

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

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

«_____» _____ 2020 р.

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

**ДІАГНОСТУВАННЯ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ
ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ**

08-13.МКР.017.00.124 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу ОППП магістр,
групи ЕСМ-18м
галузь знань 14 «Електрична інженерія»
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
освітня програма «Електричні системи і
мережі»
Яременко О.О. _____

Керівник: к.т.н., проф., доцент каф. ЕСС
Рубаненко О.Є. _____
«_____» _____ 2020 р.

Рецензент: _____
«_____» _____ 2020 р.

Вінниця – 2020 року

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

«_____» _____ 202_ р.

З А В Д А Н Н Я

на магістерську кваліфікаційну роботу на здобуття кваліфікації магістра зі спеціальності: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.
Освітньо-професійна програма – Електричні системи і мережі

(шифр – назва спеціальності)

Магістр групи ЕСМ-18м Яременко Олег Олександрович
(назва групи) (прізвище, ім'я і по батькові)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Діагностування потужних електричних двигунів електричних станцій»

Початкові дані: потужні (1,8 МВт) електричні двигуни W Line виготовлені на заводі в БЕВЕРАТЕ ді Брив - Лекко (Італія); двигуни ДВДА-260/99-20-24ЕЗ, або ДВДА-200-35/104-20-24УХЛ1 напругою 6 кВ, частотою 50 Гц потужністю 2 МВт для циркуляційних насосів та електродвигуни АВ-8000/6000УЗ для приводу пускорезервних живильних пристроїв котельних агрегатів блоків потужністю 300 МВт теплових електричних станцій.

Система автоматизованої інтелектуальної діагностики САІД-МК для діагностування електричних двигунів, що використовують теорію нейронних мереж.

Короткий зміст частин магістерської кваліфікаційної роботи:

1. Графічна: слайди, які відображають основні результати та зміст розрахунково-пояснювальної записки;
2. Текстова (пояснювальна записка): Вступ; 1 Аналіз особливостей експлуатації потужних двигунів електричних станцій ; 2 Дослідження причин пошкодження потужних двигунів електричних станцій; 3 Визначення загального залишкового ресурсу електричного двигуна; 4 Методи та засоби діагностування електричних двигунів; 5. Техніко-економічний розділ; 6. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Висновки; Перелік джерел посилання; Додатки

3. Консультанти з окремих розділів магістерської кваліфікаційної роботи:

Науковий керівник

(підпис)

канд. техн. наук., проф., доцент кафедри ЕСС
наук. ступінь, вчене звання (посада)

“ ____ ” _____ 2020 р.

О. Є. Рубаненко

Економічна частина

(підпис)

канд. техн. наук. доц., доцент кафедри ЕСС
наук. ступінь, вчене звання (посада)

“ ____ ” _____ 2020 р.

В. В. Нетребський

(ініціали та прізвище)

Охорона праці та безпека
в надзвичайних ситуаціях

(підпис)

д-р. техн. наук. доц., професор кафедри ЕСС
наук. ступінь, вчене звання (посада)

“ ____ ” _____ 2020 р.

Є. А. Бондаренко

(ініціали та прізвище)

Дата попереднього захисту роботи “ ____ ” _____ 2020 р.

Рецензент

(підпис)

(наук. ступінь, вчене звання , посада)

“ ____ ” _____ 2020 р.

(ініціали та прізвище)

Завдання видав

(підпис)

канд. техн. наук. проф., доцент кафедри ЕСС
наук. ступінь, вчене звання (посада)

“ ____ ” _____ 2020 р.

О. Є. Рубаненко

(ініціали та прізвище)

Завдання отримав магістрант

(підпис)

О. О. Яременко

(ініціали та прізвище)

“ ____ ” _____ 2020 р.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	5
ANNOTATION	6
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	7
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОТУЖНИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ	11
1.1 Призначення та конструктивні особливості живильних насосів	11
1.2 Загальні відомості про електричні двигуни живильних насосів	14
1.2.1 Допустимі режими роботи електричних двигунів.....	17
1.2.2.Випробування на наргів електродвигуна	21
1.2.3 Підготовка до запуску електродвигуна	22
1.2.4 Обслуговування електродвигуна під час роботи	25
Висновки до першого розділу	27
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПОШКОДЖЕННЯ ПОТУЖНИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ	28
2.1 Аналіз причин пошкоджуваності обмотки статора двигуна.....	28
2.1.1 Пошкодження герметичності системи охолодження обмотки ротора	30
2.1.2 Виявлення та усунення дефектів бандажних кілець ротора	31
2.2 Методи підвищення надійності електричних двигунів.....	32
2.3 Запобігання зволоженню лобової частини обмотки статора	39
2.4 Електричні випробування та вимірювання	40
Висновки до другого розділу.....	43
3 ВИЗНАЧЕННЯ ЗАГАЛЬНОГО ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА.....	44
3.1 Аналіз пошкоджуваності та особливості експлуатації двигунів	44
3.2 Нейро-нечітка модель коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД.....	50
Висновки до третього розділу	77

4 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ	78
4.1. Вимоги до діагностування електричних двигунів	78
4.2 Діагностика асинхронних двигунів на етапах виробництва, експлуатації та ремонту	80
4.3 Аналіз тестової та функціональної діагностики асинхронних двигунів	81
4.4 Методи діагностики електричних двигунів	83
4.5 Система автоматизованої функціональної діагностики	90
Висновки до четвертого розділу	97
5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ	98
5.1 Техніко-економічне обґрунтування	98
5.2 Визначення капіталовкладень	99
Висновки до п'ятого розділу	102
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	103
6.1 Правила розрахунку захисного заземлення	103
6.1.1 Загальні відомості	103
6.1.2 Послідовність розрахунку	104
6.2 Розрахунок штучного заземлювального пристрою	109
6.3 Визначення області працездатності електричних двигунів в умовах дії загрозливих чинників НС	112
6.3.1 Дослідження області працездатності потужних електричних двигунів в умовах дії на них іонізаційних та електромагнітних випромінювань	115
6.3.2 Дослідження області працездатності двигунів в умовах дії електромагнітного імпульсу	117
Висновки до шостого розділу	119
ВИСНОВКИ	120
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	121
ДОДАТОК А (Технічне завдання)	125
ДОДАТОК Б (Графічний матеріал)	130

АНОТАЦІЯ

Яременко О. О. «Діагностування потужних електричних двигунів електричних станцій». Магістерська кваліфікаційна робота – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 124 с., табл.: 20, рис.: 38, бібліогр.: 37.

У магістерській кваліфікаційній роботі досліджено конструкцію та особливості експлуатації потужних двигунів власних потреб електричних станцій, проаналізовано основні причини пошкоджень двигунів і методи та засоби їх діагностики.

В третьому розділі розроблено математичну та комп'ютерну моделі по визначенню коефіцієнта залишкового ресурсу електричного двигуна, що можуть бути застосовані під час поточного визначення часу виведення двигуна з експлуатації для ремонту або для утилізації.

В економічній частині магістерської кваліфікаційної роботи проведено розрахунок терміну окупності впровадження системи автоматизованої функціональної діагностики двигунів.

Ключові слова: електричний двигун, методи діагностування, пошкодження, залишковий ресурс двигуна, нейро-нечітке моделювання.

ANNOTATION

Yaremenko O.O. "Diagnosis of powerful electric motors of power plants". Master's qualification work - Vinnytsia: VNTU, 2020. - 124 p.p., Table: 20, fig.: 38, bibliography: 36.

In the master's qualification work the design and features of operation of powerful engines of own needs of power plants are investigated, the basic reasons of damages of engines and methods and means of their diagnostics are analyzed.

The third section develops mathematical and computer models for determining the coefficient of residual life of an electric motor, which can be used during the current determination of the time of decommissioning of the motor for repair or disposal.

In the economic part of the master's qualification work, the payback period of the introduction of the system of automated functional diagnostics of engines is calculated.

Key words: electric motor, diagnostic methods, damage, residual motor life, neuro-fuzzy modeling.

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АВР	–	Автоматичне введення резерву
АЕС	–	Атомна електростанція
ВП	–	Власні потреби
ЕД	–	Електричний двигун
ЕЕС	–	Електроенергетична система
ЖЕН	–	Живильний електронасос
ЖТН	–	Живлячий турбонасос
КЗ	–	Коротке замикання
ПУЕ	–	Правила улаштування електроустановок
САД	–	Система автоматизованої функціональної діагностики
ТЕС	–	Теплова електростанція

ВСТУП

Актуальність теми. Вітчизняний та зарубіжний досвід показує, що впровадження засобів діагностування є одним з найважливіших факторів підвищення економічної ефективності використання обладнання в енергетиці [1].

Призначення діагностики – виявлення і попередження відмов та несправностей, підтримання експлуатаційних показників у встановлених межах, прогнозування стану з метою повного використання ресурсу обладнання.

Забезпечення стабільної роботи електроустановок власних потреб (ВП) електростанції є пріоритетним завданням підтримки електропостачання основних споживачів електричної енергії, так і самої електростанції (котли, турбіни, генератори). Так як механізми ВП електростанцій відносяться до приймачів I категорії по надійності електропостачання, то слід приділити увагу швидкому відновленню роботи цих приймачів в післяаварійні режими.

Надійна робота електродвигунів на електростанціях визначає надійність роботи всього енергоблоку в цілому. Експлуатаційна надійність електродвигунів визначається конструкцією і якістю виготовлення, умовами експлуатації, періодичністю та якістю ремонту. Характер пошкоджень і причину відмов електродвигунів в процесі експлуатації визначають ступінь надійності основних його вузлів: обмотки статора і ротора, підшипників і ін. Використовуючи дані про відмови електродвигунів, визначають найменш надійні елементи конструкції і розробляють заходи щодо підвищення їх надійності та довговічності, збільшення міжремонтного періоду і т. п., а також планують терміни технічного обслуговування і ремонту, періодичність та обсяг випробувань (електричних, гідравлічних, теплових, механічних), номенклатуру запасних частин, витрата електротехнічних матеріалів для ремонту і ін.

Так, зокрема, за даними експлуатуємого персоналу, можна зробити висновок, що електродвигуни типу АВ-8000 / 6000УЗ мають низьку

експлуатаційну надійність. За даними літературних джерел середнє значення параметра потоку відмов електричних двигунів на ТЕС становить 0,02 1/рік, тобто з кожних 100 встановлених електродвигунів за рік пошкоджується біля двох.

Висока пошкоджувальність асинхронних двигунів стає причиною значних збитків. На частку електродвигунів доводиться 25-30% загальної кількості пошкоджень електроустаткування, а збиток від пошкоджень електродвигунів в Україні становить 1-1,5 млрд грн на рік. Своєчасне виявлення несправностей дозволяє скоротити витрати на обслуговування і втрати від позапланових простоїв, підвищити ефективність роботи двигунів і виробничих механізмів.

Близько 35% аварій електричних двигунів пов'язано з пошкодженням обмотки статора. Висока пошкоджувальність обмотки пояснюється важкими умовами праці та недостатньою стабільністю електричних властивостей ізоляційних матеріалів. В результаті пошкодження ізоляції може статися замикання між обмоткою і магнітопроводом, замикання між витками котушок або між фазними обмотками.

Таким чином, завдання розробки засобів діагностування електричних двигунів та тема магістерської кваліфікаційної роботи є актуальними.

Мета роботи полягає у вдосконаленні методів визначення технічного стану потужних двигунів електричних станцій шляхом аналізу їх залишкового ресурсу.

Для досягнення мети магістерської кваліфікаційної роботи поставлені та розв'язані наступні наукові задачі досліджень:

- аналіз особливостей експлуатації та конструкції потужних електричних двигунів;
- дослідження причини пошкодження потужних двигунів, що експлуатуються на електричних станціях;
- розробка математичної та комп'ютерної моделей визначення коефіцієнта залишкового ресурсу електричного двигуна;

- дослідження методів і засобів контролю діагностичних параметрів ЕД, випробовувань та діагностування ЕД;
- розрахунок економічних показників впровадження мікропроцесорної системи діагностування електричних двигунів;
- дослідження заходів з безпечної експлуатації пристроїв діагностування електричних двигунів.

Предметом дослідження є методи та засоби діагностування технічного стану електричних двигунів.

Об'єктом дослідження є процеси погіршення технічного стану електричних двигунів електричних станцій.

Методи дослідження. Для аналізу конструктивних особливостей електричних двигунів застосовувались методи теорії електричних машин, для розробки математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу застосовувались методи теорії нечітких множин та теорії нейронних мереж.

Наукова новизна одержаних результатів:

– отримав подальший розвиток метод розрахунку коефіцієнта залишкового ресурсу електричного двигуна, який шляхом використання методів нейро-нечіткого моделювання дозволяє визначити поточний технічний стан двигуна в умовах неповноти даних на момент визначення його стану.

Практичне значення одержаних результатів в роботі полягає в наведеному прикладі методики розрахунку коефіцієнта залишкового ресурсу електродвигуна та визначення його стану, яка може бути використана під час діагностування інших електричних двигунів.

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

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОТУЖНИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

1.1 Призначення та конструктивні особливості живильних насосів

Живильні насоси – це спеціальні насоси, які призначаються для живлення котлів електростанцій та промислових парових генераторів водою. Живильні насоси часто використовуються для подачі хімічно чистої води в парогенератори енергоблоків АЕС, на котельнях, на теплоелектростанціях, на промислових підприємствах. На рис .1.1 показано показано живильний насос.



Рисунок 1.1 – Живильний насос

Живильні насоси бувають поршневими і відцентровими з електричним і паровим приводами, а також струминними - інжекторами. В опалювальних установках використовують поршневі насоси ПВД і ПДГ для живлення котлів водою при температурі до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ з робочим тиском $0,4\text{-}2,0\text{ МПа}$ і продуктивністю $2\text{-}6\text{ т / год}$. Однак через недоліки, серед яких низька економічність, висока витрата пари, нерівномірність подачі води, чутливість до

механічних домішок і забруднень, їх використовують як резервні. В якості основного застосовують відцентрові живильні насоси з електроприводом. До їх переваг відносять: економічність і надійність роботи, зручність регулювання продуктивності, простота обслуговування і ін. Інжектори (пазоструйні пристрої) використовують для живлення водою дрібних опалювальних котелень.

Для їх надійної роботи температура живильної води повинна бути не вище 40 С° і висота подачі - не більше 2 метрів. Витрата пари інжекторами становить 7 - 9% кількості води, що подається. Живильний насос - важливий елемент котельної установки, тому що навіть короткочасне припинення подачі води може призвести до аварії котла. Внаслідок цього живильний насос, як і інші насоси теплової схеми, обладнують пристроєм автоматичного включення резерву (АВР). Вимоги до продуктивності, числа, типу живильних пристроїв та їх приводів для виробничо-опалювальних і енергетичних котельних установок регламентовані правилами технічної експлуатації електричних станцій [2].

Для виготовлення насосів використовують наступні матеріали:

- корпус, кришки та секції – поковки з вуглецевих сталей;
- деталі проточної частини – виливки і поковки із хромованої сталі 20Х13Л і 30Х13;
- деталі щільних ущільнень – корозійностійкі сплави;
- вал – сортовий прокат з конструкційної легованої сталі 40Х.

В комплектацію живильного насосу входять: насос в зібраному вигляді з допоміжними трубопроводами в межах насоса; відповідні фланці на патрубках; приводний електродвигун; сполучна муфта; сітка захисна; дроселюючий пристрій; оливна установка (для насосних агрегатів АПЕ 250 і АПЕ 270); фундаментна рама; деталі кріплення насоса, двигуна та огорожі муфти; комплект ЗІП.

На рис. 1.2 показано конструктивні особливості живильного насосу [4].

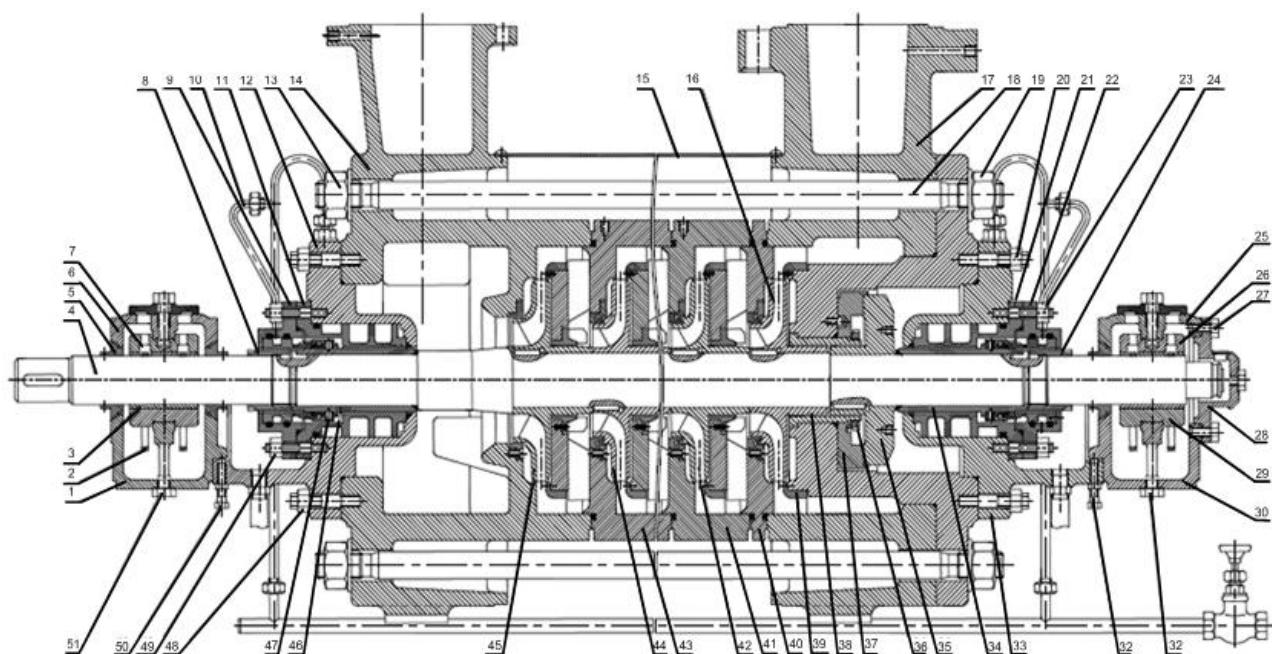


Рисунок 1.2 – Конструкція живильного насосу типу ПЕ

На рис. 1.2 показані наступні позначення: 1 – гайка, 2 – кільце оливовідбивне; 3 – нижня вкладка; 4 – вал; 5 – оливовідбивач; 6 – кришка; 7 – верхня вкладка; 8 – гайка; 9 – корпус; 10 – допоміжні трубопроводи; 11 – втулка; 12 – кільцевий ущільнювач; 13 – гайка; 14 – кришка вхідна; 15 – кожух; 16 – робоче колесо; 17 – напірна кришка; 18 – шпилька; 19 – камера; 20 – гайка; 21 – втулка; 22 – корпус; 23 – гайки; 24 – гайка; 25 – кришка; 26 – верхня вкладка; 27 – гайка; 28 – покажчик осьового зміщення; 29 – нижня вкладка; 30 – гайка; 31 – заслінка; 32 – регулювальний гвинт; 33 – кінцевий ущільнювач; 34 – втулка; 35 – диск розвантажуючий; 36 – гайка; 37 – подушка; 38 – втулка; 39 – направляючий апарат; 40 – секція; 41 – секція; 42 – робоче колесо; 43 – секція; 44 – робоче колесо; 45 – робоче колесо; 46 – втулка; 47 – гвинт; 48 – гайка; 49 – гайки; 50 – регулювальний гвинт; 51 – заслінка.

В даний час на паротурбінних блоках потужністю 800 МВт в якості живильних насосів поряд з іншими застосовуються насоси типу ПН 1500-350 і ПН 1500-350-1. Тривалий досвід експлуатації живильних насосів виявив у них ряд недоліків. Для їх усунення заводом-виробником було виконано

модернізацію насосів. Ці насоси отримали позначення ПН 1500-350-3 і ПН 1500-350-4 .

В конструкцію насосів було введено такі зміни:

- для зниження рівня вібрації і підвищення надійності насосів, співвідношення кількості лопастей робочого колеса і лопаток направляючого апарату прийняти рівним $7/12$, секції направляючого апарату виконати у вигляді нерозбірних блок-секцій, а для легкого збирання насоса ротор виконати розбірним, робочі колеса посадити на вал по перехідній посадці;
- кінцеві ущільнення виконати торцевими, використовуючи ущільнення фірми «Burgman»;
- корпуси підшипників жорстко з'єднати з корпусами кінцевих ущільнень з метою виключення резонансу системи «ротор-опори»;
- робоче колесо першого ступеня спрофілювати з розширеним входом для усунення кавітації.

1.2 Загальні відомості про електричні двигуни живильних насосів

Електродвигуни типу АВ-8000 / 6000УЗ застосовуються на теплових електричних станціях в якості приводу пускорезервних живильних пристроїв котельних агрегатів блоків потужністю 300 МВт. Безпосереднє водяне охолодження обмотки ротора і непряме охолодження водою сердечника та обмотки статора в пазовій частині привели до особливих умов експлуатації та ремонту цих електродвигунів. Тривалий досвід експлуатації електродвигунів дозволив ввести в практику ремонтів ряд заходів, спрямованих на подовження міжремонтного періоду [5].

Характеристика електродвигунів АВ-8000 600 СУЗ. Електродвигун типу АВ-8000 / 6000УЗ серії АТД (А - електродвигун, В - з водяним охолодженням, номінальна потужність 8000 кВт, номінальна напруга 6000 В), виготовлений заводом «Сибелектротяжмаш», використовується на теплових електростанціях в якості приводу живильного насоса на блоці 300 МВт .

Серед потужних електричних двигунів чинне місце займають електричні двигуни з водяним охолодженням статора, наприклад, двигуни циркуляційних насосів електричних станцій (рис. 1.3). Це двигуни ДВДА-260/99-20-24ЕЗ, або ДВДА-200-35/104-20-24УХЛ1 напругою 6000 вольт, частотою 50 Гц. Потужність до 2000 кВт. Також застосовуються ЕД типу, наприклад, ДВАН 143 – 1000/6-12У3 потужністю 1000 кВт, частотою 50 Гц, напругою 6000 В.

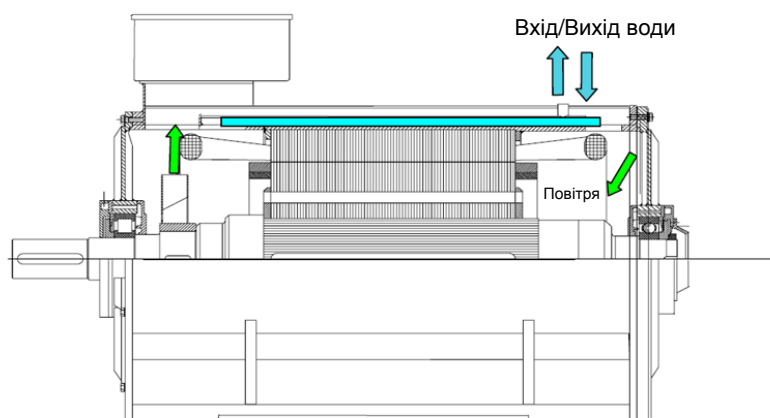


Рисунок 1.3 – Електричний двигун з водяним охолодженням

Електродвигуни підвісного виконання мають осердя статора і ротора з обмотками, щити, верхню нижню хрестовини, дві напрямні вальниці ковзання або кочення, під'ятник, розташований в оливній ванні верхньої хрестовини і фланець валу.

Система змащення замкнута: всередині ванн верхньої і нижньої хрестовин знаходиться постійний об'єм оливи з зануреними в нього оливними охолоджувачами, напрямними вальницями і під'ятником. Вальниці кочення електродвигунів заповнені консистентним мастилом.

Вентиляція здійснюється за замкненим або розімкненим циклу. Система вентиляції радіальна. Охолоджувальне повітря надходить всередину зверху та знизу електродвигуна і викидається назовні з отвори в корпусі статора. При замкнутій системі вентиляції повітря охолоджується у водяних повітроохолоджувачах.

В іншому обладнанні використовуються сучасні асинхронні трифазні двигуни W електричні двигуни з водяним охолодженням з габаритною висотою 160 - 560 мм напругою 0,4 кВ, в діапазоні потужностей від 11 до 1800 кВт. Використовувана система охолодження (IC7 A1W7) складається з первинної середовища охолодження (повітря) з теплообмінником, вбудованим в корпус двигуна, що використовують свіжу воду. Водяне охолодження являє собою ефективну систему для видалення тепла, виробленого двигуном. Ця система дозволяє значно знизити розміри і вагу ЕД. Ефективність системи водяного охолодження не залежить від швидкості обертання ротора. Водяне охолодження дозволяє також: знизити передачу тепла в приміщення установки двигуна; знизити передачу шуму; знизити вібрації, що передаються підлозі; уникати утворення пилу в приміщенні; знизити розміри машини.

Всі двигуни W Line проектуються, виготовляються, збираються і тестуються на заводі в БЕВЕРАТЕ ді Брів - Лекко - ІТАЛІЯ.

Експлуатація електродвигуна. Технічно правильна експлуатація електродвигунів оперативним персоналом, регулярне спостереження за працюючим обладнанням, знання режимів роботи і догляд за електроприводом живильних насосів є гарантією безаварійної роботи електродвигунів.

Згідно з типовою «Інструкцією по експлуатації електродвигунів в установках власних потреб електростанцій» на кожній електростанції повинна бути складена місцева виробнича інструкція з експлуатації двигунів типу АВ-8000 / 6000УЗ, що враховує конструктивні особливості двигуна.

Електродвигун повинен бути обладнаний необхідними контрольно-вимірними приладами, сигналізацією і захисними пристроями. Для контролю напруги повинен бути встановлений вольтметр. На блочному щиті управління повинен бути встановлений амперметр, який вимірює струм статора електродвигуна, на шкалі якого червоною позначкою має бути зазначено значення струму, що на 5% перевищує номінальний. Камери виводів і повітроохолоджувача повинні бути позначені номерами електродвигунів, що були присвоєні на станції, яким вони належать.

У безпосередній близькості від електродвигуна повинна бути змонтована аварійна кнопка відключення електродвигуна.

Систематично контролюють стан ізоляції обмотки статора і результати вимірювань записують у спеціальний журнал.

На електростанціях повинна бути вна явності наступна документація по електродвигунах типу АВ-8000 / 6000УЗ: паспорт електродвигуна; протокол приймально-здавальних випробувань; приймально-здавальний акт монтажу; експлуатаційні листи, в які вносять короткі відомості про проведені випробування та ремонти; приймально-здавальні технічні акти про проведені капітальні, поточні та аварійні ремонти; креслення електродвигуна і його основних деталей, збірних одиниць і запасних частин; принципові і монтажні схеми управління і релейного захисту; перелік запасних частин; технічні акти про пошкодження електродвигуна; протоколи профілактичних і післяремонтних електричних випробувань, які виконуються під час ремонту електродвигуна з частковою або повною зміною обмотки; монтажний і ремонтні формуляри; протоколи вібраційного обстеження або балансування; протоколи і акти випробувань гідравлічної щільності і гідравлічного опору системи водяного охолодження статора, ротора і повітроохолоджувача.

Якщо такі дані як: опір ізоляції обмотки статора і випробувальну напругу, зазори, вібрація, витрата і тиск води в системі охолодження ротора, статора і повітроохолоджувача – не виходять за межі допустимих норм, в експлуатаційні аркуші їх не заносять.

1.2.1 Допустимі режими роботи електричних двигунів

В установках власних потреб електростанцій виникають відхилення напруги, частоти та інших параметрів мережі живлення від рекомендованих ДСТУ. Розглянемо можливі і допустимі зміни номінальних значень і їх вплив на роботу електродвигуна [3].

При номінальному навантаженні електродвигуна допускається відхилення напруги від номінального значення в межах +10% і - 5%. При підвищенні напруги збільшуються струм намагнічування та втрати в сталі, що призводить до перегріву сердечника і обмотки статора. Робота електродвигуна при нарузі вище 110% номінальної не рекомендується. При зменшенні напруги нижче 95% номінальної зростають ковзання і втрати в роторі, а також зростає струм в статорі, викликаючи збільшення нагріву обмотки статора. Обертний момент електродвигуна пропорційний квадрату напруги, тому при значному зниженні напруги різко зменшується навантажувальна здатність і може наступити стан «перекидання» електродвигуна з можливим переходом його в режим короткого замикання. Тому при зменшенні напруги струм статора не повинен перевищувати 105% від номінального значення, що зменшує потужність двигуна на валу. В табл. 1.1 показано залежність струму статора від напруги в відсотках від номінального значення.

Таблиця 1.1 – Залежність струму статора від напруги в відсотках від номінального значення

Напруга статора, % $U_{ном}$	110	105	100	95	90	85	80
Струм в статорі, % $I_{ном}$	90	95	100	105	105	105	105

При зміні частоти в межах $(50 \pm 2,5)$ Гц електродвигун може бути навантажений до номінальної потужності. Робота електродвигуна при частоті нижче 47,5 Гц або вище 52,5 Гц – не допускається.

При одночасному відхиленні напруги і частоти від номінальних значень допускається робота електродвигуна з номінальним навантаженням, якщо сума абсолютних відсоткових значень цих відхилень не перевищує 10%.

Відповідно до ГОСТ 183-74 допускається короткочасне перевантаження по струму на 50% на протязі 1 хв для електродвигуна з безпосереднім

охолодженням обмоток. Робота електродвигуна є недопустимою при відсутності напруги на одній з фаз.

Для всіх режимів роботи при номінальній частоті обертання подвоєна амплітуда коливань не повинна перевищувати 50 мкм у всіх напрямках. Про тепловий стан електродвигуна свідчить різниця температур вхідної та вихідної охолоджуючої води, що контролюються ртутними термометрами.

