (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, настли, прогони	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Таблиця 4.5 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Межі вогнестійкості самонесучих стін, які враховуються в розрахунках жорсткості та стійкості будинку, приймають, як для несучих стін. Будівельні конструкції класифікують за вогнестійкістю та здатністю поширювати вогонь. Показником вогнестійкості є межа вогнестійкості конструкції, що визначається часом (у хвилинах) від початку вогневого випробування за стандартним температурним режимом до настання одного з граничних станів конструкції:

- втрати несучої спроможності (R);
- втрати цілісності (E);
- втрати тепло та ізолювальної спроможності (I).

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [30] наведено в таблиці 6.

Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських, сільськогосподарських будинків і споруд слід приймати за таблицею 7 (знаменник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 7. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до

виробничих, складських будинків, сільськогосподарських будівель і споруд потрібно приймати за таблицею 4.7 (знаменник) [30].

Таблиця 4.6 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	2	REI 60	2	1

Таблиця 4.7 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
III	6/9	8/9	10/12

На території АЕС встановлено 35 вогнегасників ВВП-5 (ВП-5) та 42 ВВП-9 [31].

У випадку виникнення пожежі робітники повинні: прийняти всі заходи по ліквідації вогню; місце, яке загорілось слід гасити вогнегасниками; при загоранні електропроводів слід відключити лінію, а ізоляцію електропроводів необхідно гасити тільки порошковими вогнегасниками ВП-5 або піском.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасних методів діагностування синхронних турбогенераторів свідчить про те, що до таких методів відносяться методи фірми Siemens, а саме: контроль вібрації обмоток статора, контроль часткових розрядів, контроль між виткових замкнень обмотки ротора, контроль напруги на валу та струму в шині заземлення генератора.

2. На прикладах методів теорії ідентифікації, як методи Вольтерра, теорії хаосу, теорії кінцевих елементів доведена їх застосування в задачах виявлення та ідентифікації пошкоджень синхронних генераторів, на ранній стадії їх розвитку.

3. Шляхом застосування математичної моделі Вольтерра для аналізу струмів синхронного генератора під час замкнень в роторі, доведено, що замикання в обмотці ротора СГ, виявляються шляхом контролю відсоткової різниці між нелінійною напругою нульової послідовності статора і струмом нульової послідовності в нормальних або аномальних режимах експлуатації.

4. Просте моделювання побудоване за допомогою теорії хаосу для отримання неперіодичних результатів, і коли сигнал використовується в хаотичній системі, яка призводить до сильної зміни сигналу відповідно до часу. Виправдано застосовувати теорію хаосу для синхронного генератора більшої потужності, наприклад 1000 МВт, та застосовувати інші додаткові діагностичні параметри.

5. Побудовано дерево несправностей ТГ, яке дозволяє покращити якість визначення дефектів ТВВ-1000-2УЗ

6. Розроблено математичну модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ та її параметри

7. Отримав подальший розвиток метод визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ, який шляхом використання нейро-нечіткого моделювання дозволяє визначати технічний стан ТГ в умовах неповноти поточних значень діагностичних параметрів

