

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій

проф., д.т.н. /КАПЛУН В.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

доц., к.т.н. /ОКУШКО О.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

„_____” _____ 2025р.
число місяць рік

„_____” _____ 2025 р.
число місяць рік

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ
МЕРЕЖІ»**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(назва)
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

к.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Усенко С.М.
(ПІБ)

Керівник магістерської роботи

к.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Коробський В.В.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Боярчук О.В.
(ПІБ)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій**

К.Т.Н., доцент /ОКУШКО О.В./
науковий ступінь, вчене звання підпис ПІБ
„ _____ ” _____ 2025 року
число місяць рік

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Боярчуку Олександр Володимировичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Вдосконалення системи технічного
сервісу електрообладнання з використанням штучної нейронної мережі»
затверджена наказом ректора НУБіП України від “_18_”_11_2024 р. № 2061 “С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2025.11.15
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи:

- а) Результати науково-дослідницької роботи кафедри ЕЕЕ.
- б) Публікації співробітників кафедри ЕЕЕ.
- в) Результати навчально-дослідницької практики.
- г) Система ПЗР і ТО електрообладнання сільськогосподарських підприємств.
- д) Нормативні документи: ПУЕ, ПТЕЕС та ПБЕЕС, ДСТУ, ДБН тощо.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналітичний огляд літератури щодо технічного сервісу електрообладнання.
2. Технологічна частина Проектування бази сервісної служби.
3. Електротехнічна частина. Розрахунки та вибір електрообладнання, електропроводок та електричного освітлення.
4. Дослідницька частина. Вдосконалення системи технічного сервісу електрообладнання з використанням штучної нейронної мережі.
5. Оцінка економічної ефективності періодичного діагностування асинхронних електродвигунів.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

Дата видачі завдання “ 20 ” листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____

Коробський В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

Боярчук О.В.
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 87 с., 42 рис., 27 табл., 35 джерел.

Об'єкт дослідження: система електрообладнання господарства та система технічного сервісу силового електрообладнання (асинхронних електродвигунів потужністю до 10 кВт).

Предметом дослідження: фізико-механічні процеси, що відбуваються в системі електрообладнання та комплекс приладового забезпечення робіт з діагностування та технічного сервісу, які використовуються енергетичною службою підприємства.

Методи дослідження та апаратура: розрахунково-аналітичний на базі теорії інформації із застосування технічних і приладових засобів. Експериментальні дані оброблялись з використанням методів математичної статистики та теорії ймовірностей при використанні програми «MathCAD 7 Professional».

Мета досліджень – розробка комплексу методів, технічних засобів та вдосконалення заходів для вирішення питань обґрунтування сучасної системи технічного сервісу силового електрообладнання з використанням штучної нейронної мережі (зокрема, для асинхронних електродвигунів).

В магістерській роботі розглянуто питання технічного сервісу електрообладнання на станції технічного обслуговування електричного обладнання та його ремонту. виконаний вибір пускозахисної апаратури силового та освітлювального електрообладнання. Розглянуті питання актуальності вибраної теми. Детально проаналізовано стан експлуатації енергообладнання та системи технічного сервісу електрообладнання. Запропоновано комплексний метод діагностики асинхронних електродвигунів на основі використання штучних нейронних мереж.

Ключові слова: система технічного сервісу, станція технічного обслуговування, поточний ремонт, асинхронний електродвигун, предиктивний підхід, технічна діагностика, мікроконтролер, нейронна мережа, система комп'ютерної підтримки рішень.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ.....	6
ВСТУП.....	7
АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ.....	11
1.1 Загальні положення. Технічний сервіс електрообладнання.....	11
1.2 Альтернатива системи експлуатації та технічного обслуговування...	12
1.2.1 Технічне діагностування у системі ПЗР і ТО електрообладнання...	17
1.3 Стратегії технічного обслуговування, ремонту і діагностування обладнання.....	19
1.4. Аналіз існуючих методів діагностики електрообладнання.....	21
1.4.1. Актуальність досліджень.....	21
1.4.2. Аналіз існуючих методів діагностики.....	22
1.5. Аналіз стану досліджень, засобів та методів спектральних залежностей діагностики та розпізнавання асинхронних електродвигунів...	23
1.6 Аналіз стану існуючих методів прийняття рішень та класифікуючих систем.....	29
ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	33
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ БАЗИ СЕРВІСНОЇ СЛУЖБИ.....	33
2.1 Аналіз існуючої сервісної служби станції технічного обслуговування...	33
2.2 Обґрунтування і вибір сервісної бази з обслуговування і поточного ремонтів електротехнічного обладнання.....	33
2.3 Визначення складу ділянок бази сервісної служби і розрахунок площі ділянок.....	35
2.4 Технологічні процеси на сервісній базі з обслуговування та ремонту силового електрообладнання.....	37
2.5 Вибір технологічного обладнання.....	39
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА.....	42
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ,	

	5
ЕЛЕКТРОПРОВОДОК ТА ЕЛЕКТРИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ.....	42
3.1 Перевірка електродвигунів приводу технологічного обладнання на відповідність параметрам мережі живлення і умовам навколишнього середовища.....	42
3.2 Вибір пускозахисних апаратів та низьковольтних комплектних пристроїв керування.....	49
3.3 Розрахунок електричного освітлення та освітлювальної мережі.....	52
ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	58
РОЗДІЛ 4. ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ.....	58
4.1 Методи та прилади комплексного діагностування електродвигунів..	58
4.1.1. Методи і засоби електромагнітної діагностики асинхронних електродвигунів.....	58
4.1.2. Методи і засоби температурної діагностики асинхронних електродвигунів.....	59
4.1.3. Методи і засоби вібродіагностики.....	61
4.2 Комплекс приладів для віброакустичного діагностування електродвигунів.....	61
4.3 Аналіз спектральних характеристик асинхронних електродвигунів залежно від типу дефекту.....	64
4.3.1 Механічні дефекти асинхронних електродвигунів.....	65
4.3.2 Дефекти ротора та статора асинхронного електродвигуна.....	66
4.4 Комплексний метод діагностики асинхронних електродвигунів на основі використання штучних нейронних мереж.....	69
4.5 Алгоритм функціонування СКПР.....	75
РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРІОДИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ...	78
ВИСНОВКИ.....	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	85
ДОДАТКИ.....	88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКРОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ

Скорочення:

ПН – показник надійності;

ЕМП – електромагнітний пускач;

КМ – контактний матеріал;

НТД – нормативно-технічна документація;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ум. од. – умовні одиниці з обслуговування і ремонту електрообладнання;

ТО і ПР – технічне обслуговування і поточний ремонт;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

УР - умовний ремонт;

ТО – технічне обслуговування;

ПР – поточний ремонт;

АД – асинхронний двигун;

БД – база даних;

КЗ – коротке замикання;

СКПР – система комп'ютерної підтримки рішень.

Символи:

% - відсотки;

Одиниці:

⁰С; В; А; Вт; квар; мм; км.

ВСТУП

В Україні існують цілий ряд великих птахофабрик, сучасних тваринницьких комплексів та фермерських господарств, підприємств закритого ґрунту, заводів з виробництва кормів, автоматизованих насосних станцій, комплексів з післязбиральної обробки та зберігання зерна, підприємств з переробки сільськогосподарської продукції тощо.

Добитися підвищення експлуатаційної надійності енергетичного обладнання, подовжити термін його роботи можна шляхом впровадження системи ефективного ремонту і технічного обслуговування, яка поєднує в собі сукупність організаційно-технічних заходів щодо планування, організації та проведення комплексу робіт з обслуговування і ремонту, а також діагностування.

Внаслідок застосування електрообладнання в особливій специфічній виробничій атмосфері, порушення умов монтажу та експлуатації електрообладнання аграрного комплексу щорічно мають відмови приблизно 20% електродвигунів, 17% електромагнітних пускачів та 15% автоматичних вимикачів.

За часів незалежності в організації ремонту електрообладнання на промислових та сільськогосподарських підприємствах країни відбулися докорінні зміни. Після закриття більшості вказаних підприємств перестали існувати управління та служби головного механіка і головного енергетика, які здійснювали координацію організації ремонту обладнання. Майже одночасно у всіх галузях припинилися розробка, перегляд та видання нормативних документів з планового ремонту обладнання, які забезпечували підприємства методичною та нормативною базою для планування і організації ремонту енергообладнання. Розпалася система централізованого постачання підприємств обладнанням, запасними частинами, ремонтним оснащенням та ремонтними матеріалами. Припинився перегляд норм амортизаційних відрахувань (термінів служби обладнання), ремонтних нормативів, норм витрати матеріалів, порядку і фінансування ремонту. Завантаження діючих підприємств різко знизилось.

На практиці використовують в основному систему планово-запобіжного

ремонту і технічного обслуговування (ПЗР і ТО), яка передбачає періодичне проведення технічного обслуговування і ремонтів через певні, наперед встановлені строки. Недоліком системи ПЗР є порівняно велика трудомісткість технічного обслуговування і ремонтів електрообладнання, бо багато робіт є регламентованими (наприклад, розбирання електрообладнання для визначення технічного стану тощо). Крім того реальні умови роботи електрообладнання (змінний характер навантаження, нерівномірність використання протягом доби чи року, мінливість середовища з різними змінами температури, вологи, шкідливих домішок тощо) та зростання кількості деталей і електромагнітних навантажень на активні матеріали затрудняють застосування системи ПЗР, тому що обсяги робіт під час міжремонтного обслуговування технічних доглядів і ремонтів залежать від кількості годин роботи обладнання. Енергоремонтні служби підприємств втратили до 50% кваліфікованих працівників. Велика частина промислового обладнання (понад 70%) вичерпала свій амортизаційний термін, вимагає заміни або капітального відновлювального ремонту.

Для збільшення строку експлуатації обладнання розумно і економічно вигідно проводити діагностування, технічне обслуговування та своєчасну заміну складових одиниць і окремих деталей, що в подальшій експлуатації можуть вийти з ладу. Досвід експлуатації електрообладнання у високорентабельних господарствах показує, що основним заходом, який забезпечує високу експлуатаційну надійність електрообладнання, є введення в дію системи технічного обслуговування і ремонту електрообладнання. Вона включає в себе організаційні і організаційно-технічні заходи з планування, підготовки, проведення і обліку необхідних видів робіт з технічного обслуговування (ТО) і поточного ремонту (ПР) та здійснення діагностування із застосування сучасних приладів та діагностичних лабораторій.

Задачі моніторингу, або діагностування асинхронного електродвигуна, передують задачі ідентифікації, тобто можливості визначення конкретного двигуна із сукупності сигналів, які утворюються внаслідок роботи інших двигунів, різних перешкод тощо. Задачі ідентифікації та діагностики АД належать до задач класифікації, коли визначається приналежність вхідного

набору даних з декількох раніше відомих класів електрообладнання або типів несправностей. Серед існуючих засобів класифікації даних достатньо поширеними є нейронні мережі, які характеризуються доброю стійкістю до шумів, прийнятним часом навчання, адаптованістю.

У сільському господарстві першим документом, що регламентував питання обслуговування енергетичного обладнання (електричного обладнання як його складової) була «Система планово-запобіжного ремонту та обслуговування електрообладнання, що використовується в сільському господарстві» (Система ППРЭСХ), видання 1970 року - (перевидання 1979 року).

Технічна діагностика розглядається як елемент Системи планово-запобіжного ремонту (ПЗРЕсг) і визначає справність обладнання та прогнозування, при цьому мають бути переглянуті вимоги та форми ремонтної та експлуатаційної документації в умовах технічної експлуатації обладнання при ринкових господарських відносинах.

При стабільній економіці і цінах на ринку товарів основними джерелами істотного підвищення конкурентоспроможності, рентабельності і прибутковості підприємства є впровадження нових технологій і зниження експлуатаційних витрат на виробництві. Вирішенню цього питання сприяв бурхливий розвиток мікропроцесорної і комп'ютерної техніки, розвиток на їх базі методів і засобів контролю і аналізу поточного технічного стану устаткування.

Мета досліджень - розробка комплексу методів, технічних засобів та вдосконалення заходів для вирішення питань обґрунтування сучасної системи технічного сервісу силового електрообладнання з використанням штучної нейронної мережі (зокрема, для асинхронних електродвигунів).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити *наступні завдання*:

1. Провести аналітичний огляд літератури щодо технічного сервісу електрообладнання та системи технічного сервісу електричного обладнання, на прикладі асинхронних електричних двигунів та обґрунтувати необхідність впровадження у роботу електротехнічної служби підприємства сучасних методів та засобів для технічного обслуговування електрообладнання.

2. Запропонувати комплексний метод діагностики асинхронних електродвигунів на основі використання штучних нейронних мереж.

3. Здійснити розрахунок економічної ефективності застосування сучасних установок для обслуговування і діагностування електрообладнання.

Об'єкт дослідження: система електрообладнання господарства та система технічного сервісу силового електрообладнання (асинхронних електродвигунів потужністю до 10 кВт).

Предметом дослідження: фізико-механічні процеси, що відбуваються в системі електрообладнання та комплекс приладового забезпечення робіт з діагностування та технічного сервісу, які використовуються енергетичною службою підприємства.

Методи дослідження та апаратура: розрахунково-аналітичний на базі теорії інформації із застосування технічних і приладових засобів. Експериментальні дані оброблялись з використанням методів математичної статистики та теорії ймовірностей при використанні програми «MathCAD 7 Professional».

Теоретична цінність отриманих результатів полягає в проведенні аналізу варіантів реалізації стратегій забезпечення експлуатаційної надійності електрообладнання в агропромисловому комплексі, обґрунтуванні вторинних параметрів оцінення технічного стану електродвигунів; запровадженні тривірневого процесу ухвалення рішення щодо стратегії експлуатації обладнання.

Практична цінність отриманих результатів полягає в застосуванні методу спектрального аналізу гармонік струму для діагностування асинхронних електродвигунів замість віброакустичного діагностування та використанні комплексного методу діагностики на основі штучних нейронних мереж.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

1.1. Загальні положення. Обслуговування обладнання

У будь-якого обладнання є плановий цикл обслуговування, який необхідно враховувати в робочому процесі. Але це не панацея від аварій, які тягнуть за собою терміновий ремонт і простої машин.

Системи предиктивної аналітики ведуть журнал подій, оцінюють актуальний стан обладнання за багатьма параметрами, порівнюють їх з нормальними показниками, виявляють відхилення і заздалегідь пророкують потенційні збої.

Кілька років тому на одному з об'єктів енергетичної компанії Duke Energy зафіксували незначне збільшення вібрації в роботі парової турбіни. Предиктивна система в центрі моніторингу електростанції «прийшла до висновку», що аномалія пов'язана з дефектом лопатки і перевірка підтвердила прогноз. В Duke Energy вважають, що раннє виявлення проблеми дозволило заощадити компанії понад \$ 4 млн.

Схожа ситуація сталася на станції британської EDF Energy. Тут алгоритми також виявили механічну несправність в роботі турбіни раніше співробітників. Своєчасне усунення поломки заощадило компанії понад мільйон доларів. При цьому, за даними McKinsey, прогнозна модель обслуговування додатково скорочує час простою обладнання на 30-50% і збільшує термін його служби на 20-40%.

Сучасний електропривод, що реалізує процеси електромеханічного перетворення енергії, який в основному базується на використанні як приводних пристроїв асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором, конструктивно не складний. Разом з тим спостерігається порівняно високий відсоток виходу з ладу вказаних електродвигунів, що обумовлено різними чинниками. Один з яких – це відсутність або незадовільний рівень

періодичного технічного сервісу електродвигунів. Зазначене пов'язано як з невисоким впровадженням нових розроблених методів періодичного діагностування, так і з відсутністю достовірної і простої методики оцінки економічної ефективності впровадження періодичного діагностування.

1.2 Альтернатива системи експлуатації та технічного обслуговування

Діагностування технічного стану електроприводів, у тому числі й електродвигунів дозволить:

- своєчасно попередити виникнення аварійних ситуацій;
- суттєво зменшити витрати на проведення ремонтних робіт;
- оцінити дійсний стан електроустаткування та визначити запас його працездатності;
- підготувати до введення в роботу систем безперервної діагностування й визначити залишковий ресурс електроустаткування.

Сучасні системи і методи діагностики силового електрообладнання можна розділити на дві основні групи:

- до першої групи відносяться методи тестової діагностики, які вимагають формування штучних збурень, що впливають на досліджуваний об'єкт: вимірювання опору ізоляції, струмів витoku, внутрішнього опору обмоток, тангенса кута діелектричних втрат обмоток, метод високовольтного імпульсу тощо;
- до другої група включає в себе методи оперативної або функціональної діагностики, які використовуються в першу чергу для електрообладнання, що є джерелом природних збурень в процесі роботи.

Крім цього кожна група ділиться на дві інші – це методи, що дозволяють виявити несправність електрообладнання в цілому і методи, що виявляють та локалізують конкретну несправність або дефект в електрообладнанні.

В даний час тестове діагностування – основний вид виявлення дефектів електрообладнання. Воно визначило сформовану структуру технічного обслуговування і ремонту за регламентом. Однак таке діагностування сприяє не

тільки попередженню розвитку різних дефектів, але і їх появі нових. Наприклад, при проведенні планових ремонтів електричних машин, після повного збирання електродвигун піддається високовольтним випробуванням, які створюють на ізоляцію електричної машини згубний вплив, викликаючи появу в обмотці мікродефектів, що розвиваються в процесі роботи електродвигуна під впливом несприятливих факторів: неякісної електроенергії, перевантажень, частих пусків, зупинок, зміни швидкості обертання вала (перехідних процесів). З кожним високовольтним випробуванням при планово-попереджувальних ремонтах число дефектів збільшується, що у кінцевому підсумку призводить до аварійного виходу з ладу електродвигуна. Крім того, кожне розбирання та збирання електродвигуна збільшує такі мікродефекти. Наприклад, компанією Baker нещодавно була розроблена багатофункціональна система діагностики ізоляції електричних машин AWA IV за допомогою високовольтного імпульсного випробування. І хоча, автори цієї системи стверджують, що AWA IV виконує неруйнівний тест ізоляції, пояснюючи це своєчасної зупинкою тесту, все одно тест припиняється тільки після перевищення меж міцності ізоляції.

Серед інших недоліків тестового діагностування можна відзначити також тимчасове призупинення роботи перевіряемого обладнання, відсутність можливості захисного відключення обладнання під час його роботи для запобігання повного виходу його з ладу, відсутність контролю ненормальних режимів роботи даного обладнання тощо.

Для переходу з обслуговування та ремонту за регламентом на ремонт і обслуговування по фактичному стану необхідний ретельний технічний сервіс електрообладнання, причому, щоб підготуватися до ремонту, бажано виявити всі дефекти, що впливають на ресурс, задовго до відмови. З цих причин необхідно застосування таких методів діагностування, що не тільки належать до категорії функціональних, але і дозволяють виявити дефект конкретної частини електрообладнання. До того ж методи функціонального технічного сервісу економічно найбільш переважні, оскільки не вимагають навіть

тимчасового виведення електрообладнання з експлуатації.

При ревізіях механізмів визначаються так звані первинні параметри їх стану: дефекти кінематичних вузлів, робочих органів, кріплень тощо. Оцінення стану проводиться візуально або з використанням будь-яких інструментальних засобів і є, загалом, досить надійним і достовірним. Хоча, як свідчить досвід, далеко не всі параметри можуть бути визначені методом ревізії.