В табл. 1.2 наведені допустимі значення потужності електродвигуна в відсотках від номінальної потужності при зміні температури вхідної води в електродвигун при номінальній їй витраті.

Максимальна температура обмотки статора, виміряна терморезисторами, не повинна перевищувати $+ 120^{\circ} \text{C}$. Витрата охолоджуючого конденсату через нерухомий ротор повинна бути не менше $35 \text{ м}^3 / \text{год}$ при тиску перед ротором $2 \text{ кгс} / \text{см}^2$ (196 кПа). Під час роботи електродвигуна при $n = 2960 \text{ об} / \text{хв}$ витрата охолоджуючого конденсату через ротор повинна бути $40 \text{ м}^3 / \text{год}$ при тиску на вході $4 \text{ кгс} / \text{см}^2$ (392 кПа).

Таблиця 1.2 – Залежність потужності електродвигуна від зміни температури вхідної води

Температура вхідної води, $^{\circ} \text{C}$	50	45	40	35	30 і нижче
Потужність двигуна, % $P_{\text{ном}}$	90	100	102	105	105

Максимальна температура обмотки статора, виміряна терморезисторами, не повинна перевищувати $+ 120^{\circ} \text{C}$. Витрата охолоджуючого конденсату через нерухомий ротор (при $n = 0 \text{ об} / \text{хв}$) повинна бути не менше $35 \text{ м}^3 / \text{год}$ при тиску перед ротором $2 \text{ кгс} / \text{см}^2$ (196 кПа). Під час роботи електродвигуна при $n = 2960 \text{ об} / \text{хв}$ витрата охолоджуючого конденсату через ротор повинен бути

40 м³ / год при тиску на вході 4 кгс / см² (392 кПа). Тиск конденсату на вході в статор має бути не вище 5 кгс / см² (490 кПа) при витраті не менше 5 м³ / год.

При зменшенні витрати води через ротор і статор відповідно (менше 35 і 4,5 м³ / год) повинна включатися сигналізація.

При припиненні подачі конденсату в ротор електродвигуна допускається робота його при номінальному навантаженні не більше 3 хв, а при припиненні подачі в статор – не більше 4 хв, після чого електродвигун повинен бути відключений від мережі.

При експлуатації охолоджувача повітря ТВП-108-1000 необхідно дотримуватися таких умов: не допускати в теплообмінних середовищах (воді та повітрі) хімічно активних речовин, що сприяють руйнуванню охолоджуючих трубок; подавати в охолоджувач повітря технічну воду; не допускати різких коливань температури води і повітря, що призводять до порушення нормального режиму роботи охолоджувача повітря; температурний контроль роботи охолоджувача повітря здійснюється за допомогою ртутних термометрів, встановлених на зливному і нагнітальному трубопроводах; різницю температур охолодженого повітря і води, що входить в повітроохолоджувач не повинна перевищувати + 7 ° С; різке збільшення цього перепаду свідчить про малу витрату води через охолоджувач; при запотіванні знижувати витрату води в відповідних межах; при низьких температурах охолоджуючої води можна застосовувати рециркуляцію (змішувати підігріту в повітроохолоджувачі воду з деякою кількістю холодної води, така схема водопостачання дозволяє отримати практично будь-яку температуру води і запобігає запотіванню); систематично проводити хімічний аналіз води і очищення її від шкідливих домішок; не допускати експлуатацію повітряохолоджувача з охолоджуючими трубками, незаповненими водою; випускати повітря слід через отвори з затворами, розташованими у верхній частині водяної камери; злив води з середини виконувати через отвори з затворами, розташованими в нижній частині водяної камери охолоджувача.

Кількість масла, що протікає в одиницю часу через кожен підшипник, регулюється за допомогою спеціальних діафрагм або зміною тиску масла, щоб перегрів масла не перевищував $15 - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура підшипників не повинна перевищувати $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура гарячого масла, виміряна в зливному патрубку, повинна бути не вище $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура масла, що підводиться до підшипників, повинна бути від 35 до $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$; при пуску електродвигуна – не менше $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

При експлуатації електродвигуна опір ізоляції обмотки статора не нормується. Оцінку стану обмотки статора дають результати систематичного вимірювання опору ізоляції в гарячому стані, зіставляючи їх з даними попередніх вимірювань абсолютних значень $R_{60''}$ і коефіцієнта абсорбції $R_{60''} / R_{15''}$.

1.2.2 Випробування на нагрів електродвигуна

Промислові випробування головного зразка електродвигуна АТД-8000-2 були виконані на блоці 300 МВт. Для додаткового теплового контролю, крім штатних термоопорів, були встановлені 42 термометри, контролюючі температури середнього і крайнього пакета сталі та обмотки в трьох місцях перізу по колу статора [7].

Максимальні нагриви активних частин електродвигуна визначалися по точках, які мають максимальну температуру при номінальному режимі і температурі охолоджуючої середовища $+ 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Найбільша температура при номінальному навантаженні за терморезисторами, розташованими між верхніми і нижніми стрижнями в пазовій частині, менше допустимої за ГОСТ 183-74 ($116 \text{ }^{\circ}\text{C}$, тоді як за нормами $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Максимальна температура сталі статора теж нижче допустимої ($113,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, тоді як за нормами $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

При повній непрохідності однієї з паралельних гілок (рівнозначно її відключення від схеми) максимальна температура обмотки статора більше допустимої і дорівнює 122°C . Нагрівання пакетів активної сталі статора при відключенні однієї з паралельних гілок сильно залежить від їх взаємного положення відносно один одного і збільшується в окремих пакетах на $21 - 23^{\circ}\text{C}$.

Беручи до уваги, що нагріви активних частин електродвигуна при нормальній схемі охолодження близькі до граничних, температура окремих частин під час шунтування або відключення частини охолоджуючих сегментів може перевищити допустиму. При повному припиненні подачі охолоджуючої води в статор і ротор нагрів окремих частин електродвигуна збільшується на $1,5 - 2^{\circ}\text{C}$ протягом 3 хв (витримка часу технологічного захисту). За умовами нагріву активних частин допустимі і великі перерви в постачанні охолоджуючим конденсатом, але для запобігання сухого тертя в ущільненні водоподвода, для якого конденсат є мастилом, цей час збільшувати неприпустимо.

1.2.3 Підготовка до запуску електродвигуна

Після ремонту перед пуском електродвигуна виконують підготовчі операції. Маслосистему насосного агрегату промивають одночасно з маслосистемою турбіни К-300-240 через перемички. Промивання виконують до тих пір, поки на мітталі, встановленому на латунній сітці напірного маслопроводу, не зникнуть механічні домішки. Команду про закінчення прокачування масла і можливості подачі його на опорні підшипники за нормальною схемою дає уповноважена особа персоналу хімічного цеху.

Наступним кроком необхідно зібрати схему та подати масло на опорні підшипники, поступово відкриваючи засувку на трубопроводах подачі масла від маслосистеми турбіни. Тиск масла повинно бути в межах $0,7 - 2,0 \text{ кгс} / \text{см}^2$ ($69,6 - 196 \text{ кПа}$), температура на вході до підшипників $40 - 45^{\circ}\text{C}$.

Систему трубопроводів подачі та зливу охолоджуючого конденсату в ротор і статор промивають через перемички. При номінальних витратах конденсату в системі охолодження статора та ротора воду подають в електродвигун. Температура конденсату на охолодження не повинна перевищувати 45°C . Одночасно перевіряють надходження охолоджувальної води в повітроохолоджувач [7].

Для подачі конденсату в електродвигун спочатку заповнюють бак автономного охолодження. Далі необхідно зібрати електричну схему насосів охолодження, а саме збирається схема подачі води від насосів через охолоджувач циркуляційної води і один з фільтрів з поверненням води в бак. Один насос підключається одразу, а другий – працює як АВР. Контроль здійснюється за тиском конденсату за регулюючим клапаном, який має бути рівним $10,5\text{ кгс} / \text{см}^2$.

В процесі експлуатації в разі зупинки електродвигуна циркуляцію конденсату через систему охолодження ротора і статора не припиняють. Злив води з електродвигуна допускається лише при ревізії або ремонті, після чого вся гідравлічна система електродвигуна повинна бути продута сухим стисненим повітрям.

Необхідно також перевірити уставку спрацювання релейного захисту з урахуванням її селективності, прилади автоматики, захисту, блокування, сигналізації, керування і контрольно-вимірювальні прилади.

Наступним кроком необхідно виміряти опір ізоляції обмотки статора електродвигуна. Перевіряється наряди на ремонтні роботи по насосному агрегату (вони повинні бути закриті) і готовність агрегату до пуску по записах в журналі виведення обладнання з ремонту. Збирається електричну схему двигуна.

Пуск живильного електронасоса відбувається з блочного щита керування. При аварійній зупинці живильного турбонасоса пуск автономного охолодження проводиться автоматично від системи АВР. Під час пуску електродвигуна контролюються покази приладу за режимом пуску. Після закінчення пуску на

амперметрі перевіряється чи значення струму знаходиться в встановлених межах.

Під час пуску насосного агрегату персонал з обслуговування турбіни повинен знаходитися біля обладнання і стежити за наростанням частоти обертання електродвигуна. За ввімкнення відповідає машиніст блоку. Після пуску прослуховується насосний агрегат щоб переконатися у відсутності ненормальних звуків та вібрацій. Записуються показання контрольно-вимірювальних приладів. При необхідності можна змінювати тиск охолоджуючого конденсату перед статором і ротором електродвигуна до номінальних значень за допомогою вентилів на підвідних лініях.

Далі необхідно перевірити роботу підшипників. Для цього ведеться контроль за температурою нагрітого повітря в системі охолодження електродвигуна, не допускаючи її збільшення більше 60°C . Перевіряється відсутність води в корпусі електродвигуна.

Після пробних пусків і усунення дефектів включають обладнання в роботу відповідно до режиму роботи блоку.

Якщо вібрація електродвигуна перевищує допустиме значення, то ротор балансують установкою балансувальних вантажів. Для установки балансувальних вантажів знімають ущільнення і щити електродвигуна. Кількість вантажів коливається в залежності від невірноваженості ротора. Якщо за допомогою цих вантажів збалансувати ротор неможливо, встановлюють додаткові вантажі (стрижні) в спеціальні осьові отвори, наявні в кожному зубці сердечника ротора. У нормальному стані вони закриті натисними кільцями крайніх листів. Для установки вантажів посередині зубців в крайньому листі просвердлюють отвори діаметром 11,9 мм і в балансувальні отвори вставляють стрижні діаметром 10 мм необхідної довжини. Стрижні приварюють до крайніх листів. Для доступу під час свердління отворів і установлення стрижнів бандажні кільця необхідно зняти.

1.2.4 Обслуговування електродвигуна під час роботи

Під час роботи електродвигуна необхідно постійно стежити за показаннями контрольно-вимірювальних приладів, періодично зіставляючи їх з контрольними значеннями.

Періодично обладнання необхідно прослуховувати. При появі стуку, стороннього шуму та підвищеної вібрації необхідно діагностувати та усунути їх причину. Також здійснюється контроль за надходженням холодного конденсату на охолодження електродвигуна таводи в повітроохолоджувач.

Необхідно контролювати відсутність води та пари біля електродвигуна, що може призвести до зволоження та пошкодження електродвигуна. Перевіряється відсутність води в електродвигуні за показаннями приладів. Періодично необхідно стежити за чистотою фільтрів, встановлених на підводі охолоджуючого конденсату до електродвигуна. Не рідше одного разу на місяць проводити випробування резервного електродвигуна.

Команду на зупинка електродвигуна подається з блочного щита поворотом ключа керування в положення «Зупин». При відключенні електродвигуна визначають час вибігу роторів агрегату. Нормальне час вибігу роторів дорівнює приблизно 90 с. Необхідно звернути увагу на те, щоб ротор не обертався в зворотну сторону через пропуски арматури.

Застосування електродвигунів АВ-8000 / 6000УЗ в якості приводу пускорезервних живильних пристроїв котельних агрегатів блоків 300 МВт висуває певні вимоги до надійності їх роботи.

Компонування живильних насосів енергоблоку 300 МВт поєднує установку насоса з електричним приводом (ЖЕН) і живлячого турбонасоса (ЖТН), у якого в якості приводу використовується парова турбіна потужністю 12 МВт. живлячий електронасос використовується при пускових режимах енергоблоку, а також в якості резервного приводу при відмовах ЖТН.

На рис. 1.4 показано середньорічне напрацювання двигунів живильних електронасосів енергоблоків 300 МВт.

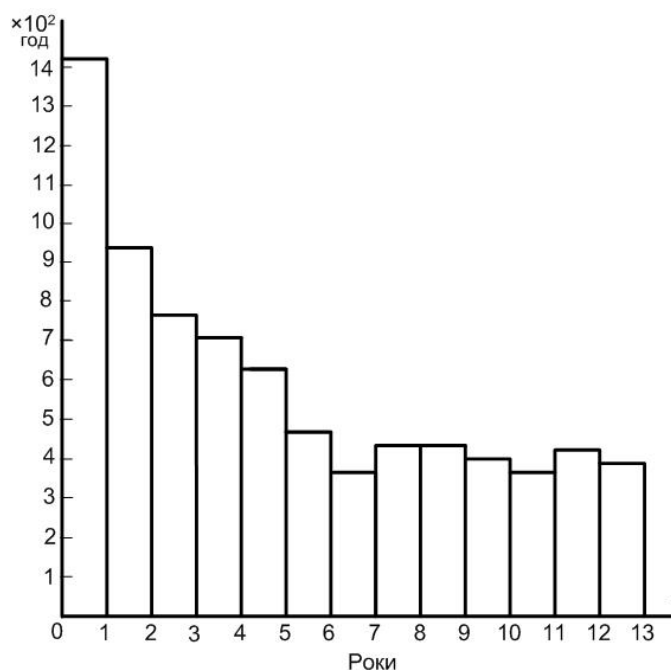


Рисунок 1.4 – Середньорічне напрацювання двигунів живильних електронасосів енергоблоків 300 МВт

Потужність живильний турбонасу забезпечує номінальну паропродуктивність котельного агрегату, проте за умовами технологічної схеми енергоблок не може бути пущений за допомогою ЖТН. Основним призначенням ЖЕН є пуск і забезпечення блоку при навантаженні нижче номінального, тому потужність ЖЕН нижча за потужність ЖТН і становить 8 МВт.

Як показує аналіз роботи 8 електродвигунів протягом 13 років (рис. 1.3), найбільше напрацювання (тривалість роботи) мають електродвигуни в перший рік експлуатації через часті пуски та зупинки енергоблоків для їх налагодження, регулювання, усунення дефектів і т. п. По мірі освоєння експлуатації обладнання тривалість роботи ЖЕН на кожній станції поступово зменшується і, починаючи приблизно з 6-го року, встановлюється в середньому на рівні 404 год / рік. Коефіцієнт технічного використання живильних електронасосів зменшується в порівнянні з першим роком експлуатації з 16,2 до 4,6%.

Незважаючи на незначне середньорічне значення напрацювання електродвигуна ЖЕН, до них висуваються дуже високі вимоги надійності.

Досвід експлуатації електродвигуна АВ-8000 / 6000УЗ свідчить про його порівняно низьку експлуатаційну надійність. За даними середнє значення параметра потоку відмов становить 0,102 1 / рік, тобто з кожних 100 встановлених електродвигунів за рік пошкоджується більше 10.

Значне число аварійних пошкоджень пов'язане з порушенням герметичності систем водяного охолодження ротора та статора і з зволоженням та пробоем ізоляції обмотки статора.

Висновки до першого розділу

Живильні насоси використовуються для подачі хімічночистої води в парогенератори енергоблоків АЕС, на котельнях, на теплоелектростанціях, на промислових підприємствах. В якості приводу живильних насосів застосовують електродвигуни типу АВ-8000 / 6000УЗ на теплових електричних станціях в якості приводу. Незважаючи на незначне середньорічне значення напрацювання електродвигуна живильних насосів, до них висуваються дуже високі вимоги надійності.

Аналіз літературних джерел показав, що електродвигун типу АВ-8000 / 6000УЗ мають низьку експлуатаційну надійність. За даними середнє значення параметра потоку відмов становить 0,102 1 / рік, тобто з кожних 100 встановлених електродвигунів за рік пошкоджується більше 10.

Здебільшого причинами аварій є: порушення герметичності систем водяного охолодження ротора та статора; зволоженням та пробоем ізоляції обмотки статора.

Отже, з метою підвищення надійності електропостачання споживачів, необхідно більш детально дослідити причини пошкодження потужних електричних двигунів електричних станцій та розробити методики покращення надійності їх роботи.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПОШКОДЖЕННЯ ПОТУЖНИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

2.1 Аналіз причин пошкоджуваності обмотки статора двигуна

У зв'язку з переведенням в окремих енергосистемах блоків 300 МВт з базового режиму в режим регулювання навантаження, а також переведеннями в резерв у вихідні та святкові дні значно збільшилася кількість пусків електродвигуна АВ-8000 / 6000УЗ, що негативно впливає на стан кріплення обмотки статора [7].

При пуску електродвигуна виникає струм, значення якого перевищує номінальне в 5,4 рази, що відповідає збільшенню динамічних сил в обмотці статора в 30 разів у порівнянні з номінальним значенням. Ці сили діють в основному на лобові частини обмотки статора, викликаючи їх деформацію, утворення місцевих дефектів ізоляції та тріщин. Це призводить до ослаблення шнурових бандажів, перетирання ізоляції в окремих випадках до міді. Зареєстровано випадки перетирання міжшаровими прокладками мікастрічкової ізоляції лобових частин верхніх стрижнів до міді за період 3,5 року.

Значна частка пошкоджень статора викликана електричними пробоями ізоляції обмотки, що виникають при роботі двигуна або при проведенні профілактичних випробувань підвищеною напругою в період ремонту.

Основні причини, що призводять до зниження рівня ізоляції: зволоження, комутаційні перенапруги, нагрів і температурні деформації, вплив масла, динамічні впливи та старіння ізоляції.

Руйнування ізоляції відбувається під впливом навколишнього середовища внаслідок теплового, механічного або електричного впливу.

Стан поверхні ізоляції значно погіршується при одночасному впливі вологи і масла. Суміш твердих частинок пилу та вологи або масла створює на поверхні ізоляції провідну плівку, що значно зменшує електричну міцність

ізоляції обмотки і призводить до міжфазного замикання обмотки в лобових частинах.

Пил, що знаходиться в повітрі, при циркуляції в системі вентиляції осідає на поверхні головок лобових частин. Це значно зменшує зволоження, забруднення та внутрішнє зволоження ізоляції обмотки, викликане тим, що цю частину обмотки ізолюють після укладання стрижнів в пази статора без компаундування. Зволоження пазової частини обмотки статора в експлуатації, як правило, не спостерігається.

В літературі приведено випадки зволоження обмоток статорів внаслідок порушення герметичності системи водяного охолодження статора та ротора. Протікання води призводить до місцевого зволоження обмотки. Також зареєстровано випадки механічного пошкодження ізоляції всіх 48 верхніх стрижнів обмотки статора через порушення герметичності місця пайки трапецеидальної частини стрижня ротора з наконечником. Таке механічне пошкодження ізоляції верхніх стрижнів обмотки статора струменем води може мати місце тільки на виході з паза на ділянці довжиною 45 мм. У пазовій частині стрижень захищений клином, а в лобовій - бандажним кільцем ротора. Імовірність пошкодження на цій ділянці збільшується також через наявність в цьому місці пайки стрижня ротора з наконечником. Також пошкодження виникали внаслідок неякісної пайки головки обмотки статора. В процесі пайки припій потрапив під ізоляцію лобової частини і викликав її підгоряння.

Внаслідок недостатньої жорсткості кріплення лобових частин обмотки статора виникають міжфазні замикання через перетирання ізоляції деталями кріплення.

В системі охолодження статора протікання води може бути викликане пошкодженням мідних трубок ребром поперечної стінки корпусу статора в місці їх зіткнення внаслідок вібрації; протікання силумінових сегментів можуть бути викликані внутрішніми пошкодженнями трубок або пошкодженнями трубок в місці виходу їх із сегментів. Пошкодження трубок можуть виникати внаслідок розморожування заповнених конденсатом сегментів, які перебувають

у нижній частині сердечника резервного статора, що зберігається при температурі нижче 0°C . Різні види пошкоджень електричних двигунів показані на рис 2.1



Вигорілі фази обмоток



Бандажна стрічка пошкоджена біля згорілої обмотки



Пошкодження обмотки статора

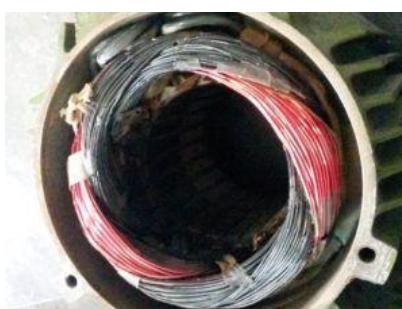


Рисунок 2.1 – Приклади пошкоджень електричних двигунів

2.1.1 Пошкодження герметичності системи охолодження обмотки ротора

В системі охолодження ротора протікання води можуть виникнути в наступних вузлах: в порожніх стрижнях обмотки ротора через дефекти металу, в місці пайки стрижня зі штуцером, в радіальному водопроводі бандажного вузла внаслідок усадки гумового ущільнення або самовідгвинчування гайок, в місці пайки штуцера з порожнистим короткозамкненим кільцем. Значна кількість протікань виявляється в результаті гідравлічного обпресування системи при ремонті. Також дані експлуатації підтверджують випадки виникнення протікань в паяній латунній радіальній трубці в місці з'єднання її з штуцером через утоншення стінки внаслідок перегріву металу при пайці.

Порушення герметичності системи охолодження ротора призводить, як правило, до зволоження і пошкодження обмотки статора.

2.1.2 Виявлення та усунення дефектів бандажних кілець ротора

Перед зняттям бандажного кільця усувається карбування короткозамкненого кільця та відзначається положення бандажного кільця відносно короткозамкненого кільця та бочки ротора [8].

Більшість пошкоджень бандажів виявляється зовнішнім оглядом. При встановленому бандажному кільці оглядають зовнішню поверхню та торці, а при знятому - внутрішню поверхню бандажа. Зовнішній огляд проводиться до чистки бандажа і після того, як поверхня буде зачищена.

При огляді слід перевірити:

- відсутність тріщин на бандажних кільцях; відсутність слідів контактної корозії (сліди контактної корозії свідчать про ослаблення посадочних натягів бандажа на короткозамкнене кільця);
- відсутність слідів підгоряння спаїв по всій поверхні бандажів.

Зняті бандажі ретельно оглядають через лупу. Тріщини, підгари, відколи, забоїни, сліди контактної корозії і місця перегрівань відзначають крейдою. Дефектні місця перевіряють методом кольорової дефектоскопії або використанням хімічних реактивів. За допомогою кольорової дефектоскопії або хімічного травлення можуть бути виявлені не помічені при простому огляді тріщини, а також уточнені їхні межі та характер поширення.

Контроль методом кольорової дефектоскопії проводиться в наступному порядку. Контрольована поверхня зачищається до металевого блиску. Безпосередньо перед проведенням робіт ділянку, що перевіряється, знежирюють бензином і на нього наносять фарбувальний склад. Фарбувальний склад містить 65% гасу, 30% трансформаторної оливи та 5% скипидару. В цей склад, підігрійтий до 40 - 50 ° С, додають барвник - судан № 1, 2 або 3 до

насичення. Після появи необхідної кількості осаду судану охолоджений розчин фільтрують.

Через 5 - 10 хв фарбувальний склад змивають струменем води і чистою серветкою видаляють воду з поверхні. Далі на суху поверхню необхідно нанести розчин крейди, та дати йому висихнути протягом 2 - 5 хв. На вкритій крейдою поверхні проявлятимуться червоні лінії, що вказують на наявність тріщин і їх розташування.

Наявність і характер розташування тріщин на поверхнях бандажів можна виявити хімічним травленням. Після зачистки і поліровки поверхню знежирюють бензином, а потім спиртом. Травлення бандажів, виготовлених з немагнітних аустенітних сталей, проводиться реактивами.

Травлення бандажів виробляють також розчином $3\text{HCl} + \text{HNO}_3$. Ділянку травлення обмежують пластиліном. Після травлення ділянку ретельно промивають і нейтралізують 10%-вим розчином соди. Травлений ділянку оглядають лупою п'ятикратного збільшення.

2.2 Методи підвищення надійності електричних двигунів

Під час капітальних ремонтів доцільно виконати реконструкцію окремих вузлів електродвигуна, що забезпечить більш надійну і тривалу роботу та збільшить міжремонтний період [6].

Зокрема, бажано посилити кріплення лобових частин обмотки статора.

Розрахунки та дослідження показали, що лобові частини обмотки статора потужних електродвигунів можуть протистояти електродинамічним силам при жорсткій та монолітній системі їх кріплення. Нижче приведено технологія монолітної системи кріплення лобових частин – обмотки статора електродвигунів АВ-8000 / 6000УЗ.

Ці заходи виконують під час повного перемотування обмотки статора. Основною метою реконструкції є заповнення формуючим матеріалом можливих зазорів між стрижнями обмотки в місцях установки дистанційних

розпірок, між обмоткою та бандажними кільцями і між верхнім і нижнім рядами стрижнів (міжшарові прокладки) в місцях їх прилягання. Шнурові бандажі з льнопенькової шнура замінюють бандажами з просоченого лавсанового шнура. Формуючий матеріал та епоксидний склад для просочення лавсанового шнура мають в своєму складі сполучні речовини гарячого затвердіння. В результаті подальшого запікання лобові частини обмотки стають монолітними та мають високі вібраційні характеристики.

Для отримання бандажа необхідний еластичний шнур, що встановлюється при нагріванні. Цим умовам задовольняє лавсановий шнур, усадка якого збільшується зі зростанням температури і досягає 6% при 120 ° С. Основні властивості шнурів для в'язки бандажів наведені в табл. 2.1. Еластичний лавсановий шнур дозволяє більш щільно накладати шнуровий бандаж. Просочення лавсанового шнура епоксидними складами гарячого затвердіння перед їх установкою та подальшою термообробкою при температурі 100 ° С підвищують механічну міцність бандажа на 50 - 60%.

Усадка лавсанового шнура після 2 год витримки при температурі 80 ° С становить 1,5%; при 100 ° С – 3,0 %; при 120 ° С – 6,0 %; при 160 ° С – 13,0%.

Таблиця 2.1 – Властивості шнурів для в'язки бандажів

Шнур	Розривне зусилля, кгс (кН)	Відносне подовження, %	Кількість подвійних перегинів на 180°, шт
Лавсановий діаметром, мм			
3	85 (0,883)	25	-
4	116 (1,137)	34	180000
5	145 (1,142)	60	412000
Скляний діаметром 3 мм	88 (0,862)	14	242
Льнопельковий діаметром, мм			
2	42 (0,412)	9	1883
2,5	45 (0,441)	11	

Здатність препрега приймати форму за місцем установки при температурі навколишнього повітря та низьких тисках дозволяє уникнути при укладанні обмотки зазорів між стрижнями та деталями кріплення. Після запікання прокладки міцно з'єднуються з поверхнями, сприяючи створенню монолітної жорсткої системи в лобовій частині обмотки статора.

В якості вихідного матеріалу використовують препреги марки АП-70-151А по ТУ 6-11-298-73 з руйнівною напругою при розтягуванні не менше $900 \text{ кгс} / \text{см}^2$ (88,2 МПа), при статичному вигині – не менше $1800 \text{ кгс} / \text{см}^2$ (176,4 МПа) і ударній в'язкості не менше $70 \text{ кгс} / \text{см}^2$.

Термін гарантії препреги встановлений заводами-виробниками становить 3 місяців з дня виготовлення. Після закінчення зазначеного терміну препреги перед застосуванням підлягають випробуванню та вважаються придатними до використання при відповідності всім показникам викладеним в технічних умовах.

Механічна міцність препреги нижче, ніж склотекстоліта, але достатня для застосування в конструкції кріплення лобових частин потужних електродвигунів.

Експлуатація електродвигунів АВ-8000 / 6000УЗ на протязі декількох років показала, що конструкція із застосуванням нових матеріалів і технологічних процесів забезпечена необхідною жорсткістю, добре протистоїть електродинамічним силам і виключає небезпечні вібрації елементів лобових частин обмотки статора.

З досвіду підприємства «Харківенергоремонт» для посилення кріплення бандажних кілець додатково з кожного боку статора встановлюється по п'ять кронштейнів з склотекстоліта товщиною 25 мм.

Дистанційні розпірки, виконані з дерева, замінюють склотекстоліт розміром 65×24 мм.

На кронштейни укладають шари препреги. Такі ж шари препреги укладають на місця сполучення кронштейнів з бандажними кільцями [8].

На обидва бандажні кільця (внутрішнє і зовнішнє) накладають зверху (по внутрішній стороні) один шар препреги товщиною 3 мм, загорнутого в склотканину, просочену лаком ЕР 1-30. Цей шар бандажують до кілець склолентою.

При укладанні стрижнів дистанційні розпірки в лобових частинах перед установкою ізолюють препрегом і просоченою лаком ЕР 1-30 склотканиною. Кожна дистанційна распірка підбирається по товщині таким чином, щоб вона, обгорнута шаром препреги і склотканини, щільно входила в зазор між стрижнями (рис. 2.2).