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. "Condition monitoring, overhauling, electromechanical repair and rewinding of high voltage rotating machines.". Available: <https://www.electromotores.com/predictive/condition-monitoring>. [Accessed: 23- Jul-2019].
2. L. Wang, Y. Li and J. Li, "Diagnosis of inter-turn short circuit of synchronous generator rotor winding based on Volterra kernel identification." *Energies* 2018, 11, 2524; doi:10.3390/en11102524 . Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2524/pdf>. [Accessed: 24-Jul-2019].
3. S. D. Lu , M. H. Wang and S. K. Chen, "Application of chaos and extension theory to fault diagnosis of three-phase synchronous generators." *Special Collection: Artificial Intelligence Paradigms* . Available: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1461348419829668> [Accessed: 24-Jul-2019].
4. "Power generator protection and control." 2019. Available: <https://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation/numerical-relays/power-generator-protection-and-control> [Accessed: 05- Jul-2019].
5. G. J. Paoletti, A. Golubev, "Partial discharge theory and technologies related to medium-voltage electrical equipment" *IEEE transactions on industry applications*, Vol. 37, №1, 2001, pp.90-103. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp /stamp.jsp?arnumber=903131> [Accessed: 24-Jul-2019].
6. V. I. Polishchuk, K.V. Baratova, "Effective mathematical model of synchronous machine with turn-to-turn short-circuit of rotor winding for adaptive methods of identification" in [Proceedings] 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) in [Proceedings] [Online].
7. C. P. Salomon, W.C. Santana, E. L. Bonaldi, L. E. L. de Oliveira, J. G. B. da Silva, G. Lambert-Torres, Fellow, and oth. "A system for turbogenerator predictive maintenance based on electrical signature analysis". Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7151244> [Accessed: 24-Jul-2019].

8. G. Stojcic, K.Pašanbegovic, T. M. Wolbank, "Detecting faults in doubly fed induction generator by rotor side transient current measurement".. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6748932> [Accessed: 24-Jul-2019].
9. M. Samonig, P.Nussbaumer, G. Joksimovi, M. Vašak, N. Peri, T. M. Wolbank, "Monitoring of rotor bar faults in induction generators with full-size inverter". Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6020367> [Accessed: 24-Jul-2019].
10. C. López-Torres, J.-R. Riba, A. Garcia, L. Romeral, "Detection of eccentricity faults in five-phase ferrite-PM assisted synchronous reluctance machines". Appl. Sci. 2017, 7, 565; doi:10.3390/app7060565. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/111545/applsci-07-00565-1.pdf> [Accessed: 24-Jul-2019].
11. Fault Tree Analysis. . Available: <https://www.weibull.com/basics/fault-tree/index.htm> [Accessed: 24-Jul-2019].
12. International standart. Fault tree analysis. IEC 61025 Edition 2.0 2006-12
13. M. A. Lundteigen, M. Rausand, Fault Tree Analysis (FTA).
14. Power engineers will check the Dukovany steam generator using a special manipulator. Available: <https://www.cez.cz/en/cez-group/media/press-releases/6998.htm> [Accessed: 11-Aug-2019].
15. Turbogenerators of the TVF series. Group specifications for overhaul. Norms and requirements. standard of organization ni invel, 2019. Available: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/a1b/4293808324.pdf>
16. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
17. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

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

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

20. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

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

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

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

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

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

26. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

27. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

28. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.

29. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.

30. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні

вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

31. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ
ЗАПОЗИЧЕНЬНазва роботи: Методи та засоби діагностування турбогенераторів ТВВ-1000Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота
(БДР, МКР)Підрозділ кафедра електричних станій та систем, факультет електроенергетики та
електромеханіки

(кафедра, факультет)

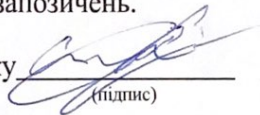
Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 82% Схожість 18%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

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

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)Вишневецький С.Я.

(прізвище, ініціали)

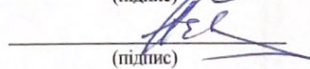
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)Буток К.А.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)Рубаненко О.Є.