При технології ремонту «за станом», яка передбачає оцінення технічного стану механізму без ревізії, на експлуатаційних режимах, мова йде про контроль за *вторинними параметрами* і тому ці параметри повинні задовільняти певним вимогам:

1) контрольовані параметри повинні мати однозначний кількісний взаємозв'язок з первинними параметрами технічного стану;

2) вимірювання параметрів має забезпечуватися, по-можливості, простими, портативними технічними засобами, що не вимагають додаткової кваліфікації персоналу;

3) технічні засоби повинні бути метрологічно аттестовані, коли це необхідно;

4) діапазон зміни контрольованих параметрів в процесі роботи механізму від стану «добре» до стану «неприпустимо» повинен бути досить великим (параметр повинен мінятися не менше, ніж у 15-20 разів) для своєчасного виявлення дефектів, що зароджуються і достовірного прогнозування залишкового ресурсу механізму;

5) вартість виконання робіт з контролю вторинних параметрів і час їх виконання повинні бути істотно нижчими, ніж при ревізії механізмів;

6) достовірність контролю за вторинними параметрами повинна бути не нижче 80%;

7) параметри контролю повинні бути, за можливості, універсальними для діагностування однакових дефектів однотипного обладнання або його вузлів.

Викладений перелік не є вичерпним і може доповнюватися ще якими-небудь вимогами залежно від конкретних особливостей механізмів і тих дефектів, які в ньому можуть з'являтися.

Наприклад, для електродвигунів широкого розповсюдження набули методи контролю, діагностування та налагодження, що базуються на вимірюванні наступних параметрів:

- ККД електродвигуна;
- частоти обертання валу;
- вібрації машини;
- характеристик електромагнітного поля машини.

Використовувані при цьому технічні засоби дозволяють не тільки проводити вимірювання і контролювати стан механізмів, а й забезпечують вирішення завдань з оперативного налагодження механізмів в процесі експлуатації. Передусім це стосується динамічного балансування роторів. Таким чином, при технології ремонту «за станом» суттєво змінюється сам цикл робіт при експлуатації обладнання.

При технології ПЗРЕсг експлуатаційний цикл являє собою безперервне чергування двох складових циклу: робота - ТО або ремонт.

При технології ремонту «за станом» в складі циклу з'являються абсолютно нові фази, що суттєво змінюють саму ідеологію експлуатації устаткування (рис. 1.1).

Паралельно з роботою механізму з певною періодичністю(зазвичай достатньо це зробити 1 раз у 2-3 місяці) проводиться контроль поточного технічного стану механізму шляхом вмірювання відповідних параметрів. Аналіз цих параметрів в часі дозволяє відстежувати реальну динаміку змін, що відбуваються, і обґрунтовано прогнозувати терміни та зміст налагоджувальних робіт, ТО і ремонту. Введення операцій контролю і, за необхідності, налагодження дозволяє істотно поліпшувати якісний стан механізмів після проходження ремонту.

При переході до технології ремонту «за станом» з'являються деякі нові поняття [14]:

- **поточне ремонтне обслуговування** складається з технічного обслуговування (прямого і непрямого) і коригувальних ремонтів;

- **коригувальний ремонт** – поточне ремонтне обслуговування з усунення дефектів і відмов обладнання, тобто неплановий ремонт, постановка обладнання на який здійснюється без попереднього призначення;

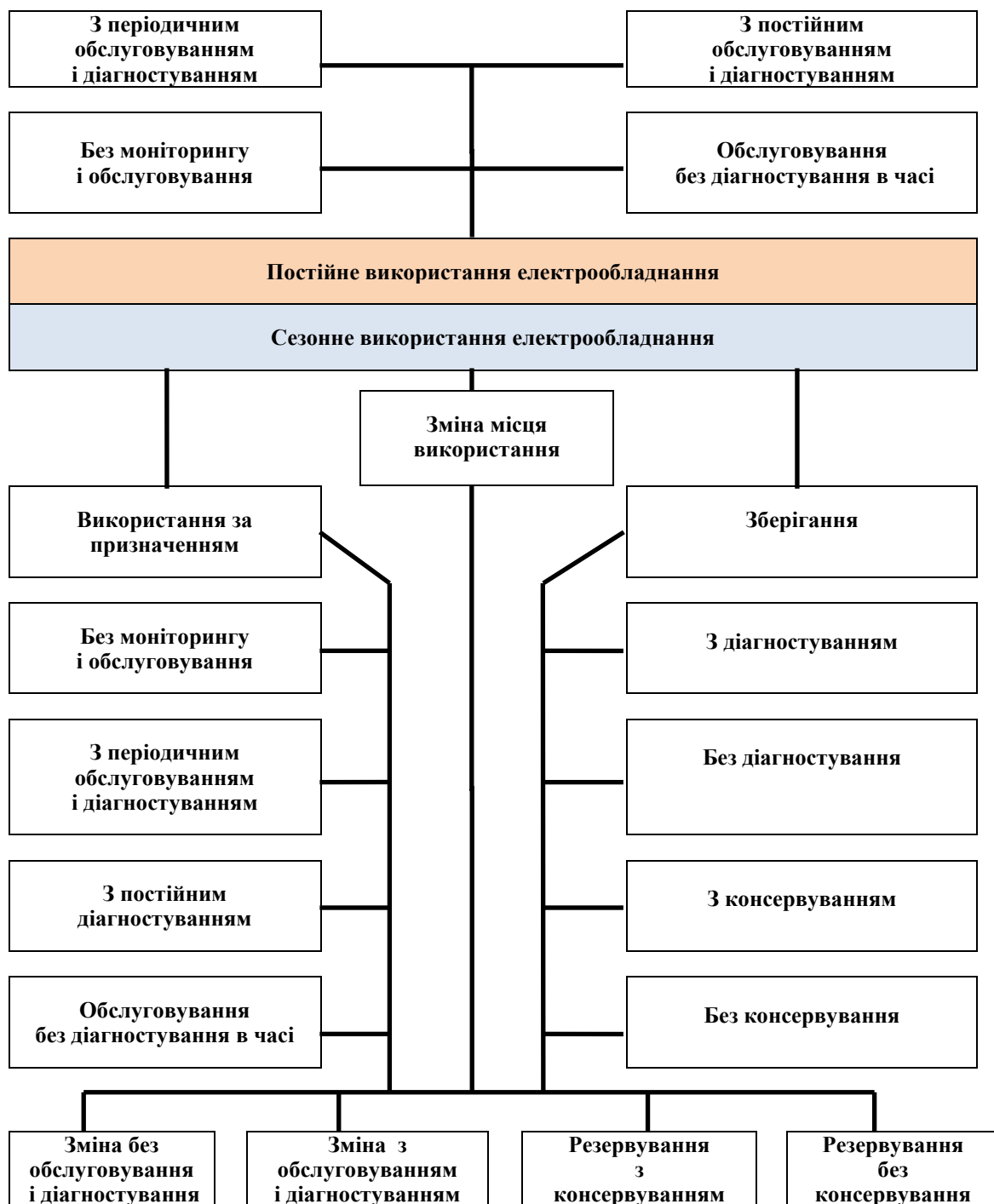


Рис. 1.1. Варіанти реалізації стратегій забезпечення експлуатаційної надійності

електрообладнання в агропромисловому комплексі.

- **профілактичне ремонтне обслуговування** включає планові ремонти та ремонти за станом обладнання. При профілактичному ремонтному обслуговуванні проводяться роботи відповідно до вимог нормативно-технічної документації.

Дана технологія при належній її організації не лише скорочує експлуатаційні витрати, але і корінним чином міняє систему обслуговування устаткування на підприємстві, що дозволяє:

- контролювати реальний поточний технічний стан механізмів;
- контролювати якість виготовлення, налагоджування і монтажу при введенні в експлуатацію;
- контролювати якість виконаних ремонтних і налагоджувальних робіт;
- технічно обгрунтовано планувати терміни і обсяг ремонтних і налагоджувальних робіт;
- планувати терміни придбання запасних частин у міру їх необхідності;
- скоротити потребу в запасних частинах, матеріалах і їх запасах на складі;
- підвищити ресурс і надійність устаткування, продовжити міжремонтний період і термін служби;
- позбавитися від «раптових» поломок механізмів і зупинок виробництва;
- підвищити загальну культуру виробництва і кваліфікацію персоналу.

Вочевидь, що для підвищення ресурсу і надійності устаткування, скорочення витрат, пов'язаних з ремонтом і простоями, необхідно переходити від регламентованих за часом профілактичних і ремонтно-відновних робіт до обслуговування «за станом».

1.2.1. Технічне діагностування у системі ПЗР і ТО електрообладнання.

Система ПЗР і ТО електрообладнання сільськогосподарських підприємств передбачає технічне обслуговування з періодичним контролем, при якому контроль технічного стану здійснюється із встановленими періодичністю та обсягом, а обсяг інших операцій визначається технічним станом виробу в момент початку технічного обслуговування.

Контроль у складі технічного обслуговування чи як окрема операція має метою прогнозування технічного стану електрообладнання до наступного обслуговування і перевірку його роботоздатності.

Плановий поточний ремонт за системою ПЗР і ТО базується на контролі технічного стану електрообладнання з періодичністю і в обсязі нею встановленими, а обсяг і момент початку ремонту визначається технічним станом виробу.

Необхідні матеріальні і трудові затрати на проведення діагностування окупуються за рахунок зменшення трудомісткості та затрат на проведення технічного обслуговування, поточного і капітального ремонтів.

Вихідними даними для планування робіт з технічного обслуговування і діагностування є інвентаризаційні документи – відомості, енергетичний паспорт підприємства, карта експлуатації тощо, а також річний план проведення цих заходів.

Технічне діагностування електрообладнання залежно від його кількості та умов підприємства може здійснюватися за такими варіантами:

- діагностування проводить окрема діагностична ланка чи бригада;
- діагностування проводить ремонтно-діагностична ланка чи бригада.

Виконавцями робіт з діагностування можуть бути інженери, бакалаври, молодші спеціалісти та досвідчені електромонтери, добре обізнані з правилами безпечної експлуатації електрообладнання. Керівник ланки чи бригади повинен мати кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче 4-ї, а інший персонал – не нижче 3-ї.

Результати вимірювань під час діагностування заносять до журналу, в якому кожній одиниці обладнання відводиться кілька сторінок з тим, щоб можна було аналізувати його стан та прогнозувати залишковий ресурс роботи.

Діагностування електрообладнання проводять з використанням переносних приладів та пристроїв. Для контролю технічного стану важкодоступного обладнання доцільно застосовувати автоматизовані діагностичні пристрої, зокрема для діагностування занурювальних електронасосних агрегатів.

1.3 Стратегії технічного обслуговування, ремонту і діагностування обладнання

Проведення діагностування енергообладнання повинно при мінімальних витратах забезпечувати достатній обсяг інформації про його технічний стан.

Пропонується розвивати ступінчасту технологію діагностування, яка дозволить енергетичним компаніям знизити витрати і перейти до перспективної стратегії виконання ТО і Р за прогнозованим технічним станом обладнання.

За кордоном [32] обговорюються дві групи стратегій технічного обслуговування та ремонту обладнання (ТО і Р), акцентовані або на підтриманні робочого стану конкретного обладнання або на збереженні надійності енергосистеми з урахуванням можливих відмов обладнання, що можуть призвести до втрат або різкого зниження цієї надійності (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Форми організації експлуатації електрообладнання

Форма організації експлуатації	Вид виконуваних робіт				
	технічне обслуговування	плановий технічний огляд	діагностування	середній і поточний ремонт	капітальний ремонт
1. Початкова стадія організації експлуатації		не проводиться	не проводиться	після відмов	після виходу з ладу
2. Система післяоглядових ремонтів	періодичне	періодичний	не проводиться	не проводиться	не проводиться
3. Система планово-запобіжного ремонту	періодичне	не проводиться	не проводиться	періодичний	періодичний
4. Система планово-запобіжного ремонту за технічним станом	періодичне	періодичний	періодичне	за технічним станом (за даними діагностування)	за технічним станом (за даними діагностування)

Наявний закордонний досвід можна сформулювати у чотирьох пунктах, наведених нижче.

- 1) стратегія планового ТО і Р забута майже повсюдно;
- 2) стратегія ТО і Р «за технічним станом» прийнята майже всюди;

3) здійснюється перехід до стратегії ТО і Р за прогнозованим технічним станом обладнання. При цьому технічні експерти розробляють сценарій ТО і Р на основі прогнозу, менеджери коригують його на основі управління ризиками;

4) стосовно комутаційних апаратів випробувана стратегія повної відмови від ТО і Р з попередньою заміною і автоматизованим моніторингом деяких видів старого обладнання (так звана коригувальна стратегія ТО і Р). Досвід кількох компаній, які впровадили цю стратегію в 2010-2012 рр., показав економію витрат в 14% [27].

Стратегію повної відмови від ТО і Р слід сприймати як парадоксальну й навряд чи реалізовану на теренах України через значний рівень зношування електрообладнання, жорсткі кліматичні умови, вандалізм, низьку кваліфікацію тощо.

5) стратегія ТО і Р за прогнозованим технічним станом становить інтерес для вітчизняних компаній як найбільш раціональна. Діагностування може і повинне стати економічно обґрунтованим.

Провідні експерти [3] пропонують трирівневий процес ухвалення рішення щодо стратегії експлуатації обладнання (рис. 1.2). Загалом процес прийняття рішення можна інтерпретувати наступним чином.

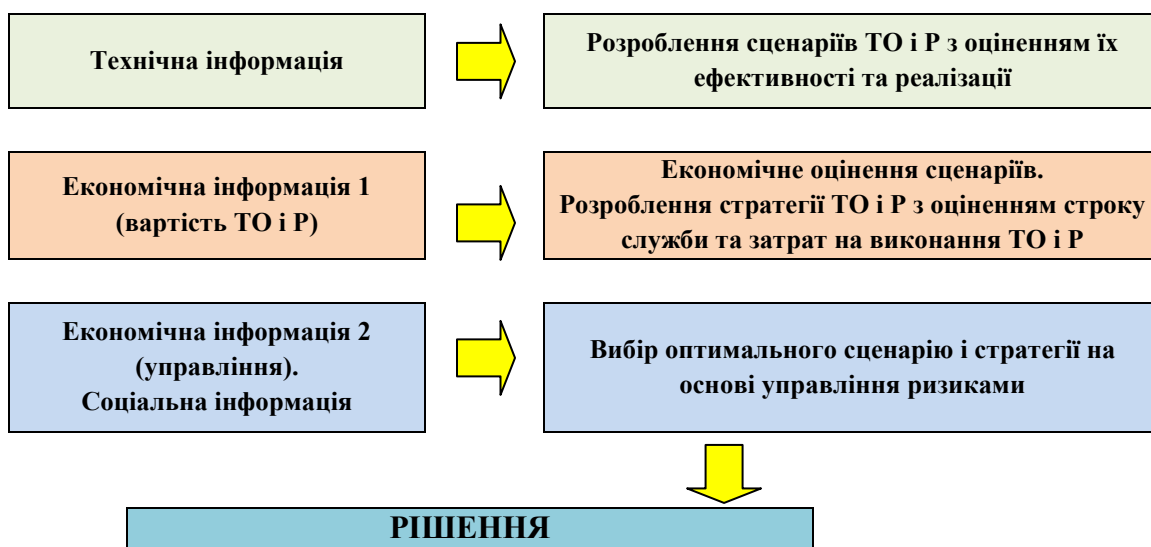


Рис. 1.2. Трирівневий механізм прийняття рішення щодо стратегії ТО і Р.

На основі технічної інформації (термін служби обладнання, навантажувальні режими, нештатні впливи, результати попередніх випробувань і діагностування) енергетичні підприємства розробляють кілька сценаріїв ТО і Р, оцінюють технічну ефективність і можливість реалізувати кожен з них.

На другому рівні (MEM) технічні фахівці прогнозують залишковий ресурс, а економісти розраховують витрати, які необхідні для ТО і Р протягом розрахункового терміну служби. У підсумку другого рівня вибираються можливі варіанти рішень.

На третьому вищому рівні менеджери департаментів енергетичних компаній на основі механізму управління ризиками та з урахуванням соціальної обстановки вибирають оптимальну стратегію і приймають рішення: продовжувати експлуатацію або міняти обладнання на нове, проводити діагностування або ставити систему моніторингу, виконувати ремонт і в якому обсязі.

1.4. Аналіз існуючих методів діагностики електрообладнання

1.4.1. Актуальність досліджень. Основу парку електроприводів сучасних промислових та аграрних підприємств складають багато- фазні асинхронні двигуни. Даний вид двигунів досить поширений, про що свідчить те, що вони споживають до 40% електроенергії, яка виробляється у світі [20]. При цьому 90% даного виду обладнання являє собою асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором [18]. За статистикою на 2011 рік [21], у загальному виробництві України використовувалося не менше 50 млн. одиниць трифазних АД напругою 0,4 кВ.

У силу своєї популярності оптимальному використанню даних двигунів перешкоджає їхня висока пошкоджуваність, тому що АД розраховуються на строк служби 10-15 років без капітального ремонту, при умові їхньої правильної експлуатації, де під правильною експлуатацією розуміється їх робота у відповідності до номінальних параметрів, вказаних у паспорті двигуна [21]. Але, на жаль, у реальних умовах виробництва завжди відступають від номінальних режимів роботи: технологічні перенавантаження, незадовільні

умови навколишнього середовища (завищена вологість та температура), неякісна мережа живлення, зниження опору ізоляції, порушення охолодження.

Результатом неправильної роботи електроприладів є аварійні режими роботи АД, через що кожен рік з ладу виходять до 10% використовуваних електродвигунів [21].

Вихід з ладу електродвигуна може спричинити до складних та тяжких аварійних ситуацій, що у свою чергу може призвести до значних матеріальних втрат, пов'язаних із простоями технологічних процесів підприємства, ліквідацією наслідків аварії та ремонтом електродвигуна. Аналіз [20, 23] свідчить про відсутність або надмірну вартість ефективних підходів щодо діагностики АД.

1.4.2. Аналіз існуючих методів діагностики. У процесі створення інформаційної технології моніторингу поточного стану АД було проаналізовано існуючі методи та засоби діагностування електродвигунів. Зокрема, найпоширенішими методами діагностування є [24]:

- вібраційний спосіб оцінки технічного стану електродвигуна, за яким реєструють та аналізують сигнал, який створює вібрація приладу. За отриманими даними аналізують форму та амплітуду отриманого сигналу і, порівнюючи її із значеннями попередніх вимірів, оцінюють можливість подальшої роботи двигуна;

- спосіб моделювання, який включає в себе етап розробки комп'ютерної моделі двигуна, з'єднання з устаткуванням за допомогою великої кількості датчиків. За отриманими даними робочих сигналів двигуна обчислюються рівняння стану у часі, яке у свою чергу, порівнюється із рішенням моделі, і на основі різниць рішень визначається, чи є несправність у двигуні;

- спектр-струмовий аналіз, спосіб діагностики двигунів та пов'язаних з ними механічних приладів, у яких протягом заданого інтервалу часу відбувається запис значень струмів, які споживає двигун. З отриманих значень виокремлюють характерні частоти для даного електродвигуна, перетворюють отриманий сигнал з аналогової форми у цифрову, а потім здійснюють

спектральний аналіз із отриманого сигналу та порівняння значень амплітуд на характерних частотах з рівнем сигналу на електромережі.

Серед розглянутих методів спектр-струмовий аналіз є найбільш перспективним та оптимальним методом, тому що він дозволяє досліджувати двигун не тільки безпосередньо під'єднавшись до нього (перші два способи), а й під'єднавшись до системи живлення. При спектр-струмовому аналізі найчастіше використовують пряме перетворення Фур'є для отримання, наприклад, амплітудно-частотної характеристики електродвигуна навіть у реальному часі [16].