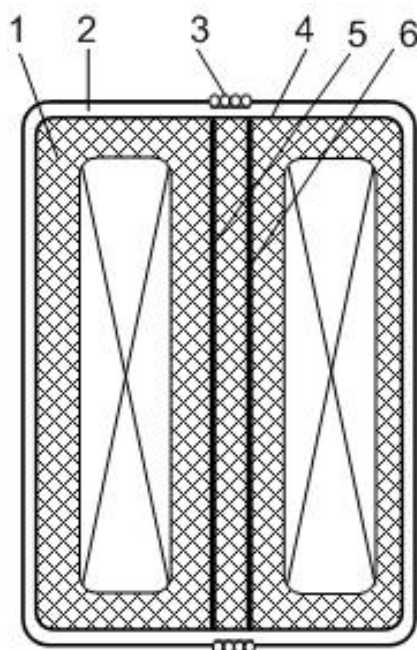


Рисунок 2.2 – Установка дистанційних розпірок і шнурових бандажів лобових частин обмотки статора

На рис. 2.2 під 1 показано стрижень, під 2 – поперечні нитки бандажа, 3 – поздовжні нитки бандажа, 4 – препреги, 5 – дистанційну розпірку, 6 – просочену склотканину.

Бандаж накладають шнуром, складеним в двоє. Використовуваний для бандажів лавсановий шнур попередньо просочують епоксидним складом. Шнур сушать на повітрі після просочення не менше 24 год.

Роботи з препрегом, епоксидним складом і просоченим лавсановим шнуром виконують в рукавичках з бавовняного трикотажного полотна. Після роботи руки миють теплою водою з милом.

Спочатку накладають поперечні нитки бандажа, а потім поздовжні. Кількість поперечних ниток визначається шириною розпірки, а поздовжніх - зазором між сусідніми стрижнями. Після укладання нижнього шару стрижнів встановлюють клини на виході з паза, попередньо огорнувши їх препрегом, та бандажують їх склолентою. Замість набору заводських дугових прокладок з електрокартону ставляться шари препрега і склотекстоліту. Аналогічно нижнім укладають верхні стрижні.

Після укладання та пайки обмотки встановлюють пристосування для опресовування обмотки в статорі (рис. 2.3).

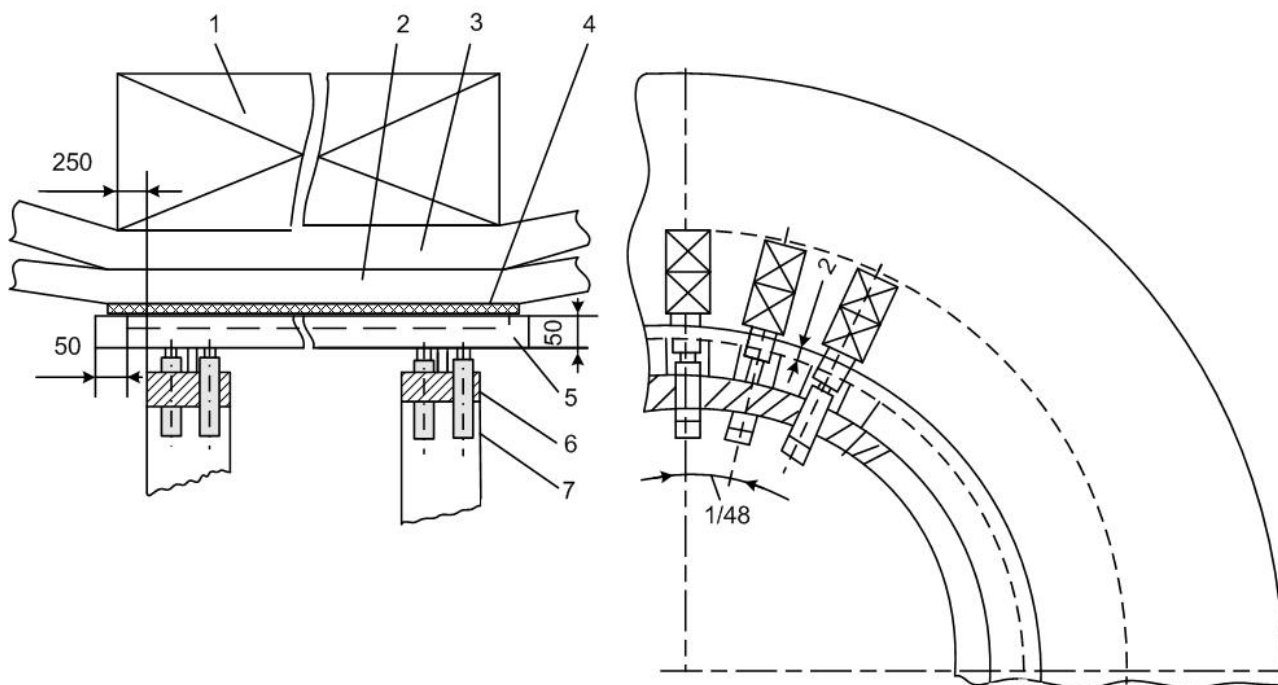


Рисунок 2.3 – Опресовування пазової частини обмотки статора

На рис. 2.3 позначено: 1 – активна сталь статора; 2 – верхній стрижень; 3 – нижній стрижень; 4 – прокладка; 5 – планка; 6 – кільце; 7 – гвинт М20.

Під планки на стрижні прокладають по одній підклиновій прокладці товщиною 0,5 - 1,0 мм і злегка підтягують болти. При цьому стежать за тим, щоб кільця не торкалися розточення статора і розташовувалися концентрично. Щоб уникнути зіткнення кілець встановлюють прокладки необхідної товщини в декількох місцях рівномірно по колу.

Всі фази статора з'єднують послідовно і протягом 3 - 4 год прогрівають обмотку постійним струмом, рівним номінальному, до температури 90 - 100 ° С на поверхні ізоляції в лобових частинах, потім відключають струм і обпресовують обмотку одночасно з обох сторін розточення, по черзі підтягуючи чотири болта, що знаходяться в площині, що проходить через вісь вала електродвигуна, трьох розташованих діаметрально протилежно один відносно іншого. Для забезпечення необхідного зусилля опресування до голівки болта необхідно прикласти крутний момент близько 10 кгс-м (98 Н-м). Після опресування обмотку охолоджують до температури 40 ° С, прибирають пристосування для опресування і заклинують пази. Щоб уникнути випадання крайні клини і прокладки змазують клеєм № 88-Н.

Для забезпечення більшої динамічної стійкості та механічної міцності головки закріплюють між собою бандажами з стеклолавсанового шнура ШСЛ діаметром 10 мм. Шнур ШСЛ має сердечник зі скляних ниток і лавсанову оболонку.

Після закінчення робіт, пов'язаних із застосуванням препреги і лавсанового шнура, обмотку запікають за допомогою електрокалориферної установки (рис. 2.4), контролюючи температури пазової частини приладами штатного термоконтролю, а лобових частин – тимчасово встановленими термopами.

Перед термообробкою перевіряють відсутність в обмотці сторонніх предметів, ретельність заповнення препрагою зазорів між стрижнями обмотки і бандажними кільцями, між стрижнями і міжшаровими дугами. Перевіряють щільність установки дистанційних розпірок: розпірки не повинні переміщатися в зазорах між стрижнями. Перевіряють якість накладення бандажів з

лавсанового шнура. Кожен виток бандажа повинен бути покладений без нахлеста витків з боку розточення статора. Перевіряють відсутність надлишків препреги в зазорах між стрижнями.

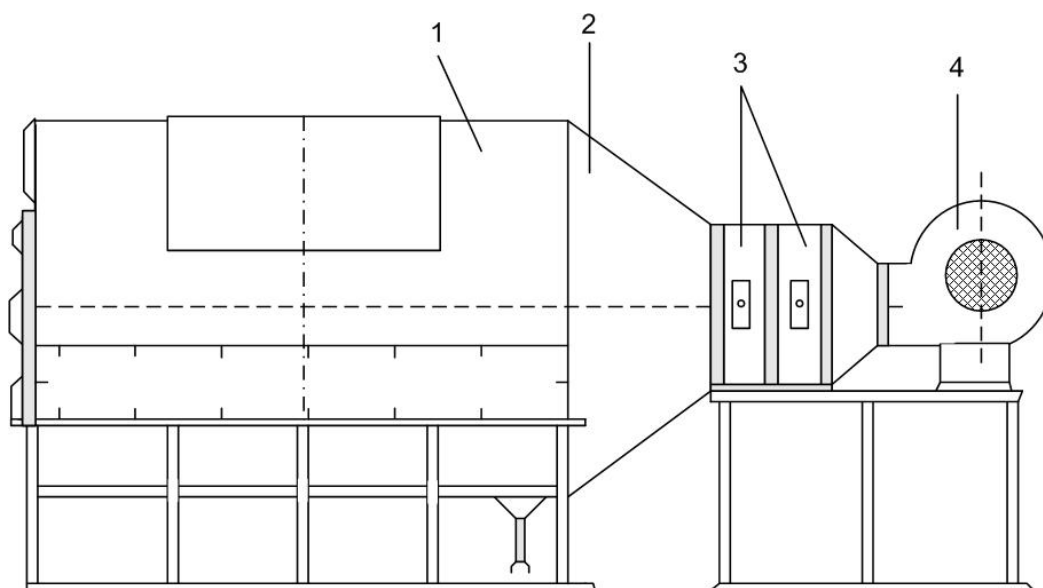


Рисунок 2.4 – Схема запікання реконструйованого кріплення обмотки статора із застосуванням препреги

На рис. 2.4 показано: 1 – статор, 2 - конус розподільний, 3 - секції калорифера, 4 - вентилятор.

Термопари встановлюють в лобових частинах обмотки з обох сторін у вертикальній і горизонтальній площинах.

З одного торця електродвигуна встановлюють електрокалориферну установку, а інший торець закривають заглушкою. Закривають люки, що забезпечують доступ до гідравлічних з'єднань системи водяного охолодження статора. Стикувальний перехід від електрокалорифера до торця статора виготовляють з алюмінієвого дроту, що створює конусоподібний каркас, на який накладають кілька шарів асботканини.

У стикувальному переході можуть бути розміщені регульовальні щитки для вирівнювання температури нагріву обмотки по колу. Встановлюють додаткову термопару для контролю температури гарячого повітря, що поступає

після калорифера в статор. Контроль роботи вентилятора калорифера здійснюється звуковою та світловою сигналізацією.

Температура лобових частин регулюється відключенням секцій калорифера, зміною напруги за допомогою пристрою РПН на трансформаторі власних потреб, від якого живиться електрокалориферна установка.

Ремонтний майданчик повинен бути обладнаний засобами пожежогасіння. Черговий персонал під час запікання повинен вести запис показань приладів термоконтролю. Запікання виконують при температурі $100 \pm \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 24 год.

Після запікання і остигання перевіряють відсутність сирих місць препреги і лавсанового шнура; при виявленні таких місць запікання повторюють.

2.3 Запобігання зволоженню лобової частини обмотки статора

При перемотуванні обмотки статора для запобігання зволоженню лобових частин використовують гідроізоляцію на основі кремнійорганічного каучуку холодної вулканізації типу КЛСЕ [7,8].

Компаунд КЛСЕ є сумішшю низькомолекулярного каучуку СКТН, білої сажі У-333 і редоксайда та володіє наступними фізико-механічними властивостями:

1. Межа міцності при розриві до $25 \text{ кгс} / \text{см}^2$ (2450 кПа);
2. відносне подовження до 80%;
3. діапазон робочих температур від $- 55$ до $+ 250 \text{ }^\circ\text{C}$;
4. електрична міцність не менше $15 \text{ кВ} / \text{мм}$;
5. тангенс кута діелектричних втрат 0,01;
6. питомий об'ємний опір $10^{13} \text{ Ом} / \text{см}$.

Лобові частини обмотки, кронштейни, бандажні кільця, з'єднувальні і вивідні шини покривають компаундом КЛСЕ, який, маючи високі діелектричні властивості, одночасно являється надійною гідроізоляцією.

Після переізоляції стрижнів, до того як покрити лобові частини захисним шаром склоленти, пензлем наноситься тонкий шар підслою. Компаунд КЛСЕ розводять толуолом до в'язкості, що забезпечує нанесення його на поверхню стрижня; в отриману суміш додають каталізатор К-1 в відношенні 25: 1. Після нанесення тонкого шару суміші на лобову частину стрижня, її покривають склолентою шириною 0,1 мм і після вторинного покриття сумішшю стрижень сушать протягом 3 - 4 год при температурі навколишнього середовища Товщина гідроізоляційного покриття рівна 0,85 - 0,9 мм. Для механічного захисту гідроізоляційного шару його покривають одним шаром склоленти встик і емаллю ГФ-92ХС або 1201. Гідроізоляція інших елементів і деталей кріплення обмотки виконується за такою ж технологією.

2.4 Електричні випробування та вимірювання

Згідно [4] в період капітальних ремонтів електродвигунів повинні бути виконані наступні електричні випробування та вимірювання:

1. Вимірювання опору ізоляції та відношення $R_{60''} / R_{15''}$ обмотки статора мегаомметром на 2500 В;
2. Випробування підвищеною напругою частотою 50 Гц обмотки статора;
3. Вимірювання опору обмотки статора постійному струму;
4. Вимірювання опору ізоляції термоіндикаторів, опорних підшипників і водопідводної колонки.

Опір ізоляції термоіндикаторів, виміряний мегаомметром на 250 В, має бути не менше 1 МОм.

Опір ізоляції опорних підшипників і водопідводної колонки згідно [5] вимірюється мегаомметром на 1000 В, його значення не нормується.

Під час перемотування обмотки статора з заміною ізоляції стрижнів виконують післяопераційні випробування згідно [5].

Також виконується випробування підвищеною напругою частотою 50 Гц додаткових елементів. В табл. 2.2 наведені значення напруги випробування, кВ.

Таблиця 2.2 – Значення випробувальної напруги для окремих елементів двигуна

Назва елемента	Випробувальна напруга, кВ
Окремий стрижень перед укладанням:	
лобові частини	12,0
виткова ізоляція	3,5
Стрижні після укладання в пази:	
виткового ізоляція нижніх стрижнів	2,0
виткового ізоляція верхніх стрижнів	1,5
З'єднання та ізоляція вивідних шин після переізоляції перед установкою	9,0
Ізоляція кронштейнів (на місці установки)	7,5
Ізоляція бандажних кілець кріплення лобових частин	11,0

Тривалість випробувань – 1 хв. При проведенні випробувань були враховані конструктивні особливості обмотки статора цих електродвигунів. Передбачене в [6] допустиме зниження випробувальної напруги на 5% для мікастрічкової ізоляції без компаундування при модернізації кріплення обмотки статора електродвигуна АВ-8000 / 6000У3 підприємством не враховується.

Проведення випробувань підвищеною напругою частотою 50 Гц додаткових елементів сприяє підвищенню якості робіт при перемотуванні та модернізації кріплення обмотки статора електродвигунів АВ-8000 / 6000У3.

Сердечник статора електродвигуна АВ-8000 / 6000У3 зібраний із сегментів листової електротехнічної сталі марки 3411. Для підвищення надійності активної сталі статора доцільно при випробуванні сердечника електродвигуна підвищити значення магнітної індукції до 1,4 Тл. Підвищення магнітної індукції до 1,4 Тл знижує пошкоджуваність активної сталі сердечника статора та скорочує час проведення випробування. В табл 2.3 наведені основні відомості по виконанню випробувань сталі електродвигуна при магнітній індукції 1,0 і 1,4 Тл.

Таблиця 2.3 – Значення випробувальної напруги для окремих елементів двигуна

Параметри	V=1,0 Тл	V= 1,4 Тл
Кількість витків обмотки намагнічування, шт.	10	7
Кількість витків контрольної обмотки, шт.	3	3
Напруга обмотки намагнічування, В	393	383
Струм обмотки намагнічування, А	22,8	138
Втрати в сталі, кВт	5,2	10,43
Питомі втрати в сталі, Вт/кг	1,2	2,5
Максимальний перегрів, °С	3	5
Наявність точок з місцевим нагрівом	Нет	Нет
Тривалість випробувань, хв	90	45
Найбільш допустимий перегрів, °С	45	25
Найбільша допустима різниця нагріву різних зубців	30	15
Найбільш допустимі питомі втрати, Вт/кг	5	3

Висновки до другого розділу

Аналіз літературних джерел свідчить, що для електричних двигунів живильних насосів електричних станцій характерні наступні пошкодження: зволоження обмоток статора внаслідок порушення герметичності системи водяного охолодження статора та ротора; виникнення міжфазних замикань внаслідок недостатньої жорсткості кріплення лобових частин обмотки статора ; перетирання міжшаровими прокладками мікастрічкової ізоляції лобових частин верхніх стрижнів до міді; пробій ізоляції обмоток двигуна; пошкодження бандажних кілець ротора та інші.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ЗАГАЛЬНОГО ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

3.1 Аналіз пошкоджуваності та особливості експлуатації двигунів

Результати аналізу літературних джерел [4-6, 30-35] за період з 2010 до 2020 року дозволили згрупувати пошкодження ЕД (126 одиниць виведених з експлуатації пошкоджених ЕД) так, як це показано в таблиці 3.1.

В таблиці 3.1 приведені наступні діагностичні параметри: k_1 – коефіцієнт залишкового ресурсу обмотки статора, визначений за результатами вимірювання активного опору ізоляції обмоток фаз А, В і С (не менше 0,5 МОм); k_2 – коефіцієнт залишкового ресурсу магнітопроводу статора, визначений за результатами вимірювання струму холостого ходу ЕД (А); k_3 – коефіцієнт залишкового ресурсу бандажу обмотки статора визначений за результатами вимірювання віброприскорення (м/сек^2) лобових поверхонь (норма не більше $3,6 \text{ м/с}^2$ для ЕД без спеціальних вимог до вібрації); k_4 – коефіцієнт залишкового ресурсу обмотки ротора з магнітопроводом, визначений за результатами вимірювання $\cos(\varphi)$ у відносних одиницях (коефіцієнт потужності $\cos(\varphi)=0,85$); k_5 – коефіцієнт залишкового ресурсу вальниць ЕД визначений у відносних одиницях за результатами вимірювання віброшвидкості у м/сек ; k_6 – коефіцієнт залишкового ресурсу кріплення ЕД визначений у відносних одиницях за результатами вимірювання віброприскорення на корпусі ЕД у м/сек ; k_7 – коефіцієнт залишкового ресурсу системи охолодження ЕД визначений у відносних одиницях за результатами вимірювання температури лобових поверхонь обмотки статора у градусах за шкалою Цельсія; k_8 – коефіцієнт залишкового ресурсу борнів (клемної коробки) виводів ЕД визначений у відносних одиницях за результатами

вимірювання перехідного опору в мікроОмах та температури контактів борнів ЕД в °С.

Таблиця 3.1 – Пошкоджуваність електричних двигунів електричних станцій

№ п/п	Пошкоджений вузол	Діагностичний параметр	Кількість виведень ЕД з експлуатації		
			одиниць ЕД, од.	відсотків, %	відносних одиниць, в.о.
Статор					
1	Обмотка статора	k1	30	25	0,25
2	Магнітопровід статора	k2	3	2	0,02
3	Бандаж лобових поверхонь обмотки статора	k3	11	9	0,09
Ротор					
4	Обмотка ротора з магнітопроводом	k4	9	7	0,07
5	Вальниці (підшипники)	k5	42	34	0,34
Інші					
6	Кріплення ЕД (до фундаменту, до іншого обладнання, сам фундамент)	k6	6	5	0,05
7	Система охолодження: повітряна та водяна	k7	9	7	0,07
8	Борни (клемні коробки з клемами)	k8	14	11	0,11
	Разом		126	100	1

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

На рис. 3.1 над параметром показано відсоткову кількість виявлених дефектних електричних двигунів (ЕД) за даним параметром, яка наведена у відсотках від загальної кількості дефектних ЕД

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

З метою отримання узагальненого показника залишкового ресурсу ЕД, який враховує значення всіх діагностичних параметрів та їх вплив на узагальнений коефіцієнт залишкового ресурсу ЕД, пропонується від відомих значень діагностичних параметрів перейти до відповідних цим значенням коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному діагностичному параметру. Ці коефіцієнти k_i визначаються у відносних одиницях за виразом (3.1) і тому характеризують сумарне напрацювання ЕД від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан, коли діагностичний параметр досягає граничного значення, тобто залишковий технічний ресурс [9, 10]. 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 $x_{i1,гран}$ – 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.

Так, для асинхронного ЕД визначимо коефіцієнт залишкового ресурсу бандажу обмотки статора за результатами вимірювання віброприскорення $a_{вп}$

(м/сек²) лобових поверхонь, який під час введення в експлуатацію ЕД дорівнював 0,9 %, а на момент контролю дорівнював 2,2 %. Граничне значення цього параметра – не більше 3,6 м/с². Тому коефіцієнт залишкового ресурсу $K_{a_{en}}$ за діагностичним параметром a_{en} визначається за виразом (3.2):

$$k_3 = \left| \frac{3.6 - 2.2}{3.6 - 0.9} \right| = 0.52 (в.о.). \quad (3.2)$$

У загальному випадку структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу обладнання може мати вигляд, показаний на рис. 3.1

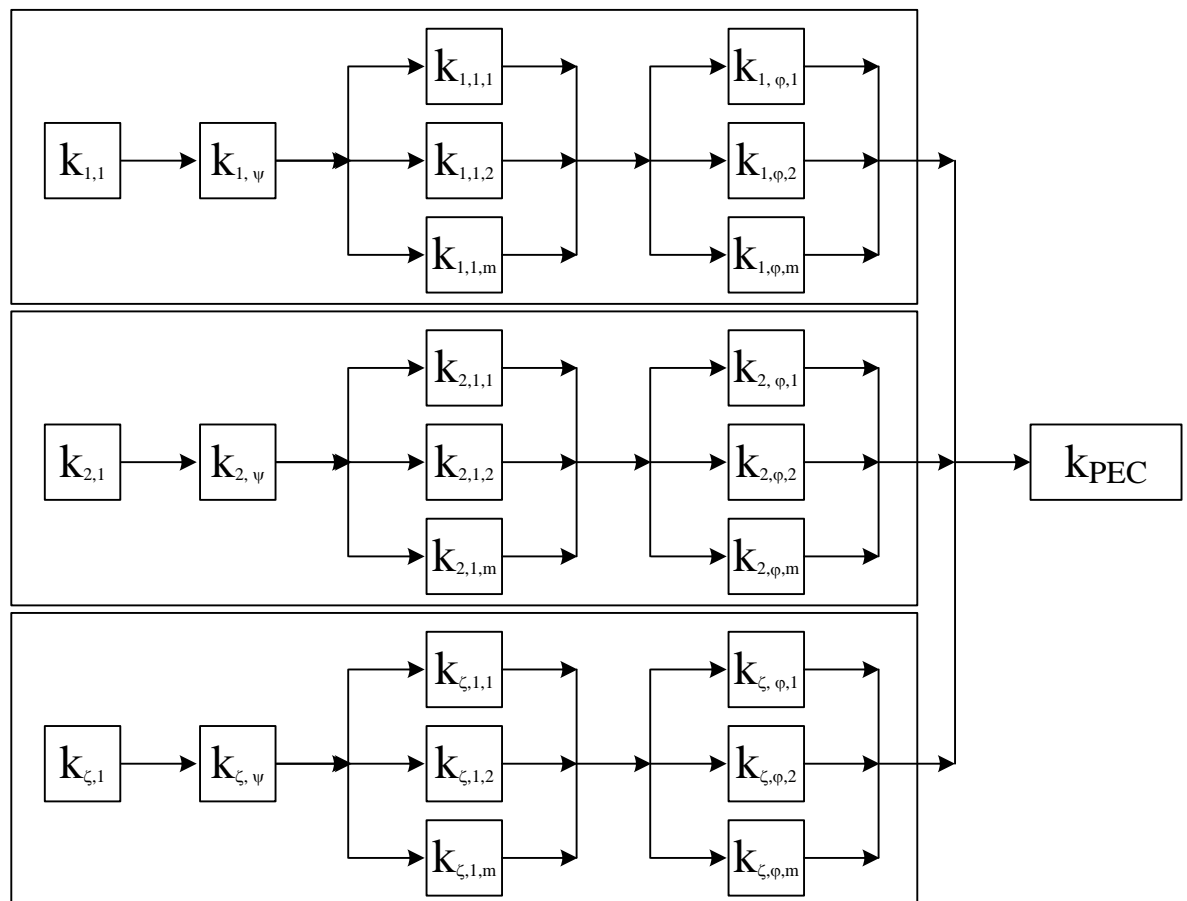


Рисунок 3.1 – Загальна структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу обладнання

Відповідно до рис. 3.1 коефіцієнт загального залишкового ресурсу обладнання визначається за виразом (3.3):

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

де j_1 – номер блока в паралельній частині схеми, яка згортається; m_1 – кількість блоків в паралельній частині схеми, яка згортається; λ – номер блока в послідовній частині схеми, яка складається зі згорнутих паралельних блоків; φ – кількість блоків в послідовній частині схеми, яка складається зі згорнутих паралельних блоків; χ – номер блока в послідовній частині схеми яка складається з незгорнутих блоків; ψ – кількість блоків в послідовній частині схеми, яка складається з не згорнутих блоків; Θ – номер блока в паралельній частині схеми, яка складається зі згорнутих послідовно-паралельних блоків; ζ – кількість блоків в паралельній частині схеми, яка складається зі згорнутих послідовно-паралельних блоків; $k_{\Theta\lambda j1}$ – коефіцієнт залишкового ресурсу за контрольованим $\Theta\lambda j1$ -им параметром у відповідній групі паралельних блоків, які в подальшому згортаються; $P_{\Theta\lambda j1}$ – ймовірність відхилення контрольованого параметра від норми у ЕД, який виведений в ремонт за $\Theta\lambda j1$ -им параметром у відповідній групі паралельних блоків, які в подальшому згортаються; $k_{\Theta\chi}$ – коефіцієнт залишкового ресурсу за діагностичним параметром у блоці, який не згортається у послідовній частині; $P_{\Theta\chi}$ – ймовірність відхилення контрольованого діагностичного параметра у блоці, який не згортається у послідовній частині; $P_{\Theta\lambda}$ – ймовірність відхилення групи контрольованих параметрів від норми у згорнутій групі, що містить паралельні блоки у ЕД, який виведений в ремонт; P_{Θ} – ймовірність відхилення групи контрольованих параметрів від норми у згорнутій групі, що містить послідовно-паралельні блоки у ЕД, який виведений в ремонт.

Відповідно до рис. 3.3 здійснюємо згортання схеми за такими виразами. Для послідовної частини схеми коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом (3.4):

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

де k_{τ} – коефіцієнт залишкового ресурсу ЕД 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 [10] (3.5):

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

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

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

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

де k_j – коефіцієнт залишкового ресурсу ЕД за j -м діагностичним параметром, j – j -тий діагностичний параметр, m_1 – кількість блоків у паралельній частині схеми, яка згортається (рис. 3.1).

Відповідно до виразів (3.5) і (3.6) та рис. 3.1 коефіцієнт загального залишкового ресурсу ЕД визначається за виразом (3.7):

$$k_{заг.pec} = k_{k_1}^{pk_1} \cdot k_{k_2}^{pk_2} \cdot k_{k_3}^{pk_3} \cdot k_{k_4}^{pk_4} \cdot k_{k_5}^{pk_5} \cdot k_{k_6}^{pk_6} \cdot k_{k_7}^{pk_7} \cdot k_{k_8}^{pk_8}, \quad (3.7)$$

де $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8$ – відомі на момент розрахунку значення коефіцієнтів залишкового ресурсу відповідно по параметрах активного опору ізоляції обмоток фаз А, В і С; струму холостого ходу ЕД; віброприскорення лобових поверхонь ЕД; $\cos(\varphi)$; віброшвидкості на корпусі ЕД; температури лобових поверхонь обмотки статора, перехідного опору та температури контактів борнів ЕД.

$p_{k1}, p_{k2}, p_{k3}, p_{k4}, p_{k5}, p_{k6}, p_{k7}, p_{k8}$ – ймовірності відхилень значень діагностичних параметрів від гранично допустимих нормованих значень з урахуванням загальної кількості відхилень всіх діагностичних параметрів для послідовної частини схеми. Так, відповідно до табл. 3.1: $p_{k1}=0,25$ в.о., $p_{k2}=0,02$ в.о., $p_{k3}=0,09$ в.о., $p_{k4}=0,07$ в.о., $p_{k5}=0,34$ в.о., $p_{k6}=0,05$ в.о., $p_{k7}=0,07$ в.о., $p_{k8}=0,11$ в.о. Тоді:

$$k_{\text{залиш.рес}} = k_{k1}^{0,25} \cdot k_{k2}^{0,02} \cdot k_{k3}^{0,09} \cdot k_{k4}^{0,07} \cdot k_{k5}^{0,34} \cdot k_{k6}^{0,05} \cdot k_{k7}^{0,07} \cdot k_{k8}^{0,11}, \text{ в.о.}$$

3.2 Нейро-нечітка модель коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД

Для створення математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД було використано параметри, за кожним з яких можна робити висновок про стан ЕД. Якщо один з цих технічних параметрів виходить за нормовані межі, це зовсім не означає що ЕД повністю втратив свою роботоздатність.