(прізвище, ініціали)

```

graph TD
    Root[Пошкодження генератора] --> Stator[Статор]
    Root --> Rotor[Ротор]
    Root --> Exciter[Збуджувач]
    Root --> Comm[Щітковий контактний апарат]
    Root --> Bearings[Підшипники]
    Root --> Cooling[Система охолодження]

    Stator --> StatorCore[Осердя статора]
    Stator --> StatorWind[Обмотки]
    StatorCore --> StatorCoreFault1((Пошкодження з'єднань))
    StatorCore --> StatorCoreFault2((Пошкодження зовнішніх пакетів статора))
    StatorWind --> StatorWindFault1((Пошкодження з'єднань))
    StatorWind --> StatorWindFault2((Пошкодження кінців стрижнів))
    StatorWind --> StatorWindFault3((Пошкодження ізоляції))
    StatorWindFault1 --> StatorWindFault1Sub1((Пошкодження гумових ущільнювачів))
    StatorWindFault1 --> StatorWindFault1Sub2((Низьке значення перехідного опору контрольних з'єднань))
    StatorWindFault2 --> StatorWindFault2Sub1((Несправність ізоляції сталевих затискачів (Доступно для вимірювання)))
    StatorWindFault2 --> StatorWindFault2Sub2((Повітряний зазор між статором і ротором в діаметрально протилежних точках не відповідає нормам))
    StatorWindFault2 --> StatorWindFault2Sub3((Повітряний зазор між полюсом і арматурою t в діаметрально протилежних точках не відповідає нормам))

    Rotor --> RotorWind[Обмотки]
    Rotor --> RotorBars[Стрижні]
    RotorWind --> RotorWindFault1((Пошкодження слоїв))
    RotorWind --> RotorWindFault2((Несправність бандажних кілець))
    RotorWind --> RotorWindFault3((Пошкодження ізоляції))
    RotorBars --> RotorBarsFault1((Пошкодження кінців обмоток))