При використанні спектр-струмового аналізу в процесі створення інформаційної технології моніторингу поточного стану АД необхідно вирішувати задачі ідентифікації та діагностики електродвигунів. Дані задачі належать до задач класифікації, коли визначається приналежність вхідного набору даних з декількох раніше відомих класів електродвигунів або типів несправностей. Серед існуючих засобів класифікації даних достатньо поширеними є нейронні мережі, які характеризуються доброю стійкістю до шумів, прийнятним часом навчання, адаптованістю.

Спектр-струмовий метод у силу своєї відносної новизни є досить актуальним та перспективним, адже дозволяє використовувати інформаційну технологію діагностування та моніторингу поточного стану електрообладнання без безпосереднього під'єднання до нього датчиків, наприклад, як у вібраційному способі.

Також при розробці системи комп'ютерної підтримки рішень (СКПР) моніторингу поточного стану групи АД в основу покладено системи розпізнавання обладнання, одним із варіантів рішення задач класифікації та розпізнавання є використання апарату нейронних мереж [21, 26, 27].

1.5. Аналіз стану досліджень, засобів та методів спектральних залежностей діагностики та розпізнавання асинхронних електродвигунів

Спектральний аналіз – це метод обробки різноманітних сигналів, який дозволяє виявляти частотний склад сигналу.

Головним критерієм визначення інформаційною системою можливих несправностей є виявлення підвищених амплітуд вібрації, значень струму на частотах, що збігаються із частотами можливих ушкоджень елементів, резонансних частотах деталей, на частотах протікання робочого процесу.

Комп'ютерний аналіз даних частот допомагає виявити й ідентифікувати несправність на ранніх стадіях її зародження й розвитку [24].

На сьогоднішній день існує два способи опису сигналу: у частотній та часовій області (рис. 1.1).

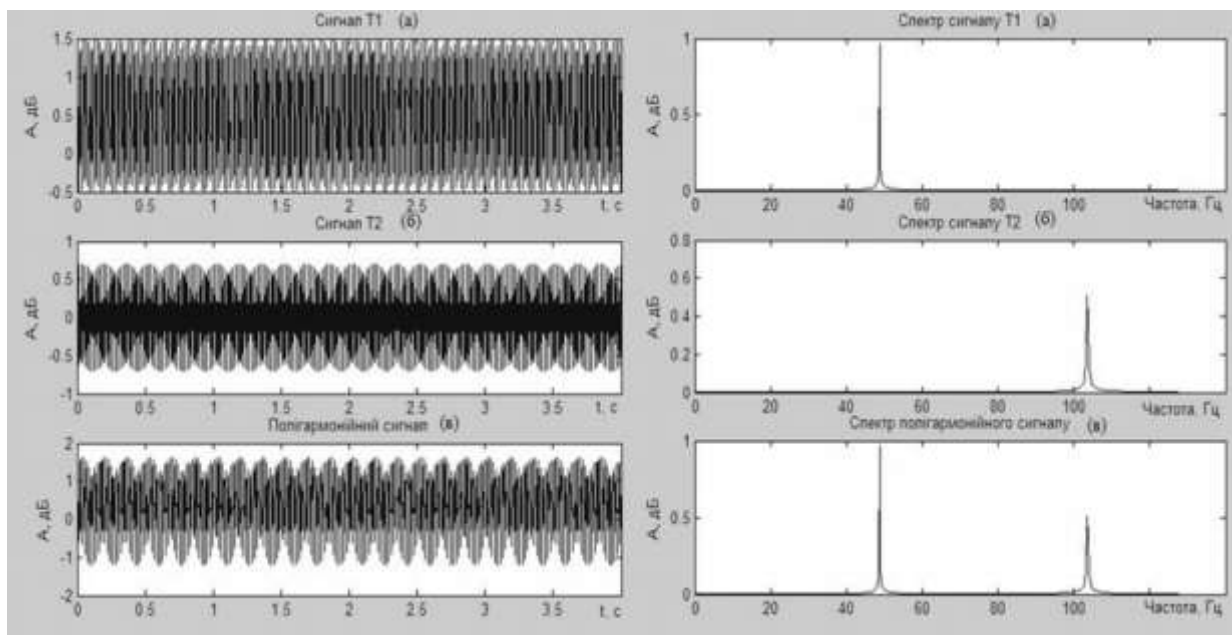


Рис. 1.1. Поточні сигнали струму та їхні спектри:

- а) гармонійні коливання з періодом T1; б) гармонійні коливання з періодом T2;
- в) полігармонійний сигнал.

Вимірювання на конкретній частоті може дати інформацію про ту чи іншу несправність. Розв'язання задач спектрального аналізу можливе при використанні перетворення Фур'є, а для пришвидшення процесу обчислення та комп'ютерного аналізу використовують швидке перетворення Фур'є. Даний метод дозволяє визначити вклад окремих складових спектра струму у загальну картину сигналу. Сигнал струму, який у часовій області представляється у вигляді амплітуди $x(\omega)$, можна отримати у вигляді розподілення амплітуд у частотній області $x(f)$ [14]:

$$x(\omega) = a_0 / 2 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t + \dots + b_1 \sin \omega t + \dots + b_n \sin n\omega t, \quad (1.1)$$

де $a_0, a_1, a_2, a_n, b_1, b_2, b_n$ – амплітуди складових компонентів струму,
 ω – кутова швидкість оборотної частоти коливань,
 n – число складових струму.

Спектр-струмовий аналіз є досить популярним методом при визначенні несправностей в АД. Зокрема дослідження у даному напрямі представлені у ряді готових виробів та прототипів, зокрема найбільш потужними приладами та розробками є:

1. Апаратно-програмний комплекс для виконання робіт із діагностики стану й умов роботи електричної та механічної частини електродвигунів і пов'язаних з ними механічних пристроїв на основі спектрального аналізу сигналів споживаного електродвигуном струму, розроблений Петуховим В.С. [19].

Даний комплекс робить аудит стану й умов роботи електричної й механічної частини електродвигунів і пов'язаних з ними механічних пристроїв, на основі спектрального аналізу сигналів споживаного електродвигуном струму. Блок-схема комплексу представлена на рис. 1.2.

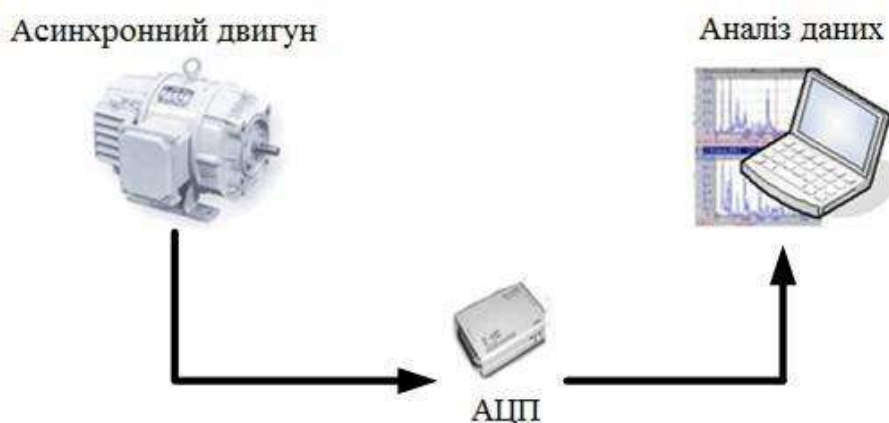


Рис. 1.2. Блок-схема діагностичного комплексу.

До складу комплексу входять роз'ємний струмовий датчик з лінійною частотною характеристикою, кондиціонер сигналу (фільтр низьких частот, що перешкоджає появі помилкових частот сигналів (aliasing) при їхній

дискретизації (9), аналого-цифровий перетворювач, персональний комп'ютер з необхідним програмним забезпеченням для збору й обробки інформації [18].

Запис сигналів струму здійснюється протягом часу, необхідного для виконання спектрального аналізу з дозволом за частотою не менш 0.01-0.02 Гц.

Відцифровані АЦП дані передаються до ПК, де виконується обробка отриманих даних, визначається частота обертання двигуна і число стрижнів його ротора, потім виконується спеціальний спектральний аналіз сигналу струму.

2. Система діагностики електродвигуна постійного струму на основі NICompactRio. Дана система містить такі можливості: вимірювання температури за допомогою термодари та модулю NI cRIO-9211; визначення частоти спожитого струму та напруги, використовуючи безконтактний датчик струму NI cRIO-9201; управління роботою двигуна по алгоритму ПД-регулювання з використанням широтно-імпульсної модуляції. Дані вимірювань заносяться у базу даних, також вони доступні on-line з будь-якого комп'ютера по Ethernet або через web-інтерфейс [28].

3. МСЕ – портативний і всебічний діагностичний прилад, МСЕ пристрій з найбільш повними можливостями для статичного тестування електродвигунів (рис. 1.3) [24].



Рис. 1.3. Зовнішній вигляд приладу МСЕ.

Даний виріб дозволяє ретельно аналізувати двигун і його зв'язаний контур, ідентифікувати електричні дефекти, які можуть не виявлятися за допомогою більш традиційних технологій превентивного обслуговування. За

допомогою серій якісних, але неруйнуючих тестів МСЕ забезпечує раннє виявлення високого опору з'єднань, деградації ізоляції, дефектів статора, дефектів ротора, ексцентриситету повітряного зазору.

Статична методика діагностування устаткування дозволяє робити моніторинг стану під час виведення електрообладнання з роботи для гарантії надійної роботи електродвигуна.

4. Прилад АМТест-2 призначений для оперативного контролю технічного стану електричних машин різного виконання. За допомогою даного приладу в режимі моніторингу контролюється вібраційний стан, параметри енергоспоживання, проводиться діагностика стану електродвигуна, також в цьому присутні функції контролю електричних машин постійного струму, що стосуються діагностики стану обмотки ротора (якоря) і колекторного апарата (рис. 1.4) [26].

Важливою функцією приладу є можливість дослідження трифазної живлячої напруги, струмів, спожитих у фазах контрольованого електродвигуна. При цьому контролюється не тільки рівень, але й несиметрія трифазних параметрів, рівень гармонік у напругах і струмах, споживана електродвигуном потужність.



Рис. 1.4. Зовнішній вигляд приладу АМТест-2.

У результаті за допомогою одного приладу марки АМТест-2 можна контролювати технічний стан: синхронних генераторів і електродвигунів, асинхронних електродвигунів, генераторів і двигунів постійного струму.

5. Комплексний метод діагностики асинхронних електродвигунів на основі використання штучних нейронних мереж [29]. В основі даного методу є використання програмно-апаратного комплексу (рис. 1.5), що складається з комп'ютера та цифрового пристрою-посередника, що робить необхідні виміри і передає їх у комп'ютер. У якості вимірюваних електричних величин можуть бути оперативний струм, спожита потужність та інші параметри. Програма, виконувана на комп'ютері, повинна у свою чергу певним чином обробити вхідну інформацію й визначити найбільш імовірний вид ушкодження працюючого електродвигуна або зробити висновок про його справність.

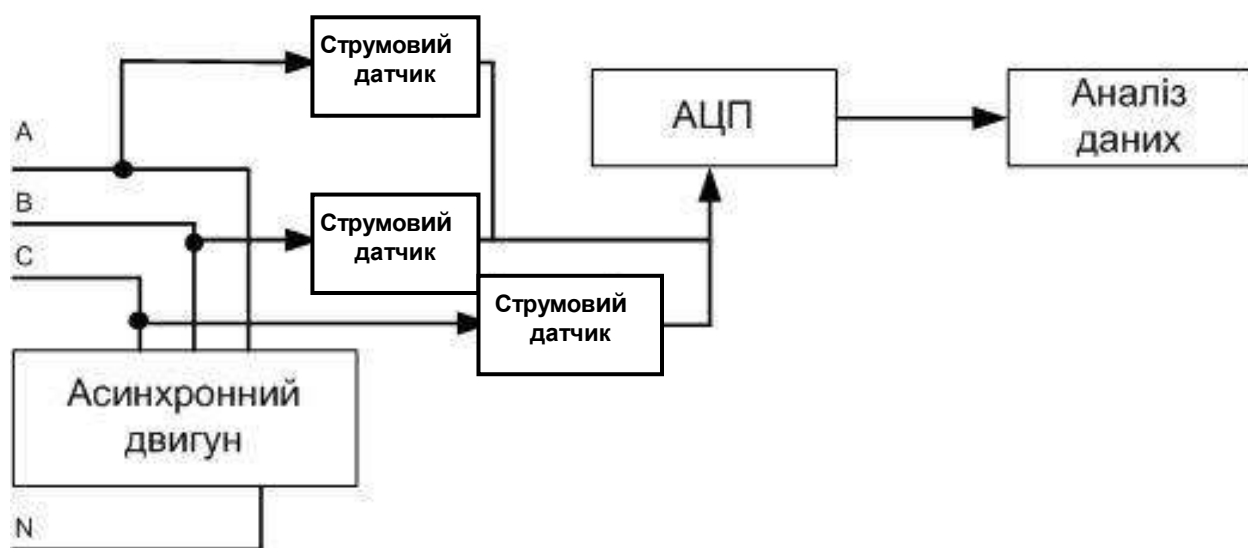


Рис. 1.5. Структура програмно-апаратного комплексу

Цей метод найбільш ефективний, тому що дозволяє зберігати на комп'ютері більші бази даних з інформацією про відслідковування динаміки ушкоджень електродвигуна з наступним прогнозуванням виходу його з ладу.

Також за допомогою спектр-струмового методу можливо відслідковувати відносну спожиту електроенергію того чи іншого електродвигуна. Однією із існуючих та запроваджених технологій є система моніторингу енергоспоживання типу «Energoauditor» [25]. У результаті її впровадження можливо економити до 30% теплової та 15-20% електроенергії. В основі даної системи є безперервний моніторинг в автоматичному режимі загальнодоступних технічних ресурсів (електролічильники, стандартні ЕОМ, датчики тощо). Дана система дозволяє здійснювати контроль за споживанням

теплової та електроенергії, а також управління на великій віддаленості об'єктів один від одного, а результати моніторингу подаються у вигляді таблиць та графіків. Дана система не використовує спектр-струмовий метод.

Також теоретичному та практичному дослідженню спектральних залежностей енергоспоживання присвячені роботи вітчизняних авторів: Д.В. Полковніченко, Д.Й. Родькін, Т.А. Желдак, О.П. Чорний, А.О. Ткаченко, В.А. Сидоров, В.С. Петухов, О.М. Швець, іноземних авторів: В.Т. Томсон, В. Торсен, М. Далва, А. Садегіан та ін.

Отже, у результаті аналізу вищезазначених робіт було виявлено, що при створенні інформаційної технології моніторингу поточного стану АД, при діагностуванні несправностей обмоток статора і ротора, у тому чи іншому ступені погіршується синусоїдальність та симетричність струмів напруг у фазах, відбувається погіршення робочих характеристик та енергетичних показників двигуна, починає виникати шум, вібрації.

У свою чергу, з метою визначення можливого дефекту двигуна, необхідно виконувати комп'ютерний аналіз спожитого струму електродвигуном шляхом розкладу його на відповідні складові.

Усі розглянуті розробки та програмно-апаратні комплекси мають декілька головних недоліків, а саме:

- безпосереднє та постійне під'єднання датчиків для зняття інформації до досліджуваних АД;
- неможливість одночасного діагностування та розпізнавання декількох АД;

У більшості випадків для отримання результату необхідно використовувати спеціаліста.

1.6 Аналіз стану існуючих методів прийняття рішень та класифікуючих систем

Методи прийняття управлінських рішень – це конкретні способи цільового вибору з безлічі альтернатив найбільш прийняттого варіанту рішення проблеми [33]. Існують такі методи, що використовуються для прийняття управлінських рішень: 1. Прості методи прийняття рішень (методи, які не

вимагають застосування розвиненого математичного апарата). 2. Декомпозиція (подання складної проблеми як сукупності простих питань). 3. Діагностика (пошук у проблемі найбільш важливих деталей, які вирішуються в першу чергу; використовується при обмежених ресурсах). 4. Методи експертних оцінок. 5. Математичні методи аналізу експертних оцінок: методи середніх балів, метод середніх арифметичних рангів, метод медіан рангів, метод узгодження кластеризованих ранжировок. 6. Метод неспеціаліста (питання вирішується особами, які ніколи не займалися даною проблемою, але є фахівцями в суміжних областях). 7. Методи оптимізації. 8. Імітаційне моделювання. 9. Метод теорії імовірності. 10. Метод теорії ігор (завдання вирішуються в умовах повної невизначеності). 11. Метод аналогій (пошук можливих рішень проблем на основі запозичення з інших об'єктів керування). 12. Метод теорії графів (рішення транспортних завдань, завдань про призначення, вибору найкоротшого шляху, календарно-мережного планування й керування, завдань розміщення, розподілу ресурсів на мережах тощо).

Для задач класифікації використовуються різні методи.

Найбільш популярними методами є: - класифікація за допомогою дерев рішень – основним недоліком даного методу є те, що використання даного алго- ритму засновано на евристичних алгоритмах, що призводить до неможливості забезпечення оптимальності усього дерева загалом. На результат класифікації впливають тільки індивідуальні значення вхідних змінних, комбінований вплив значень різних атрибутів та властивостей не враховується; - класифікація за допомогою штучних нейронних мереж – до основних недоліків можна віднести те, що досить важко оцінити статистичну значимість отримуваних результатів у процесі навчання прогностичних моделей, а також те, що нейронна мережа при значних об'ємах обробки даних потребує великі обчислювальні потужності з метою зменшення часу навчання; - класифікація методом опорних векторів – до основних недоліків можна віднести те, що немає чітких критеріїв вибору ядра, значний час навчання системи класифікації, мала кількість параметрів для налаштування; - статистичні

методи, зокрема лінійна регресія – до основних недоліків можна віднести те, що моделі, які мають невелику складність, можуть стати неточними, а моделі, які навпаки мають велику складність, можуть стати перенавченими.

Отже, найбільш оптимальним методом ідентифікації об'єкта дослідження в електромережі є класифікація за допомогою нейронних мереж, адже інтелектуальні системи на основі штучних нейронних мереж дозволяють із успіхом вирішувати проблеми розпізнавання образів, виконання прогнозів, оптимізації, асоціативної пам'яті й керування [24]. Традиційні підходи до рішення цих проблем не завжди дають необхідну гнучкість.

Для створення можливості безперервного оперативного моніторингу поточного стану асинхронних електродвигунів можна використовувати інформаційні системи комп'ютерної підтримки рішень. Дані системи являють собою інструменти (апаратні та програмні) які здатні допомогти оператору на підприємстві прийняти правильне та вчасне рішення.

На сьогоднішній день всі існуючі системи комп'ютерної підтримки рішень (СКПР) можна умовно поділити на *зосереджені та розподілені*. До зосереджених належать системи підтримки прийняття рішень, розташовані фізично та функціонально на одному обчислювальному вузлі. Дані системи можуть включати до свого складу експертні системи, системи оцінки прийнятих рішень, моделюючі та прогнозуючі програми тощо.

Розподілені СКПР розподіляються фізично або функціонально та складаються з однієї або декількох експертних систем, пов'язаних між собою інформаційно, які дозволяють оцінити одну й ту саму ситуацію з різних точок зору.