Тому, задача полягає у знаходженні не завжди відомих, нечітких взаємовпливів різних технічних параметрів на загальний технічний стан ЕД і якомога точнішому спрогнозуванні динаміки розвитку пошкоджень і їх впливу на загальний технічний стан. За допомогою системи комп'ютерної математики – системи MATLAB – є можливість створити математичну модель коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД, використовуючи яку можна відредагувати раніше створену ймовірнісну вибірку навчальних даних, за якими далі можна отримати аналітичну залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД від діагностичних параметрів у вигляді поліному. Ця залежність може бути використана у

продовження таблиці 3.2

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6 в.о.	k_7 ,в. о.	k_8 в.о.	Коефіцієнт залишкового ресурсу
0,56	0,44	0,44	0,44	0,56	0,56	0,56	0,44	0,52217
0,57	0,43	0,43	0,43	0,57	0,57	0,57	0,43	0,52526
0,58	0,42	0,42	0,42	0,58	0,58	0,58	0,42	0,52817
...
0,97	0,03	0,03	0,03	0,97	0,97	0,97	0,03	0,35398
0,98	0,02	0,02	0,02	0,98	0,98	0,98	0,02	0,31701
0,99	0,01	0,01	0,01	0,99	0,99	0,99	0,01	0,26116
1	0	0	0	1	1	1	0	0
0,06	0,94	0,94	0,94	0,06	0,06	0,06	0,94	0,13326
0,07	0,93	0,93	0,93	0,07	0,07	0,07	0,93	0,14821
0,08	0,92	0,92	0,92	0,08	0,08	0,08	0,92	0,16244
0,09	0,91	0,91	0,91	0,09	0,09	0,09	0,91	0,17605
0,1	0,9	0,9	0,9	0,1	0,1	0,1	0,9	0,18912
0,11	0,89	0,89	0,89	0,11	0,11	0,11	0,89	0,2017
0,12	0,88	0,88	0,88	0,12	0,12	0,12	0,88	0,21385
0,13	0,87	0,87	0,87	0,13	0,13	0,13	0,87	0,22561
0,14	0,86	0,86	0,86	0,14	0,14	0,14	0,86	0,237
0,15	0,85	0,85	0,85	0,15	0,15	0,15	0,85	0,24806
0,16	0,84	0,84	0,84	0,16	0,16	0,16	0,84	0,2588
1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0

Повна таблиця містить 2614 розглянутих варіантів сполучень діагностичних параметрів та відповідних їм значень загального залишкового ресурсу ЕД. Далі у 107 рядках цієї таблиці було скореговано значення коефіцієнту залишкового ресурсу ЕД (табл. 3.3) шляхом опитування незалежних експертів: кваліфікованих представників відділів ремонту ЕД

ХАЕС та Ладжинської ТЕС, відділу ремонтів високовольтного обладнання ПЗЕС та інших організацій.

Таблиця 3.3 – Фрагмент скорегованих значень коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД

Діагностичні параметри								Коефіцієнт залишкового ресурсу ЕД
k_1 , в.о.	k_2 , в.о.	k_3 , в.о.	k_4 , в.о.	k_5 , в.о.	k_6 , в.о.	k_7 , в.о.	k_8 , в.о.	
0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0,9	0,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8
0,2	0,2	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25
0,5	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,4	0,5
0,6	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6
0,6	0,5	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,4	0,55
0,9	0,1	0,1	0,1	1	1	1	0	0,
1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	1	0
0	0,92	0,92	0,92	0,08	0,08	0,08	1	0
0	0,91	1	1	0	0	0	0	0
0,1	0,9	0,9	0,9	0,1	0,1	0,1	0,9	0,1
0,1	0,9	0,9	0,92	0,2	0,2	0,2	0,9	0,3
0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,45
0,7	0,3	0,7	0,3	0,7	0,3	0,7	0,3	0,56637
0,75	0,25	0,75	0,25	0,75	0,25	0,75	0,25	0,7
0,82	0,2	0,8	0,1	0,8	0,1	0,8	0,2	0,56128
0,9	0,1	0,9	0,1	0,9	0,1	0,9	0,1	0,7
0,95	0,05	0,95	0,05	0,95	0,05	0,95	0,05	0,45502
0,05	0,95	1	1	0,05	0,95	0	1	0
0,17	0,8	0,8	0,9	0	0,8	08	0,8	0
0,42	0,6	0,6	0,6	0	0,6	0	0	0
1	0	0	0	1	0,1	1	1	0

Відкориговані дані були використані, як навчальні дані при моделюванні в системі комп'ютерної математики MATLAB. Для цього використовувався пакет Fuzzy Logic Toolbox. За допомогою редактора ANFIS Editor (Edit –

редактор, Adaptive Network of Fuzzy Inference of the System – адаптивна мережа системи нечіткого висновку) з використанням гібридного навчального алгоритму та використовуючи алгоритм нечіткого висновку Сугено було отримано нейро-нечітку модель коефіцієнта залишкового ресурсу асинхронного ЕД (з використанням методу субкластеризації).

Структура отриманої нейро-мережі показана на рис. 3.5.

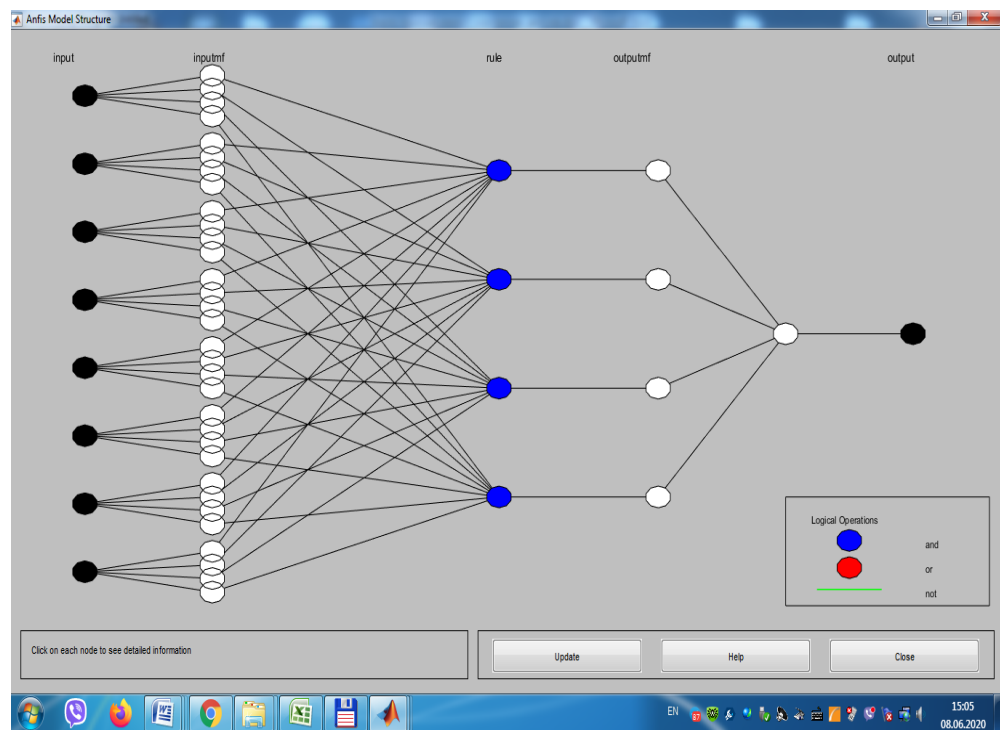


Рисунок 3.5 – Структура ANFIS - мережі ЕД.

Для кожної вхідної змінної нейро-моделі використовувались по чотири лінгвіністичних терми з гаусовими функціями належності (рис. 3.6) вираз (3.7) [10]:

$$k_{pec.il} = f(x_{il}; \sigma_{il}; c_{il}) = e^{-\frac{(x_{il} - c_{il})^2}{2 \cdot \sigma_{il}^2}}. \quad (3.7)$$

У виразі (3.7): σ_{il} та c_{il} – числові параметри, σ_{il}^2 в теорії ймовірності називається дисперсією розподілу [10], а другий параметр c_{il} – математичним сподіванням, i_l – вхідний параметр нейро-нечіткої моделі, який відповідає

діагностичному параметру, x_{i1} – значення i_1 -го вхідного параметра моделі: $x_1=k_W$, $x_2=k_R$, $x_3=k_{Cx}$, $x_4=k_{Ig(\delta)}$, $x_5=k_{T3}$, $x_6=k_{XAPF}$, $x_7=k_{P1}$, $x_8=k_{T2}$, $x_9=k_{T1}$, $x_{10}=k_{T4}$, $x_{11}=k_{P2}$.

Це такі терми, як: «нормальні» значення діагностичного параметра, «незначні відхилення» значення діагностичного параметра, «передаварійні» значення діагностичного параметру, «аварійні» значення діагностичного параметра. Для знаходження значення коефіцієнта загальнозалишкового ресурсу використовуємо нечітку нелінійну авторегресійну модель коефіцієнта загально залишкового ресурсу ЕД. Ця модель встановлює нечітке нелінійне перетворення між значеннями коефіцієнтів залишкового ресурсу по діагностичних параметрах та загальним коефіцієнтом залишкового ресурсу ЕД (3.8).

$$k_{\text{заг. зал. рес}} = F(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8) , \quad (3.8)$$

де F – нечітке функціональне перетворення.

Для визначення значення коефіцієнта загальнозалишкового ресурсу ЕД використовуємо модель логічного висновку Такагі-Сугено. В цій моделі нечіткі правила визначаються на основі заданої кількості значень «вхід-вихід» модельованого об'єкта у вигляді (3.9):

$$\text{ЯКЩО } x_1 \in A_1 \text{ ТА } x_2 \in B_2 \text{ ТА } \dots x_m \in V_m \text{ ТО } y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (3.9)$$

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

Математична модель коефіцієнта загальнозалишкового ресурсу є системою логічних рівнянь (3.10)

$$\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{ТА } k_7 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } k_8 \in \text{"нормальне"} \text{ТО} \\
k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{11} \cdot k_1 + a_{12} \cdot k_2 + a_{13} \cdot k_3 + a_{14} \cdot k_4 + a_{15} \cdot k_5 + a_{16} \cdot k_6 + a_{17} \cdot k_7 + a_{18} \cdot k_8 \\
\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{ТА } k_7 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } k_8 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТО} \\
k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{21} \cdot k_1 + a_{22} \cdot k_2 + a_{23} \cdot k_3 + a_{24} \cdot k_4 + a_{25} \cdot k_5 + a_{26} \cdot k_6 + a_{27} \cdot k_7 + a_{28} \cdot k_8 \\
\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{ТА } k_7 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } k_8 \in \text{"передаварійне"} \text{ТО} \\
k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{31} \cdot k_1 + a_{32} \cdot k_2 + a_{33} \cdot k_3 + a_{34} \cdot k_4 + a_{35} \cdot k_5 + a_{36} \cdot k_6 + a_{37} \cdot k_7 + a_{38} \cdot k_8 \\
\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{ТА } k_7 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } k_8 \in \text{"аварійне"} \text{ТО} \\
k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{41} \cdot k_1 + a_{42} \cdot k_2 + a_{43} \cdot k_3 + a_{44} \cdot k_4 + a_{45} \cdot k_5 + a_{46} \cdot k_6 + a_{47} \cdot k_7 + a_{48} \cdot k_8 \\
\dots
\end{array} \right. \quad (3.10)$$

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

$$k_{\text{заг.зал.рес}} = \sum_{j_2=1}^{m_3} w_{j_2} \left(a_{j_21} \cdot k_1 + a_{j_22} \cdot k_2 + a_{j_23} \cdot k_3 + a_{j_24} \cdot k_4 + a_{j_25} \cdot k_5 + a_{j_26} \cdot k_6 + a_{j_27} \cdot k_7 + a_{j_28} \cdot k_8 + c_{j_2} \right), \quad (3.11)$$

де $0 \leq w_{j_2} \leq 1$ – ступінь виконання (вага) j_2 -го правила, яка визначається відповідністю реальних змін діагностичних параметрів ЕД, що відображені у j_2 -му правилі (3.12):

$$\begin{aligned}
w_1 &= \frac{\Omega_1}{\xi} \\
w_2 &= \frac{\Omega_2}{\xi} \\
w_3 &= \frac{\Omega_3}{\xi} \\
w_4 &= \frac{\Omega_4}{\xi}
\end{aligned}, \quad (3.12)$$

де

$$\xi = \sum_{j=1}^{m_3} [\mu_j(k_1) \cdot \mu_j(k_2) \cdot \mu_j(k_3) \cdot \mu_j(k_4) \cdot \mu_j(k_5) \cdot \mu_j(k_6) \cdot \mu_j(k_7) \cdot \mu_j(k_8)],$$

$$\Omega 1 = \mu_{1''}(k_1) \cdot \mu_{1''}(k_2) \cdot \mu_{1''}(k_3) \cdot \mu_{1''}(k_4) \cdot \mu_{1''}(k_5) \cdot \mu_{1''}(k_6) \cdot \mu_{1''}(k_7) \cdot \mu_{1''}(k_8),$$

$$\Omega 2 = \mu_{2''}(k_1) \cdot \mu_{2''}(k_2) \cdot \mu_{2''}(k_3) \cdot \mu_{2''}(k_4) \cdot \mu_{2''}(k_5) \cdot \mu_{2''}(k_6) \cdot \mu_{2''}(k_7) \cdot \mu_{2''}(k_8),$$

$$\Omega 3 = \mu_{3''}(k_1) \cdot \mu_{3''}(k_2) \cdot \mu_{3''}(k_3) \cdot \mu_{3''}(k_4) \cdot \mu_{3''}(k_5) \cdot \mu_{3''}(k_6) \cdot \mu_{3''}(k_7) \cdot \mu_{3''}(k_8),$$

$$\Omega 4 = \mu_{4''}(k_1) \cdot \mu_{4''}(k_2) \cdot \mu_{4''}(k_3) \cdot \mu_{4''}(k_4) \cdot \mu_{4''}(k_5) \cdot \mu_{4''}(k_6) \cdot \mu_{4''}(k_7) \cdot \mu_{4''}(k_8),$$

де $\mu_j(k_1), \mu_j(k_2), \mu_j(k_3), \mu_j(k_4), \mu_j(k_5), \mu_j(k_6), \mu_j(k_7), \mu_j(k_8)$ – функції належності значень коефіцієнтів залишкового ресурсу контрольованих діагностичних параметрів до відповідної нечіткої множини значень цих параметрів відповідного правила (j_2 – номер правила, m_3 – кількість правил), $\mu_1(k_1) = \mu_{\text{нормальне}}(k_1)$, $\mu_1(k_2) = \mu_{\text{нормальне}}(k_2)$, $\mu_1(k_3) = \mu_{\text{нормальне}}(k_3)$, $\mu_1(k_4) = \mu_{\text{нормальне}}(k_4)$, $\mu_1(k_5) = \mu_{\text{нормальне}}(k_5)$, $\mu_1(k_6) = \mu_{\text{нормальне}}(k_6)$, $\mu_1(k_7) = \mu_{\text{нормальне}}(k_7)$, $\mu_1(k_8) = \mu_{\text{нормальне}}(k_8)$.

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 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6, \sigma_7, \sigma_8$ та математичне очікування $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_7, c_8$ 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 ЕД модель реалізується у вигляді адаптивної нейронечіткої багатошарової мережі прямого розповсюдження ANFIS. ANFIS являє собою найпростішу мережу прямого розповсюдження, яка містить адаптивні вузли, використовуючи правила навчання параметри цих вузлів налаштовуються так, щоб мінімізувати похибку між реальним виходом моделі $k_{\text{заг.зал.рес.мод}}$ та реальним коефіцієнтом загальнозалишкового ресурсу $k_{\text{заг.зал.рес}}$. ЕД (3.13):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{k_3=0}^{N_1-1} (k_{\text{заг.зал.рес.мод}k_3} - k_{\text{заг.зал.рес}k_3})^2} \rightarrow \min, \quad (3.13),$$

де N_l – 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 $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8$ та виходу $k_{заг.зал.рес}$ використовується для визначення параметрів висновку $a_{1,1} - a_{4,4}$ та $c_{1,1} - c_{4,4}$ методом найменших квадратів. Далі розраховується похибка ANFIS-мережі. При зворотному розрахунку методом градієнтного спуску визначаються параметри посилянь, які мінімізують середньо-квадратичну похибку моделі (3.13).

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

Призначення шарів цієї мережі. Шар 1 визначає нечіткі терми діагностичних параметрів. Кожен вузол цього шару є адаптивним з функцією належності $\mu_{A_i}(x)$, де x – вхід вузла i . A_i – лінгвістична нечітка змінна, яка асоціюється з цим вузлом.

Так $\mu_{\text{«нормальне»}1}(k_1)$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра активного опору ізоляції обмоток фаз А, В і С ЕД,

$\mu_{\text{«нормальне»}2}(k_2)$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра струму холостого ходу ЕД,

$\mu_{\text{«нормальне»}3}(k_3)$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра віброприскорення лобових поверхонь ЕД,

$\mu_{\text{«нормальне»}4}(k_4)$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра $\cos(\varphi)$ ЕД,

$\mu_{\text{«нормальне»}5}(k_5)$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра віброшвидкості на корпусі ЕД,

$\mu_{\text{«нормальне»6}} (k_6)$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра температури лобових поверхонь обмотки статора ЕД,

$\mu_{\text{«нормальне»7}} (k_7)$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра перехідного опору контактів борнів ЕД,

$\mu_{\text{«нормальне»8}} (k_8)$ – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра температури контактів борнів.

Використовуючи варіантний метод за критерієм мінімізації середньо-квадратичної похибки навчання нейро-мережі для термів вибрані (табл. Д.8) гаусові функції належності (3.7).

Таблиця 3.4 – Результати дослідження похибок нейро-моделей

Назва функції належності	Рівняння функції належності	Параметри рівняння	Похибка навчання, в.о.
1	2	3	4
trimf	(3.14)	a,b,c – довільні дійсні числа від 0 до 1, $a \leq b \leq c$	0,084
gbellmf	(3.16)	a,c – довільні дійсні числа від 0 до 1, $a < b < c$, але $b > 0$ та $b \leq 1$	0,072
gaussmf	(3.7)	σ^2 – в теорії ймовірності називається дисперсією розподілу, а другий параметр c – математичним очікуванням	0,065
pimf	(3.20)	a,b,c,d – довільні дійсні числа від 0 до 1, $a \leq b < c \leq d$	0,071

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4
Sigmf	(3.17)	a,b – довільні дійсні числа від 0 до1, a<b	0,075
smf	(3.18)	a,b – довільні дійсні числа від 0 до1, a<b	0,081
zmf	(3.19)	a,b – довільні дійсні числа від 0 до1, a<b	0,079

Функції належності описуються такими виразами:

– для «трикутної» (trimf) функції належності

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

– для «трапецеподібної» (trapmf) функції належності

$$\mu = f_{\Delta}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{a-x}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}, \quad (3.15)$$

– для «дзвоноподібної» (gbellmf) функції належності

$$\mu = f_{\Delta}(x; a, b, c) = \left\{ \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2 \cdot b}} \right\}, \quad (3.16)$$

– для «сигмоїдальної» (sigmf) функції належності

$$\mu = f_{\Delta}(x; a, b) = \left\{ \frac{1}{1 + e^{-a(x-b)}} \right\}, \quad (3.17)$$

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

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

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

$$\mu = f_z(x; a, b) = \left\{ \begin{array}{ll} 1, & x \leq a \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \cdot \left(\frac{b-x}{b-a} \right)^2, & \frac{a+b}{2} < x < b \\ 0, & b \leq x \end{array} \right\}, \quad (3.19)$$

– для «rimf» функція належності

$$\mu = f_{\Pi}(x; a, b, c, d) = f_s(x; a, b) \cdot f_z(x; c, d). \quad (3.20)$$

Шар 2. Визначає посилення нечітких правил. Кожен вузол даного шару не адаптивний, виконує нечітку логічну операцію ТА на параметрах посилення кожного правила та посилає інформаційний сигнал далі. Вихід цього вузла – вага правила W_{j_2} , яка визначається як добуток значень функцій належності коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів за виразом (3.21):

$$W_{j_2} = \prod_{i_2=1}^{m_4} \mu_{j_2, i_2}(k_{i_2}), \quad (3.21)$$

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

Так $i_2 = 1$ відповідає параметру k_1 – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру активного опору ізоляції обмоток фаз А, В і С ЕД; $i_2 = 2$ відповідає параметру k_2 – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру струму холостого ходу ЕД; $i_2 = 3$ відповідає параметру k_3 – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру віброприскорення лобових поверхонь ЕД; $i_2 = 4$ відповідає параметру k_4 – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру $\cos(\varphi)$ ЕД; $i_2 = 5$ відповідає параметру k_5 – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру віброшвидкості на корпусі ЕД; $i_2 = 6$ відповідає параметру k_6 – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру температури лобових поверхонь обмотки статора ЕД; $i_2 = 7$ відповідає параметру k_7 – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру перехідного опору контактів борнів ЕД; $i_2 = 8$ відповідає параметру k_8 – коефіцієнту залишкового ресурсу по діагностичному параметру температури контактів борнів.

Тоді: для правила з порядковим номером j_2 ваговий коефіцієнт знаходиться за виразом (3.22):

$$w_{j_2} = \mu_{j_2}(k_{j_2,w}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,R}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,Cx}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,tg(\delta)}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,T3}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,XAPГ}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,P1}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,T2}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,T1}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,T4}) \cdot \mu_{j_2}(k_{j_2,P2}), \quad (3.22)$$

де $j_2 = 1, 2, 3, 4$.

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

Шар 3. Не адаптивні вузли цього шару обчислюють нормалізовану вагу правил (3.23):

$$\bar{w}_{j_2} = \frac{w_{j_2}}{\sum_{j_2=1}^{m^3} w_{j_2}}, \quad (3.23)$$

де $j_2 = 1, 2, 3, 4$.

Шар 4. Адаптивні вузли цього шару обчислюють $k_{заг.зал.рес \text{ ЕД}}$ (3.24) відповідно до кожного з правил (висновок кожного правила):

$$k_{заг.зал.рес, j_2} = \left(\sum_{i_2=1}^{m^4} a_{j_2, i_2} \cdot k_{i_2} \right) + c_{j_2}, \quad (3.24)$$

тому для j_2 -го правила

$$k_{заг.зал.рес, j_2} = \left[a_{j_2,1} \cdot k_{1,j_2} + a_{j_2,2} \cdot k_{2,j_2} + a_{j_2,3} \cdot k_{3,j_2} + a_{j_2,4} \cdot k_{4,j_2} + a_{j_2,5} \cdot k_{5,j_2} + a_{j_2,6} \cdot k_{6,j_2} + a_{j_2,7} \cdot k_{7,j_2} + a_{j_2,8} \cdot k_{8,j_2} \right],$$

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

Шар 5. Неадаптивний ЕДзол цього шару є суматором (3.25):

$$k_{заг.зал.рес} = \sum_{j2=1}^{m3} (\bar{w}_{j2} \cdot k_{заг.зал.рес,j2}) \quad (3.25)$$

якщо в (3.24) підставити (3.22), то $k_{заг.зал.рес}$ знаходиться за виразом (3.26):

$$k_{заг.зал.рес} = \frac{\sum_{j2=1}^{m3} (w_{j2} \cdot k_{заг.зал.рес,j2})}{\sum_{j2=1}^{m3} w_{j2}} \quad (3.26)$$

З метою зменшення часу на навчання нейро-нечіткої моделі в системі комп'ютерної математики MATLAB [10] використовуємо метод субкластеризації. Субкластеризація – це об'єднання об'єктів у групи на основі однаковості ознак для об'єктів однієї групи та неоднаковості ознак між групами. Більшість алгоритмів кластеризації не ґрунтуються на традиційних для статистичних методів припущеннях. Вони можуть використовуватись в умовах майже повної відсутності інформації про закони розподілу даних. Кластеризацію використовують для об'єктів з кількісними (числовими), якісними або змішаними ознаками.

Початковою інформацією для кластеризації є матриця спостережень, кожен рядок якої являє собою значення n ознак одного з M кластерів. Задача кластеризації полягає в розбитті об'єктів на декілька підмножин (кластерів), в яких об'єкти більш схожі між собою, ніж з об'єктами з інших кластерів. В матричному просторі «однаковість» зазвичай визначають через відстань. Відстань може розраховуватись як між початковими об'єктами (рядками матриці), так і від цих об'єктів до прототипу кластерів.

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

першого кластера для того, щоб центром одного з кластерів була призначена точка, яка розглядається (Accept radio) – 0,5; коефіцієнт, який встановлює, у скільки разів потенціал даної точки має бути меншим за потенціал центра першого кластера, щоб ця точка була виключена з можливих центрів кластерів (Reject radio) – 0,15.

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

Тому, наприклад, при подальшому моделюванні для коефіцієнта залишкового ресурсу k_l діагностичного параметра активного опору ізоляції обмоток фаз А, В і С ЕД для першого правила значення гаусової функції належності було взято такі значення параметрів: $\delta_l = 0,1823$ в.о., $C_l = 0,5009$ в.о.

Відповідно до виразу (3.11) було введено такі параметри рівнянь висновків правил (табл.3.5).

Таблиця 3.5 – Параметри висновків правил нейро-нечіткої моделі ЕД

Номер правила, j_2	Параметри рівняння висновку								
	$a_{j_2,1}$	$a_{j_2,2}$	$a_{j_2,3}$	$a_{j_2,4}$	$a_{j_2,5}$	$a_{j_2,6}$	$a_{j_2,7}$	$a_{j_2,8}$	c_{j_2}
l	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.2172	0.04879	0.131	0.1142	0.2946	0.06287	0.05896	0.1151	-0.03741
2	-27.15	7.036	5.872	7.036	-5.923	11.83	0.03566	0.7937	1.474

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	54.5	-6.146	2.386	-2.329	-45.43	45.52	40	6.662	-46.68
4	0.3998	2.974	-0.3061	0.353	54.25	-52.65	9.765	-6.547	-3.368

З урахуванням проведених ітераційних обчислювальних експериментів визначено вектор параметрів функцій належності (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Параметри функції належності

Діагностичні параметри	Вхідні параметри моделі	Назва терму (нечіткої множини значень вхідних параметрів)	Номер правила	Параметри функцій належності	
				δ	C
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
R_{i3}	k_1	нормальні	1	0.1766	0.8002
		незначні відхилення	2	0.177	0.801
		передаварійні	3	0.1823	0.5009
		аварійні	4	0.1824	0.203
I_{xx}	K_2	нормальні	1	0.1736	0.8
		незначні відхилення	2	0.1766	0.8002
		передаварійні	3	0.1823	0.501
		аварійні	4	0.1774	0.2016
a_{lm}	k_3	нормальні	1	0.1769	0.8001
		незначні відхилення	2	0.1770	0.8002
		передаварійні	3	0.1823	0.5011
		аварійні	4	0.1778	0.2022

Продовження табл. 3.6

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>cos(φ)</i>	<i>k₄</i>	нормальні	1	0.1744	0.798
		незначні відхилення	2	0.1769	0.8001
		передаварійні	3	0.1825	0.502
		аварійні	4	0.1767	0.2013
<i>v_{корп}</i>	<i>k₅</i>	нормальні	1	0.1693	0.8007
		незначні відхилення	2	0.1823	0.5019
		передаварійні	3	0.178	0.3508
		аварійні	4	0.1838	0.202
<i>T_{лп}</i>	<i>k₆</i>	нормальні	1	0.1778	0.8015
		незначні відхилення	2	0.1778	0.8015
		передаварійні	3	0.1823	0.5018
		аварійні	4	0.1833	0.2018
<i>R_{пр.б}</i>	<i>k₇</i>	нормальні	1	0.1666	0.8048
		незначні відхилення	2	0.17	0.8005
		передаварійні	3	0.501	0.501
		аварійні	4	0.1776	0.2001
<i>T_{пр.б}</i>	<i>k₈</i>	нормальні	1	0.1724	0.7998
		незначні відхилення	2	0.1823	0.5024
		передаварійні	3	0.1422	0.188
		аварійні	4	0.1844	0.2021

З урахуванням даних табл. 3.5 та 3.6, виразу (3.11) отримуємо математичну модель коефіцієнта загально залишкового ресурсу ЕД у вигляді (3.27)

$$\begin{aligned}
 & \text{ЯКЩО } k_1 \text{ "нормальне" } \text{ТА } k_2 \text{ "нормальне" } \text{ТА } k_3 \text{ "нормальне" } \text{ТА } k_4 \text{ "нормальне" } \\
 & \text{ТА } k_5 \text{ "нормальне" } \text{ТА } k_6 \text{ "нормальне" } \text{ТА } k_7 \text{ "нормальне" } \text{ТА } k_8 \text{ "нормальне" } \text{ТО} \\
 k_{\text{заг.зал.рес}} &= 0,2172k_1 + 0,04879k_2 + 0,131k_3 + 0,1142k_4 + 0,2946k_5 + 0,06287k_6 + 0,05896k_7 + \\
 & + 0,1151k_8 - 0,03741 \\
 & \text{ЯКЩО } k_1 \text{ "незначне відхилення" } \text{ТА } k_2 \text{ "незначне відхилення" } \text{ТА } k_3 \text{ "незначне відхилення" } \\
 & \text{ТА } k_4 \text{ "незначне відхилення" } \text{ТА } k_5 \text{ "незначне відхилення" } \text{ТА } k_6 \text{ "незначне відхилення" } \\
 & \text{ТА } k_7 \text{ "незначне відхилення" } \text{ТА } k_8 \text{ "незначне відхилення" } \text{ТО} \\
 k_{\text{заг.зал.рес}} &= -27,15k_1 + 7,036k_2 + 5,872k_3 + 7,036k_4 - 5,923k_5 + 11,83k_6 + 0,03566k_7 + \\
 & + 1,474k_8 + 1,474 \tag{3.27} \\
 & \text{ЯКЩО } k_1 \text{ "передаварійне" } \text{ТА } k_2 \text{ "передаварійне" } \text{ТА } k_3 \text{ "передаварійне" } \text{ТА } \\
 & k_4 \text{ "передаварійне" } \text{ТА } k_5 \text{ "передаварійне" } \text{ТА } k_6 \text{ "передаварійне" } \\
 & \text{ТА } k_7 \text{ "передаварійне" } \text{ТА } k_8 \text{ "передаварійне" } \text{ТО} \\
 k_{\text{заг.зал.рес}} &= 54,5k_1 - 6,146k_2 + 2,386k_3 - 2,329k_4 - 45,43k_5 + 45,52k_6 + 40k_7 + \\
 & + 6,662k_8 - 46,68 \\
 & \text{ЯКЩО } k_1 \text{ "аварійне" } \text{ТА } k_2 \text{ "аварійне" } \text{ТА } k_3 \text{ "аварійне" } \text{ТА } k_4 \text{ "аварійне" } \\
 & \text{ТА } k_5 \text{ "аварійне" } \text{ТА } k_6 \text{ "аварійне" } \text{ТА } k_7 \text{ "аварійне" } \text{ТА } k_8 \text{ "аварійне" } \text{ТО} \\
 k_{\text{заг.зал.рес}} &= 0,3998k_1 + 2,974k_2 - 0,3061k_3 + 0,53k_4 + 54,25k_5 - 52,65k_6 + 9,765k_7 + \\
 & - 6,547k_8 - 6,547 \\
 & \dots
 \end{aligned}$$

На рис. 3.6 показано фрагмент віконної заставки редактора адаптивної мережі системи нечіткого висновку (ANFIS Editor) пакету Fuzzy Logic Toolbox системи комп'ютерної математики MATLAB. Ця мережа має одинадцять входів, один вихід та передбачає використання алгоритму нечіткого висновку Сугено.