    RotorBars --> RotorBarsFault2((Пошкодження фронтальних частин))
    RotorBars --> RotorBarsFault3((Висока температура газу з ковпачків стрижнів))
    RotorBars --> RotorBarsFault4((Підвищення температури міді))

    Exciter --> ExciterFault1((Пошкодження неистора))
    Exciter --> ExciterFault2((Пошкодження тиристора))
    Exciter --> ExciterFault3((Пошкодження реостата))
    Exciter --> ExciterFault4((Пошкодження щіток))
    Exciter --> ExciterFault5((Пошкодження бандажних кілець))
    Exciter --> ExciterFault6((КЗ обмоток демпфування))

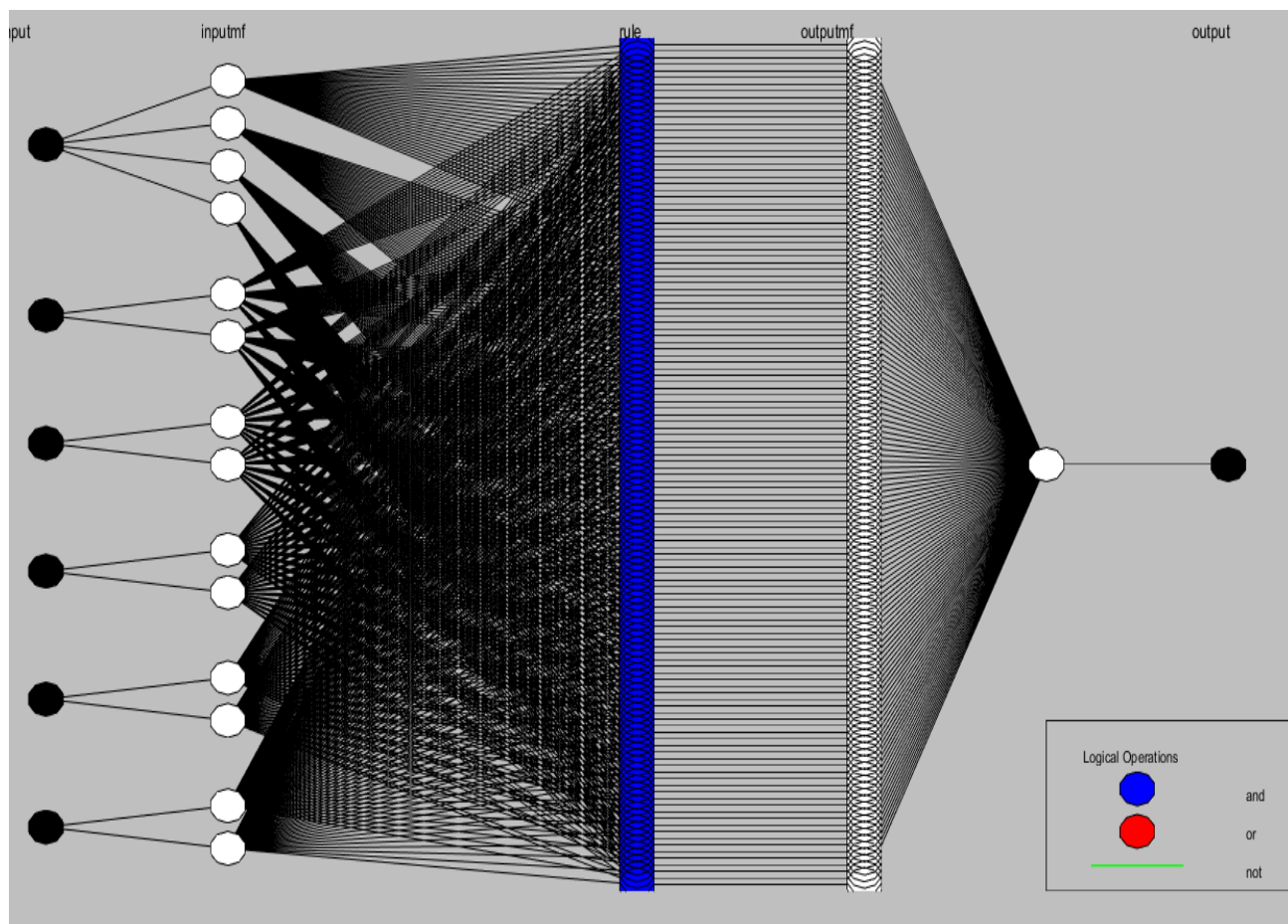
    Comm --> CommFault1((Кільця ковзання))
    Comm --> CommFault2((Щітки))
    CommFault2 --> CommFault2Sub1((Високий рівень вібрації))

    Bearings --> BearingsFault1((Пошкодження ізоляції підшипників вала з обох сторін))
    Bearings --> BearingsFault2((Пошкодження ущільнюючого підшипника))
    BearingsFault1 --> BearingsFault1Sub1((Підвищення температури підшипника))
    BearingsFault2 --> BearingsFault2Sub1((Тиск(перепаду)оливи-водно не відповідає (0,75-0,85кг/м3)))
    BearingsFault2 --> BearingsFault2Sub2((Надмірна наявність водно в картерах ущільнюючих підшипників (не більше 1-2%)))

    Cooling --> CoolingFault1((Трубки сист.охолодження в лобових частинах))
    Cooling --> CoolingFault2((Лопаті вентилятора))
    CoolingFault1 --> CoolingFault1Sub1((Витік водно на добу))
    CoolingFault1 --> CoolingFault1Sub2((Недостатня щільність дренажних клапанів))
    CoolingFault2 --> CoolingFault2Sub1((Велика швидкість))
    CoolingFault2 --> CoolingFault2Sub2((Відкриття помпових клапанів в момент їх проходження))
  