Таким чином, при створенні інтелектуальної СКПР перш за все необхідно вирішувати задачу ідентифікації електродвигуна в електромережі. Дана задача належить до класу задач класифікації. Серед розглянутого різноманіття методів вирішення задач класифікації найбільш оптимальним, з точки зору часу навчання та кількості оброблюваних параметрів, є апарат штучних нейронних мереж, який у свою чергу дозволяє пришвидшити час навчання за рахунок

використання паралельних алгоритмів навчання, що дасть змогу зменшити час відгуку СКПР.

Висновки до розділу 1.

1. Проведений аналіз стратегій технічного обслуговування і діагностування електрообладнання дозволив виявити найбільш раціональну форму, а саме: стратегію ТО і Р за прогнозованим технічним станом з проведенням економічно обґрунтованим діагностуванням.

2. Проаналізовано ряд готових виробів та прототипів, що реалізують спектр-струмовий аналіз при визначенні несправностей в АД.

3. У результаті аналізу робіт вітчизняних авторів: Д.В. Полковніченко, Д.Й. Родькіна, Т.А. Желдака, О.П. Чорного, А.О. Ткаченка, В.А. Сидорова, В.С. Петухова, О.М. Швеця, іноземних авторів: В.Т. Томсона, В. Торсена, М. Далви, А. Садегіана, що присвячені теоретичному та практичному дослідженню спектральних залежностей енергоспоживання встановлено погіршення синусоїдальності та симетричності струмів напруг у фазах, робочих характеристик та енергетичних показників двигуна, починає виникати шум, вібрації.

4. Аналіз існуючих інформаційних засобів та методів діагностики асинхронних електродвигунів дозволив встановити, що методи спектральної діагностики дістають все більше поширення і є перспективними для оцінки їхнього поточного стану. Перспективне розширення області використання даних інформаційних методів обмежує зменшення вірогідності діагностування на малих частотах обертання роторів, великих рівнях шумів, створюваних іншим АД тощо. Тому існує цілий ряд невирішених завдань, які тим чи іншим чином впливають на якість, швидкість та час діагностування (моніторингу) інформаційною технологією.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.

ПРОЕКТУВАННЯ БАЗИ СЕРВІСНОЇ СЛУЖБИ

2.1 Аналіз існуючої сервісної служби станції технічного обслуговування

На станції ТО і ПР існує електротехнічна служба. До її недоліків слід віднести:

- відсутність сучасної сервісної бази;
- недостатню забезпеченість запасними частинами і ремонтним фондом;
- недостатню чисельність та низьку дисципліну персоналу.

Ці недоліки призводять до того, що серійне електрообладнання має фактичний термін служби нижчий, ніж той, що гарантує завод-виробник.

2.2 Обґрунтування і вибір сервісної бази з обслуговування і поточного ремонту електротехнічного обладнання

Зазначена сервісна служба з обслуговування призначена для проведення технічного обслуговування, поточного ремонту електричного, теплового, теплосилового, холодильного обладнання, усунення раптово виникаючих пошкоджень і несправностей, сушіння, просочування і фарбування, підготовчо-монтажних, налагоджувальних і зварювальних робіт.

Поточному ремонту підлягають малогабаритні електроустановки, а також окремі деталі і збірні одиниці різноманітних видів енергообладнання та систем електропостачання.

До сервісної бази входять наступні виробничі і допоміжні приміщення:

1. Бокс для стоянки спецавтомобіля. В боксі передбачено ТО і дрібний ремонт спецавтомобіля. Є оглядова яма, слюсарний верстат, секції стелажа для збереження запасних частин і слюсарних інструментів, підйомних гідравлічний з ручним приводом.

2. Дільниця фарбування. Призначена для можливості фарбування електрообладнання після виконання ТО і ПР (якщо необхідно). В приміщенні розташована камера для фарбування, шафа для малярних інструментів, фарборозпилювач тощо.

3. Дільниця просочування і сушіння. Вона призначена для виконання робіт з просочування і сушіння обмоток асинхронних електродвигунів, трансформаторів, автотрансформаторів та інших виробів. Є стелаж, сушильна шафа, ванна для миття, витяжна шафа тощо.

4. Приміщення складу. Призначений для зберігання інструменту, монтажних належностей, запасних частин, обладнання яке пройшло ТО або ПР, або демонтовано для проходження ТО або ПР.

5. Ремонтно-монтажна дільниця. Є основним виробничим приміщенням. В ній проводиться основний об'єм робіт з розбирання, дефектування, миття та очищення обладнання. Проектом передбачається встановлення стендів для ремонту і регулювання ПРА, освітлювальних установок, електродвигунів, пароводозабірної арматури, перевірки приладів автоматики, установки для миття, консольного підвісного крану та іншого підвісного обладнання.

6. Дільниця заготовлення конструкцій. Проводяться не складні роботи з ремонту ремонтнопридатних деталей та вузлів, а також свердлильні та шліфувальні, зварювальні та інші роботи.

7. Побутові приміщення.

8. Кабінет майстра.

9. Венткамера. В ній встановлено витяжний вентилятор для відсмоктування пилу та шкідливих парів із приміщень майстерні.

10. Електрощитова, в ній встановлені електросилові розподільчі пункти та освітлювальні щитки.

Характеристика основних і допоміжних приміщень сервісної бази наведена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Характеристика основних і допоміжних приміщень сервісної бази

Найменування	Площа, м ²	Категорія приміщень			
		за умовами оточуючого середовища	за ступенем враження електричним струмом	за ступенем вогнестійкості	за надійністю електропостачання
Бокс для стоянки автомобіля ИЖ-2715	54,1	сухе	без підвищеної безпеки	В	Ш
Дільниця фарбування	11,5	сухе	без підвищеної безпеки	А	ІІ
Дільниця просочування і сушіння	17,6	сухе	з підвищеною небезпекою	А	ІІ
Склад	34,7	сухе	без підвищеної небезпеки	В	ІІ
Ремонтно - монтажна дільниця	67,3	сухе	з підвищеною небезпекою	В	ІІ
Дільниця заготівлі конструкцій	35,5	сухе	з підвищеною небезпекою	В	ІІ
Кабінет майстра	9,3	сухе	без підвищеної безпеки	Д	Ш
Побутові приміщення:					
- кімнати спецодягу	18,0	сухе	без підвищеної безпеки	Д	Ш
- душова	5,25	особливо вологе	з підвищеною небезпекою	Д	Ш
- тамбур	10,4	сухе	без підвищеної безпеки	Д	Ш
- санвузол	9,0	вологе	без підвищеної безпеки	Д	Ш
Венткамера	56,0	сухе	з підвищеною небезпекою	В	ІІ
Електрощитова	10,0	сухе	з підвищеною небезпекою	В	ІІ

2.3 Визначення складу дільниць бази сервісної служби і розрахунок площі дільниць

База сервісної служби з ТО і ПР повинна забезпечувати:

- проведення ПР електрообладнання;
- зберігання матеріалів і запасних частин в об'ємах, необхідних для безперебійного забезпечення ТО або робіт з поточному ремонту;

- зберігання технічної документації, захисних засобів, інструментів і пристосувань.

Для проведення робіт з ТО необхідно передбачити наступні ділянки:

- ремонтно-монтажна;
- заготівлі конструкцій;
- фарбування;
- просочування і сушіння;
- витратний склад

Загальна виробнича площа кожної ділянки визначається за формулою:

$$F_{уч} = P \cdot f_p + F_{об}, \quad (2.1)$$

де P – кількість робочих місць чи стандартних приладів на одне робоче місце;

f_p – питома площа на одне робоче місце, m^2 ; $f_p = 17 m^2$;

$F_{об}$ – сумарна площа контуру, що займає технологічне і допоміжне обладнання, m^2 .

Визначаються необхідні площі виробничих ділянок.

1. Ремонтно-монтажна ділянка:

$$P=3, f_p=17 m^2, F_{об}=13,25 m^2;$$

$$F_{д1}=3 \cdot 17 + 13,25 = 64,3 m^2.$$

2. Ділянка заготівлі конструкцій:

$$P=2, f_p=17 m^2, F_{об}=5,3 m^2;$$

$$F_{д2}=2 \cdot 17 + 5,3 = 39,3 m^2.$$

3. Ділянка просочування і сушіння:

$$P=1, f_p=17 m^2, F_{об}=4,3 m^2;$$

$$F_{д3}=1 \cdot 17 + 4,3 = 21,3 m^2.$$

4. Ділянка фарбування:

$$P=1, f_p=9 m^2, F_{об}=2,7 m^2;$$

$$F_{д4}=1 \cdot 9 + 2,7 = 11,7 m^2.$$

5. Склад:

$$F_{д5}=34,7 m^2.$$

6. Кабінет інженера – електрика:

$$F_{\partial 6} = 9,3 \text{ м}^2.$$

7. Венткамера. $F_{\partial 7} = 56 \text{ м}^2$, вентилятори встановлені в двох приміщеннях площею 35 м^2 і 21 м^2 .

8. Кімната спецодягу:

$$P = 11, f_p = 1 \text{ м}^2, F_{об} = 7 \text{ м}^2;$$

$$F_{\partial 8} = 11 \cdot 1 + 7 = 18 \text{ м}^2.$$

9. Душова:

$$F_{\partial 9} = 9 \text{ м}^2.$$

10. Санвузол:

$$F_{\partial 10} = 5,25 \text{ м}^2.$$

11. Електрощитові:

$$F_{\partial 11} = 10 \text{ м}^2.$$

12. Тамбур:

$$F_{\partial 12} = 10,4 \text{ м}^2.$$

Площі ділянок № 5...12 вибираються згідно площ даних ділянок згідно проекту. Експлікація приміщень наведена в матеріалах презентації та в додатках.

2.4 Технологічні процеси на сервісній базі з обслуговування та ремонту силового електрообладнання

Спеціалізована сервісна база з пунктом діагностування електрообладнання призначена для проведення технічного обслуговування, поточного капітального ремонту силового електрообладнання.

Технологічний процес ремонту включає в себе наступні технологічні операції:

- доставка на базу;
- розбирання;
- очищення і мийка вузлів та агрегатів;
- дефектування;
- ремонт зношених деталей і збірних одиниць;

- комплектування;
- збирання;
- настроювання та післяремонтні випробовування;
- фарбування та сушіння;
- направлення на склад ремонтного фонду або на місце монтажу.

Процес ремонту розпочинається з миття. В технологічному процесі ремонту, миття і очистка виконується в декілька станів: зовнішнє миття; миття збірних одиниць; очистка окремих деталей в спеціальних машинах.

Починаючи ремонт, обладнання частково розбирають на агрегати для повторного миття, потім по конвеєру подають в камеру повторного миття, після чого його розбирають повністю.

З дільниці розбирання агрегатів і миття деталей контейнери з деталями надходять на дільницю дефектування.

Мета дефектування - встановити істинний технічний стан деталей і вузлів, прийняти правильне рішення про можливість їх подальшого використання. З дільниці дефектування контейнери надходять на дільницю комплектації. Мета цих робіт - підготувати комплекти деталей для збирання агрегатів. Зібрані і перевірені вузли і агрегати фарбують і подають на лінію збирання.

Деякі вузли перед заключним встановленням збирають і випробовують в зібраному вигляді на окремих дільницях бази. На дільниці фарбування проводяться роботи по підготовці поверхні до фарбування і відбувається сам процес фарбування.

2.5. Вибір технологічного обладнання

На сервісній базі передбачається сучасне технологічне обладнання, яке забезпечує виконання широкого комплексу технологічних операцій з технологічного обслуговування і поточного ремонту електрообладнання.

Технологічне обладнання ремонтно-монтажної дільниці повинна забезпечувати можливість продуктивного і якісного виконання розбірних

робіт, миття вузлів і деталей, дефектування і транспортування агрегатів, вузлів на відповідні ремонтні дільниці.

Розміщення обладнання на окремих дільницях проводиться з урахуванням послідовності ремонту і механізації передавальних операцій. Ремонтно-монтажні роботи виконуються на спеціалізованих місцях.

Для налагодження електрообладнання, контрольно-вимірювальних приладів і засобів автоматизації застосовують пересувну електролабораторію ЕНЛ – на базі автомобіля «Ланос» або «Таврія-Пікап». Джерелом живлення є зовнішня мережа 220В/380В; кількість персоналу - 2 працюючих.

Лабораторія комплектується інструментами та приладами, за допомогою яких виконуються вимірювання опору ізоляції обмоток електричних машин та іншого обладнання, випробування силових кабелів напругою до 10 кВ, вимірювання опору на постійному струмі, контурів заземлення і заземлюючих пристроїв, визначення групи з'єднання обмоток трансформаторів, полярності обмоток електричних машин тощо.

Для розбирання двигунів, трансформаторів, інших вузлів з великою вагою використовують підвісні крани (кран-балки).

Для виконання контрольно-дефектних робіт і комплектування використовуються контрольно-вимірювальні стенди, столи, шафи, вимірювальний інструмент та пристосування для дефектування і сортування деталей.

На слюсарно-механічній дільниці виконуються роботи по механічній обробці деталей і деякі слюсарні роботи по ремонту деталей, виготовлення нестандартного обладнання, технологічної оснастки і інструменту.

Технологічне обладнання дільниці включає токарно-гвинтовий верстат, універсально-фрезерувальний верстат, вертикально-свердлильний верстат.

Зварювання і наварювання металів бувають найбільш поширеними технологічними процесами при виконанні механічних ремонтних робіт. Для цих робіт в основному використовують електродугове зварювання. Додатково на ковальсько-зварювальній дільниці майстерні виконуються роботи по відновленню деталей тиском, виготовлення нових деталей і окремих їх частин.

Для різноманітних ковальських робіт, що виконані методом зварного кування на плоских і фасонних бабках використовуються пневматичні ковальські молоти. Для нагрівання деталей використовуються ковальські горни і нагрівні печі.

На збиральній дільниці виконуються ремонтно-монтажні роботи, пов'язані із збиранням, регулюванням електрообладнання. Дільниця обладнана стендами для збирання вузлів електрообладнання і різним випробувальним обладнанням. До обладнання пункту діагностування електрообладнання відноситься спеціалізовані стенди, що використовується для перевірки і регулювання електрообладнання, універсальний випробувальний стенд сільського електрика (УИССЭ) або більш сучасний пристрій тощо.

Розміщення технологічного обладнання на базі наведено в додатку А, специфікація основного технологічного обладнання, встановленого на дільницях та в приміщеннях бази, приводяться в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Електрообладнання та пристрої бази, які застосовуються для проведення ПР і ТО енергообладнання

№ з/п	Найменування обладнання	Тип, ГОСТ	Габарити, мм	Кількість, шт.	Встановлена потужність, кВт
1	2	3	4	5	6
1	Камера для фарбування	К0.00.000.ЦИТЕП	1832x920x1726	1	
2	Фарборозпилювач	СО-71А		1	
3	Шафа сушильна	СНОЛ-3,5Х3,5 35/343	1400x350	1	40
4	Шафа сушильна	ЦЕП-282А		1	7,5
5	Ванна для миття (рухома)	ОМ-1316	1250x620x960	2	
6	Шафа витяжна для сушильного бака	ШВ.00.000.ЦИТЕП	1530x1270x2560	1	
7.	Таль рухома черв'якова	ГОСТ 1106-74		1	
8	Ванна для нагрівання підшипників	ОКС-1513	1360x500x850	1	30
9	Пристрій для миття заглибних насосів	ОРГ-4990	1200x500x1000	1	3,5
10	Установка для миття		1000x500x1000		3,72

Продовження табл. 2.2

1	2	3	4	5	6
11	Стенд для ремонту ПРА		1540x900x1270	1	4,5
12	Стенд для ремонту і перевірки опромінювальних і освітлювальних установок	Э37Н.000. с.г.	1600x900x1300	1	2,2
14	Компресор гаражний рухомий	Модель 1136В2		1	1,5
15	Верстат стенда для ремонту асинхронних двигунів	Э36И.		1	
16	Силовий пункт стенду	Э40Н	510x260x600	1	30
17	Верстат слюсарний	5105.000	1500x600x600	6	
18	Верстат настільний свердлильний	НС-12А		1	0,6
19	Прес гідравлічний	2153 Ми		1	0,8
20	Стіл монтажний металічний	ОРФ 1468-01	1200x800x600	1	
21	Кран підвісний	0,5-51-4,5-6-2201.380		1	1,23
22	Кран консольно-поворотний	ОПТ-1153		1	0,87
23	Трансформатор пайки мідних проводів	ОС3-3105	400x500x500	1	3,0
24	Стіл для електрозварювальних робіт	ОКС-7523	1100x750x715	1	
25	Трансформатор зварювальний рухомий	ТД-300-2У2 5157.000	640x490x715	1	19,4
26	Верстат обдирувально-шліфувальний	ЗБ534	1000x665x1230	1	4,6
27	Установка пиловловлююча	УПВ-900М		1	1,5
28	Гідравлічна установка для згинання труб	РТГ-2		1	

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ, ЕЛЕКТРОПРОВОДОК ТА ЕЛЕКТРИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ

3.1 Перевірка електродвигунів приводу технологічного обладнання на відповідність параметрам мережі живлення і умовам навколишнього середовища

Вибір електроприводів виконується згідно з діючими нормами технологічного проектування ДБН, ДСТУ тощо.

Для перевірки параметрів електродвигуна приймається вентиляційне обладнання, а саме електродвигун приводу витяжного вентилятора Ц4-70 №5, який розміщений на ділянці фарбування.

Технічні дані вентилятора :

- подача $L = 4055,2 \text{ м}^3/\text{год}$;
- тиск $p = 58.5 \text{ кг/м}^2$;
- частота обертання 1420 об/хв .

Оскільки частота обертання вентилятора $n = 1420 \text{ об/хв}$, то необхідно вибрати двигун з синхронною частотою обертання $n_c = 1500 \text{ об/хв}$. Ступінь захисту електродвигуна від впливу навколишнього середовища - IP54.

Навантаження на електродвигун стає, режим роботи електродвигуна тривалий - S1. Конструктивне виконання електродвигуна згідно з ГОСТ 2479-79; приймається IM1001 - двигун на лапах з двома підшипниками, з одним циліндричним кінцем валу, положення в просторі будь-яке.

Встановлена потужність електродвигуна вентилятора з урахуванням коефіцієнту запасу дорівнює:

$$P_u = (K_3 \cdot L \cdot p \cdot 9,8 \cdot 10^{-3}) / (3600 \cdot \eta_e \cdot \eta_m); \quad (3.1)$$

де K_3 - коефіцієнт запасу потужності на пуск для електродвигунів потужністю до 2 кВт; $K_3 = 1,2$ [15];

P – приведений тиск, $P = 58,2$ мм вод. ст.;

L_0 – номінальна продуктивність вентилятора, $L_0 = 4055,2$ м³/с;

η_6 – коефіцієнт корисної дії (ККД) вентилятора, $\eta_6 = 0,6$ [15];

η_n – ККД передачі, $\eta_n = 1$, оскільки вентилятор знаходиться на валу двигуна.

Отже,

$$P_{ц} = (1,2 \cdot 4055,2 \cdot 58,5 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3}) / 3600 \cdot 0,6 \cdot 1 = 1,29 \text{ кВт.}$$

Номінальна потужність вибирається з умови: $P_{ном} \geq P_{ц}$.

Живлення двигуна здійснюється від трифазної мережі змінного струму частотою 50 Гц. За частотою обертання двигун вибирається, виходячи з частоти обертання, яка повинна бути 930...1420 об/хв., щоб забезпечити необхідний тиск і подачу.