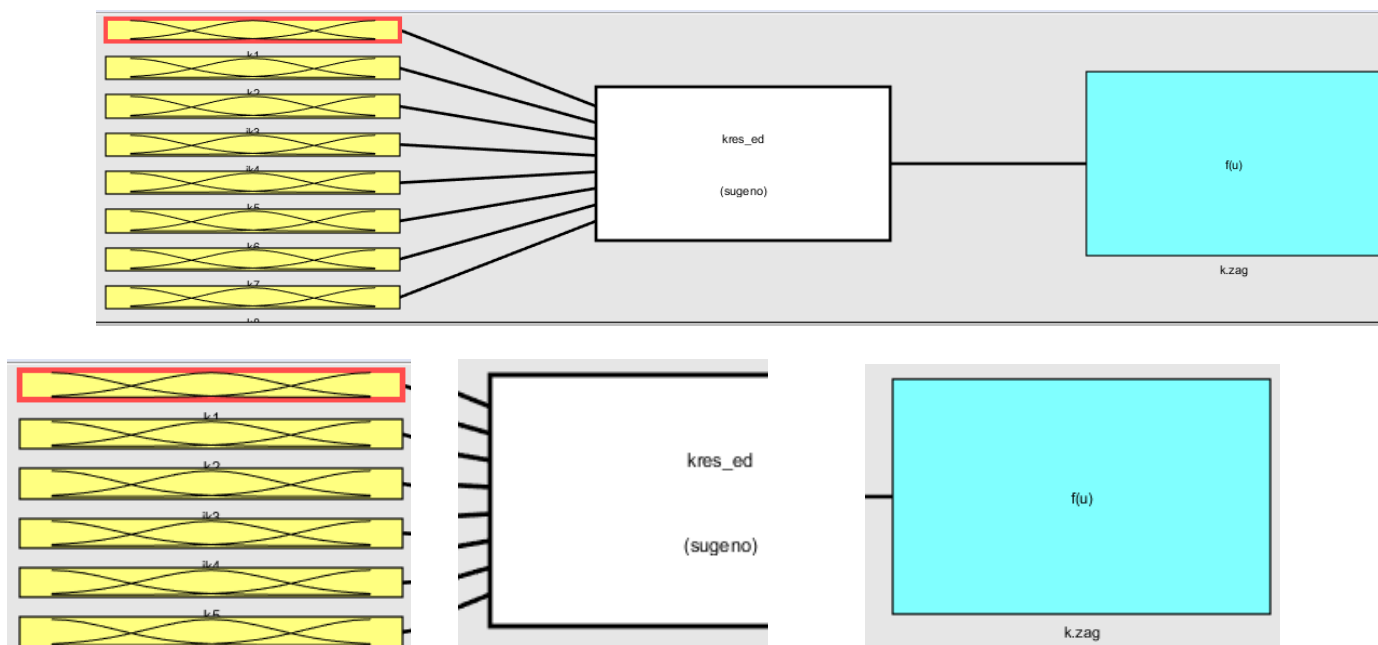


Рисунок 3.6 – Фрагмент віконної заставки редактора ANFIS.

На рис. 3.7 показано екранну заставку системи комп'ютерної математики MATLAB підчас формування структури нейро-нечіткої моделі ЕД.

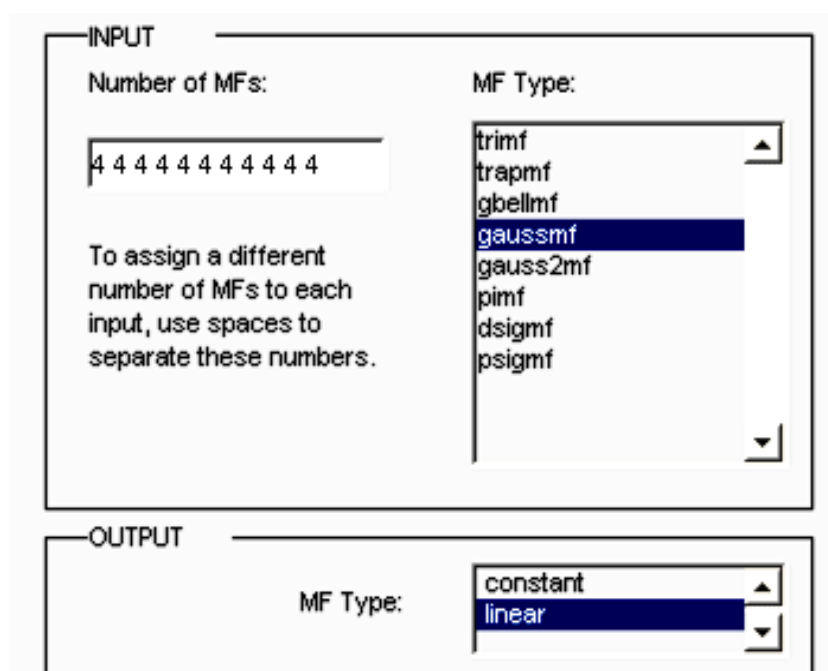


Рисунок 3.7 – Формування структури нейро-нечіткої моделі ЕД

З рис. 3.6 видно, що під час формування структури нейро-нечіткої моделі ЕД було задано вісім входів та один вихід цієї моделі. Кожен з восьми входів має по чотири терми. Тобто кожна множина можливих значень вхідних параметрів моделі умовно поділена на чотири підмножини: «нормальні» значення вхідного параметра, «незначні відхилення» значення вхідного параметра, «передаварійні» значення вхідного параметра, «аварійні» значення вхідного параметра. Ступінь належності кожного значення вхідного параметра до відповідної цьому параметру множини значень визначається гаусовою функцією належності. Модель призначена для знаходження числового значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу ЕД, тому має один вихід. Це числове значення знаходиться шляхом рішення лінійного рівняння, яке описує залежність коефіцієнта загального залишкового ресурсу ЕД від вхідних параметрів.

З таблиці 3.8 вводимо параметри функцій належності (рис. 3.7).

На рис. 3.7 показано, що ступінь належності значення коефіцієнта k_w залишкового ресурсу за параметром «вміст вологи W в трансформаторному маслі ЕД» до підмножини «аварійні» значення визначається рівнянням гаусової функції

$$\mu(k_w) = f(k_w, \sigma, c) \quad (3.14)$$

з параметрами $\sigma = 0,176$ в.о. та $c = 0,5$ в.о., $k_w \in 0,1$ в.о. та $\mu(k_w) \in 0,1$ в.о.



Рисунок 3.7 – Введення параметрів функції належності

З таблиці 3.7 вводимо параметри рівнянь висновків правил (рис. Д.8), які дозволяють обчислити коефіцієнт загального залишкового ресурсу ЕД.

На рис. 3.8 показано: діапазон можливих значень коефіцієнта загального залишкового ресурсу ЕД $k_{zag.pec} = 0 \div 1$ в.о., параметри рівняння висновку першого правила: [0.1955 0.07457 0.09484 0.08466 0.2746 0.09931 0.09763 0.09799 - 0.02827].

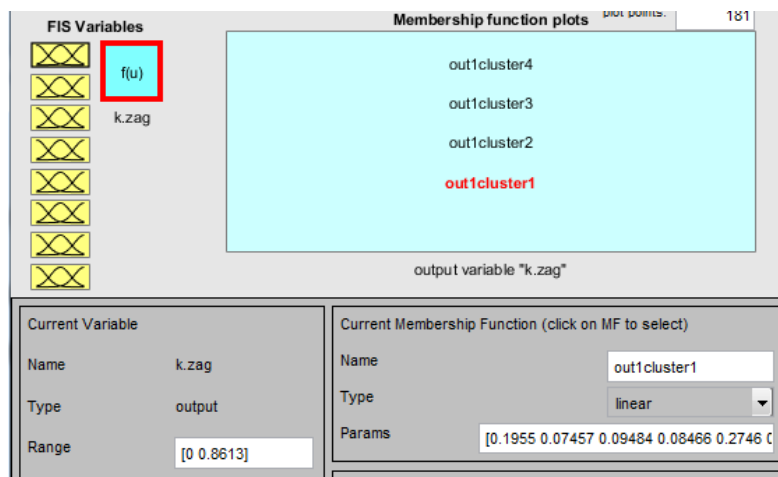


Рисунок 3.8 – Виведення параметрів рівняння висновку правила
Відповідно до табл. 3.8 з файлу з розширенням .dat вводимо вибірку навчальних даних (рис. 3.9).

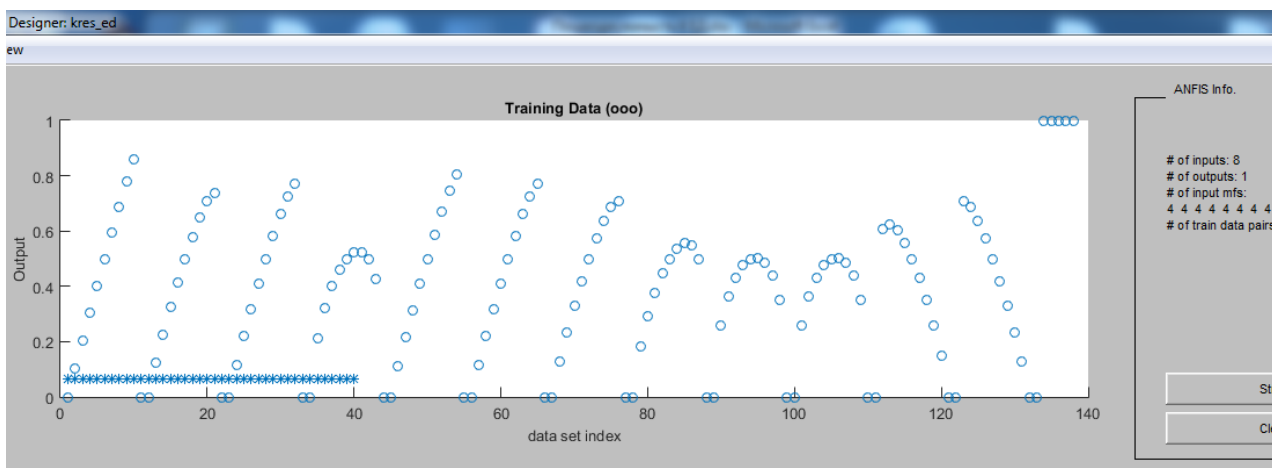
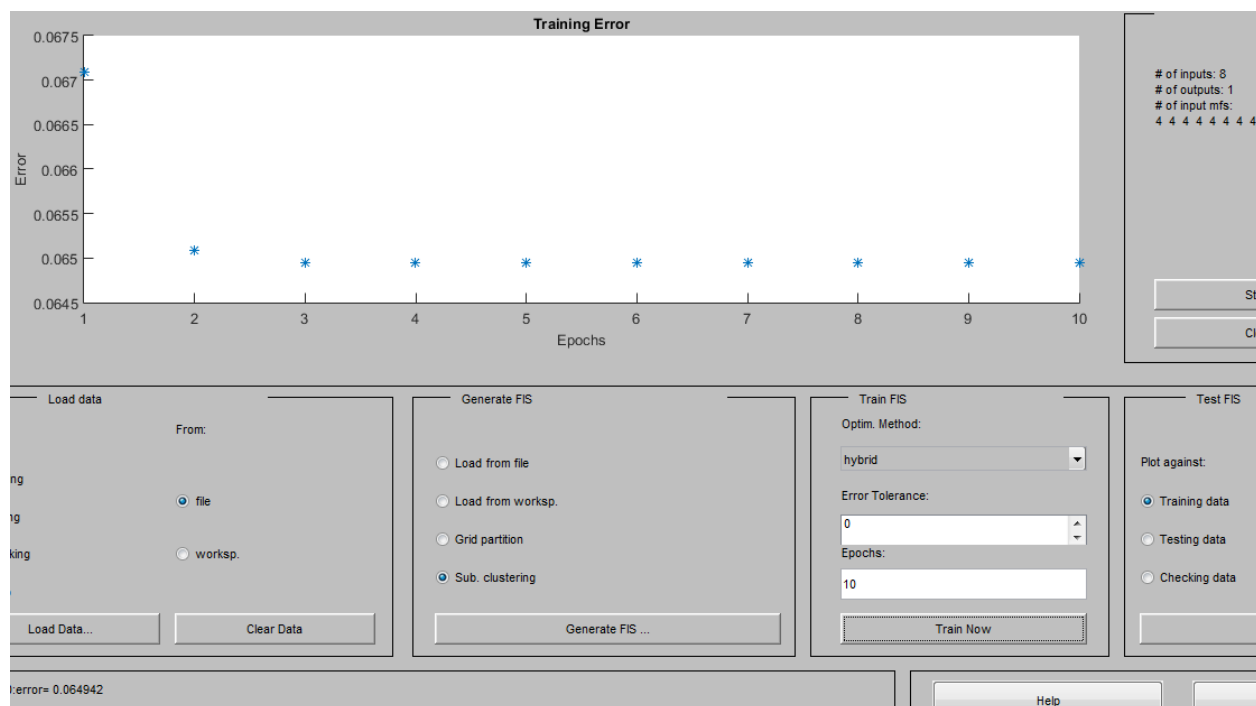


Рисунок 3.9 – Введення вибірки навчальних даних з файлу
Далі навчаємо модель. Навчання передбачає 30 епох. Результати навчання показані на рис. 3.10.



t:error= 0.064942

Рисунок 3.10 – Навчання моделі ЕД

Ознакою припинення навчання є незмінність середньоквадратичної похибки навчання. На рис. 3.10 показано, що середньоквадратична похибка навчання, яке тривало 10 епох, дорівнює 0,0649 в.о.

Отримана нейро-нечітка модель дозволяє визначити значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу ЕД 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 тоді коефіцієнт загального залишкового ресурсу дорівнює 0,49 в.о. з похибкою 2% (рис. 3.11), якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 1 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу (з похибкою 0%) дорівнює 1,0 в.о. (рис. 3.12), якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 0 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу (з похибкою 3,62 %) дорівнює 0 в.о. (рис. 3.13).

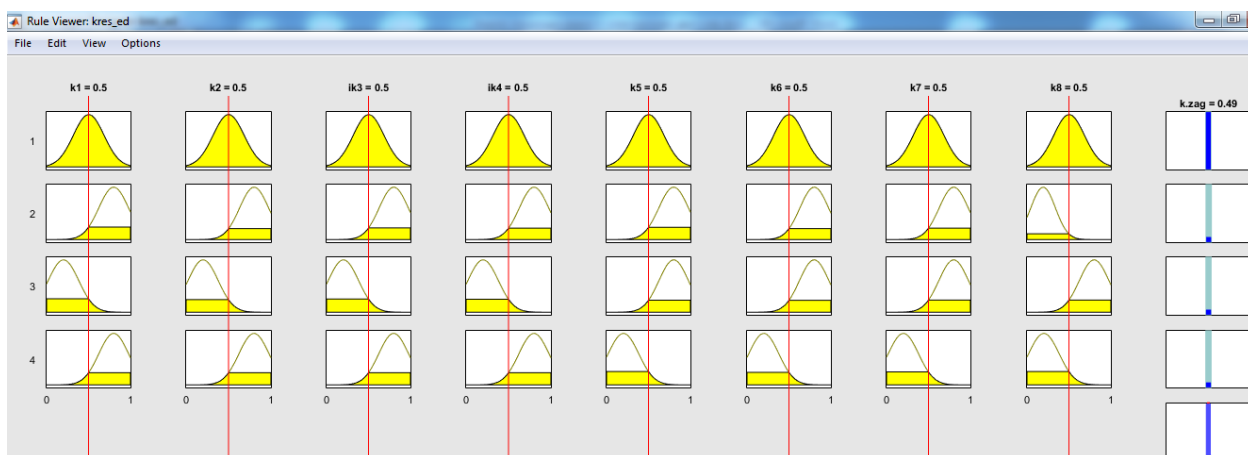


Рисунок 3.11 – Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД при значеннях всіх вхідних параметрів 0.49 в.о

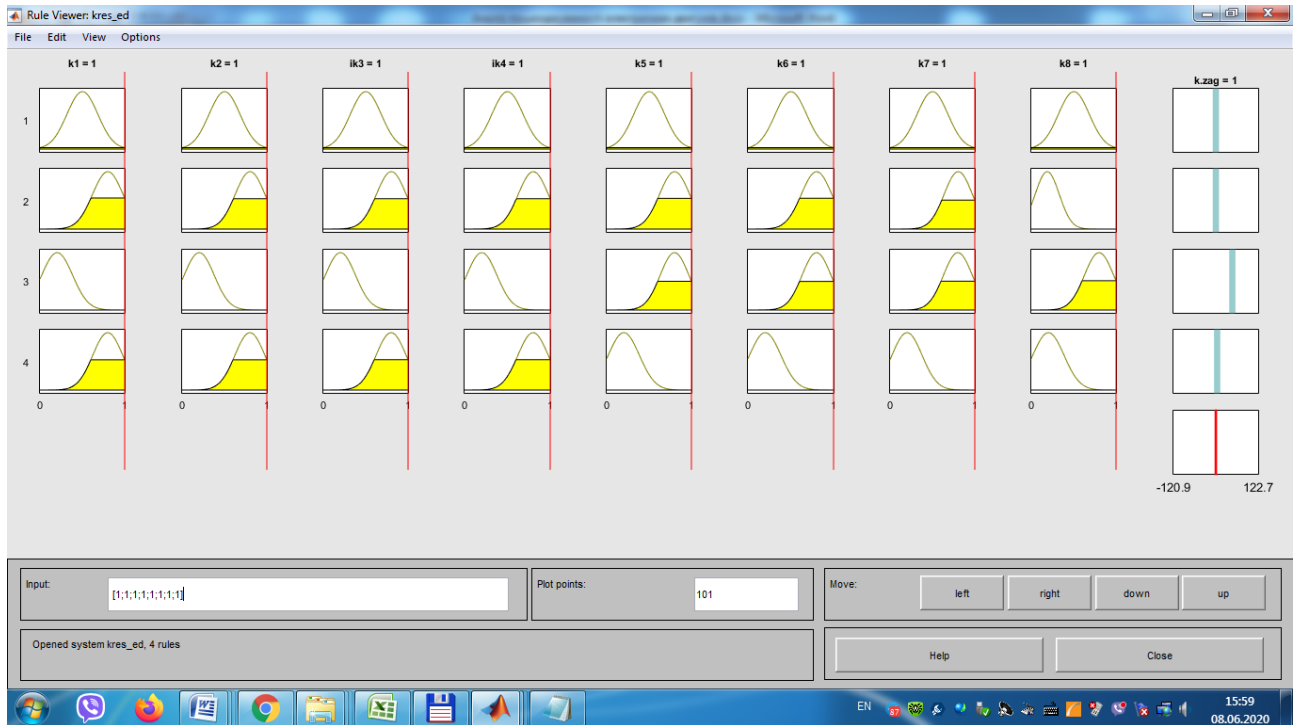


Рисунок 3.12 – Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД при значеннях всіх вхідних параметрів 1 в.о



Рисунок 3.13 – Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД при значеннях всіх вхідних параметрів 0 в.о

Складність залежностей вихідного параметра розробленої моделі від сукупності вхідних параметрів підтверджують графіки поверхонь цих залежностей, які показані на рис. 3.14 - 3.19.

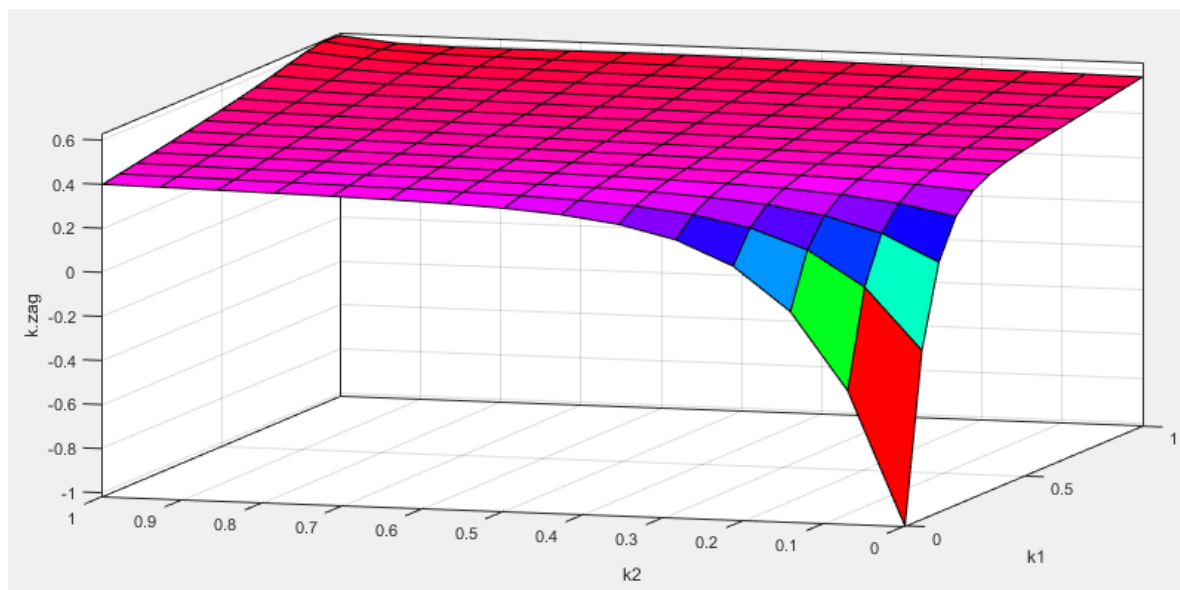


Рисунок 3.14 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД від k_1 та k_2 .

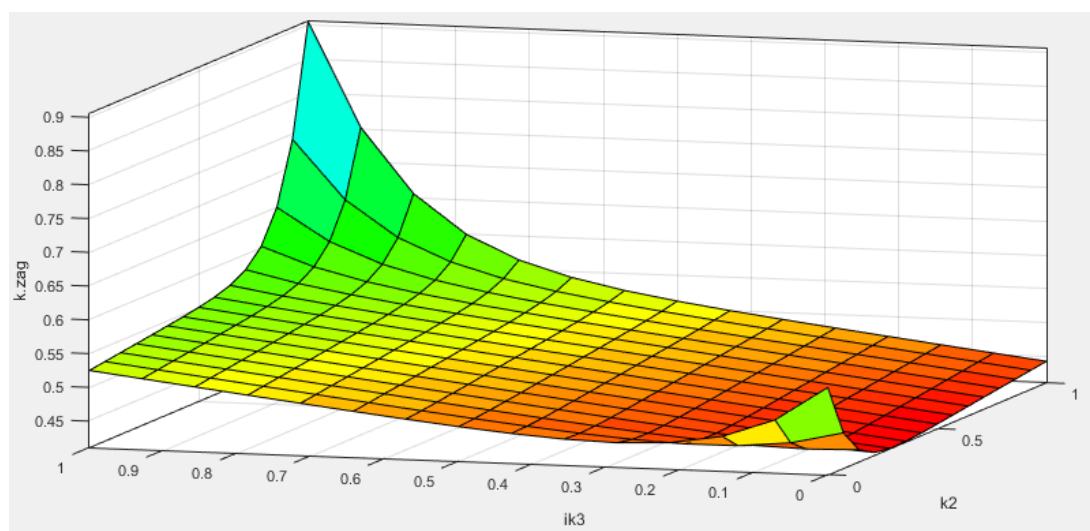


Рисунок 3.15 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД від k_2 та k_3 .

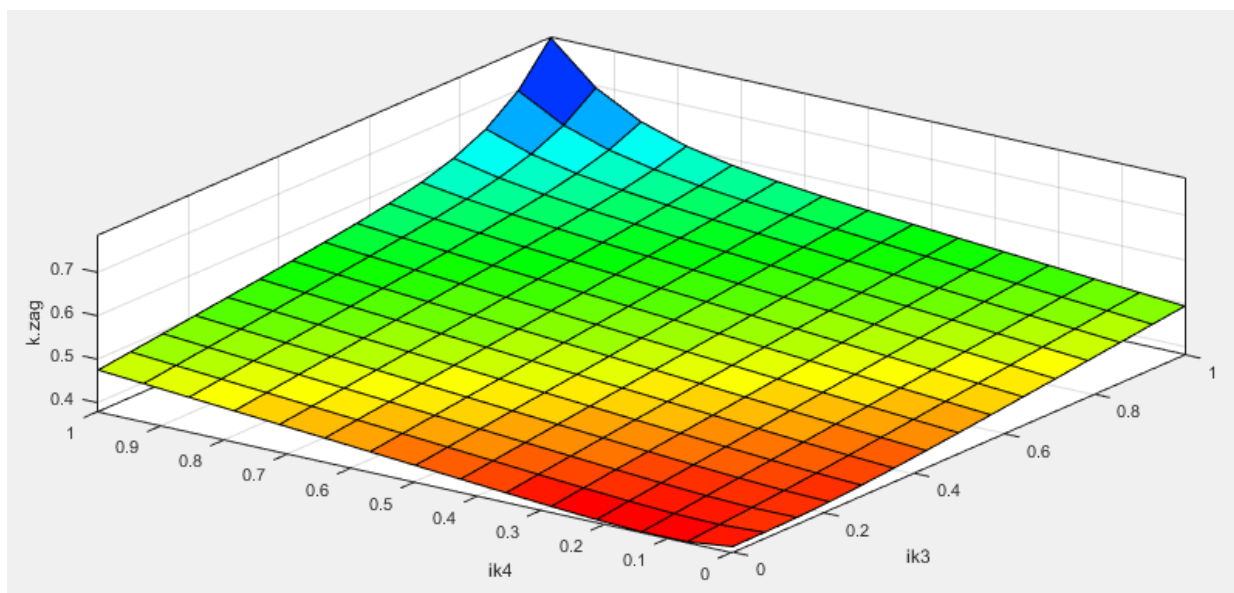


Рисунок 3.16 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД від k_3 та k_4 .

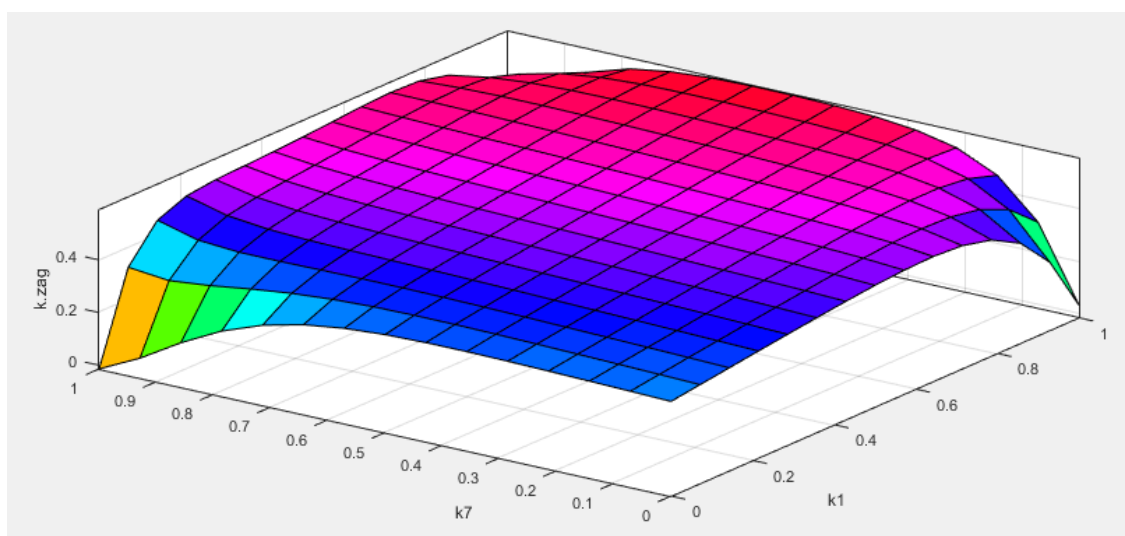


Рисунок 3.17 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД від k_1 та k_7 .