```

Додаток В

Структура нейронної мережі ТГ без використання методу субкластеризації.



ДОДАТОК Г
ІЛЮСТРАЦІЙНА ЧАСТИНА

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ
ТВВ – 1000

Студент

(підпис)

Буток К.А.

Керівник роботи

(підпис)

Рубаненко О.Є.



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

1

Методи та засоби діагностування турбогенераторів ТВВ-1000

Виконав студент групи 2ЕЕ-206
Керівник: к.т.н. проф., професор каф. ЕСС

Буток Костянтин Андрійович
Рубаненко Олександр Євгенійович

2024 р.

Актуальність

2

Актуальність теми. Актуальність роботи зумовлена пошкоджуваністю турбогенераторів під час експлуатації а також зумовлена вдосконалення існуючих методів діагностування ТГ.

Отже актуальність роботи зумовлена необхідністю використання ефективних методів діагностування генераторів ТВВ-1000, а саме, турбогенераторів, які відіграють ключову роль у виробленні електроенергії в Україні.



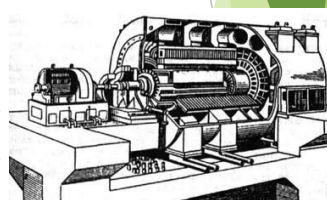
Мета та задачі дослідження

3

Мета роботи. Покращення якості експлуатації турбогенераторів ТВВ – 1000 шляхом вдосконалення методів та засобів діагностування ТГ ТВВ – 1000.

Відповідно де мети в роботі розглядаються наступні задачі:

- проаналізувати сучасні методи діагностування турбогенераторів;
- довести на прикладах методи теорії ідентифікації;
- довести, що замикання в обмотці ротора СГ, виявляються шляхом контролю відсоткової різниці між нелінійною напругою нульової послідовності статора в струмом нульової послідовності;
- довести те, що просте моделювання побудоване за допомогою теорії хаосу може бути використане для отримання неперіодичних результатів діагностування;
- побудувати дерево несправностей ТГ ТВВ-1000-2УЗ,
- розробити математичну модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ та її параметри;
- розвинути метод визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ, який шляхом використання нейро-нечіткого моделювання дозволить визначати технічний стан ТГ в умовах неповноти поточних значень діагностичних параметрів.

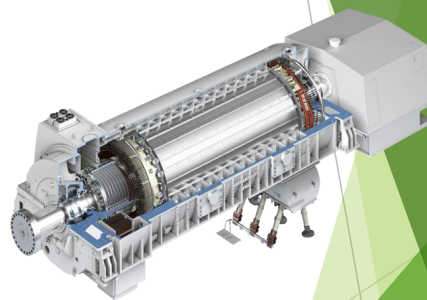


Об'єкт, предмет та методи дослідження

Об'єкт дослідження. Процеси зміни технічного стану ТГ ТВВ-1000-2У3.

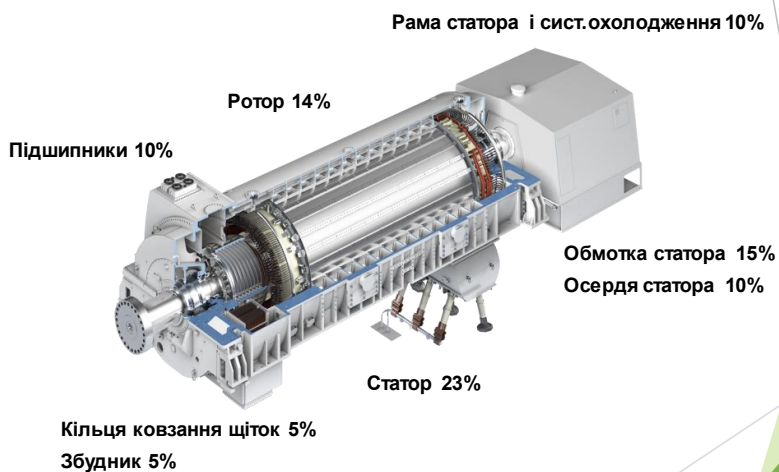
Предмет дослідження. Дефекти та пошкодження конструкції турбогенератора типу ТВВ-1000-2У3 та методи діагностування ТГ.

Методи дослідження. Для визначення дефектів синхронних генераторів використовуються теорія ідентифікації, теорія хаосу і теорія кінцевих елементів, а методи нейро-нечіткого моделювання використовуються для визначення коефіцієнту залишкового ресурсу СГ.