Вибирається електродвигун загальнопромислового виконання з найближчою більшою номінальною потужністю - АИР80В4 УЗ.

Паспортні дані електродвигуна: $P_{н.дв.} = 1,5$ кВт; $I_n = 3,6$ А; $\eta = 77\%$; $\cos \varphi = 0,83$; $N_n = 1395$ об/хв.

Отже, для двигуна потужністю $P_n = 1,5$ кВт маємо:

- кратність пускового моменту $M_{пуск} / M_n = 2,0$;
- кратність мінімального моменту $M_{min} / M_n = 1,6$;
- кратність максимального моменту $M_{max} / M_n = 2,2$;
- кратність пускового моменту $I_{пуск} / I_n = 5$;
- момент інерції ротора двигуна $J_{об} = 0,0033$ кгм².

Виконується перевірка вибраного електродвигуна на відповідність робочій машині, тобто відцентровому вентилятору Ц4-70 №5.

Вибраний електродвигун перевіряється за умовами пуску при зниженій напрузі на $-7,5\%$ і розкиду його параметрів згідно [13].

Визначається час пуску електродвигуна графоаналітичним способом і здійснюється перевірка електродвигуна на нагрівання його під час пуску.

Механічна характеристика вентилятора отримується розрахунковим

шляхом за формулою:

$$M_c = M_{co} + (M_{сн} - M_{co}) \cdot (\omega / \omega_n)^x \quad (3.2)$$

де M_{co} – момент тертя, котрий не залежить від зміни швидкості, $Нм$;

$M_{сн}$ – момент статичного опору вентилятора при номінальній швидкості, $Нм$;

ω - поточне значення кутової швидкості, $1/с$;

ω_n – номінальне значення кутової швидкості, $1/с$;

x – коефіцієнт, котрий характеризує ступінь залежності моменту статичного опору від швидкості, для вентиляторів $x=2$ [13].

$$M_{сн} = 9550 \cdot P_n / n_n = 9550 \cdot 1,32 / 1395 = 9,0 \text{ Нм}; \quad (3.3)$$

$$\omega_n = (2\pi n) / 60 = (3,14 \cdot 1395) / 60 = 146 \text{ 1/с}; \quad (3.4)$$

$$M_c = 0,15 \cdot M_{сн} = 0,15 \cdot 9,0 = 1,35 \text{ Нм}; \quad (3.5)$$

Результати розрахунку заносяться до табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Розрахунок механічної характеристики вентилятора

ω , 1/с	0	3,14	62,8	94,2	125,6	148,7	157
M_c , Нм	1,34	1,68	2,7	4,37	6,73	8,9	9,8

Для побудови механічної характеристики двигуна, визначається критичне ковзання за формулою:

$$s_{кр} = \frac{s + \sqrt{s_n \frac{\mu_{кр} - 1}{\mu_1 - 1}}}{1 + \sqrt{s_n \frac{\mu_{кр} - 1}{\mu_1 - 1}}}, \quad (3.6)$$

де $\mu_{кр}$ - кратність максимального моменту, $\mu_{кр}=2,2$;

μ_1 – відношення кратності максимального моменту до кратності

пускового моменту: $\mu_l = \mu_{кр} / \mu_n = 2,2 / 2,0 = 1,1$;

s_n – номінальне значення ковзання, $s_n = 0,08$.

Тоді значення критичного ковзання:

$$s_{кр} = \frac{0,08 + \sqrt{0,08 \frac{2,2 - 1}{1,1 - 1}}}{1 + \sqrt{0,08 \frac{2,2 - 1}{1,1 - 1}}} = 0,45.$$

Використовуючи каталожні дані електродвигуна [13], будується природна механічна характеристика $M_{\text{дв.}} = f(n)$ за п'ятьма характерними точками (рис. 3.1):

1 точка - неробочий хід: $M_1 = 0$; $s_1 = 0$;

2 точка - номінальний режим роботи $M_2 = M_n$; $s_2 = s_n$;

$$M_n = 9550 \cdot P_{\text{н.дв.}} / n_n, \quad (3.7)$$

де M_n - номінальний обертовий момент електродвигуна, *Нм*;

$P_{\text{н.дв.}}$ - номінальна потужність електродвигуна, *кВт*;

n_n - номінальна частота обертання електродвигуна, *об/хв*.

$$s_n = (n_c - n_n) / n_c, \quad (3.8)$$

де s_n - номінальне ковзання двигуна;

n_c - синхронна частота обертання, *об/хв*.

Підставивши дані в формули (3.7) і (3.8), отримаємо:

$$M_n = 9550 \cdot 1,5 / 1395 = 10,1 \text{ Нм};$$

$$s_n = (1500 - 1395) / 1500 = 0,08.$$

3 точка - точка максимального моменту: $M_3 = M_{\text{max}}$; $s_3 = s_{\text{max}} = s_{кр}$;

$$M_{\text{max}} = \mu_k \cdot M_n = 2,2 \cdot 1,92 = 4,22 \text{ Нм}; \quad (3.9)$$

$$M_{\text{max}} = 4,22 \text{ Нм}; \quad s_{кр} = 0,45.$$

4 точка - точка мінімального моменту; $M_4 = M_{\text{min}}$; $s_4 = 0,7$:

$$M_{\text{min}} = \mu_{\text{min}} \cdot M_n = 1,6 \cdot 10,1 = 16,16 \text{ Нм}; \quad (3.10)$$

5 точка - точка пускового моменту: $M_5 = M_{\text{пуск}}; s_5 = 1$:

$$M_{\text{пуск}} = 2 \cdot 10,1 = 20,2 \text{ Нм.}$$

Визначаються дані для побудови штучної механічної характеристики $M'_{\text{дв}} = f(\omega)$ при зниженні напруги на затискачах споживача на $-7,5\%U_{\text{ном}}$ згідно зі стандартом. При цьому використовується формула:

$$M' = (0,925)^2 \cdot M, \quad (3.11)$$

де M - відповідні значення моментів електродвигуна, Нм .

Одержимо :

$$M'_{\text{ном}} = (0,925)^2 \cdot 10,1 = 8,7 \text{ Нм};$$

$$M'_{\text{max}} = (0,925)^2 \cdot 22,22 = 19,1 \text{ Нм};$$

$$M'_{\text{min}} = (0,925)^2 \cdot 16,16 = 13,9 \text{ Нм};$$

$$M'_{\text{пуск}} = (0,925)^2 \cdot 20,2 = 17,3 \text{ Нм.}$$

Друга штучна механічна характеристика $M''_{\text{дв}} = f(\omega)$ визначається відхилення моментів. Згідно ГОСТ 183-74:

$$\Delta M_{\text{кр(max)}} = -10\%; \Delta M_{\text{min}} = -20\%; \Delta M_{\text{пуск}} = -15\%.$$

Тоді:

$$M''_{\text{max}} = 0,9 \cdot M_{\text{max}} = 0,9 \cdot 22,22 = 17,2 \text{ Нм};$$

$$M''_{\text{min}} = 0,8 \cdot M_{\text{min}} = 0,8 \cdot 16,16 = 11,12 \text{ Нм};$$

$$M''_{\text{пуск}} = 0,85 \cdot M_{\text{пуск}} = 0,85 \cdot 20,2 = 14,7 \text{ Нм};$$

$$M''_{\text{н}} = M_{\text{н}} = 10,1 \text{ Нм.}$$

Розрахункові дані для побудови механічних характеристик електродвигуна АИР80В4У3 наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Розрахункові дані для побудови механічних характеристик електродвигуна

$\omega, \text{с}^{-1}$	78,5	72,2	43,1	23,5	0	Найменування характеристики
s	0	0,08	0,45	0,7	1	
$M, \text{Нм}$	0	10,1	22,22	16,16	20,2	природна $M = f(\omega)$
$M', \text{Нм}$	0	8,7	19,1	13,9	17,3	штучна, при $\Delta U = -7,5\%$
$M'', \text{Нм}$	0	6,3	17,2	11,12	14,7	штучна, при відхиленні моментів ΔM

На основі цих характеристик будується динамічна характеристика $M_{дин} = f(\omega)$:

$$M_{дин} = M_{дв} - M_c \quad (3.12)$$

Використовуючи динамічну характеристику $M_{дин} = f(\omega)$ (рис. 3.1.) визначається тривалість пуску електродвигуна t_n .

Для цього розбивається характеристика по осі ординат на рівні ділянки і для кожної ділянки графічно визначається середнє значення динамічного моменту.

Тривалість пуску електродвигуна в цьому випадку :

$$t_i = \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \quad (3.13)$$

де Δt_i - час пуску двигуна на i -тій ділянці, c .

$$\Delta t_i = j_{i\delta} \frac{\Delta \omega_i}{\Delta M_{i\delta}}, \quad (3.14)$$

де j_{np} - приведений момент інерції до валу електродвигуна, $кгм^2$;

$\Delta \omega_i$ - частота обертання на i -тій ділянці, $рад/с$;

$\Delta M_{i\delta}$ - середній динамічний момент на i -тій ділянці, $Нм$ (рис. 3.1).

Момент інерції приведений до валу двигуна визначається за формулою:

$$J_{np} = J_{дв} + J_{вент}, \quad (3.15)$$

де $J_{дв}$ – момент інерції двигуна, $кгм^2$; для двигуна АИР80В4У3 - $J_{дв} = 0,0033 кгм^2$;

$J_{вент}$ – момент інерції вентилятора, $кгм^2$; $J_{вент} = 0,009 кгм^2$.

$$J_{np} = 0,0033 + 0,009 = 0,0123 кгм^2 = 0,123 Нм^2.$$

Результати розрахунків заносяться до табл. 3.3. Час пуску електродвигуна складає: $t_n = \sum \Delta t_i = 1,12 c$.

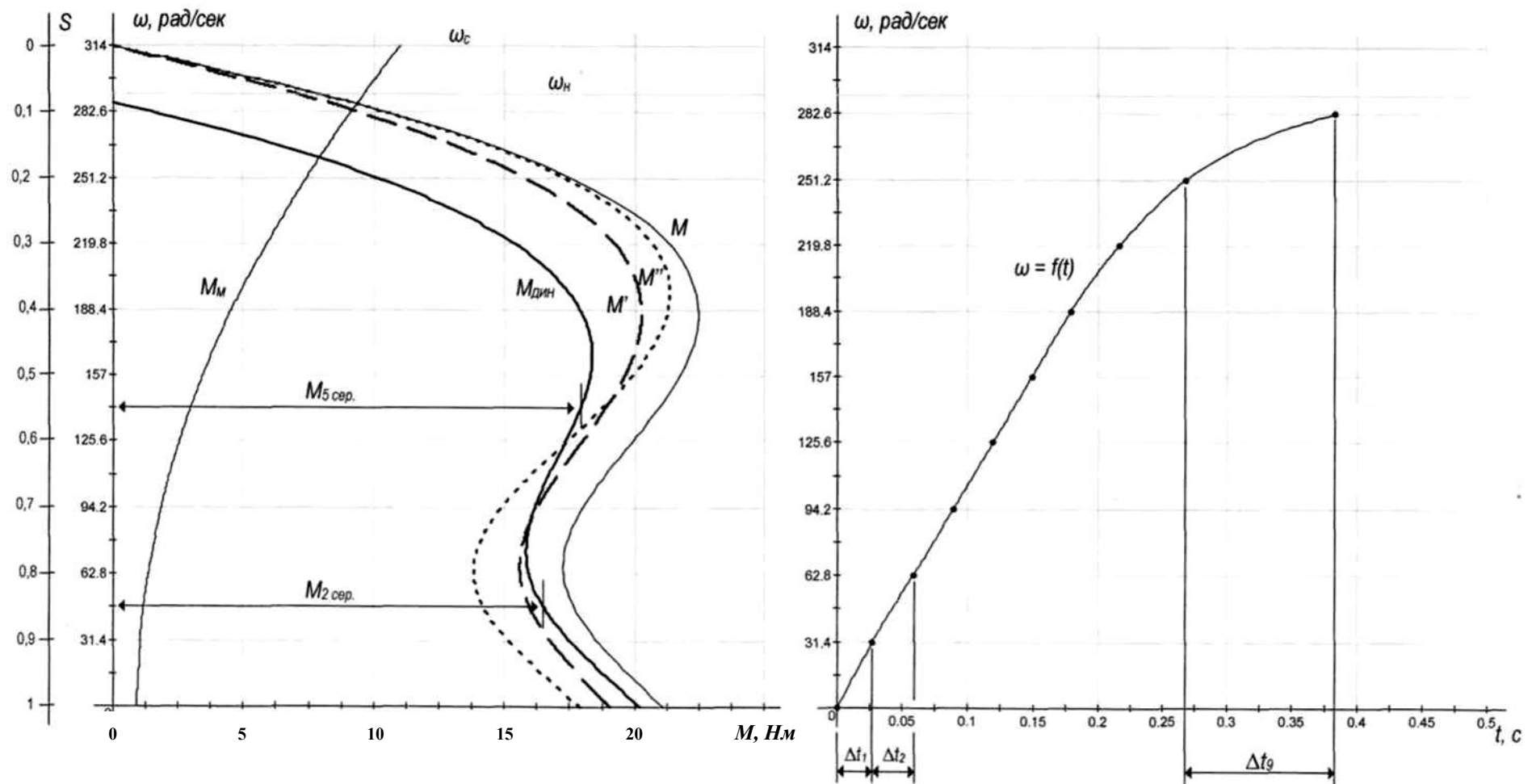


Рис. 3.1. Механічні характеристики електродвигуна АІР 80В4С1У3 та вентилятора.
Визначення тривалості пуску електропривода графо-аналітичним способом.

Розрахунок тривалості пуску електродвигуна

$J, Нм$	0,123	0,123	0,123	0,123	0,123
$\Delta\omega, 1/c$	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
$M_{дин}, Нм$	11,1	9,9	11,3	10,9	4,5
$\Delta t, c$	0,16	0,18	0,16	0,16	0,46

Клас нагрівостійкості ізоляції двигуна В [13], що відповідає допустимій температурі нагрівання обмотки статора 130°C. Нагрівання двигуна за час пуску визначимо за формулою:

$$Q = Q_{навк} + V_t \cdot t_n, \quad (3.16)$$

де $Q_{навк}$ – температура навколишнього середовища, °C.

V_t – швидкість росту температури, $V_t = 5,9^\circ C$.

$$Q = 25 + 5,9 \cdot 2,323 = 38,7^\circ C.$$

Виходячи з цього значення, нагрівання електродвигуна за час пуску для ізоляції безпеки не становить.

3.2 Вибір пускозахисних апаратів та низьковольтних комплектних пристроїв керування

Прийняті апарати керування і захисту сервісної бази мають відповідати вимогам ПУЕ і ПТЕЕС [8, 10]. Проводиться перевірка і вибір пускозахисної апаратури для одного з електроприводів - приводу витяжного вентилятора, встановленого в ремонтно-монтажній дільниці.

Паспортні дані електродвигуна АИР80В4У3: $P_{н.дв.} = 1,5 кВт$; $I_n = 3,6 А$; $\eta = 77\%$; $\cos \varphi = 0,83$; $n_n = 1395 об/хв$.

Умови вибору автоматичного вимикача в колі живлення двигуна:

$$1) U_{авт} \geq U_{мережі};$$

$$2) I_{н.авт.вим} \geq I_{н.дв};$$

$$3) I_{т.р.} \geq I_{н.дв};$$

$$4) I_{ел.м.розр(відсічки)} \geq I_{неспр};$$

У наведених нерівностях:

$U_{авт}, U_{мер}$ - відповідно номінальні напруги автоматичного вимикача і мережі, B ;

$I_{н.авт.вим}, I_{н.дв}$ - відповідно номінальні струми автоматичного вимикача і електродвигуна, A ;

$I_{т.р.}$ - струм теплового розчіплювача, A ;

$I_{неспр}$ - струм неспрацювання електромагнітного розчіплювача, A ;

$I_{відсічки}$ - струм відсічки електромагнітного розчіплювача, A .

Дані вибраного автоматичного вимикача ВА47Г29-34. $U_{авт} = 500B$;

$$I_{н.авт.вим} = 16 A; I_{н.р.} = 4 A.$$

Тоді: $I_{у.е.р} = 1,1 \cdot 1,15 \cdot 1,2 \cdot 5 \cdot 3,6 = 27,3 A$;

$$I_{відсічки} = 12 \cdot I_{н.р} = 12 \cdot 4 = 48 A.$$

Перевірка умов вибору :

$$1. U_{авт} = 500 B > U_{мер} = 380 B;$$

$$2. I_{н.авт.вим} = 16 A > I_{роб} = 3,6 A;$$

$$3. I_{н.р.} = 4 A > I_{роб} = 3,6 A;$$

$$4. I_{ел.м.в.} = 48 A > 27,3 A.$$

5. За конструктивним виконанням автоматичний вимикач триполюсний, з електромагнітним розчіплювачем максимального струму; без допоміжних контактів. Ступінь захисту оболонки вимикача - IP30.

Повне позначення автоматичного вимикача : ВА47Г29-34УЗВ.

Для дистанційного керування роботою двигуна вибирається електромагнітний пускач серії ПМЛ, виконуючи такі умови вибору:

$$1. U_{пуск} \geq U_{мережі};$$

$$2. I_{н.пускача} \geq I_{н.дв};$$

$$3. I_{т.р.} \geq I_{н.дв};$$

$$I_{нагр.сл} \geq I_{н.дв} \text{ з наступним регулюванням струму неспрацювання на } I_{н.дв}.$$

4. За конструктивним виконанням;

$$5. U_{\text{кот}} = U_{\text{к.к}};$$

де $U_{\text{пуск}}$ - номінальна напруга пускача, B ;

$I_{\text{н.пускача}}$ - номінальний струм пускача, A ;

$I_{\text{т.р}}$ - номінальний струм теплового реле, A ;

$U_{\text{кот}}$, $U_{\text{к.к}}$ - відповідно напруга котушки і кола керування, B .

Перевіримо умови вибору:

$$1. U_{\text{пуск}} = 660B > U_{\text{мер}} = 380B;$$

$$2. I_{\text{н.пуск}} = 10A > I_{\text{н.дв}} = 3,6 A;$$

$$3. I_{\text{т.р}} = 10A > I_{\text{н.дв}} = 3,6 A .$$

4. Пускач з електротепловим реле, нереверсивний; ступінь захисту IP54, з кнопками “Пуск” і “Стоп”; кліматичне виконання О.

$$5. U_{\text{кот}} = 220 B = U_{\text{к.к}} = 220 B.$$

Повне позначення пускача ПМЛ – 1220.04В.

Електротеплове реле РТЛ -1007.06 з діапазоном регулювання номінальної сили струму неспрацювання 2,6...4 А. Номінальна сила струму реле 25 А.

Отже, умови вибору виконуються.

Розрахунок внутрішніх електричних мереж зводиться до вибору перерізу струмоведучих жил проводів і кабелів за тривало-допустимим струмом. Розрахунковий струм - 3,6 А. Розподільча мережа виконується кабелем АВРГ 1(4х2,5). Тривало-допустимий струм кабелю АВРГ перерізом 2,5 мм² дорівнює 19 А [15].

Тоді, умова $I_{\text{тр.доп.}} = 19 A > I_{\text{с.р.}} = 3,6 A$, - виконується.

За умовою для тривало-допустимих струмів проводів з номінальними даними захисних апаратів:

$$I_{\text{тр.доп.}} / I_{\text{н.с.р}} > 1.$$

Для розподільчої мережі електродвигуна і вимикача ВА47Г29-34УЗВ:

$$19 / 4 = 4,75 \gg 1.$$

Тобто, умова виконується.