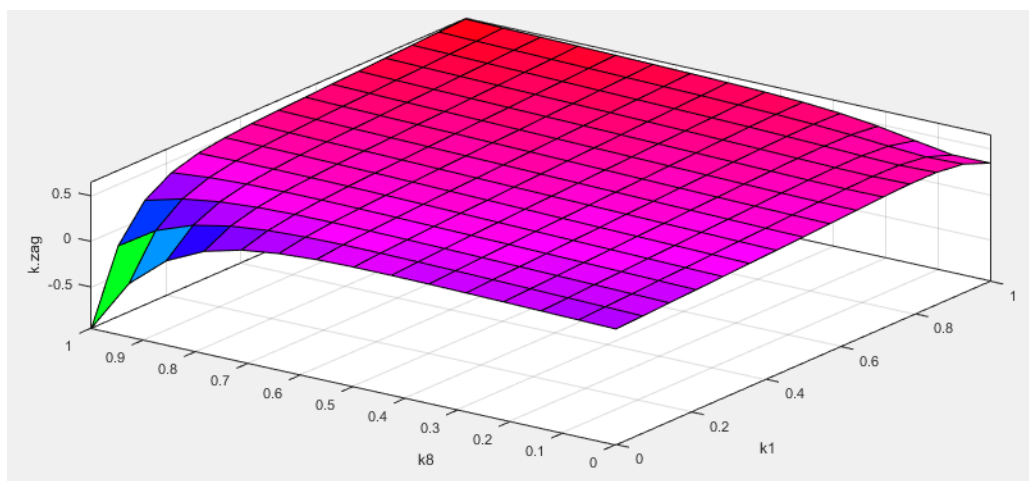


Рисунок 3.18 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД від k_1 та k_8 .

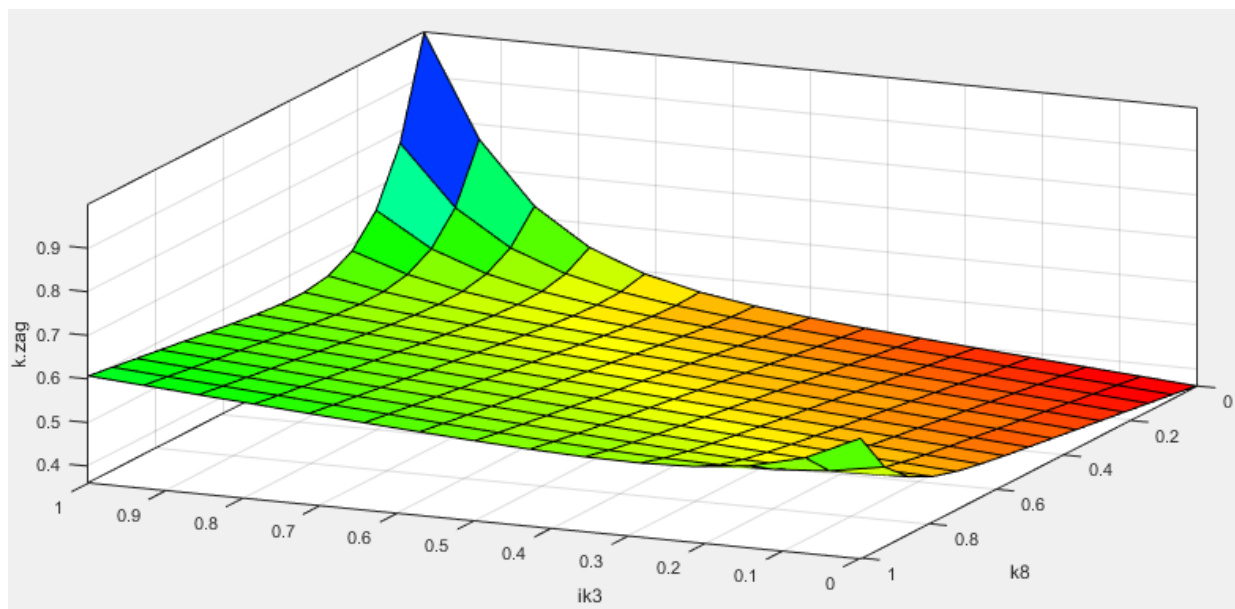


Рисунок 3.19 – Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД від k_3 та k_8 .

Незважаючи на складність залежностей, які показані на рис. 3.14 - 3.19 математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД (3.27) може бути використана для програмування нечіткого контролера з метою створення

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

Висновки до третього розділу

Розроблені математична та комп'ютерна моделі по визначенню коефіцієнта залишкового ресурсу електричного двигуна можуть бути застосовані під час поточного визначення часу виведення ЕД з експлуатації для ремонту або для утилізації;

4. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ

4.1. Вимоги до діагностування електричних двигунів

Електродвигуни змінного струму підлягають вимірюванням під час прийнятно-здавальних випробувань, під час капітального ремонту, під час поточного ремонту.

Для визначення необхідності сушіння ізоляції обмоток електродвигунів слід керуватися нормативними документами.

Вимірювання опору ізоляції виконують мегаомметром. Випробування ізоляції обмотки статора підвищеною випрямленою напругою з вимірюванням струму витoku по фазах проводять в електродвигунах потужністю більше 5000 кВт для визначення можливості їх увімкнення без сушіння.

Значення випробної напруги підвищеної напруги промислової частоти приймають згідно з нормативними документами. Тривалість подання випробної напруги – 1 хв.

Вимірювання зазорів між сталлю ротора і статора проводять, якщо дозволяє конструкція електродвигуна. При цьому в електродвигунах потужністю 100 кВт і більше, в усіх електродвигунах відповідальних механізмів, а також в електродвигунах з виносними підшипниками і підшипниками ковзання значення повітряних зазорів у місцях, розміщених по обводу ротора і зсунутих один відносно одного під кутом 90° або в точках, спеціально передбачених під час виготовлення електродвигуна, не повинні відрізнятись більше ніж на 1 0% від середнього значення зазору.

Вимірювання зазорів підшипника ковзання проводять відповідно до вказівок підприємства-виробника.

Вимірювання опору обмоток постійному струму проводять в холодному стані машини.

Вимірювання діагностичних параметрів обмоток статора та ротора провадять в електродвигунах на напругу 3 кВ і вище і в електродвигунах потужністю 300 кВт і більше.

Вимірювання опору постійному струму обмотки ротора провадять в синхронних електродвигунах і в електродвигунах з фазним ротором.

Значення опорів різних фаз обмотки не повинні відрізнятися один від одного або від попередніх вимірювань, а також від заводських даних більше ніж на 2 %.

У реостатах і резисторах, установлених на електродвигунах на напругу 3 кВ і вище, опір обмоток вимірюють на усіх відгалуженнях, у решти електродвигунів вимірюють загальний опір реостатів і резисторів та перевіряють цілісність відпайок.

Значення опорів не повинні відрізнятися від паспортних, проектних значень або попередніх вимірювань більше ніж на 10 %.

Гідравлічне випробування повітроохолодника провадять надмірним тиском від 0,2 МПа до 0,25 МПа (2 - 2,25 кгс/см²) протягом від 5 хв до 10 хв, якщо відсутні інші вказівки заводу-виробника.

Перевірку роботи електродвигуна на неробочому ході або з ненавантаженим механізмом провадять в електродвигунах на напругу 3 кВ і вище, потужністю 100 кВт і більше. Значення струму неробочого ходу (НХ) для електродвигунів, які вводяться в роботу, не нормується. Значення струму НХ після капітального ремонту електродвигуна не повинне відрізнятися більше ніж на 10% від значення струму, виміряного перед ремонтом. Тривалість безперервної роботи електродвигуна неробочому ході (НХ) — не менше 1 год.

Вимірювання вібрації підшипників ЕД провадять в електродвигунах на напругу 3 кВ і вище, а також в усіх електродвигунах відповідальних механізмів.

Допустиме значення вібрації на кожному підшипнику електродвигуна не повинне перевищувати таких значень (якщо заводськими інструкціями не передбачені більш жорсткі норми):

— синхронна частота обертання, об/хв — 3000, 1500, 1000, 750 і нижче;

— вібрація підшипників, мкм — 30, 60, 80 і 95 відповідно.

Вимірювання розбігу ротора в осьовому напрямку провадять в електродвигунах, які мають підшипники ковзання.

Осьовий розбіг не повинен перевищувати значення від 2 мм до 4 мм. Розбіг ротора перевіряють під час капітального ремонту в електродвигунах відповідальних механізмів або у випадку виймання ротора.

Перевірку роботи електродвигуна під навантаженням провадять під навантаженням, яке забезпечене технологічним обладнанням до моменту здавання в експлуатацію, але не меншим ніж 50 % номінального.

Перевірку справності стрижнів короткозамкнутих роторів провадять до асинхронних електродвигунах потужністю 100 кВт і більше під час капітального ремонту з вийманням ротора.

Випробування збудників провадять в синхронних електродвигунах

4.2 Діагностика асинхронних двигунів на етапах виробництва, експлуатації та ремонту

Вибір стратегії та методів діагностування асинхронних двигунів визначається цілою низкою чинників. Першорядне значення має кінцева мета діагностування, яка залежить від того, на якому етапі життєвого циклу визначається технічний стан двигуна: на етапі виготовлення, експлуатації або ремонту.

На етапі виготовлення важливо забезпечити оптимальне проектування, орієнтуючись на забезпечення надійності та довговічності, а також контроль якості виготовлення деталей і їх монтажу. Основні види несправностей в умовах серійного виробництва: кінематичні помилки виготовлення деталей, вихід параметрів за допустимі межі по точності та дефекти збірки, до яких відносяться невірноваженість, наявність різного роду перекосів, зазорів, відносні зміщення взаємодіючих деталей, недотримання технології змащування і т.п. На етапі експлуатації внаслідок природного процесу старіння

елементів з часом відбувається зміна параметрів двигунів, що приводить до несправностей та пошкоджень.

За швидкістю розвитку експлуатаційні дефекти ділять на дві категорії: ті що швидко розвиваються (викликають раптові відмови), та ті що повільно розвиваються. До 1-ї категорії відносяться важкопрогнозовані відмови, які є наслідком виробничих технологічних дефектів або руйнуванням під дією миттєво виникаючого навантаження, що перевищує межу міцності елементів. До 2-ї категорії відносяться пошкодження, виникнення та розвиток яких може бути спрогнозовано.

При правильній організації експлуатації асинхронних двигунів вид пошкодження і обсяг ремонту можна визначити заздалегідь, до настання критичного стану механізму. Діагностика на етапі ремонтних робіт зводиться до післяремонтного контролю технічного стану. В програму діагностування необхідно включати і передремонтну оцінку технічного стану обладнання [11-14].

У електродвигунів після ремонту з розбиранням і заміною деталей надійність роботи часто знижується. Під час ремонту проблематично виявити приховані дефекти, такі, наприклад, як дефекти стрижнів короткозамкнутого ротора або пошкодження ізоляції обмотки статора [12].

На сьогодні актуально проводити діагностику стану асинхронних електродвигунів в процесі його роботи. Виявлення дефектів в працюючому електродвигуні на ранній стадії розвитку дозволить попередити раптову зупинку обладнання внаслідок аварії, знизити витрати на ремонт електродвигуна і збільшити термін його служби.

4.3 Аналіз тестової та функціональної діагностики асинхронних двигунів

Сучасні системи та методи діагностики асинхронних двигунів можна розділити на дві групи. До 1-ї групи належать методи тестової діагностики. Це

вимірювання опору ізоляції, струмів витоку, внутрішнього опору обмоток, тангенса кута діелектричних втрат обмоток, метод високовольтного імпульсу та ін. Тестове діагностування – основний вид виявлення дефектів електродвигунів у вітчизняній енергетиці. Тестова діагностика визначає структуру технічного обслуговування і ремонту по регламенту. Така діагностика сприяє не тільки попередженню розвитку різних дефектів, але і їх появі. Наприклад, при проведенні планових ремонтів електричних машин після повного збирання двигун випробовують підвищеною напругою, що погано впливає на ізоляцію двигуна. Таке випробовування викликає появу в обмотці мікродефектів, що розвиваються в процесі роботи електродвигуна під впливом неякісної електроенергії, перевантажень, частих пусків і зупинок. З кожним високовольтним випробуванням при планово попереджувальних ремонтах число дефектів збільшується. Це в кінцевому підсумку призводить до аварійного виходу з ладу електричного двигуна. При кожному розбиранні та збиранні електродвигуна мікродефекти збільшуються.

В даний час розроблені багатофункціональні системи діагностики ізоляції асинхронних двигунів за допомогою високовольтного імпульсного випробування. Розробники даних систем стверджують, що тест не призводить до руйнування ізоляції, пояснюючи це своєчасною зупинкою тесту. Однак тест припиняється тільки після перевищення меж міцності ізоляції. До недоліків тестової діагностики можна віднести також тимчасову призупинку роботи електродвигуна, відсутність можливості захисного відключення обладнання під час його роботи для запобігання повного виходу його з ладу, відсутність контролю ненормальних режимів роботи даного обладнання і т.д.

Друга група включає в себе методи функціональної діагностики. Вони економічно вигідні, тому що не вимагають тимчасового виведення електрообладнання з експлуатації. Для підготовки до ремонту необхідно виявити всі дефекти, що впливають на ресурс, задовго до відмови. У зв'язку з цим необхідно застосування методів діагностики, не тільки таких, що

відносяться до категорії функціональних, але і дозволяють виявити дефект конкретної частині електродвигуна [13].

Порівняльний аналіз методів обслуговування обладнання роторного типу показав, що при планово-попереджувальних ремонтах та випробуваннях не менше 50% робіт виконується без фактичної їх необхідності. При цьому частота виходу такого обладнання з ладу не зменшується. Надійність роботи після обслуговування з розбиранням і заміною деталей часто знижується. Близько 70% дефектів викликано проведенням робіт з обслуговування. При обслуговуванні по фактичному стану персонал має об'єктивні дані про поточний технічний стан обладнання. Не порушується нормальна робота механізму через необґрунтоване втручання людини [15,16-19].

4.4 Методи діагностики електричних двигунів

В даний час відомі наступні методи діагностики асинхронних двигунів:

- методи, що базуються на аналізі вібрацій окремих елементів обладнання;
- методи на аналізі акустичних коливань, що виникають під час роботи;
- методи, що працюють на вимірюванні та аналізі магнітного потоку в зазорі двигуна та зовнішнього магнітного поля;
- методи на основі вимірювання та аналізу температури окремих елементів машини;
- діагностики механічних вузлів (зокрема, підшипників), засновані на аналізі вмісту заліза в маслі;
- методи засновані на аналізі електричних параметрів обладнання;
- методи діагностики стану ізоляції.

Методи вібродіагностики отримали найбільш широке поширення. Суть методів полягає в аналізі вібраційних параметрів в різних точках електродвигуна. До вібраційних параметрів належать вібропереміщення, віброприскорення і віброшвидкість. Реєстрації підлягають як діючі

(середньоквадратичні) значення, так і пік-фактор. Досить поширеними є методи спектрального аналізу, в яких в якості діагностичних параметрів використовують значення амплітуди окремих гармонійних складових вібраційного сигналу. Головними недоліками вібродіагностики є: необхідність використання спеціальних віброакустичних датчиків, складність їх установки та складність інтерпретації результатів. Вібродіагностика дозволяє визначати дефекти підшипникового вузла, ексцентриситету і в меншій мірі - дефекти обмотки статора. При цьому аналіз відмов електродвигунів показує, що до 80% електродвигунів виходять з ладу через дефекти обмотки статора [17, 20]. Методи акустичної емісії також недостатньо чутливі саме до електричних пошкоджень низьковольтних двигунів [20].

Встановлено, що зовнішнє магнітне поле електричних машин в значній мірі визначається різного роду несиметричністю обмоток статора і магнітної системи. Несиметричності, обумовлені виниклими дефектами, змінюють характер зовнішнього магнітного поля, викликаючи спектр просторових гармонік індукції. Це дає можливість використовувати аналіз індукції зовнішнього магнітного поля для діагностування технічного стану асинхронного двигуна.

Теоретично доведено залежність між наявністю в двигуні дефектів і проявом певних гармонік в спектрі зовнішнього магнітного поля двигуна, а саме:

- наявність статичного ексцентриситету ротора призводить до появи в зовнішньому магнітному полі асинхронних двигунів просторових гармонік, порядок яких нижче порядку основний просторової гармоніки і які значною мірою визначають рівень зовнішнього магнітного поля електричної машини;
- наявність у зовнішньому магнітному полі двигуна гармонік $k - 1$ і $k + 1$, де k – основна гармоніка, може служити діагностичним ознакою відпрацювання підшипників;

– наявність у зовнішньому магнітному полі двигуна гармонік $3k$ може служити діагностичним ознакою міжвиткових і міжфазних замикань обмотки статора.

Так Тонкіх В.Г. [20] розробив основні принципи реєстрації зовнішнього магнітного поля двигунів, запропонував інтерпретації отриманих результатів і висновки про наявність дефектів в двигуні. Дані принципи використовуються в методі діагностики асинхронних електродвигунів на основі аналізу параметрів їх зовнішнього магнітного поля. Суть методу полягає в установці поруч з двигуном електромагнітного датчика, що дозволяє фіксувати зовнішнє магнітне поле, що утворюється навколо двигуна в процесі його роботи, що дає можливість зареєструвати поле в магнітному зазорі асинхронного двигуна. Сигнал з датчика надходить на персональний комп'ютер, де він оцифровується і записується. Далі проводиться спектральний аналіз отриманого сигналу, і за певними характеристиками отриманої картини визначається вид пошкодження. Достовірність результатів діагностики даного методу складає 92% [20, 21].

Методи, засновані на вимірюванні та аналізі магнітного потоку в зазорі двигуна, поширені для діагностики висовольтного обладнання (від 6 кВ і вище). Установка датчиків магнітного поля вимагає безпосереднього доступу до об'єкту діагностування. Установка датчиків магнітного поля (елементів Холла або магніторезисторів) можлива тільки при виробленні обладнання або ремонту.

Методи тепловізійного контролю дозволяють досить точно визначити стан підшипникових вузлів електричного обладнання. Однак для контролю внутрішніх пошкоджень ізоляції дігуна вони непридатні. Як датчики температури можуть бути використанні безконтактні інфрачервоні пірометри. Це дозволяє їх використовувати при відсутності безпосереднього доступу до обладнання, що діагностується. Однак закрите виконання приводів не дозволяє використовувати безконтактні датчики [17].

Методи, що базується на аналізі вмісту заліза в маслі, широко застосовуються для діагностики механічних вузлів приводів. Однак ці методи

визначають стан механізму по непрямим ознаках, що не дає змоги вчасно виявити пошкодження, що розвиваються [17].

Останнім часом широко розвиваються методи діагностики стану асинхронних двигунів, на основі контролю споживаного струму з наступним виконанням спеціального спектрального аналізу отриманого сигналу. Це дозволяє з високим ступенем достовірності визначати стан різних елементів двигуна. Наявність в спектрі струму двигуна характерних частот певної величини свідчить про наявність пошкоджень електричної та / або механічної частини електродвигуна [22-26].

Струми статора надають інформацію про обриви стрижнів, міжвиткові замикання обмоток статора. Механічні пошкодження, такі як руйнування підшипників, також виявляються по спектру струму [22, 27].

Недоліком спектрального аналізу струму асинхронного двигуна є складність оцінки результатів. Будь-яка амплітудно-модульована частота враховується в спектрі двічі, по обидві сторони напруги живлення. Подвійне врахування модульованої частоти обумовлює недостатню точність двагностування і відсутність можливості збільшення числа аналізованих гармонік [28, 29]. Для виключення накладення частот від різних пошкоджень і, як наслідок, спотворення картини реального стану двигуна використовується метод аналізу спектрів векторів струму (PI) та напруги (PU).

Напруга живлення не є ідеально синусоїдальною, тому в одержуваних спектрах PI і PU наявні гармоніки, обумовлені якістю напруги живлення. Пошкодження електродвигуна та механічного навантаження викликають відповідні гармоніки в спектрі струму.

На відміну від простого спектрального аналізу сигналів струму при формуванні спектрів модуля вектора Парку будь-яка модульована амплітудна модуляцією характерна частота враховується в спектрі вектора Парку тільки один раз. Гармоніки в спектрі PI, які відповідають різним видам пошкоджень, відрізняються одна від одної. Таким чином, виявлення в спектрі PI характерних

гармонік достовірно і однозначно вказує на наявність електричних і механічних несправностей в електродвигуні [29].

Метод діагностування стану асинхронних двигунів на основі спектрального аналізу векторів Парку струму і напруги в порівнянні з іншими способами діагностики має низку переваг: розширення переліку діагностованих пошкоджень і підвищення точності діагностування; діагностика стану електродвигуна методом спектрального аналізу спектрів модуля векторів Парку дозволяє виявити основні види дефектів електродвигуна; зниження трудомісткості процедури діагностування (це обумовлено тим, що при збігу ліній в спектрах модуля вектора Парку струму і напруги відсутня необхідність перевірки стану спектра на кожній характерній частоті при кожній операції діагностики кожного електродвигуна); забезпечення можливості дистанційного діагностування; спрощення процедури діагностування: не потрібно відключення двигуна і / або зняття навантаження; забезпечення можливості повної автоматизації процесу діагностики [28].

Загальним недоліком методу спектрального аналізу струму статора і спектрального аналізу модулів векторів Парку струму і напруги є необхідність врахування впливу на електричні параметри приводу параметрів мережі живлення, характеру навантаження, впливу зовнішніх електромагнітних полів, перехідних процесів в приводі. При використанні регульованого електроприводу на основі силових напівпровідникових перетворювачів в спектрах струмів виникають частоти, обумовлені комутацією вентилів. Це також необхідно враховувати [17]. Для достовірного діагностування стану електродвигуна необхідно здійснювати обробку осцилограмм статорного струму великої тривалості при постійній частоті і повільно змінюючому навантаженні. Для двигунів, які постійно працюють в динамічних режимах (часті пуски і гальмування), розглянуті методи не можуть бути використані [30].

Контроль стану ізоляції високовольтних асинхронних двигунів в процесі експлуатації може бути здійснений декількома методами. Сучасні, найбільш ефективні методи діагностики параметрів ізоляції наступні:

- контроль вібрації секцій обмоток статора в пазах і в зоні лобових частин;
- контроль пульсацій радіальної складової магнітного поля в зазорі;
- контроль часткових розрядів в ізоляції обмотки статора.

Часткові розряди містять інформацію про ступінь розвиненості дефекту. Амплітудні і амплітудно-фазові розподіли часткових розрядів є найбільш інформативними ознаками наявності різних дефектів в ізоляції високовольтних електричних машин [31, 32].

Контроль стану ізоляції статорів асинхронних двигунів за рівнем і розподілом часткових розрядів можливий для двигунів, робоча напруга яких становить від 4 кВ і вище. Для двигунів, що працюють при менших робочих напругах обмотки статора, виникнення дефектів в ізоляції не завжди супроводжується явищем часткових розрядів. З цієї причини ефективність застосування цього методу для низьковольтних двигунів невисока.

Одним з найбільш важливих питань, що виникають при проведенні діагностики стану ізоляції по частковим розрядами, є вибір діапазону частот, в якому передбачається проводити вимірювання параметрів часткових розрядів. Питання вибору оптимального частотного діапазону для проведення вимірювань часткових розрядів неоднозначний, в ньому є кілька протилежних аспектів. Без вирішення цього питання важко бути впевненим у достовірності кінцевих діагнозів.

На практиці використовується вимірювальне обладнання, яке працює в високочастотному діапазоні (від 0,5 до 80,0 МГц). Для реєстрації часткових розрядів в обмотках статорів асинхронних двигунів використовуються високочастотні трансформатори струму і конденсатори зв'язку.

Застосування акустичного методу реєстрації часткових розрядів ускладнено через екранування активних частин статора елементами конструкцій машин.

Для приладів, що працюють в надвисокочастотному діапазоні частот, корпус статора також є перешкодою для реєстрації електромагнітного випромінювання від часткових розрядів.

Пошкодження ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна виникають зазвичай в наступних трьох основних зонах:

- в пазах пакета статора між секцією обмотки та сталлю пакета статора або між двома секціями обмотки, що належать різним фазам обмотки;
- на зрізі пакета статора при фазній напрузі через пошкодження напівпровідникового покриття в ізоляції секцій;
- в лобових частинах секцій обмотки статора під впливом лінійної напруги між фазами обмотки.

У всіх цих трьох основних місцях розташування обмотки статора або максимально близько до них, де потенційно можуть і зазвичай виникають часткові розряди, слід монтувати первинні датчики часткових розрядів.

При вимірюванні часткових розрядів в процесі експлуатації асинхронних двигунів наявний великий рівень наведених високочастотних перешкод. Проблемою, яка виникає при проведенні вимірювань часткових розрядів в асинхронних двигунах в процесі експлуатації, є високі вимоги до надійності роботи і монтажу конденсаторів зв'язку.

Підключення конденсаторів зв'язку може бути виконано тільки на відключеному устаткуванні. Конденсатори зв'язку повинні надійно працювати в умовах високої температури, сильних магнітних полів та інших зовнішніх впливів [32].

Аналіз сучасних діагностичних комплексів показав, що для підвищення вірогідності діагностування технічного стану асинхронних двигунів необхідно вдосконалення існуючих та розробка нових методів і засобів діагностики асинхронних двигунів в процесі експлуатації.

Також необхідна розробка засобів комплексної діагностики асинхронних двигунів малої та середньої потужності на основі електричного, магнітного, теплового та вібраційного методів [33, 34].

4.5 Система автоматизованої інтелектуальної діагностики

Система автоматизованої інтелектуальної діагностики (САІД), що розроблена компанією КРОТ, використовує сам двигун основним датчиком, знімає з нього данні з досить великою кількістю шумів. Потім очищає і відновлює дані, профілює двигун і передає результати оператору. На рис. 4.1 показано зовнішній вигляд пристрою діагностування [35].



Рисунок 4.1 – Система автоматизованої інтелектуальної діагностики КРОТ

Фізичний принцип, який лежить в основі цього методу, такий: будь-які збурення в роботі електричної та / або механічної частини електродвигуна і пов'язаного з ним пристрою призводять до змін магнітного потоку в зазорі електричної машини, а значить – до слабкої модуляції споживаного електричною машиною струму. Наявність в спектрі струму електричної

мащини характерних частот певної величини вказує про наявність пошкоджень електричної та / або механічної частини електродвигун. Гармоніки, кратні частоті живильного струму, вказують на проблеми в електричній частині. Гармоніки, кратні зворотній частоті обертання двигуна, - це механіка.

Підключається пристрій до вимірювальних трансформаторів напруги та струму (рис. 4.2). На низьковольтному обладнанні – безпосередньо до ліній живлення.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Підключення системи КРОТ до діагностованого обладнання:
а) підготовка до підключення системи КРОТ; б) підключення до ліній живлення.

Для ряду критичних об'єктів дуже важливий режим постійного моніторингу. Система навчається на кожен екземпляр обладнання і будує порогові значення.

Вхідним сигналом служить напруга живлення, частота якого модулюється роботою самого двигуна і формує вихідний сигнал у вигляді гармонійного спектру споживаного струму (рис. 4.3).

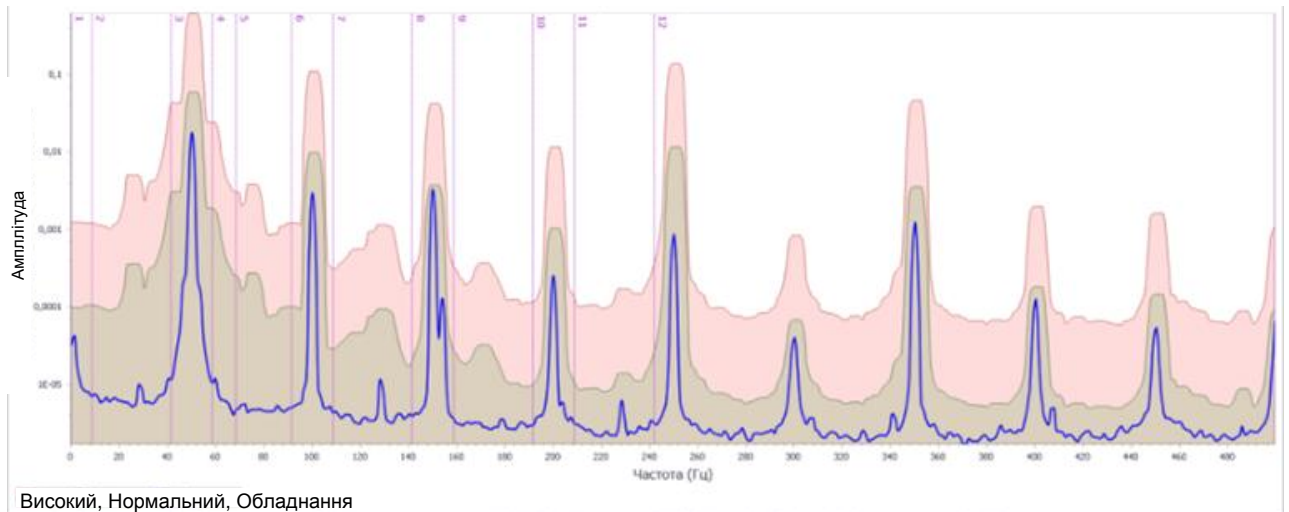


Рисунок 4.3 – Спектр справного живильного електронасоса котла парової турбіни ТЕС отриманого з використанням пристрою САІД

Профілювання пристрою САІД – важлива перевага. Двох однакових потужних електродвигунів навіть в одній серії заводу просто немає. У кожного свій спектральний слід. До того ж в Україні дуже складно знайти пару двигунів хоча б однієї серії на одному об'єкті. Відомо, що вони теж ремонтувалися, модернізувалися і перемаркіровувалися, тому практично не буває типового старого обладнання без унікальної конструкції і дефектів.

Такий моніторинг обходиться, безумовно, дорожче разової діагностики. Для діагностики потрібен один комплект – і з ним потрібно обійти всі ЕД. А для моніторингу – по комплекту на двигун, щоб постійно спостерігати. Монтуються такі системи прямо в щиті. Там вони збирають і обробляють дані про стан ЕД.