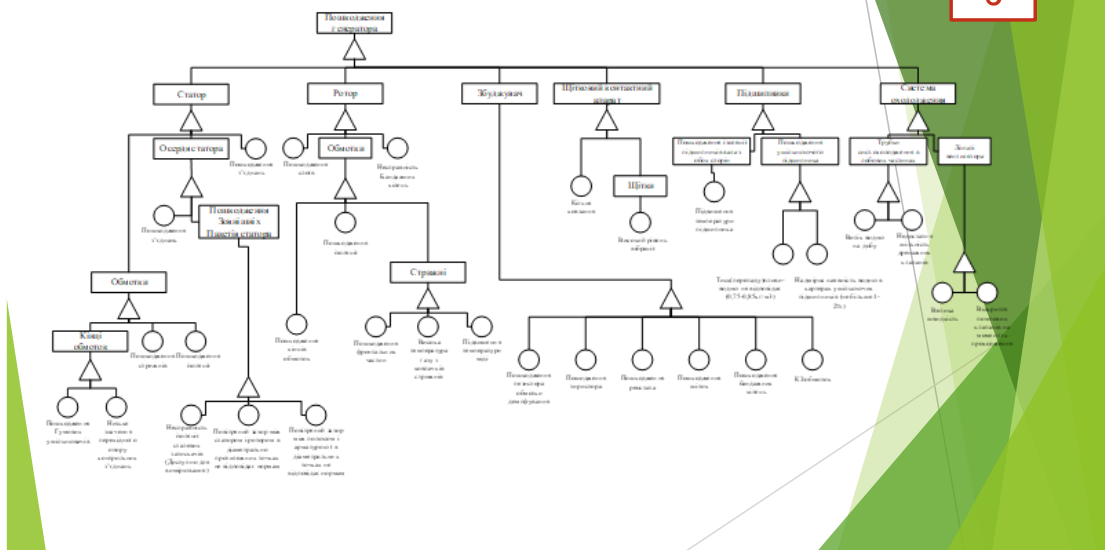
4

Будова ТГ та його пошкоджуваність елементів



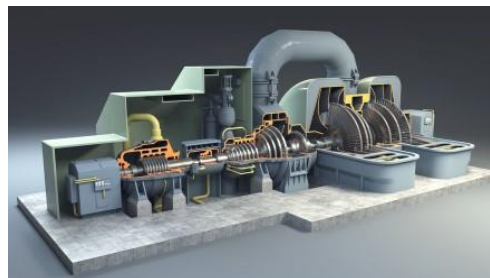
5

Дерево пошкоджень турбогенератора



Сучасні методи контролю технічного стану турбогенераторів

- ▶ Контроль вібрації обмоток статора
- ▶ Контроль часткових розрядів
- ▶ Контроль міжвиткових замкнень обмотки ротора
- ▶ Контроль напруги на валу ротора, та струму в шині заземлення ТГ
- ▶ Моніторинг та виявлення несправностей ТГ (TM Wolbank)
- ▶ Прогнозування технічного стану генератора



Етапи побудови математичної моделі

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

Формування таблиці початкових даних

9

№	Вузли генератора	Попереджувальність ТГ типу ТВВ-1000-2УЗ, в.о	Позначення
1.	Підшипники ротора	0,4	K ₁
1.1	Ізоляція підшипників валу з двох сторін	0,011	R ₁
1.2	Заземлення валу турбінного агрегату	0,35	R ₂
1.3	Ущільнення підшипників ротора	0,012	T ₁
2.	Система збудження	0,05	K ₂
2.1	Тиристори системи збудження	0,01	T ₂
2.2	Розрядник збудника	0,04	T ₃
2.3	Ізоляція ротора	0	R ₃
3.	Щітки ковзання	0,04	K ₃
4.	Обмотка статора	0,14	K ₄
4.1	Магнітопровід статора	0,01	T ₄
4.2	Лобові частини обмотки статора	0,02	T ₅
4.3	Елементні провідники в пазах статора	0	T ₆
4.4	Ізоляція статора	0	R ₃
4.5	Пакети сталі статора	0	T ₇
4.6	Інші попередження магнітопроводу статора	0,01	V ₁
4.7	Кінці обмоток та контакти	0,2	T ₈