Для інших електроприймачів внутрішні розподільчі мережі вибираються аналогічно, а результати вибору зводяться до розрахунково-монтажної таблиці,

яка наведена в матеріалах презентації.

Виходячи з умов навколишнього середовища, кількість груп електроприймачів, їх потужності, вибирається головний розподільчий пункт і групові розподільчі пункти. В якості головного розподільчого пункту, приймається комплектний розподільчий пункт ПР 8501-096IP21У3 з шістьма автоматичними вимикачами ВА47Г29-34; групових розподільчих пунктів - ПР8501-067IP21У3 з шістьма автоматичними вимикачами ВА 47Г-29-34 на лініях, що відходять.

Дані про вибір розподільчих пунктів заносяться до розрахунково-монтажної таблиці та на план пункту (матеріали презентації).

3.3 Розрахунок електричного освітлення та освітлювальної мережі

Застосування штучного освітлення забезпечує можливість нормальної діяльності людей в умовах недостатнього природного освітлення. В приміщеннях бази передбачені наступні види освітлення:

- робоче освітлення, загальне і місцеве;
- переносне.

Напруга мережі робочого освітлення 220В, напруга живлення ламп 220В, переносного освітлення 36В.

Освітлення приміщень прийняті згідно з нормами. Робоче освітлення здійснюється світильниками з світлодіодними лампами. Переносне освітлення передбачене світильниками РП 6-2/36, від щита із знижуючим трансформатором.

Освітлювальний щиток вибирається типу ОЩВ 25-6 з сімома автоматичними вимикачами ВА47-2912.

Групові освітлювальні мережі виконані кабелем АВРГ, що прокладені по будівельних конструкціях на скобах і на тросу, Провід АПВ прокладається в сталевих трубах. Вид освітлення для приміщень – робоче. Для ремонтно-монтажної ділянки приймається система комбінованого освітлення, а для всієї решти приміщень – система загального рівномірного освітлення.

Для приміщень дільниць просочування, сушіння, фарбування в якості джерел світла приймаємо світильники вибухозахисного виконання зі світлодіодними лампами, в туалеті, душовій, венткамері, коридорі, тамбурах, електрощитовій – подовжені світильники ОПАЛ-SL зі стрічковими світлодіодними лампами G13, а для решти приміщень - незахищені подовжені світильники ОПАЛ-SL зі стрічковими світлодіодними лампами (найкращі за показником ціна-якість).

Світлотехнічні розрахунки здійснюються для ремонтно-монтажної дільниці. Розрахунок проводиться методом використання коефіцієнту світлового потоку з наступною перевіркою точковим методом. Для приміщень – електрощитової, гардеробу, туалету, душової, коридору, тамбура – методом питомої потужності.

Розрахунковий світловий потік для всього приміщення визначається за формулою:

$$\Phi = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot z}{N \cdot \eta}, \quad (3.17)$$

де Φ - розрахунковий світловий потік лампи, *лм*;

E - нормована освітленість, *лк*;

S - площа приміщення, *м²*;

z - коефіцієнт нерівномірності освітлення, $z = 1,15$;

k - коефіцієнт запасу, для ламп розжарювання $k = 1,15$;

N - кількість світильників, *шт.*;

η - коефіцієнт використання світлового потоку.

Подовжені світильники зі стрічковими світлодіодами у виробничих приміщеннях доцільно розміщувати рядами паралельно довгій стороні приміщення. Враховуючи конусне світлорозподілення прийнятих світильників ОПАЛ-SL, приймаємо відносну відстань між рядами світильників $\lambda = 1,4$.

Тоді отримаємо відстань між рядами світильників, *м*.

$$L = \lambda \cdot H_p, \quad (3.18)$$

де L - відстань між світильниками, *м*;

H_p - розрахункова висота, *м*.

$$H_p = H - (h_{p.n.} + h_{ce}), \quad (3.19)$$

$$h_{ce} = 2,2 \text{ м};$$

$$h_{p.n.} = 0,8 \text{ м}.$$

Тоді, $H_p = 6 - (0,8 + 2,2) = 3,0 \text{ м}$; $L = 1,4 \cdot 3,0 = 4,2 \text{ м}$.

Кількість рядів світильників:

$$N_p = (B - 2l) / L + 1, \quad (3.20)$$

де B – ширина приміщення, м; $B = 5,7 \text{ м}$;

l – довжина від крайнього світильника до стіни, м;

$$l = (0,8 - 0,5) \cdot L = 0,3 \cdot 4,2 = 1,26 \text{ м};$$

$$N_p = ((5,7 - 2 \cdot 1,26) / 4,2) + 1 = 1,76 \text{ шт}.$$

Приймається $N_p = 2$ ряди. Кількість світильників в ряду:

$$N_c = ((A - 2l) / L) + 1, \quad (3.21)$$

де A – довжина приміщення, м; $A = 14,7 \text{ м}$.

$$N_c = ((14,7 - 2 \cdot 1,26) / 4,2) + 1 = 3,9 \text{ шт}.$$

Приймається $N_c = 4 \text{ шт}$.

Визначається фактична відстань між світильниками:

$$L_{fc} = (A - 4 \cdot l_0) / 4 = ((14,7 - 4 \cdot 1,24) / 4) = 2,43.$$

де l_0 – довжина світильника, м; $l_0 = 1,24 \text{ м}$.

Загальна кількість світильників: $N = N_p \cdot N_c = 2 \cdot 4 = 8 \text{ шт}$.

Коефіцієнт використання світлового потоку знаходяться залежно від типу світильника, коефіцієнтів відбивання, індексу приміщення:

$$i = A \cdot B / (A_p(A+B)) = 14,7 \cdot 5,7 / (3 \cdot (14,7 + 5,7)) = 1,36. \quad (3.22)$$

Враховуючи матеріали стелі, стін, підлоги, приймаються значення коефіцієнту відбивання: $\rho_1 = 70\%$ - стелі, $\rho_2 = 50\%$ - стін, $\rho_3 = 30\%$ - підлоги;

За таблицями [6] знаходиться η - коефіцієнт використання світлового потоку: $\eta = 0,43$.

Підставивши дані в формулу (3.17), отримаємо:

$$\Phi = \frac{300 \cdot 1,3 \cdot 67,3 \cdot 1,7}{8 \cdot 0,43} = 8392,9 \text{ лм.}$$

Приймаються світильники фірми ЕВРОСВЕТ типу 52Вт Опал-SL з стрічковими алюмінієвими світлодіодами з чіпами 2835, 6400К, 1200мм, світловий потік яких складає $F_n = 4500 \text{ лм.}$

Сумарний світловий потік ламп світильника:

$$\Phi_c = 2 F_n = 2 \cdot 4650 = 9300 \text{ лм.}$$

Згідно ДБН В.2.5. – 23 – 2003 освітленість, створена додатковим місцевим освітленням на столах і верстатах повинна складати при освітленості 300 лк, люмінесцентними лампами - 2600 лк.

Приймаються для місцевого освітлення світильники МЛ-2х80, які встановлюють на стіні, створюють при розмірі світлової плями 600х1000 мм освітленість 800 лк.

Для допоміжних приміщень розрахунок освітленості здійснюється методом питомої потужності за формулою:

$$P = \omega S / N, \quad (3.23)$$

де P - потужність ламп, $Вт$;

ω - питома потужність загального рівномірного освітлення, $Вт/м^2$;

N – кількість світильників, $шт$;

S – площа приміщення, $м^2$.

Розраховується освітлення для приміщення венткамери.

Попередньо приймається 3 світильника типу НСП 02, в яких використовуються світлодіодні лампи типу MEGALAMP, потужністю 12 Вт. Норма освітленості для венткамери $E=40 \text{ лк}$ [15]. Коефіцієнт відбивання для стелі, стін, підлоги відповідно дорівнює: $\rho_1=50\%$, $\rho_2=30\%$, $\rho_3=10\%$; площа - $S=32м^2$.

Визначається індекс приміщення:

$$i = A \cdot B / (A_p(A + B)) = 5,8 \cdot 5,5 / (2,5 \cdot (5,8 + 5,5)) = 1,13.$$

За даними таблиць визначається значення ω , знаючи площу приміщення,

висоту підвісу світильників, освітленість робочої поверхні і коефіцієнти робочої поверхні: $\omega = 11 \text{ Вт/м}^2$. Тоді:

$$P = 11 \cdot 32 / 1 \cdot 3 = 117,3 \text{ Вт.}$$

Приймаються світлодіодні лампи типу MEGALAMP, потужністю 12 Вт. Розрахунок освітлення для решти приміщень здійснюється аналогічним способом. Результати розрахунків заносяться до світлотехнічної відомості (табл. 3.4).

Живлення світильників здійснюється від розподільчого пункту ОЩВ 25-6 з лінійними автоматичними вимикачами на групах ВА47-29-12.

Здійснюється вибір перерізу проводів проводиться для групи №4, яка живить світильники ПВЛМ. Для групи $P_{уст} = 0,86 \text{ кВт}$.

Розрахунковий струм групи (з урахуванням втрат в ПРА для люмінесцентних ламп):

$$I_p = 1000 \cdot 0,9 \cdot P / U \cdot \cos\varphi = 860 \cdot 0,9 / 220 \cdot 0,85 = 3,7 \text{ А.} \quad (3.24)$$

Розрахунок внутрішніх електричних мереж зводиться до вибору перерізу проводів і кабелів за тривало-допустимим струмом:

$$I_{mp.дон} > I_n.$$

Проводка виконується проводом АПВ 2(1х2,5) на тросу, переріз струмоведучої жили - $2,5 \text{ мм}^2$ з $I_{mp.дон} = 19 \text{ А}$ [22].

Для решти груп розрахунок проводиться аналогічно, а результати розрахунків зводяться до розрахунково-монтажної таблиці освітлювальної мережі (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Світлотехнічна відомість

№ п/п	Назва приміщення	Характеристика приміщення		Коефіцієнти відбиття поверхні, %			Нормована освітленість, лк	Тип світильника кількість і потужність ламп	Кількість світильників	Параметри джерела світла			Сумарна встановлена потужність, кВт
		площа, м ²	клас за умовами навк.середовища	стелі ρ ₁	стін ρ ₂	підлоги ρ ₃				тип	потужність, Вт	світловий потік, лм	
1	Бокс для спецавтомобіля	54,1	П-Іа	50	30	10	80	Опал-SL 1x52	6	СВІТЛОДЮДИ	52	2340	0,48
2	Дільниця фарбування	11,5	В-Іа	70	50	10	200	Опал-SL 1x52	2	СВІТЛОДЮДИ	52	2340	0,16
3	Дільниця просушування і	17,4	В-Іа	50	30	10	200	Опал-SL 1x52	3	СВІТЛОДЮДИ	52	2340	0,24
4	Склад	30	П-Іа	50	30	10	30	НСП02	4	MEGALAMP	9	1450	0,4
5	Ремонтно-монтажна дільниця	67,3	П-Іа	70	50	10	200	Опал-SL 1x52	10	СВІТЛОДЮДИ	52	2340	1,04
6	Дільниця заготівлі конструкцій	34,8	П-Іа	50	30	10	200	Опал-SL 1x52	6	СВІТЛОДЮДИ	52	2340	0,576
7	Кабінет майстра	10,0	норм	50	30	10	100	Опал-SL 1x52	2	СВІТЛОДЮДИ	52	2340	0,16
8	Гардероб	16,5	норм	50	30	10	30	Опал-SL 1x52	2	СВІТЛОДЮДИ	52	2340	0,16
9	Санвузол	3,0	сире	50	30	10	30	НСП 02	2	MEGALAMP	5	790	0,08
10	Душова	2,25	сире	50	30	10	20	НСП 02	2	MEGALAMP	5	790	0,08
11	Тамбур	2,4	норм	50	30	10	10	НСП 02	1	MEGALAMP	9	460	0,06
12	Вентиляційна камера	32	норм	50	30	10	75	НСП02	3	MEGALAMP	12	2340	0,45
13	Електрощитова	8,25	норм	50	30	10	20	Опал-SL 1x52	1	СВІТЛОДЮДИ	52	1450	0,08
	Всього												3,96

РОЗДІЛ 4

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

4.1 Методи та прилади комплексного діагностування електродвигунів

Електродвигуни в загальному об'ємі виробництва електротехнічної промисловості займають одне із основних місць, тому експлуатаційні властивості як нових електродвигунів, так і вже тих, що знаходяться в експлуатації мають значення для економіки нашої країни. У зв'язку з цим особливе місце займають питання створення нових форм експлуатації, діагностування та моніторингу електродвигунів із застосуванням нових інформаційних технологій.

Існують наступні методи діагностування електродвигунів:

- електромагнітний;
- температурний;
- тепловізійний (інфрачервоний)
- віброакустичний, як приклад використання штучних нейронних мереж.

4.1.1 Методи і засоби електромагнітної діагностики асинхронних електродвигунів. Одними з найбільш поширених методів діагностування є методи, засновані на аналізі електричних параметрів працюючого устаткування, а саме струмів, напруг і споживаних потужностей. Використання даних методів можливо без безпосереднього доступу до електродвигуна, який діагностується. Як датчики струму й напруги в наш час використовуються датчики на основі ефекту Холу, які працюють у широкому діапазоні частот з постійною чутливістю. Це дозволяє реєструвати коливання із частотами від нуля до декількох десятків кілогерц. Як діагностичні параметри використовуються:

гармонійні складові спектру струму статора, гармонійні складові спектру споживаної потужності, спектральні складові амплітуди тощо. Недоліком даних методів є необхідність врахування впливу на електричні параметри приводу параметрів живильної мережі, характеру навантаження, впливу зовнішніх електромагнітних полів, перехідних процесів у приводі. При використанні регульованого електроприводу на основі силових напівпровідникових перетворювачів у спектрах струмів виникають частоти, обумовлені комутацією вентилів. Це також необхідно враховувати [19]. За допомогою аналізу спектра електромагнітного потоку можна ідентифікувати асиметрію ротора, перекіс валів, ушкодження підшипників і міжвиткові короткі замикання обмотки статора. Обрив стержня супроводжується появою в основній гармоніці бічних складових з подвійною частотою ковзання. При перекосі валів спостерігаються незначні зміни на всіх компонентах спектра електромагнітного потоку. При ушкодженні підшипників з'являються кілька компонентів на інтервалі частот між 0,6 і 0,9 кГц при частоті мережі 50 Гц [20]. Електромагнітне діагностування стану ротора проводять за зміною ЕРС у вимірювальній обмотці. Недоліком даного методу є неможливість діагностування АД під час роботи. Останнім часом широко розвиваються методи діагностики стану асинхронних електродвигунів, що засновані на виконанні моніторингу споживаного струму з наступним виконанням спеціального спектрального аналізу отриманого сигналу. Це дозволяє з високим ступенем вірогідності визначати стан різних складових частин електродвигуна.

4.1.2 Методи і засоби температурної діагностики асинхронних електродвигунів. Особливе місце в оцінці технічного стану електродвигуна відіграє температура обмоток, яка є основою, як для його температурного діагностування, так і захисту. Причому роль температурного діагностування і температурного захисту може виконувати одна загальна система, або дві незалежні.

На користь температурного діагностування електродвигунів, в процесі їх роботи, говорить і той факт, що реальні параметри приводу відрізняються від номінальних [23] для електродвигуна за параметрами довкілля,

енергопостачання і робочого механізму.

До основних параметрів електроприводу, що впливають на температуру обмоток електродвигунів можна віднести:

1) параметри навколишньої температури, в першу чергу відхилення температури довкілля від заданої величини як у бік підвищення, так у бік зменшення. Ці відхилення температури викликають в порівнянні зі встановленою потужністю, або підвищення допустимої потужності, або її зниження.

2) параметри енергопостачання.

– робота від довгих ліній живлення, що призводить до залежності напруги на затисках електродвигуна від споживаного струму, а також до підвищеної несиметрії напруги.

– робота від перетворювачів тиристорів, а, отже, робота від несинусоїдальної напруги і при не номінальних оборотах обертання [18].

3) параметри робочого механізму.

– важкі умови пуску, обумовлені високим моментом опори або моментом інерції механізму.

– режими з частими пусками електродвигуна;

– випадкова стохастична в часі зміна моменту навантаження при нестабільній її середньою величині.

Асинхронні електродвигуни широко використовуються в різних галузях промислового виробництва. Залежно від режиму роботи в усіх асинхронних електродвигунах виникають нестационарні теплові процеси. Вони відрізняються від стаціонарних або таких, що встановилися тим, що температура нагріву елементів конструкції електродвигуна змінюється в часі, тобто криві нагріву містять вільні складові, і ті, що встановилися. Ці умови можуть призводити до підвищених перегрівань електродвигунів, а, отже, до передчасного старіння ізоляції і виходу електродвигунів з ладу. Окрім цього на тепловий стан електродвигуна роблять вплив і зміни, що пройшли в елементах електродвигуна, наприклад засмічення вентиляційних каналів, руйнування частин ротора, підшипників тощо, в основному, це призводить до збільшення температури нагріву.

4.1.3. Методи і засоби вібродіагностики. Більшість сучасних методів діагностування технічного стану електродвигунів і устаткування базується на обробці та аналізі вібраційних параметрів. Ці методи є основою функціональної (робочої) діагностування. Комплекс параметрів вібрації практично повністю характеризує технічний стан працюючого електроприводу і дозволяє прогнозувати виникнення несправностей і аварій АД і електромеханічного устаткування. Існує ряд факторів, що впливають на обґрунтованість застосування будь-якого з методів вібродіагностики в кожному конкретному випадку: режим роботи АД, необхідна точність діагностування, умови, в яких проводяться операції діагностування, вимоги до вібровимірювальної і віброаналізуючої апаратури, якість електроенергії.

Класифікація методів вібраційної діагностики:

- діагностування АД по середньоквадратичному значенню (СКЗ) вібросигналу;
- вібродіагностування АД за допомогою фазових портретів (траєкторій коливань).

4.2 Комплекс приладів для віброакустичного діагностування електродвигунів

Для діагностики асинхронних електродвигунів в оперативному режимі в даний час використовуються кілька способів діагностики, серед яких найбільш поширений метод віброакустичної діагностики. Головним недоліком такого методу є необхідність використання спеціальних віброакустичних датчиків і складність їх установки. В даний час розроблений метод спектрального аналізу споживаного струму. Гідність цього методу в порівнянні з попереднім – можливість контролю стану як механічних, так і електричних частин електродвигунів з електричного параметру, а зокрема, за сигналом споживаного струму, що значно спрощує установку схеми для діагностики і позбавляє від необхідності запровадження спеціальних датчиків. Особливо подібні методи поширені за кордоном. Суть даного методу полягає в аналізі спектру гармонік

струму, що споживається електродвигуном, шляхом виявлення періодично повторюваних змін сигналу на графіку, відповідних конкретному виду пошкодження електродвигуна. Проте із-за появи помилкових гармонік сигналу при різних перешкодах електричної мережі, підключеної до неї електродвигуном, можливі хибні результати діагностики. В додаток до цього невідомо, яким буде графік спектрального аналізу струму при нестабільній напрузі в електромережі.

Сучасні електротехнічні засоби, що базуються на використанні програмованих мікроконтролерів, що дозволяють найбільш гнучко реалізувати захист і функціональну діагностику електродвигунів, їх електричним параметрам.