Розглянемо поршневий повітряний компресор; технічні характеристики електродвигуна: напруга – 6 кВ; номінальний струм – 60 А; частота мережі – 50 Гц; номінальна частота обертання валу – 500 об / хв; параметри вимірювальних трансформаторів: трансформатор напруги – 6000/100; трансформатор струму - 300/5. Тип вальниці – кулькова вальниця кочення.

На екрані ноутбуку бачимо синій графік – це «усереднені» значення амплітуд спектра струму статора. Сіро-зелена область – це профіль нормальної

роботи машини, поки машина в ньому – це нормальна робота з урахуванням «довгограючих» дефектів. Рожева область – попередження, які не потребують миттєвої зупинки. Біла область вище рожевої – аварія не за горами.

Розглянемо детальніше графік спектра і проведемо його аналіз (рис. 4.4).

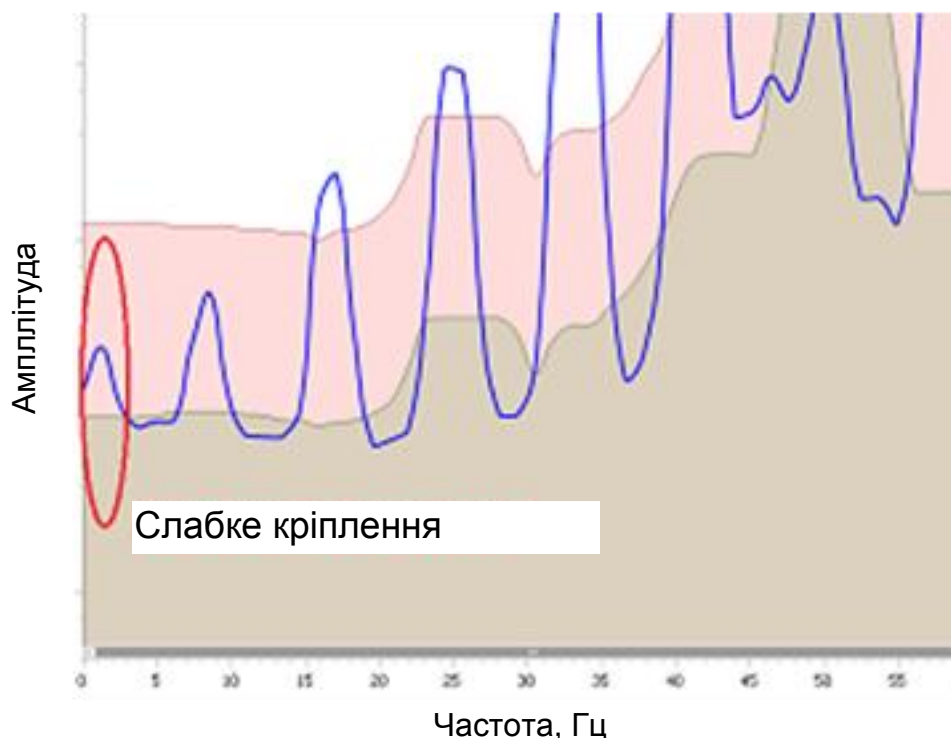


Рисунок 4.4 – Графічна модель стану ЕД «Наближення дефекту кріплення ЕД до фундаменту»

На частоті біля 1 Гц спостерігається пік, що виходить за межі середньостатистичної кривої допустимих значень, що характеризує ослаблення кріплення електродвигуна, люфт або надмірні допуски муфти приводиться обладнання. Даний дефект поки не критичний, але вимагає перевірки та усунення.

В районі 50 Гц (промислова частота живлення ЕД) – піки, кратні кількості обертів ротора ЕД. Ці піки відображають роботу поршнів компресора.

Можна відстежувати стан ЕД при тривалому спостереженні. Пік на частоті 100 Гц – потенційні проблеми з обмоткою статора (рис. 4.5-4.6). В

даний момент ЕД знаходиться в зоні допустимих значень, але вимагає більш ретельного спостереження (потрібно терміново додатково перевірити стан обмоток).



Рисунок 4.5 – Графічна модель стану ЕД «Наближення дефекту кріплення ЕД до фундаменту»

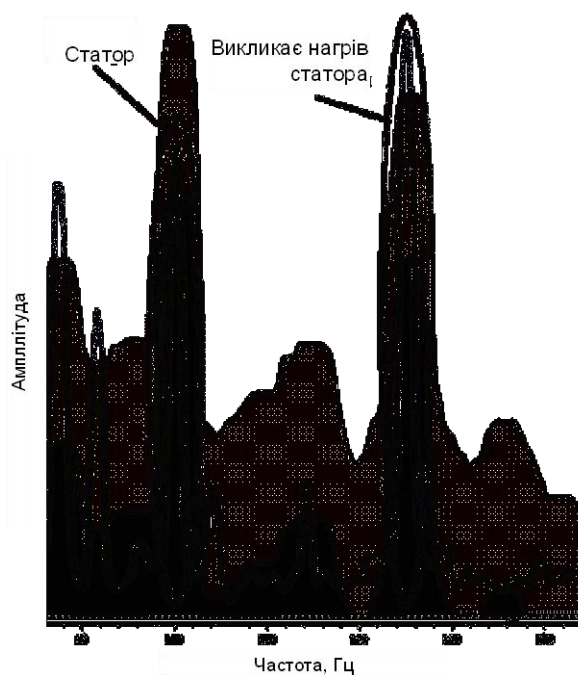


Рисунок 4.6 – Графічна модель стану ЕД «Наближення дефекту обмотки статора та її нагрів»

На частоті 150 Гц (3-тя гармоніка) – пік, перевищує рівень допустимих значень, а це може викликати нагрівання статора (рис.4.7). Також це може призводити до термічного старіння і висихання лаку обмоток (погіршення ізоляції обмоток і короткозамкнені витки).

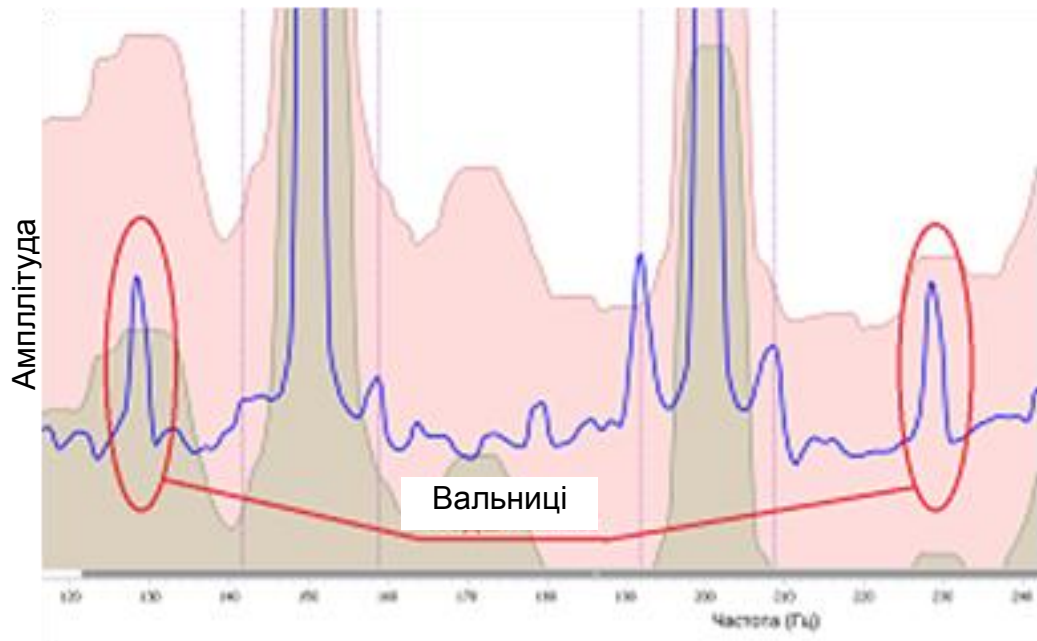


Рисунок 4.7 – Графічна модель стану ЕД «Пошкодження вальниці кочення»

На частотах близько до 128 Гц та близько до 228 Гц спостерігаються піки, що виходять за межі середньостатистичної кривої допустимих значень, які вказують на розвиток дефектів, що дефекти вальниці кочення. Конкретний дефект вальниці можна визначити, знаючи тип і характеристики вальниць (рис. 4.8).

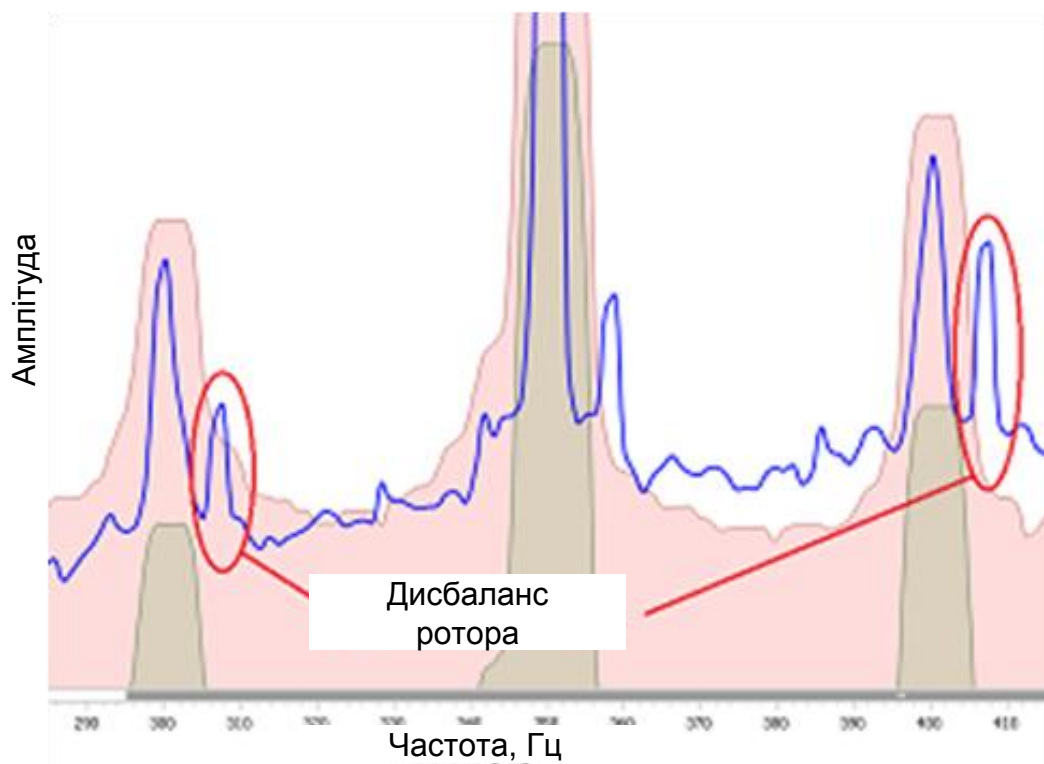


Рисунок 4.8 – Графічна модель стану ЕД «Дисбаланс ротора»

На частотах біля 308 Гц та біля 408 Гц спостерігаються піки, що виходять за межі середньостатистичної кривої допустимих значень, що характеризують дисбаланс ротора (рис.4.9).

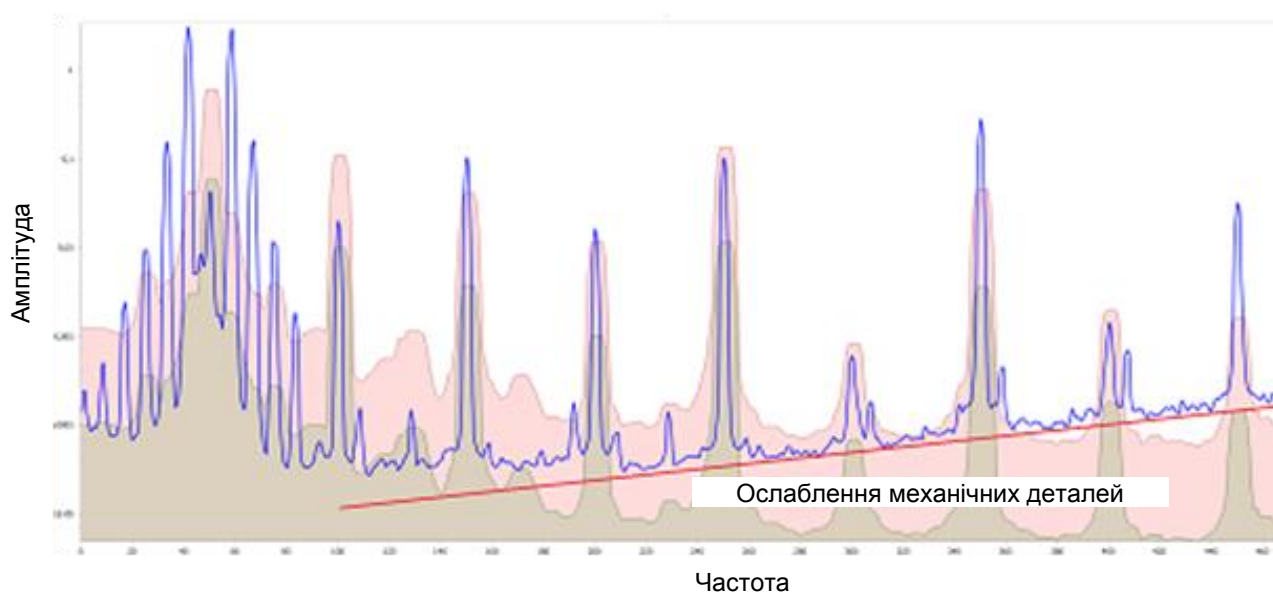


Рисунок 4.9 – Графічна модель стану ЕД «ослаблення механічного кріплення механічних ЕД»

На частотах від 100 Гц до 500 Гц присутній широкосмуговий шум. Як правило, така картина спостерігається на обладнанні, в якому є ослаблення кріплення механічних ЕДзлів (наприклад, люфт клапана). Даний дефект небезпечний і вимагає термінової додаткової перевірки.

Завдання моніторингу – зафіксувати дефект, оцінити його критичність, а потім відстежувати його розвиток. І розрахувати, коли він досягне критичного рівня. І найважливіше – передбачити час виходу обладнання з ладу.

Висновки до четвертого розділу

При діагностиці асинхронних двигунів можливе застосування методів, що базуються на аналізі електричних параметрів двигуна (струм, напруга, потужність, тангенс кута діелектричних втрат і т.д.), а також методів тепловізійної діагностики вузлів. Це обумовлено простотою їх реалізації, відносно низькою вартістю, високою продуктивністю і широкими можливостями для автоматизації діагностування.

Для контролю стану ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна доцільно додатково використовувати метод контролю часткових розрядів, що надає найбільш повну інформацію про наявність різних дефектів в ізоляції асинхронного двигуна на ранній стадії їх розвитку.

Методи вібродіагностики є досить дорогими і трудомісткими та вимагають застосування спеціальної виміральної техніки і програмного забезпечення.

Для отримання найбільш достовірної інформації при оцінці технічного стану асинхронних двигунів необхідно розглянуті методи застосовувати в сукупності. Це може бути реалізовано в діагностичних комплексах.

Методи функціональної діагностики економічно найбільш кращі, тому що не вимагають тимчасового виведення електрообладнання з експлуатації.

5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Техніко-економічне обґрунтування

Поняття економічної ефективності передбачає коректне співставлення понесених витрат з отриманими результатами.

Основною метою економічних розрахунків в будь-яких інвестиційних проектах є обґрунтування рішень на основі оцінки їх економічної ефективності. Світова економічна практика давно виробила методи оцінки інвестиційних проектів, які враховують всі можливі умови реалізації і тому мають властивість універсальності, що і дозволяє використовувати їх для визначення ефективності майже будь-якого проекту з достатньою точністю.

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

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

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

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

5.2 Визначення капіталовкладень

У випадках власних не залучених фінансових ресурсів орієнтиром необхідної норми прибутковості є середній банківський відсоток за банківськими вкладками з урахуванням їх оподаткування, який на даний час складає 20 %.

Чиста приведена вартість відноситься до показників ефекту капіталовкладень і характеризує чистий абсолютний результат або віддачу від реалізації інвестиційного проекту, і визначається за формулою (5.1). Від'ємне значення приведення вартості свідчить про неефективність інвестиційного проекту при даній нормі дисконту. Прийнятність того чи іншого варіанту деякого інвестиційного проекту оцінюється за величиною $NPV > 0$, чим він більше, тим відповідний варіант кращий.

$$NPV = -K + \sum_t^T \frac{D_t}{(1+E)^t} , \quad (5.1)$$

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

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

$$T_{ок} = \frac{K}{D_t} . \quad (5.2)$$

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

Економічна ефективність системи технічної діагностики трансформаторів визначається зниженням експлуатаційних витрат на ремонти і зниженням збитку від аварійних відмов обладнання, вартістю заміни чи ремонту пошкодженого обладнання, а також зменшенням збитку від недовідпуску електроенергії. Розглянемо розрахунок економічної ефективності вдосконалення системи оперативного діагностування на прикладі 4 потужних електродвигунів власних потреб електричних станцій.

Тоді формулу (5.1) можна записати

$$NPV = -K_{обл} + \sum_t^T \frac{(\Delta Z_t - Z_D)}{(1+E)^t}, \quad (5.3)$$

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

ΔZ_t - зменшення річних затрат на двигуни (технічне обслуговування і ремонти); Z_D - річні затрати на проведення діагностування; T - період часу, що розглядається.

Капітальні затрати на придбання обладнання для діагностування приведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Капітальні затрати на придбання обладнання для діагностування

Вид обладнання	Вартість обладнання, тис. грн..
Обладнання САІД КРОТ	520
Мегометр ЕСО 202 Г	5
Обладнання для проведення тепловізійного обстеження (тепловізор)	800
Разом	1325

Затрати на поточні і розширені поточні ремонти 4 двигунів за попередніх десяти років наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Затрати на проведення ремонтів, тис. грн.

Вид ремонту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поточні	34	32	38	37	39	34	37	35	36	38
Розширені поточні	680	320	800	680	1200	1000	900	800	360	320
Разом	714	352	838	717	1239	1034	935	835	396	358
Разом	7420									

Значні затрати на 4 році викликані аварією, що призвела до необхідності заміни обмотки статора на одному з двигунів. На 8 році внаслідок аварії довелось замінити підшипники.

Очікується, що запропоноване вдосконалення системи діагностики дозволить зменшити кількість ремонтів а також уникнути раптових тяжких аварій. Очікувані затрати на ремонти в наступні 10 років подані у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Затрати на проведення ремонтів, тис. грн.

Вид ремонту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поточні	36	35	36	38	37	35	36	34	37	36
Розширені поточні	290	170	310	350	360	330	350	300	190	180
Разом	326	205	346	388	397	365	986	334	227	216
Разом	3790									

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

$$\Delta Z = 7420 - 3790 = 3630 \text{ (тис.грн.)} \quad (5.4)$$

Тому за рік в середньому зменшення витрат складе

$$\Delta Z_t = \frac{3630}{10} = 363 \text{ (тис. грн.)} \quad (5.5)$$

Приймаємо, що затрати на проведення діагностування становлять 45,8 тис. грн. Підставимо відомі значення у формулу (5.3):

$$NPV = -1325000 + \sum_{t=1}^{10} \frac{(363000 - 45800)}{(1 + 0,2)^t} = 240650 \text{ (грн.)} \quad (5.6)$$

Термін окупності за формулою (5.2):

$$T_{ок} = \frac{1325000}{363000 - 45800} = \frac{1325000}{317200} \approx 4,17 \text{ (років)} \quad (5.7)$$

З приведених розрахунків видно, що прибуток від реалізації проекту почне надходити на початок четвертого року і до кінця 10-го року складе 240650 грн.

Висновки до п'ятого розділу

Результати розрахунку економічних показників вказують на доцільність впровадження мікропроцесорної системи діагностування електричних двигунів САІД КРОТ. Термін окупності впровадження системи становить приблизно 4 роки.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Правила розрахунку захисного заземлення

Згідно з Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), для захисту людини від ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції може бути застосований один з таких захисних засобів: мала напруга, вирівнювання потенціалів, подвійна ізоляція, роздільне живлення, захисне вимикання, захисне заземлення (занулення). Із захисних засобів, перелік яких дається, кожний може бути використаний окремо (бути самостійним захисним засобом) або поєднуватись з іншими в деяку комбінацію. Найбільш поширеними технічними засобами захисту є захисне заземлення та занулення, які мають чітку сферу застосування, тоді як сфера застосування інших захисних засобів або обмежена, або має рекомендаційний характер, або ж дуже вузьку сферу обов'язкового застосування. Захисному заземленню або зануленню підлягають металеві частини електроустановок, які доступні дотику людини і не мають інших засобів захисту, які забезпечують електробезпеку.

6.1.1 Загальні відомості

Заземлення – виконання електричного з'єднання певних частин електроустановки або обладнання з заземлювальним пристроєм.

Захисне заземлення – заземлення, яке виконується з метою забезпечення електробезпеки.

Мета розрахунку захисного заземлення – визначення кількості електродів заземлювача і заземлювальних провідників, їхніх розмірів і схеми розміщення в землі, при яких опір заземлювального пристрою розтіканню струму або напруга дотику при замиканні фази на заземлені частини електроустановок не перевищують допустимих значень.

Розрахунок, як правило, виконується за умов однорідності ґрунту.

Заземлювальний пристрій складається із заземлювача і з'єднувальної смуги. Розрізняють заземлювачі штучні, які призначені тільки для цілей заземлення, і природні (металеві конструкції і комунікації іншого призначення, які знаходяться у землі).

Як штучні заземлювачі використовують сталеві труби діаметром 35–50 мм і кутову сталь (40·40...60·60 мм з товщиною стінок не менше 3,5 мм і довжиною 2,5–3 м); пруткову сталь діаметром не менше 10 мм; сталеві шини перерізом 100 мм². Вертикальні заземлювачі з'єднують у контур смугою зі сталі перерізу не менше 6 мм за допомогою зварювання.

Розрахунок заземлення робиться з урахуванням заданих допустимих значень опору R_d заземлювального пристрою, допустимої напруги дотику та кроку [35, 36].

Загальні вимоги щодо значень R_d захисного заземлення електроустановок викладені у міждержавному стандарті ГОСТ 12.1.03081 «Захисне заземлення. Занулення» та ПУЕ.

6.1.2 Послідовність розрахунку

1. Визначається розрахунковий струм замикання на землю I_z , A і допустимий опір розтікання струму в заземлювальному пристрої R_d , Ом згідно з ПУЕ залежно від напруги, режиму нейтралі, потужності електроустановок.

2. Визначається розрахунковий питомий опір ґрунту залежно від коефіцієнта сезонності для відповідної кліматичної зони за виразом (6.1) :

$$r_{\text{розрах.}} = r_{\text{табл.}} \cdot K_c, \quad (6.1)$$

де $r_{\text{табл.}}$ – приблизне табличне значення питомого опору ґрунту, яке рекомендується для розрахунку, табл. 6.1; K_c – коефіцієнт сезонності, табл. 6.2.

3. Визначається H – відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача (рис. 6.1): $H=H_0+ l /2$, де l – довжина заземлювача, м.; H_0 – глибина закладення заземлювача, м.

4. Визначається опір розтікання струму в одному вертикальному заземлювачі за виразом (6.2):

$$R_B = \frac{\rho_{\text{розр}}}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H+l}{4H-l} \right), \quad (6.2)$$

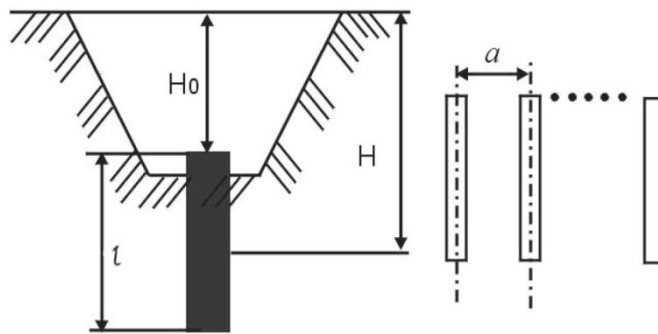


Рисунок 6.1 – Схема розміщення заземлювача в ґрунті

5. Визначається орієнтована кількість $n_{op.}$ вертикальних заземлювачів за формулою (6.3):

$$n_{op.} = \frac{R_B}{R_D \cdot \eta_B}, \quad (6.3)$$

де η_B – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів, при

$$\eta_B = 1, n_{op.} = \frac{R_B}{R_D}. \quad (6.4)$$

Таблиця 6.1 – Приблизні значення питомих електричних опорів різних ґрунтів та води, Ом · м

Ґрунт, вода	Можливі межі коливань, ρ	При вологості 10-20% до маси ґрунту	Рекомендоване значення для приблизних розрахунків
Глина	8-70	40	40
Суглинок	40-150	100	100
Чернозем	9-530	200	200
Торф	10-30	20	20
Садова земля	30-60	40	40
Супісок	150-400	300	300
Пісок	400-700	700	700
Кам'янистий	500-800	-	-
Скелястий	10 ⁴ -10 ⁷	-	-
Вода:			
морська	0,2-1,0	-	1,0
річкова	10-100	-	80
водоймищ	40-50	-	50
струмкова	10-60	-	60
ґрунтова	20-70	-	50

Таблиця 6.2 – Коефіцієнт сезонності К_{с.в.} для однорідної землі при вимірюванні її опору

Кліматична зона	Вологість землі при вимірюванні		
	підвищена	Нормальна	Мала
К с.в. для електрода довжиною LB = 3 м			
I	1,9	1,7	1,5
II	1,7	1,5	1,3
III	1,5	1,3	1,2
IV	1,3	1,1	1,0
К с.в. для електрода довжиною LB = 5 м			
I	1,5	1,4	1,3
II	1,4	1,3	1,2
III	1,3	1,2	1,1
IV	1,2	1,1	1,0

6. Знаючи орієнтовну кількість вертикальних заземлювачів ρ_{op} , їх розташування (у ряд чи по контуру) і відношення відстані між заземлювачами до їх довжини a/l , визначають за табл. 6.3 або табл. 6.4 коефіцієнт використання η_B вертикальних заземлювачів.

Таблиця 6.3 – Значення коефіцієнта використання вертикальних заземлювачів h_B , розташованих у ряду

Відношення відстані між електродами до їх довжини a/l	Кількість заземлювачів n									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,86	0,81	0,77	0,74	0,72	0,70	0,67	0,65	0,62	0,60
2	0,95	0,92	0,89	0,86	0,84	0,82	0,79	0,77	0,75	0,73
3	0,97	0,94	0,92	0,90	0,88	0,87	0,85	0,83	0,82	0,81

Таблиця 6.4 – Значення коефіцієнта використання вертикальних заземлювачів h_B , розташованих по контуру

Відношення відстані між електродами до їх довжини a/l	Кількість заземлювачів n							
	4	8	12	16	20	40	60	100
1	0,66	0,56	0,50	0,47	0,44	0,41	0,39	0,36
2	0,76	0,68	0,65	0,63	0,61	0,58	0,55	0,52
3	0,84	0,77	0,73	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62

7. Визначається необхідна кількість n_B вертикальних заземлювачів з урахуванням коефіцієнта використання з формули (6.5):

$$n_B = \frac{R_B}{R_D \cdot \eta_B} = \frac{n_{OP}}{\eta_B} \quad (6.5)$$

8. Визначається $R_{роз.в.}$ – розрахунковий опір розтікання струму у вертикальних заземлювачах при n_B без врахування з'єднувальної смужки (вираз (6.6)). Приймаємо, що всі вертикальні заземлювачі з'єднані паралельно.

$$R_{роз.в.} = \frac{R_B}{n_B \cdot \eta_B}, \quad (6.6)$$

9. Визначається довжина з'єднувальної смужки L_C за формулою (6.7):

$$L_C = 1.05 \cdot a(n_B - 1) \quad (6.7)$$

10. Визначається опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі (з'єднувальній смужці), R_{Γ} :

$$R_{\Gamma} = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{L_c} \ln \frac{2Lc^2}{H_0 \cdot B_c} \quad (6.8)$$

де B_c – ширина смужки.

11. Визначаємо η_{Γ} – коефіцієнт використання горизонтального заземлювача при розташуванні вертикальних заземлювачів відповідно до початкових даних (в ряд, або по контуру) з табл. 6.5 або 6.6.

Таблиця 6.5 – Значення коефіцієнта використання горизонтального стрічкового електрода h_{Γ} , що з'єднує вертикальні заземлювачі, розташовані у ряд

a/l	Кількість заземлювачів n									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,84	0,76	0,71	0,67	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,55
2	0,90	0,85	0,81	0,79	0,77	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71
3	0,93	0,90	0,87	0,85	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78

Таблиця 6.6 – Значення коефіцієнта використання горизонтального стрічкового електрода h_{Γ} , що з'єднує вертикальні заземлювачі, розташовані по контуру

a/l	Кількість заземлювачів n									
	4	6	8	10	12	16	20	40	60	100
1	0,45	0,40	0,36	0,34	0,32	0,30	0,27	0,22	0,20	0,19
2	0,55	0,48	0,43	0,40	0,38	0,35	0,32	0,29	0,27	0,23
3	0,70	0,64	0,60	0,56	0,54	0,50	0,45	0,39	0,36	0,33

12. Визначаємо $R_{\text{розр.}\Gamma}$ – розрахунковий опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі (з'єднувальній смужці) з урахуванням η_{Γ} :

$$R_{\text{розр.}\Gamma} = R_{\Gamma} / \eta_{\Gamma} \quad (6.9)$$

13. Визначається $R_{розр}$ – розрахунковий опір розтікання струму у вертикальних та горизонтальних заземлювачах, якій має бути не більше R_d :

$$R_{розр} = \frac{R_{розр.В} \cdot R_{розр.В}}{R_{розр.В} + R_{розр.В}} \leq R_d \quad (6.10)$$

14. Обирається матеріал та переріз з'єднувальних проводів і магістральної шини.