$$k_{i1} = \frac{|x_{i1,гран} - x_{i1,ном}|}{|x_{i1,гран} - x_{i1,поч}|}$$

де $x_{i1,гран}$ – граничне нормативне значення i_1 -го діагностичного параметра, $x_{i1,ном}$ – значення i_1 -го діагностичного параметра на момент контролю, $x_{i1,поч}$ – початкове значення i_1 -го діагностичного параметра (на момент введення в експлуатацію нового обладнання або після ремонту), i_1 – діагностичний параметр.

Таблиця даних для моделювання

10

Так, для ТГ типу ТВВ-1000-2УЗ потужністю 1000 МВт опір ізоляції обмотки статора R_3 після ремонту дорівнював 1000 МОм, а на момент контролю дорівнював 600 МОм, граничне значення цього параметра – 0,5 МОм. Тому коефіцієнт залишкового ресурсу k_{R3} за діагностичним параметром R_3 визначається за виразом (3.2):

$$k_{R3} = 1 - \left| \frac{1000-600}{1000-0,5} \right| = 0,4 (\text{в.о.}).$$

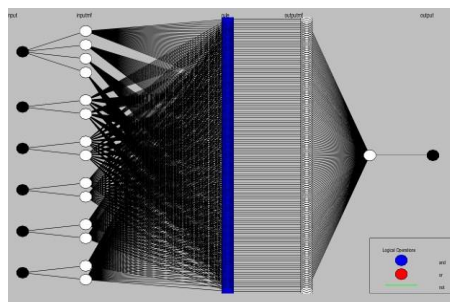
Для послідовної частини схеми коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом (3.3):

$$K_{pec} = \prod_{\tau=1}^v K_{\tau}^{p_{\tau}},$$

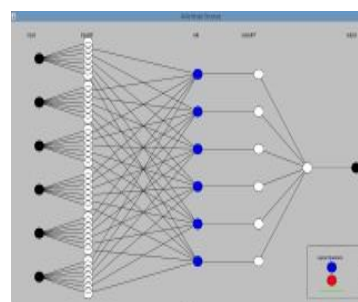
K_{11} в.о.	K_{21} в.о.	K_{31} в.о.	K_{41} в.о.	K_{51} в.о.	K_{61} в.о.	Коефіцієнт залишкового ресурсу ТГ
0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	0
1	0	1	1	1	1	0
...	...	...	...	...	...	...
0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,94
1	1	1	1	1	0,07	0,68
1	1	1	1	1	0,07	0,71
1	1	1	1	1	1	0,2
1	1	1	1	1	1	0,27
1	1	1	1	1	1	0,93
1	1	1	1	1	1	0,95
1	1	1	1	1	1	0,95
...	...	...	...	...	...	...
0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,97
0,6	0,5	0,8	0,4	0,7	0,5	0,62
0,2	0,5	0,3	0,4	0,7	0,5	0,41
0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,7	0,46

Структурна модель та нейро - мережі

11



Структура нейро - мережі



Гаусова функція незалежності

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

Висновки (Продовження)

15

4. Просте моделювання побудоване за допомогою теорії хаосу для отримання неперіодичних результатів, і коли сигнал використовується в хаотичній системі, яка призводить до сильної зміни сигналу відповідно до часу. Виправдано застосовувати теорію хаосу для синхронного генератора більшої потужності, наприклад 1000 МВт, та застосовувати інші додаткові діагностичні параметри.

5. Побудовано дерево несправностей ТГ, яке дозволяє покращити якість визначення дефектів ТВВ-1000-2УЗ

6. Розроблено математичну модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ та її параметри

7. Отримав подальший розвиток метод визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ТГ, який шляхом використання нейро-нечіткого моделювання дозволяє визначати технічний стан ТГ в умовах неповноти поточних значень діагностичних параметрів

16

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