Найбільш вдалим методом є використання програмно-апаратного комплексу, який зображений на рис. 4.1, який складається з комп'ютера і цифрового пристрою-посередника, що виконує необхідні вимірювання і передається їх в комп'ютер. В якості вимірюваних електричних величин можуть бути оперативний струм, потужність тощо. Програма, яка встановлена на комп'ютері, повинна, в свою чергу, певним чином обробляти вхідну інформацію

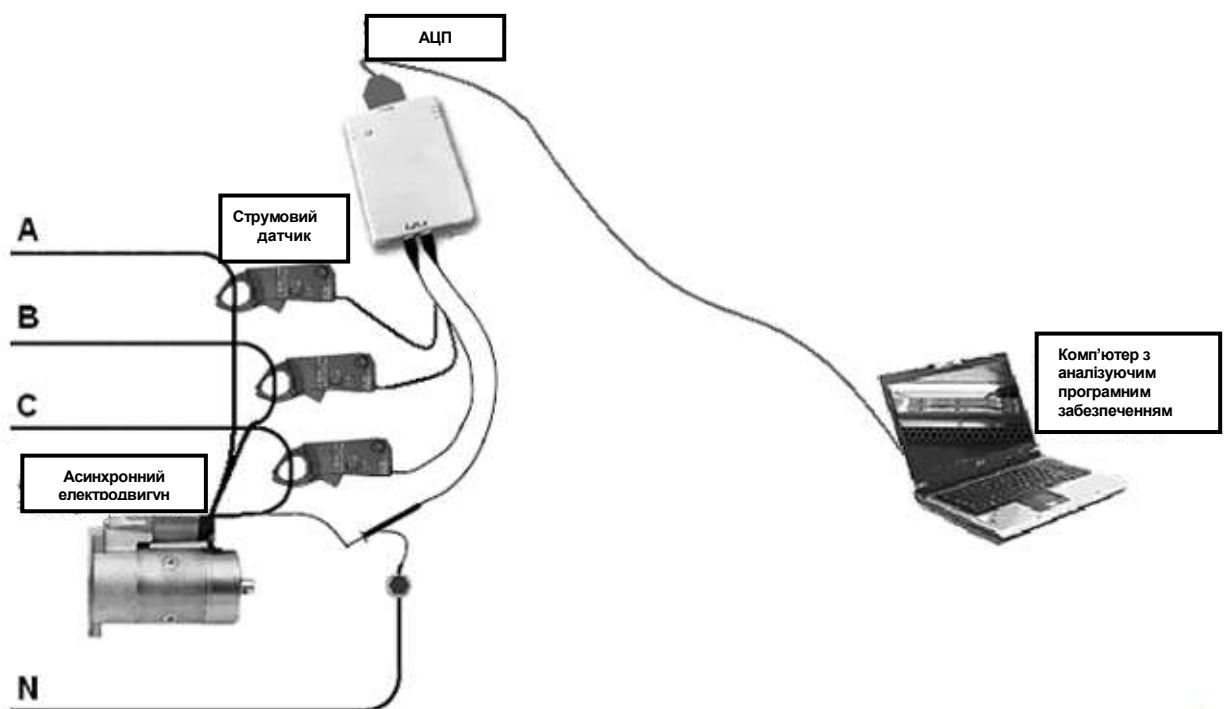


Рис. 4.1. Комплекс приладів для віброакустичного діагностування електродвигунів.

і визначити найбільш ймовірний вид пошкодження працюючого електродвигуна або зробити висновок про його справності. Цей метод найбільш ефективний, так як дозволяє зберігати на комп'ютері великі бази даних з інформацією про відслідковується динаміці ушкоджень електродвигуна з подальшим прогнозуванням виходу його з ладу.

Відомо, що електромагнітне поле обертового ротора працюючого асинхронного електродвигуна впливає на електромагнітне поле його статорної обмотки, що призводить до періодичних коливань електричних величин електродвигуна, таких як споживаний струм, потужність або напруга обмотки статора. Період даних коливань пропорційний, частоті обертання ротора. Таким чином, аналізуючи форму графіка сигналу будь-якої з електричних величин на даному періоді можна виявити пошкодження в електромеханічній частини електродвигуна і розпізнати його вигляд. Для вирішення даної проблеми можна використовувати багато різних підходів. Наприклад, можна побудувати аппроксимационную функцію з кількох вихідних точок сигналу, відповідного конкретного виду ушкодження, і в процесі діагностики порівнювати поточні вимірювані значення зі значеннями цієї функції з певною часткою похибки. Однак апроксимація складних нелінійних сигналів призводить до великих погрешностей, які посилюються додатковими перешкодами електричної мережі з підключеним електродвигуном. В даний час широке поширення набуло використання штучних нейронних мереж для побудови математичних моделей складних нелінійних процесів, розпізнавання образів і прогнозування сигналів.

При навчанні нейронної мережі на виході використовується певне значення Y_{ET} , відповідне конкретного виду несправності електродвигуна і еталонні експериментальні значення сигналу повної споживаної потужності досвідченого електродвигуна, отримані за допомогою того ж вимірювального пристрою. Після цього, при ідентифікації сигналу, вже навченої мережею, проводиться перевірка відповідності значення Y на виході мережі значенням Y_{ET} , яке ставилося при навчанні. Якщо $Y=Y_{ET}$, то це означає, що в електродвигуні на 100% є несправність, для якої навчалася ця нейронна мережа.

Як виявленої несправності вибирається та, ступінь відповідності якої найбільша. За ступенем відповідності для інших несправностей електродвигуна можна судити про ймовірність їх присутності. У найбільш складних випадках, можливо, доведеться використовувати експертну систему з набором правил нечіткої логіки, які будуть визначатися в ході експериментальних досліджень.

4.3 Аналіз спектральних характеристик асинхронних електродвигунів залежно від типу дефекту

При створенні інформаційної системи, завданням якої є моніторинг та аналіз стану робочих режимів електродвигунів у реальному часі, в якості критерію оцінки стану двигуна необхідно обрати ознаки, які характеризують наявність тих чи інших дефектів або пошкоджень.

Так як майбутня експертна система повинна аналізувати поточний стан електрообладнання у реальному часі і вчасно повідомляти про це оператору, у випадку виникнення передаварійних станів двигунів, було обрано пошкодження, які не призводять до повного виходу з ладу обладнання. Такі дефекти спричиняють тільки подальше руйнування конструкції, що призводить, наприклад, до збільшеного енергоспоживання, вібрації тощо.

На сьогоднішній день можна виділити найпоширеніші основні типи дефектів електродвигунів [18]:

1. Перевантаження і перегрів статора електродвигуна – 31%.
2. Міжвиткове замикання – 15%.
3. Пошкодження підшипників – 12%.
4. Пошкодження обмоток статора або ізоляції – 11%.
5. Нерівномірний повітряний зазор між статором і ротором – 9%.
6. Робота електродвигуна на двох фазах – 8 %.
7. Обрив або ослаблення кріплення стрижнів білячої клітки – 5%.
8. Ослаблення кріплення обмоток статора – 4%.
9. Дисбаланс ротора – 3%.

10. Неспіввісність валів – 2%.

У загальному випадку масову частку пошкоджень ротора, статора та механічної частини електродвигуна можна продемонструвати діаграмою, представленою на рис. 4.2.

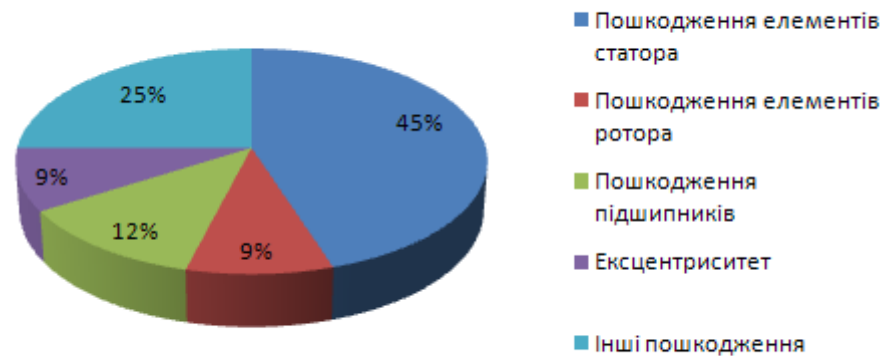


Рис. 4.2. Найпоширеніші дефекти електродвигунів.

4.3.1 Механічні дефекти асинхронних електродвигунів. До найбільш поширених механічних пошкоджень електродвигунів відносять пошкодження підшипників, збільшений ексцентриситет, обрив або ослаблення кріплення стрижнів білячої клітки, що у свою чергу призводить до перенавантаження.

При виникненні даного типу дефектів момент опору, який діє на вал електродвигуна, починає періодично змінюватися з частотою, пропорційною частоті обертання вала. Періодична зміна моменту опору викликає появу у струмі статора складових (гармонік), пропорційних частоті обертання вала [25].

Збільшений ексцентриситет. Зміна повітряного зазору внаслідок динамічного або статичного ексцентриситету призводить до зміни густини магнітного струму у повітряному просторі. У свою чергу, внаслідок зміни струму статора, можливо виявити ексцентриситет на таких частотах [19]:

$$f = ((R * f_r \pm n_d) \pm k * f_r, \quad 4.1$$

де R – кількість стрижнів ротора;

f_r – швидкість обертання ротора, Гц;

nd – порядок ексцентриситету (0, 2, 4, 6);

k – коефіцієнт, який визначає гармоніки споживаючої мережі.

Пошкодження підшипників. Наявність пошкоджень елементів підшипників, які відображають наявність несправностей, пов'язаних з дефектами внутрішнього та зовнішнього кілець, тіл кочення, можливо діагностувати на таких частотах [19, 32]:

$$f = k \cdot fn, \quad (4.2)$$

де fn – характерні частоти при наявності дефектів елементів підшипника, використовувані для діагностики (внутрішньої та зовнішньої обійми, частота тіл кочення):

n - частота обертання тіл кочення; її можна розрахувати таким чином:

$$f_n = \left(\frac{D_{out}}{D_{tk}} * \frac{D_v}{D_v + D_{out}} \right) f_r \quad (4.3)$$

Частоту перекошування тіл кочення по зовнішньому кільцю можна розрахувати таким чином:

$$f_n = \frac{D_v}{D_v + D_{out}} N * f_r, \quad (4.4)$$

Частоту перекошування тіл кочення по внутрішньому кільцю можна розрахувати наступним чином:

$$f_n = \frac{D_{out}}{D_v + D_{out}} N * f_r, \quad (4.5)$$

де D_v – діаметр внутрішнього кільця,

D_{out} – діаметр зовнішнього кільця,

N – кількість тіл кочення,

D_{tk} – діаметр тіл кочення.

4.3.2 Дефекти ротора та статора асинхронного електродвигуна.

Пошкодження стрижнів ротора. При дефектах ротора виникає його асиметрія, в результаті чого утворюється магнітне поле з протилежним напрямком щодо

поля ротора з частотою, пропорційною частоті ковзання gf_s . У свою чергу, це призводить до виникнення додаткових гармонік на таких частотах [19, 32]:

$$f=(1\pm 2s)f_s, \quad (4.6)$$

де s – частота ковзання,

f_s – частота живлення.

Приклад спектра струму даного дефекту наведено на рис. 4.3.

Міжвиткові замикання статора. Даний вид несправності є одним із найпоширеніших та складно виявляємим, особливо на початкових стадіях. Внаслідок цього може виникнути міжфазне замикання або замикання витків на землю. Характерною особливістю даного виду дефектів (рис. 4.4) є виникнення гармонік на таких частотах [19, 32]:

$$f=f_s \cdot k, \quad (4.7)$$

де f_s – частота живлення,

k – коефіцієнти (1, 2, 3, 4, 5).

Неспіввісність валів та механічного навантаження. Даний тип несправності (рис. 4.5) електродвигунів можливо діагностувати на таких частотах [19, 32]:

$$f=fr \cdot k, \quad (4.8)$$

де fr – частота обертання ротора (Гц),

k – коефіцієнти (1, 2, 3, 4, 5).

Замикання ротора об статор. Діагностувати даний вид несправності електродвигуна (рис. 4.6) можливо на таких частотах [19, 32]:

$$f=k \frac{f_r}{2}, \quad (4.9)$$

де fr – частота обертання ротора (Гц),

k – коефіцієнти (1, 2, 3, 4, 5).

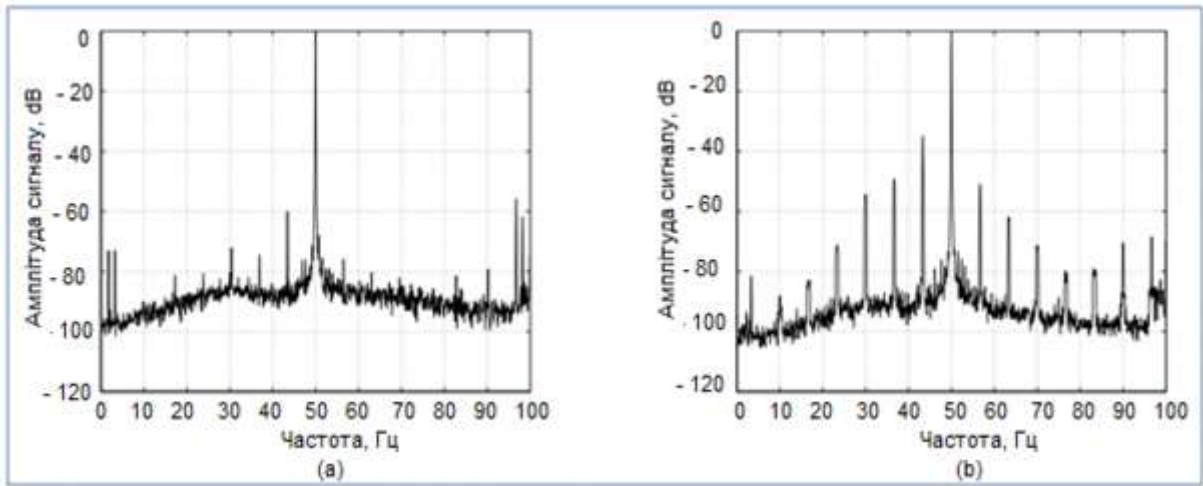


Рис. 4.3. Спектр струму справного двигуна (а) та із обривом стрижня (б).

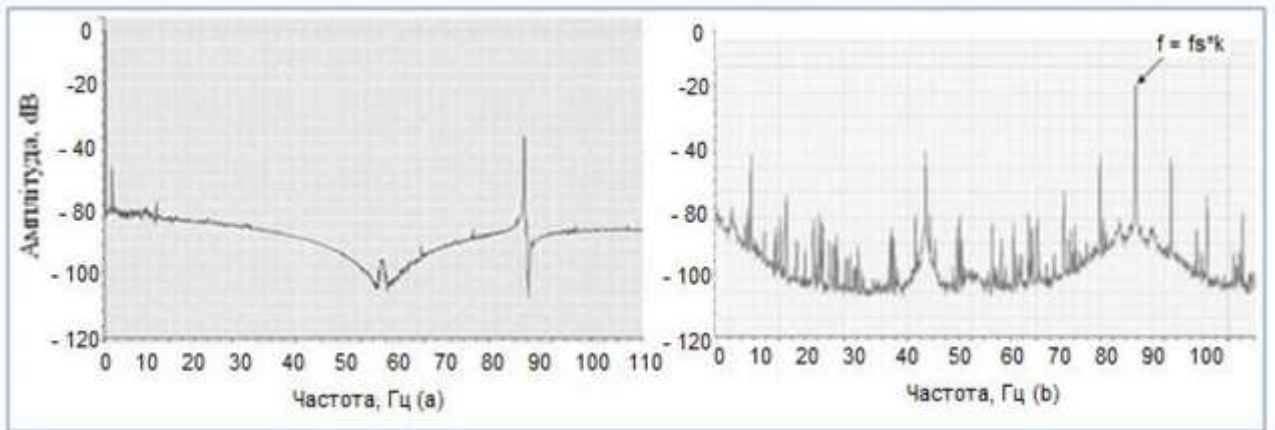


Рис. 4.4. Спектр струму справного двигуна (а) та із міжвитковим замиканням (б).

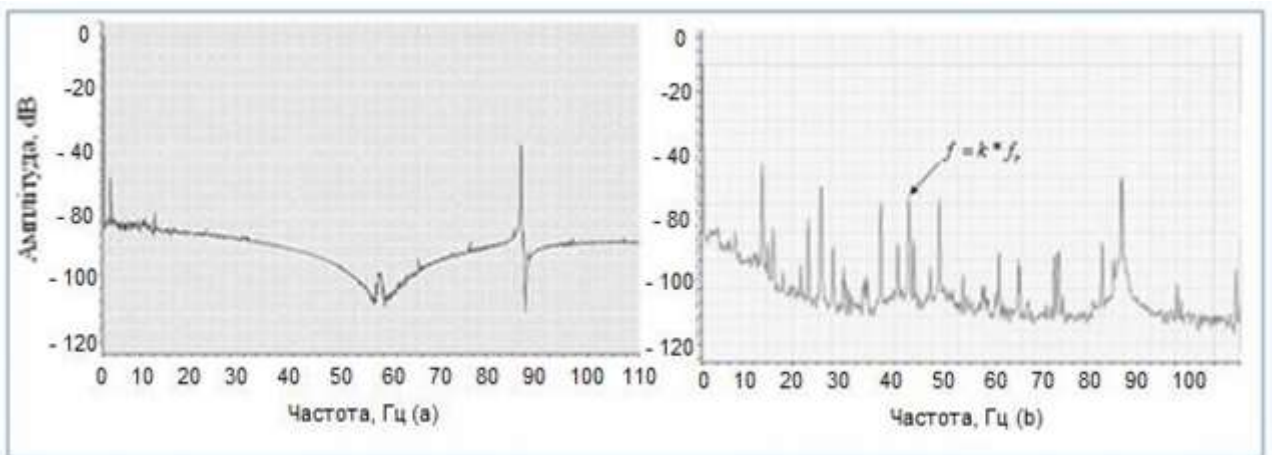


Рис. 4.5. Спектр струму справного двигуна (а) та з неспіввісністю валів (б).

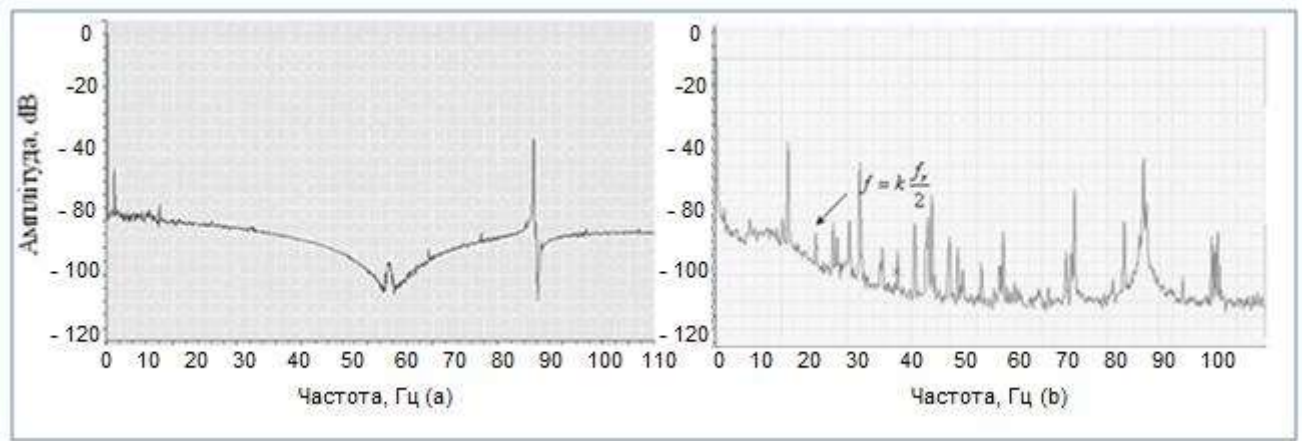


Рис. 4.6. Спектр струму справного двигуна (а) та із замиканням ротора об статор (b).