6.2 Розрахунок штучного заземлювального пристрою

Розрахунок штучного заземлювального пристрою при відсутності природних заземлювачів.

Початкові дані

1. Захисту підлягає електрообладнання цеху.
2. Виконання мережі – з ізолюваною нейтраллю. Напруга мережі – 380/220 В.
3. Тип заземлювального пристрою – вертикальні сталеві труби з розмірами: $l_B = 3,2$ м; $d_B = 0,035$ м; товщина стінки $\delta = 3,5$ мм; відстань між вертикальними заземлювачами $a = 3,2$ м, тобто $a/l_B = 1$. Глибина закладання заземлювачів $h_0 = 0,8$ м, $B_c = 35$ мм.
4. Ґрунт – глина; склад – однорідний; вологість – мала. Кліматична зона – III.

Визначення параметрів штучних заземлюючих пристроїв:

1. Визначаємо R_d – допустиме (нормативне) значення опору розтікання струму в заземлювальному пристрої.

Згідно з ПУЕ для напруги до 1 кВ, $R_d \leq 4$ Ом.

2. Визначаємо розрахунковий питомий опір глини для III кліматичної зони

$$\rho_{розр} = \rho_{табл} \cdot K_c$$

$$\rho_{\text{табл}} = 60 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$K_c = 1,5$$

$$\rho_{\text{розр}} = 60 \cdot 1,5 = 90 \text{ Ом}$$

3. Визначаємо H – відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача:

$$H = H_0 + \frac{l_B}{2} = 0,8 + \frac{3,2}{2} = 2,4 \text{ м.}$$

4. Визначаємо опір розтікання струму в одному вертикальному заземлювачі:

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

$$R_B = 0,366 \frac{90}{3,2} \left(\ln \frac{2 \cdot 3,2}{0,035} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,4 + 3,2}{4 \cdot 2,2 - 3,2} \right);$$

$$R_B = 28,92 \text{ Ом.}$$

5. Визначаємо орієнтовну кількість вертикальних заземлювачів при $\eta_B = 1$

$$n_{\text{ор}} = \frac{R_B}{n_B \cdot \eta_B} = \frac{28,92}{4 \cdot 1} = 7,23; \text{ приймаємо } n_{\text{ор}} = 8 \text{ шт.}$$

6. Визначаємо коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів η_B з табл. 6.2, заземлювачі розташовані в ряд, $a/l_B = 1$, $n = 8$. Приймаємо $\eta_B = 0,67$.

7. Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів з урахуванням коефіцієнта використання

$$n_B = \text{НОР} / \eta_B = 8 / 0,67 = 11,9.$$

Приймаємо $n_B = 12$ шт.

8. Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму у вертикальних заземлювачах при $n_B = 12$ без урахування з'єднувальної смуги

$$R_{\text{РОЗР.В.}} = \frac{R_B}{n_B \cdot \eta_B} = \frac{28,92}{12 \cdot 0,67} = 3,59 \text{ Ом}$$

9. Визначаємо довжину з'єднувальної смуги

$$L_c = 1,05 \cdot a (n-1) = 1,05 \cdot 3 \cdot 11 = 34,65 \text{ м.}$$

10. За формулою (6.10) для горизонтальних електродів, розташованих в ґрунті, визначаємо опір розтікання струму

$$R_r = 0,366 \frac{90}{34,65} \ln \frac{2 \cdot (34,65)^2}{0,8 \cdot 0,04} = 6,46 \text{ Ом.}$$

11. Визначаємо за табл. 6.6 коефіцієнт використання горизонтального заземлювача при $a/l = 1$, $n = 12$. Приймаємо $\eta_r = 0,55$.

12. Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі з урахуванням η_r :

$$R_{\text{РОЗР.Г.}} = \frac{R_r}{\eta_r} = \frac{6,46}{0,55} = 11,74 \text{ Ом.}$$

13. Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму заземлювального пристрою

$$R_{\text{розр.}} = \frac{R_{\text{розр.В}} \cdot R_{\text{розр.Г}}}{R_{\text{розр.В}} + R_{\text{розр.Г}}} = \frac{3.59 \cdot 11.74}{3.59 + 11.74} = 2.74 \text{ Ом.}$$

Отриманий розрахунковий опір розтікання струму відповідає вимогам ПУЕ, ПТЕ та ПТБ.

14. Вибираємо матеріал та поперечний переріз з'єднувальних проводів і магістральної шини.

Приймаємо сталеву шину товщиною $\times = 4$ мм і перерізом 100 мм^2 .

Схема з'єднання обладнання з магістральною шиною та з'єднання магістральної шини з заземлювальним пристроєм наведена на рис. 6.1

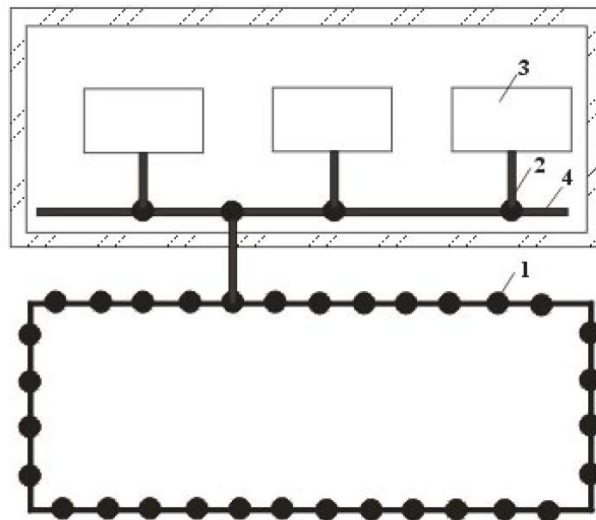


Рисунок 6.1– Схема захисного заземлення:

1 – заземлювальний пристрій; 2 – заземлювальні провідники; 3 – заземлюване обладнання; 4 – внутрішня магістраль заземлення

6.3 Визначення області працездатності електричних двигунів в умовах дії загрозливих чинників НС

Впроваджувана в енергетичній галузі провідних країн світу концепція Smart Grids передбачає використання сучасних мікропроцесорних систем моніторингу стану високовольтного обладнання з метою автоматизації процесу керування транспортуванням та розподілом електричної енергії.

Швидкоплинність змін параметрів обладнання електроенергетичних систем під час їх експлуатації вимагає створення нових та вдосконалення існуючих методів та засобів керування цими параметрами. Тому в наш час все ширше використовуються такі мікропроцесорні системи, як наприклад: КІН-750, ІДК «Регіна» та інші.

Пошкодження систем оперативного визначення залишкового ресурсу електричних двигунів (СОВЗРД) унеможлиблює автоматизоване керування режимами та обладнанням ЕЕС, що неприпустимо, особливо в умовах стихійних лих та техногенних катастроф. Мова йде про надзвичайні ситуації техногенного, антропогенного, біологічного та соціального походження. За останні сорок років в енергетичній галузі сталося чимало катастроф сторіччя, в яких загинуло багато людей.

Тому в процесі розробки методів та засобів автоматичного та автоматизованого керування режимами ЕЕС, керування обладнанням електричних станцій, підстанцій, лініями електропередач потрібно оцінювати ефективність конструктивних рішень по захисту обслуговуючого персоналу та цивільного населення, розрахунків по стійкості роботи, як окремих видів обладнання енергетичної галузі, так і енергетичних підприємств в цілому та оцінки безпеки їх роботи.

Всім відомі світові аварії на АЕС (Чорнобиль, Україна, 26.04.1986), (Фукусіма, Японія, 11.03.2011), ([Три-Майл-Айленд](#), Пельсильванія, США, [28.03.1979](#)) та інші. Ці аварії були викликані помилками людей, відмовами обладнання, стихійними лихами. Однак, навіть за таких умов мікропроцесорна протиаварійна автоматика, режимна автоматика мали б працювати безвідмовно. Нажаль це не так. Про це свідчать такі, відомі на весь світ аварії, як: аварія в західному енергооб'єднанні США 10.08.1996 року (вимкнено 7,5 млн. споживачів, недовідпуск електроенергії – біля 40 млн. кВт·год), аварія в енергетичній системі Hydro Quebec Канади 14.12.1982 року (збитки – 3 млн. доларів США) та інші.

Тому актуальними є завдання оцінювання стійкості роботи систем оперативного визначення залишкового ресурсу електричних двигунів в умовах дії електромагнітних та іонізуючих випромінювань, наприклад на ТЕС, де такі системи також експлуатуються.

Відомо, що дія радіації на матеріали і деталі систем оперативного визначення залишкового ресурсу двигунів власних портеб залежить від виду випромінювання, дози радіації, природи опромінюваної речовини та умов навколишнього середовища.

В розроблювальній в магістерській роботі СОВЗРД використовуються елементи, до складу яких входять такі матеріали, як: метали, неорганічні матеріали, напівпровідники та різні органічні сполуки (діелектрики та ін.).

Серед цих матеріалів, метали найбільш чутливі до радіації, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв. В них радіація викликає зворотні і незворотні процеси, внаслідок яких можуть бути порушення роботи елементів схеми СОВЗРД, що приведе до пошкодження СОВЗРД.

Якщо потік гамма-опромінення проходить через елементи схеми СОВЗРД, то в них виникають вільні носії електричних зарядів, внаслідок переміщення яких виникає хибний імпульс, який може призвести до помилкового увімкнення, або вимкнення високовольтного і потужного енергетичного обладнання.

Найбільш чутливі до дії радіації напівпровідники (діоди, транзистори, мікросхеми і т.п.) з яких складається схема СОВЗРД.

В елементній базі СОВЗРД, внаслідок дії іонізаційних випромінювань, можлива зміна майже всіх електричних та експлуатаційних характеристик, залежних від проходження процесів іонізації і порушення структури матеріалів.

Практика експлуатації СОВЗРД в умовах дії радіоактивних випромінювань (Ладжинська ТЕС) дає можливість зробити висновки:

1. СОВЗРД може раптово втратити роботоздатність при певних (критичних) рівнях радіації.

2. В елементах схем СОВЗРД можуть початись зворотні або незворотні процеси через деякий час після випадання радіоактивних опадів при поточних рівнях радіації (P_i) значно нижчих критичних ($P_{кр}$), тобто $P_i < P_{кр}$.

6.3.1 Дослідження області працездатності потужних електричних двигунів в умовах дії на них іонізаційних та електромагнітних випромінювань

Розглянемо перший випадок, тобто оцінюємо стійкість роботи СОВЗРД при знаходженні її на зараженій радіоактивними речовинами місцевості тривалістю однієї години після випадання радіоактивних речовин на даній місцевості, наприклад на території Ладжинської ТЕС. Для цього спочатку визначаємо та аналізуємо елементи СОВЗРД, від яких залежить її робота. Це наступні елементи: транзистори КТ3102Г, 2П301Б, резистори С2-14 (0,125 Вт), мікросхеми К561ЛЕ5, мікропроцесор КР580ВМ80А, К140УД7, АОД130Б, конденсатори К50-35, КМ4, діоди КД103 та ін.

Для кожного елемента визначаємо максимально допустимі потужності дози гамма-випромінювання (P_i) та експозиційні дози (D_i) (табл. 6.7).

За даними експлуатації самими уразливими елементами СОВЗРД виявились польові транзистори КП301Б, мікросхеми виготовлені за КМОП технологією (К561ЛЕ5) та мікропроцесор КР580ВМ80А

Граничне значення потужності дози гамма – випромінювання для цих елементів $P_{гр}=10^4$ (Р/с).

Визначаємо максимальний рівень радіації (6.11):

$$P_{1\max} = \frac{P_{гр} \cdot K_{\text{посл.}}}{2 \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})} \quad (6.11)$$

де коефіцієнт послаблення радіації знаходиться за виразом (8.5):

$$K_{noc} = K_p \prod_{i=1}^n 2^{\frac{h_i}{d_i}} \quad (6.12)$$

де K_p – коефіцієнт, який враховує умови розміщення сховища ($K_p = 1$ – для окремо розміщеного сховища, $K_p = 2$ – для вбудованого сховища); $n = 2$ – кількість захисних шарів перекриття; $d_i = 15$ см – товщина шару половинного послаблення радіації даним матеріалом, см; $h_i = 30$ см – товщина i -го захисного шару, см.

Таблиця 6.7 – Максимально допустимі потоки нейтронів, експозиційних доз і потужності дози гама-випромінювання для матеріалів і елементів СОВЗРД (початок змінення параметрів, при яких елементи ще можуть працювати)

Блок СОВЗРТА	Елементи радіоапаратури і матеріали	Доза гамма випромінювання, Р	Потужність дози гамма випромінювання, Р/с
1	2	3	4
Блок вхідних підсилювачів і перетворювачів	Транзистори 2Т3102, 2П301 діоди 2Д103	10^5	10^4
	Мікросхеми К140УД7, К561ЛЕ5	10^5	10^4
Блок обробки та зберігання даних	Інтегральні схеми КР580ВМ80А, К580ИК55	5×10^3	10^4
	Конденсатори К50-35, КМ4, КМ10	$10^7 \dots 10^9$	10^5
	Резистори С2-14	$10^7 \dots 10^9$	10^6

Підставивши відповідні цифрові значення в формулу (8.11) отримаємо:

$$P_{1\max} = \frac{10^4 \cdot 16}{2 \cdot (\sqrt{8762} - \sqrt{1})} = 863,879 \text{ (Р/с)} \quad (6.13)$$

Визначаємо допустимий час роботи (6.14; 6.15):

$$t_{\text{дон}} = \left(\frac{P_{\text{зр}} \cdot K_{\text{носл}} + 2 \cdot P_{1\text{max}} \cdot \sqrt{t_n}}{2 \cdot P_{1\text{max}}} \right)^2 \quad (6.14)$$

$$t_{\text{дон}} = \left(\frac{10^4 \cdot 16 + 2 \cdot 863,879 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 863,879} \right)^2 = 8762 \text{ (год)} \quad (6.15)$$

Отже, стійка робота обладнання забезпечується в області значень потужності дози від 0 (Р/с) до 863,879 (Р/с) протягом 8762 годин.

6.3.2 Дослідження області працездатності двигунів в умовах дії електромагнітного імпульсу

При оцінці впливу електромагнітного імпульсу (ЕМІ) на струмопровідні елементи СОВЗРД необхідно врахувати те, що ЕМІ мають горизонтальну та вертикальну складові напруженості електричного поля і тому повинні визначатися значеннями напруги на вертикальних та горизонтальних частинах. Для визначення області стійкості СОВЗРД в умовах дії електромагнітних випромінювань, необхідно визначити значення вертикальної складової напруженості електромагнітного поля, при коефіцієнті безпеки рівному $K_B=40$ дБ.

Напругу наводки горизонтальної струмопровідної частини визначаємо з формули (6.16):

$$K_{\text{б(в,з)}} = 20 \lg \frac{U_{\text{дон}}}{U_{\text{(в,з)}}} \geq 40 \text{ (дБ)} \quad (6.16)$$

де $U_{\text{доп}}$ – допустиме коливання напруги наводки, В;

$U_{(в,г)}$ – напруга наведена за рахунок електромагнітних випромінювань у вертикальних (горизонтальних) струмопровідних частинах, В.

Значення лінійної напруги – 750 кВ, фазної – 450 кВ, амплітудне значення – 640 кВ.

Визначаємо допустимі коливання напруги живлення ($N=5\%$):

$$U_{\text{доп}} = U_{\text{жс}} + \frac{U_{\text{жс}}}{100} \cdot N \quad (6.17)$$

$$U_{\text{доп}} = 640000 + \frac{640000}{100} \cdot 5 = 6,72 \cdot 10^5 \text{ (В)} \quad (6.18)$$

З рівняння (6.18) визначаємо:

$$U_{\text{с}} = \frac{U_{\text{доп}}}{100} \quad (6.19)$$

$$U_{\text{с}} = \frac{6,72 \cdot 10^5}{100} = 6,72 \cdot 10^3 \text{ (В)} \quad (6.20)$$

Прийmemo максимальну довжину горизонтальних струмопровідних частин (в кабельних тунелях по території ВРП до зали релейного захисту та протиаварійної автоматики) $l_{\text{г}}=523$ (м). Тоді вертикальна складова напруженості електричного поля визначається за формулою (6.22):

$$U_{\text{с}} = E_{\text{с}} \cdot l_{\text{с}} \quad (6.21)$$

$$E_{\text{в}} = \frac{U}{l_2} \quad (6.22)$$

$$E_{\text{в}} = \frac{6,72 \cdot 10^3}{523} = 12,85 \text{ (В / м)} \quad (6.23)$$

Отже, стійка робота СОВЗРД можлива в області значень вертикальної складової напруженості електричного поля від 0 кВ/м до 12,85 В/м.

Висновки до шостого розділу

В розділі виконано розрахунок штучного захисного заземлення. Отриманий розрахунковий опір розтікання струму відповідає вимогам ПУЕ, ПТЕ та ПТБ. Також було досліджено стійкість роботи систем оперативного визначення залишкового ресурсу двигунів в умовах дії на них іонізаційних та електромагнітних випромінювань.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу особливостей експлуатації та конструкції потужних електричних двигунів доведено, що ці двигуни експлуатуються в тяжких умовах, а саме в умовах високих напруг 6000 або 10000 вольт, підвищеної вологості повітря машинної зали теплової електростанції (ТЕС), насосних, підвищених температур котельних приміщень, а таж в умовах частих перевантажень, пусків та зупинень.

Проведені дослідження причини пошкодження потужних двигунів, що експлуатуються на електричних станціях свідчать про те, що до таких причин відносяться перенапруги в колах живлення власних потреб електричних станцій (ЕС), висока вібрація привідних механізмів (кулькових млинів, транспортерів вугілля, дугтєвих вентиляторів і т. п.), струмові пускові перевантаження в умовах дії АПВ та інші;

Розроблені математична та комп'ютерна моделі по визначенню коефіцієнта залишкового ресурсу електричного двигуна можуть бути застосовані під час поточного визначення часу виведення ЕД з експлуатації для ремонту або для утилізації;

Досліджені існуючі методи та засоби діагностування асинхронних електродвигунів свідчать про наявність методів та засобів як періодичного контролю, так і on-line моніторингу.

Результати розрахунку економічних показників вказують на доцільність впровадження мікропроцесорної системи діагностування електричних двигунів.

Впровадження на електричних станціях і підстанціях розглянутих заходів з безпечної експлуатації пристроїв діагностування електричних двигунів сприяє зменшенню електротравматизму, зменшує ризик задання шкоди організму людини.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – М., 1996. – 276 с.
2. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.; Видавництво «Форт», 2017. – 760 с..
3. ГКД 34.20.601-2003 «Правила організації технічного обслуговування та ремонту обладнання будівель та споруд лектростанцій та мереж» / Об'єднання енергетичних підприємств "Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики" // Київ, 2003 р.
4. Малафеев А.В., Тремасов М.А. Анализ устойчивости двигателей собственных нужд тепловых электростанций с учетом характеристик приводных механизмов // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С.6-13. doi: 10.18503/2311-8318-2016- 4(33)-6-13
5. Малафеев А.В., Тремасов М.А. Разработка уточненной методики расчета моментно-скоростной характеристики питательного насоса тепловой электростанции в задаче анализа устойчивости собственных нужд // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №3. С.58-63.
6. Малафеев А.В., Долганова А.С., Газизова О.В. Анализ устойчивости двигателей собственных нужд электростанций ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Главный энергетик. 2012. №10. С.40-46
7. Васильев В.А., Ницкий А.Ю. Некоторые проблемы эксплуатации питательных насосов энергоблоков мощностью 800 МВт Нижневартговской ГРЭС // Вестник ЮУрГУ, – № 1. –2005. – С.41-47.
8. Ливанова О. В. Испытания головного образца асинхронного электродвигателя АТД-8000-2 / О. В. Ливанова, В. Д. Климовицкий // Электрические станции, – 2003. – №3. – С. 51-58.

9. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. / Леоненков А. В. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
10. Нечёткие алгоритмы оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования / Н. В. Костырев, Е. И. Бардик, Р. В. Вожаков [и др.] // Наукові праці ДонНТУ – Електротехніка і енергетика. – 2008. – № 8. – С. 65-70.
11. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – М., 1996. – 276 с.
12. Полковниченко Д.В. Послеремонтная оценка технического состояния короткозамкнутых асинхронных электродвигателей / Донец. нац. техн. ун-т. – Донецк, 2005. – С. 22-29.
13. Пономарев В.А., Суворов И.Ф. Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей // Новости электротехники. – 2011. – № 2 (68).
14. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
15. Голубева А.М. Анализ проблемы диагностики асинхронных двигателей с поврежденным короткозамкнутым ротором // Мехатроника: сб. ст. техн. тематики. – 2007.
16. Акимова Н.А., Котеленец Н.Ф., Сентюрихин Н.И. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования. – М.: Академия, 2008. – 300 с.
17. Современные методы неразрушающего контроля и диагностики технического состояния электроприводов горных машин / С.В. Бабурин, В.Л. Жуковский, А.А. Коржев, А.В. Кривенко; С.-Петерб. гос. горн. ин-т им. Г.В. Плеханова. – СПб., 2009. – 163 с.
18. Лежнюк П.Д. Оперативне діагностування високовольтного обладнання в задачах оптимального керування режимами електроенергетичних систем / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, О.В. Нікіторович // Технічна електродинаміка. – 2012. – №3. – С. 35-36..

19. Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа их внешнего магнитного поля. – Барнаул, 2009. – 181 с.

20. Диагностика и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего электромагнитного поля / А.Ю. Алексеенко, О.В. Бродский, В.Н. Веденеев, В.Г. Тонких, С.О. Хомутов // Вестник Алтай. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова. – 2006. – № 2. – С. 79–83.

21. Петухов В. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости Электротехники. – 2005. – № 1 (31). – С. 23–28.

22. Thorsen V., Dalva M. Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry / University of Cambridge. – 1997. – № 444. – С. 1–13.

23. Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring / R.S. Randy, G.H. Thomas, F. Kamrah, G.B. Rodert // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1995. – Vol. 31, № 6. – P. 52–59.

24. Рубаненко О.Є. Діагностування обладнання в умовах неповноти вихідних даних / О.Є. Рубаненко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і електроенергетика». – 2011. – Вип.11. – С.319-323

25. Kliman G.B., Stein J. Induction Motor Fault Detection Via Passive Current Monitoring // ICEM'90: Proceedings of International Conferences, MIT. – Boston, – 1990. – P.32-41.

26. Bechard P. Передовой спектральный анализ / PDMA Corporation. – 2009. – 253 с.

27. Петухов В. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // Новости электротехники. – 2008. – № 1 (50). – С. 33–37.

28. Петухов В. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // Новости электротехники. – 2008. – № 1 (49).

29. Купцов В.В., Горзунов А.С., Сарваров А.С. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по осциллограммам нестационарных режимов работы // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. – 2009. – № 4 (167). – С. 123–129.

30. Экспертная система контроля технического состояния вращающихся машин [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.diacs.com/ru/article.php>. (дата обращения: 29.11.2012).

31. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования / Урал. гос. ун-т путей сообщ.-я. – Екатеринбург, 2011. – 367 с.

32. Обзор современных методов и средств оперативной диагностики электромеханических преобразователей энергии / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, Д.Ю. Пашали, О.А. Бойкова // Вестник Урал. гос. авиац. техн. ун-та. – 2010. – Т. 14, № 4 (39). – С. 73–79.

33. Жарков В.В. Разработка и исследование методов и средств диагностики электрических машин на основе измерения их полей рассеяния: дис. ... канд. техн. наук. – Ульяновск, 2003. – 157 с.

34. Система автоматического интеллектуального діагностування – <https://www.google.com/urlimages&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCOjf4J7D8OkCFQAAAAAdAAAAABAD>

35. Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках / П. А. Долин. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.

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

37. Рубаненко О.Є. Планування технічного обслуговування силових трансформаторів за результатами контролю їх частотних характеристик / О.Є. Рубаненко, Грищук М.О., О.О. Рубаненко // Світлотехніка та електроенергетика – 2019. –№ 3 (56). – С. 92–98.

ДОДАТОК А**Технічне завдання МКР**

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

ЗАТВЕРДЖУЮЗавідувач кафедри ЕССд.т.н., професор Лежнюк П.Д.

(наук. ст., вч. зв., ініц. та прізви.)

(підпис)

«_____» _____ 20__ р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
**ДІАГНОСТУВАННЯ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ
ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ**
08-13.МКР.017.00.124 ТЗ

Науковий керівник: к.т.н., проф., доцент
каф. ЕСС_____
(підпис) Рубаненко О.Є.

Магістр групи ЕСМ-18м

(підпис) Яременко О.О.

Вінниця 2020 р.

1. Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)

а) ознакою сьогодення є висока пошкоджуваність асинхронних двигунів, що стає причиною значних збитків. На частку електродвигунів доводиться 25-30% загальної кількості пошкоджень електроустаткування, а збиток від пошкоджень електродвигунів в Україні становить 1-1,5 млрд грн на рік. Своєчасне виявлення несправностей дозволяє скоротити витрати на обслуговування і втрати від позапланових простоїв, підвищити ефективність роботи двигунів і виробничих механізмів.

Таким чином, завдання розробки засобів діагностування електричних двигунів та тема магістерської кваліфікаційної роботи є актуальними.

б) наказ ректора ВНТУ № 76 від 6 березня 2020 р. про затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи.

2. Мета і призначення МКР

Мета МКР полягає у вдосконаленні методів визначення технічного стану потужних двигунів електричних станцій шляхом аналізу їх залишкового ресурсу.

МКР призначена для:

- аналізу особливостей експлуатації та конструкції потужних електричних двигунів;
- дослідження причин пошкодження потужних двигунів, що експлуатуються на електричних станціях;
- розроблення математичної та комп'ютерної моделі по визначенню коефіцієнта залишкового ресурсу електричного двигуна;
- розрахунок економічних показників впровадження мікропроцесорної системи діагностування електричних двигунів
- дослідження заходів з безпечної експлуатації пристроїв діагностування електричних двигунів.

3. Вихідні дані для виконання МКР

Дослідити пошкоджуваність асинхронних електричних двигунів власних потреб електричних станцій. Проаналізувати конструктивні особливості потужних електричних двигунів (1,8 МВт) типу W Line виготовлені на заводі в БЕВЕРАТЕ

ді Брів - Лекко (Італія); двигуни ДВДА-260/99-20-24ЕЗ, або ДВДА-200-35/104-20-24УХЛ1 напругою 6 кВ, частотою 50 Гц потужністю 2 МВт для циркуляційних насосів та електродвигуни АВ-8000/6000У3 для приводу пускорезервних живильних пристроїв котельних агрегатів блоків потужністю 300 МВт теплових електричних станцій.

Система автоматизованої інтелектуальної діагностики САІД-МК для діагностування електричних двигунів, що використовують теорію нейронних мереж.

Список рекомендованих літературних джерел розробки:

1. Рубаненко О.Є. Діагностування обладнання в умовах неповноти вихідних даних / О.Є. Рубаненко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і електроенергетика». – 2011. – Вип.11. – С.319-323.;

2. Лежнюк П.Д. Оперативне діагностування високовольтного обладнання в задачах оптимального керування режимами електроенергетичних систем / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, О.В. Нікіторович // Технічна електродинаміка. – 2012. – №3. – С. 35-36.;

3. ГКД 34.20.601-2003 «Правила організації технічного обслуговування та ремонту обладнання будівель та споруд електростанцій та мереж» / Об'єднання енергетичних підприємств "Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики" // Київ, 2003 р.

4. Пономарев В.А., Суворов И.Ф. Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей // Новости электротехники. – 2011. – № 2 (68).

5. Петухов В. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // Новости электротехники. – 2008. – № 1 (49).

6. Рубаненко О.Є. Планування технічного обслуговування силових трансформаторів за результатами контролю їх частотних характеристик /

О.Є. Рубаненко, Грищук М.О., О.О. Рубаненко // Світлотехніка та електроенергетика – 2019. –№ 3 (56). – С. 92–98.

4. Вимоги до виконання МКР

Вимоги до виконання викладені у відповідних нормативних матеріалах з використанням основних законів електротехніки і методів розрахунку струмів короткого замикання.

5. Економічні показники

Провести розрахунок по визначенню терміну окупності впровадження системи автоматизованого функціонального діагностування двигунів.

6. Етапи МКР та очікувані результати

№ етапу	Назва етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	кінець	
1	Розроблення технічного завдання			формування технічного завдання
2	Аналіз особливостей експлуатації потужних двигунів електричних станцій			аналітичний огляд літературних джерел, задачі досліджень, розділ 1 ПЗ
3	Дослідження причин пошкодження потужних двигунів електричних станцій			розділ 2
4	Визначення загального залишкового ресурсу електричного двигуна			розділ 3
5	Методи та засоби діагностування електричних Двигунів			розділ 4
6	Економічні розрахунки			розділ 5
7	Розроблення заходів безпеки життєдіяльності та цивільного захисту			розділ 6
8	Оформлення пояснювальної записки та презентації			презентація

7. Матеріали, що подаються до захисту МКР

Пояснювальна записка МКР, ілюстративні матеріали, відгук наукового керівника, відгук рецензента, анотації до МКР українською та іноземною мовами.

8. Порядок контролю виконання та захисту МКР

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

9. Вимоги до оформлення МКР

Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційну роботу у Вінницькому національному технічному університеті (БДР (БД), ДП (ДР), МКР)», 2015р.

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

Відсутні..

ДОДАТОК Б**Графічний матеріал**