4.4 Комплексний метод діагностики асинхронних електродвигунів на основі використання штучних нейронних мереж

Методи аналізу прямого спектру і спектра огибаючої можуть бути реалізовані із застосуванням теорії штучних нейронних мереж. Застосування математичного апарату нейронних мереж забезпечує підвищення точності процесу діагностики шляхом застосування наявних знань про роботу аналогічних агрегатів. Крім того, результати вимірювання вібрації, як і будь-які інші фізичні вимірювання, схильні до деякої випадковості. А апарат нейронних мереж відноситься до статистичних математичних методів, що дозволяє ставити діагноз при значних випадкових складових оброблюваного сигналу. Перевагами застосування даної технології є висока точність визначення дефекту, а також високий рівень автоматизації процесу. До недоліків же можна віднести складність реалізації та навчання нейромережі, крім того, варто виділити низький ступінь уніфікації (для кожного нового вузла необхідно створювати нову мережу і навчати її).

Нейронна мережа – це набір нейронів, кожен з яких представляє собою модель біологічного нейрона. Кожен нейрон має так звані дендрити, синапси і аксони. Дендрити йдуть від тіла нервової клітини до інших нейронів, де вони приймають сигнали в точках з'єднання, які називаються синапсами. Прийняті

синапсом вхідні сигнали підводяться до тіла нейрона. Тут вони підсумовуються, причому одні входи прагнуть порушити нейрон, інші – перешкодити його порушення. Коли загальне збудження в тілі нейрона перевищує деякий поріг, нейрон збуджується, посылаючи по аксону сигнал іншим нейронам. У цієї основної функціональної схеми багато ускладнень і винятків, тим не менше, більшість штучних нейронних мереж моделюють лише ці прості властивості.

В даний час широко використовуються математичні моделі нейронних мереж. Існують також і інші моделі нейронних мереж, серед яких найбільш часто використовуються рекурентні мережі Хопфілда і самоорганізуючі мережі Кохонена. Прямокутники являють собою тіла нейронів, вихідні і вхідні стрілки – дендрити, а точки, в яких стрілки заходять і точки, з яких стрілки виходять - це відповідно синапси і аксони. Круги на рисунку – умовні входи нейронів, які просто розподіляють вхідні значення по всіх нейронів мережі. В математичній моделі нейрона всі вхідні стрілки мають ваги, а на виході зазвичай обчислюється нелінійна функція від середньої суми цих ваг з деякими додатковими арифметичними діями.

Були розроблені також і інші моделі нейронів та нейронних мереж, наприклад, електричні. Однак через непрактичність вони не набули великого поширення.

Для використання нейронної мережі прямого поширення при вирішенні конкретної задачі, її спочатку необхідно «навчити». Для цього на вхід нейронної мережі подаються які-небудь значення, а на виході знімаються результуючі значення, які порівнюються з тими значеннями, які повинні там бути. Якщо вихідні значення нейронної мережі відрізняються від необхідних значень, то відбувається оптимізація ваг нейронної мережі яким-небудь з математичних алгоритмів до тих пір, поки ці значення не будуть їм відповідати з заданою точністю. Після цього нейронну мережу можна вважати навченою.

Нейронні мережі дають можливість ефективно визначати причину і види пошкодження асинхронних електродвигунів, працювати з зашумленими даними, позбавляючи від необхідності застосування проміжних електронних фільтрів від

перешкод або фільтрації математичними методами, а також адаптуватися до конкретного типу електродвигуна. Крім цього, штучні нейронні мережі широко використовуються в задачах прогнозування.

Крім вибору алгоритмів обробки сигналу та визначення способу діагностування асинхронних електродвигунів необхідно розробити апаратну частину програмно-апаратного діагностичного комплексу. При цьому дуже важливо вибрати недорогу компонентну базу для його реалізації, що визначає собівартість комплексу в розмірі не більш ніж 10% від вартості самого електродвигуна.

У реалізації програмної частини комплексу використовується метод аналізу сигналу повної споживаної потужності електродвигуна на кожній фазі штучною нейронною мережею, що визначає ймовірність присутності якого-небудь ушкод-ження, як електричної, так і в механічній частині електродвигуна. Для цього нейронну мережу прямого поширення планується використовувати для ідентифікації залежності повної потужності від часу, або для ідентифікації спектру гармонік сигналу повної споживаної потужності на одному періоді. Спочатку виконується визначення періоду сигналу. Потім відрізок, на якому сигнал триває протягом заздалегідь визначеного періоду, масштабується по ширині, а значення амплітуди повної потужності нормуються щодо значення номінальної потужності електродвигуна. Таким чином, будуть аналізуватися процентні зміни потужності. Для їх аналізу отриманий графік розбивається на рівномірні проміжки, кількість яких залежить від швидкодії вимірювального пристрою і частоти обертання ротора електродвигуна.

За допомогою нейронної мережі планується також виконувати прогнозування пошкоджень в електродвигуні. Апаратна частина комплексу, структура якої зображена на рис. 4.7, включає в себе 10 блоків, з яких 7 блоків є однаковими вхідними блоками, а з інших три блоки є основними.

Головний блок пристрою – вимірювальний – виконує функції виміру вхідного сигналу, управління блоком перемикання діапазонів і виконавчим блоком, а також обмін інформацією між комп'ютером і пристроєм. Вхідні блоки

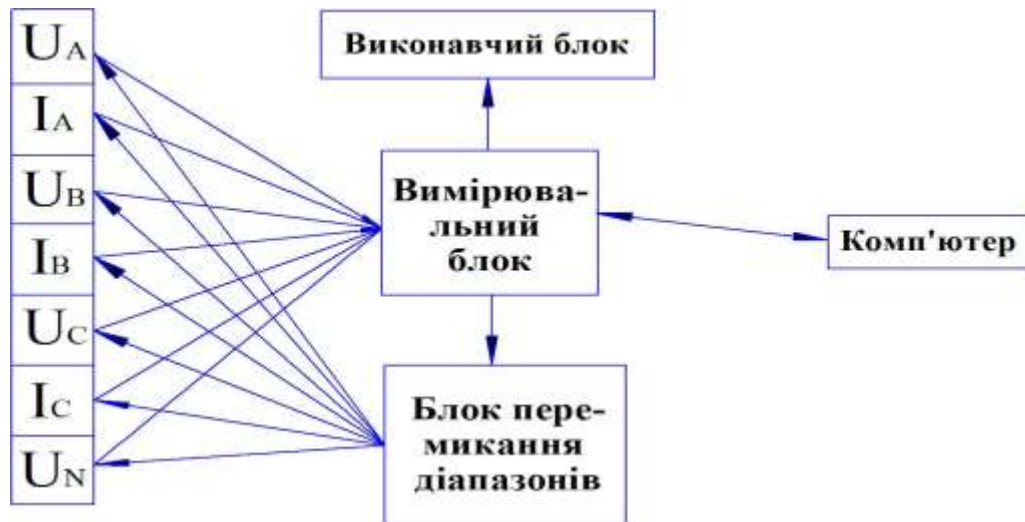


Рис. 4.7. Структура апаратної частини вимірювального блоку.

служать для масштабування вхідного вимірюваного рівня напруги для його зміни в межах від 0 до 5 Ст. Кожен вхідний блок підтримує роботу в трьох діапазонах напруги (від 0 до 100 В з точністю 0,1 В, від 10 до 1000 В з точністю 1 та від 100 до 10000 В з точністю 10) (рис. 4.8). Для автоматичного вибору поточного діапазону напруги використовується блок перемикання діапазонів, який керує вхідними блоками, отримуючи команди на перехід від вимірювального блоку. Виконавчий блок служить для керування роботою електродвигуна або для сигналізації про що сталася несправність електродвигуна (рис. 4.9).

В якості основи для реалізації вимірювального блоку, принципова схема якого зображена, був обраний недорогий мікроконтролер фірми ATMEL ATmega8535 RISC-архітектури з вбудованим 8-канальним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Даний мікроконтролер має 512 байт енергонезалежної пам'яті EEPROM, яку можна використовувати для зберігання калібрувальних коефіцієнтів і параметрів, що відносяться до діагностуємого електродвигуна. Мікросхема FT245BM використовується для зв'язку вимірювального блоку з комп'ютером через інтерфейс USB 2.0. Однак виникли додаткові труднощі, пов'язані з низькою швидкодією АЦП даного мікроконтролера, в результаті чого виходить занадто мало експериментальних значень вимірюваної величини на аналізованому періоді сигналу електродвигуна. Можна скористатися більш

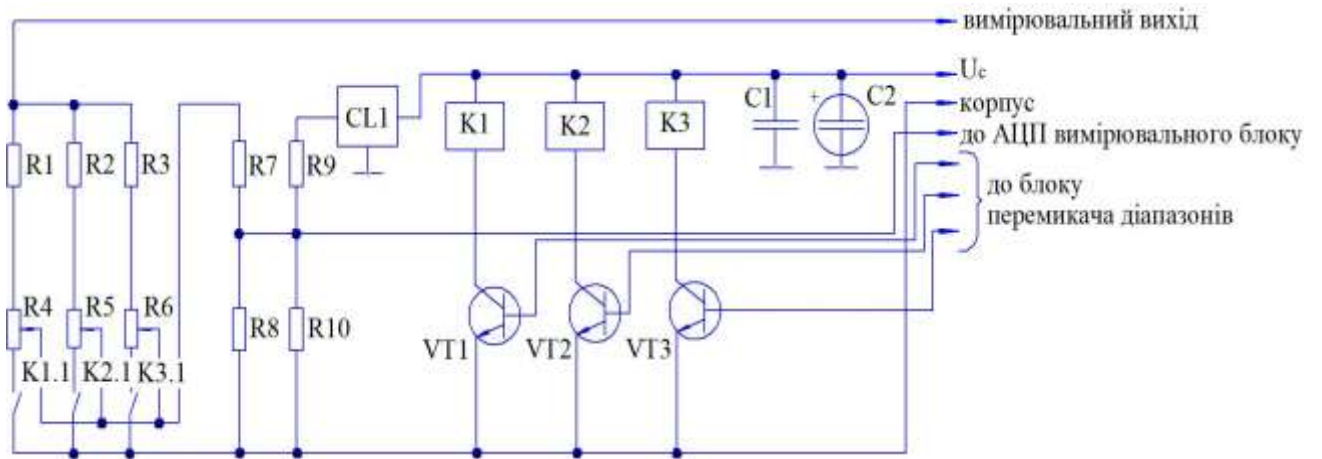


Рис. 4.8. Схема підключення вхідного блоку

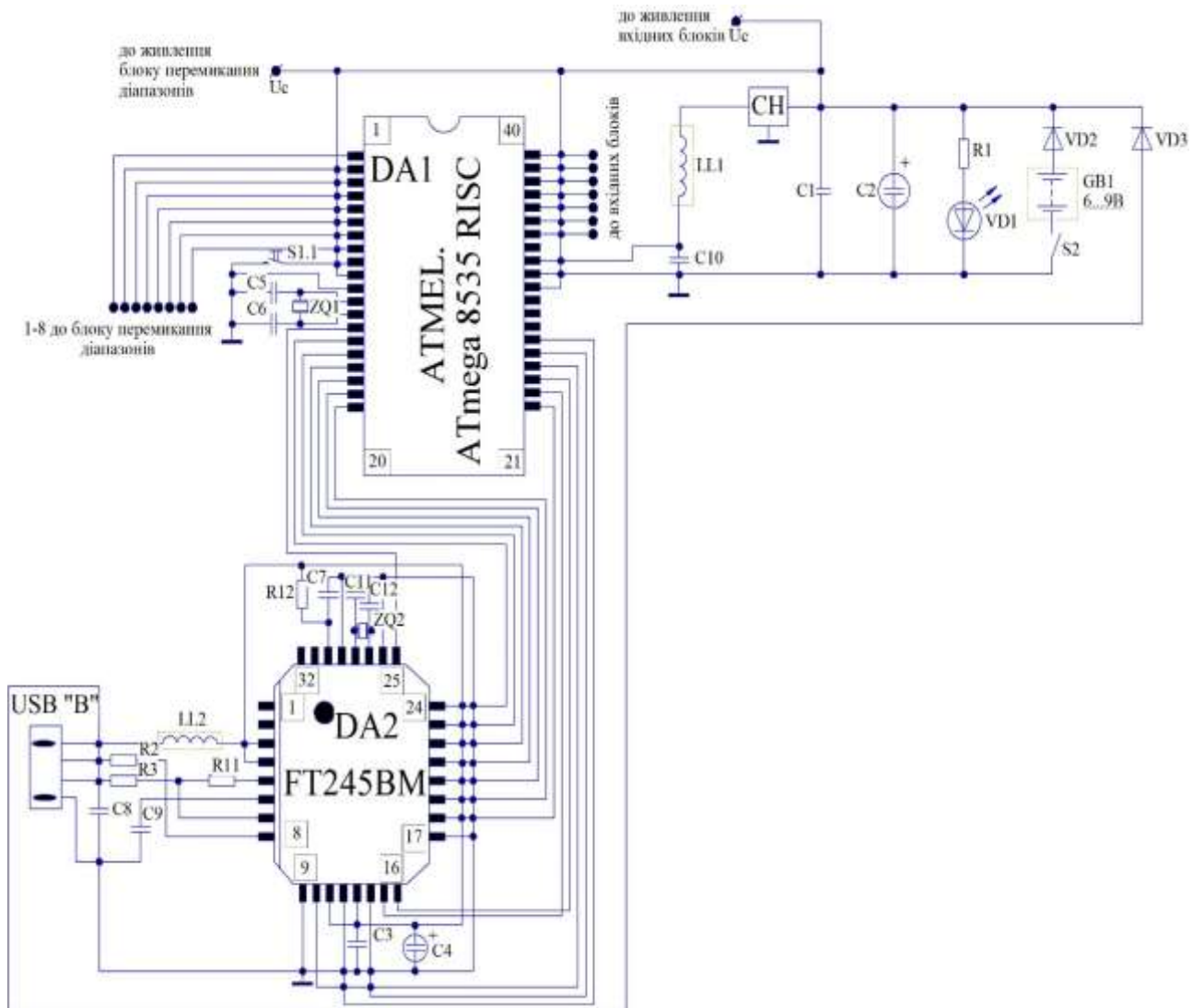


Рис. 4.9. Структура штучної нейронної мережі, яка використовується для ідентифікації сигналу повної споживчої потужності.

потужним і швидким багатоканальним АЦП або кількома одноканальними АЦП, що працюють паралельно, проте обидва цих способу значно завищують собівартість апаратної частини комплексу. Вирішенням цієї проблеми став програмний метод, за допомогою якого відбувається отримання більш детального графіка сигналу на одному періоді шляхом аналізу відразу декількох періодів сигналу.

Напруга з датчиків струму або з фаз електродвигуна подається на вимірювальний вхід вхідного блоку, зображеного на рис. 4.10. Вхідна напруга подається через один з трьох дільників в залежності від поточного діапазону напруги. Кожен дільник підключається за допомогою реле, після отримання відповідного сигналу на базу одного з трьох транзисторів від блоку перемикачів діапазонів. Реле у вхідному блоці є герконовими, так як вони споживають невеликий струм і при цьому порівняно безшумні. Поточний вхідний дільник вибирається блоком перемикачів діапазонів таким чином, щоб на виході

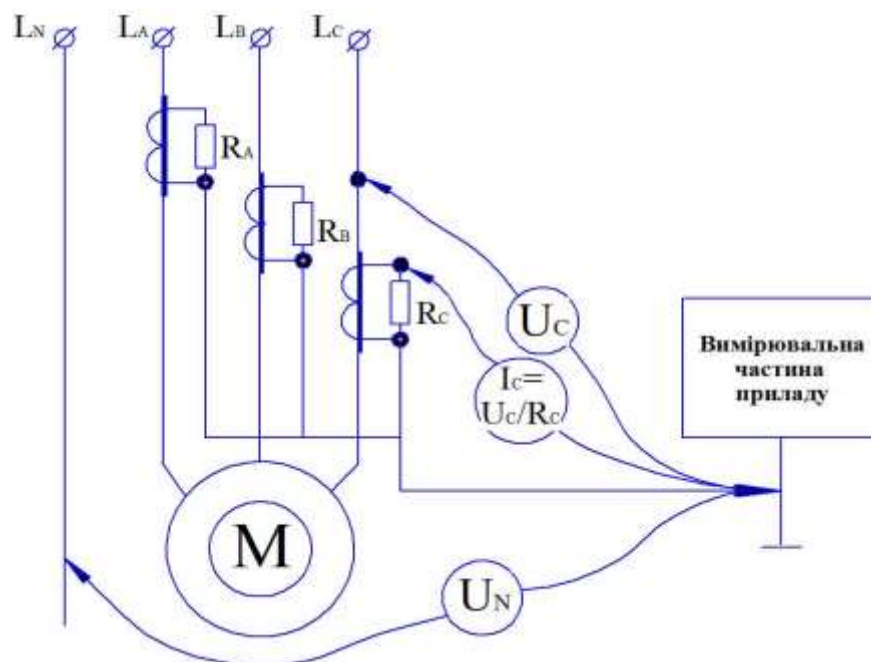


Рис. 4.10. Схема підключення вимірювальної частини діагностичного комплексу до кола трифазного асинхронного електродвигуна.

дільника рівень напруги був у межах від -1,25 до 1,25 Ст. Але враховуючи, що аналого-цифровий перетворювач мікроконтролера виконує вимірювання тільки невід'ємних сигналів від 0 до 2,5 В, додатково на вихідний сигнал подається постійна напруга зсуву з інтегрального стабілізатора CL1 через дільник R9 і R10, на виході якого утворюється +1,25 Ст.

Даний програмно-апаратний комплекс дозволить значно збільшити економічну ефективність використання промислових установок з асинхронними електродвигунами, і при цьому збільшити строк служби електродвигунів у виробництві шляхом проведення своєчасного їх ремонту за даними прогнозування, отриманими в результаті діагностики.

4.5 Алгоритм функціонування СКПР

При моніторингу поточного стану асинхронних електродвигунів логіко-функціональну схему роботи СКПР можна представити схемою, яка наведена на рис. 4.11. За даною схемою можна простежити основні етапи утворення управлінського рішення на підприємстві.

Основним засобом, який дозволяє збільшити продуктивність роботи оператора, є персональний комп'ютер з установленим відповідним програмним забезпеченням (програмна реалізація СКПР).

Отримана вихідна інформація від датчиків АЦП (блок 1), а саме спожитий електричний струм, які розташовані на технологічних об'єктах, оброблюється (перетворення до цифрового виду та отримання амплітудно-частотної характеристики) та в структурованому вигляді поступає до системи підтримки прийняття рішень (блок 2-8).

Блок 2 відповідає за перетворення вхідної інформації за допомогою математичного апарата Фур'є у АЧХ. Також даний блок визначає чи під'єднано обладнання вперше чи ні. Далі АЧХ оброблюється у блоці 3-6 відповідно до поточного стану (навчання або ідентифікація електрообладнання).

Блок 3 відповідає за визначення характерних частот на основі спектрального шуму досліджуваного об'єкта.

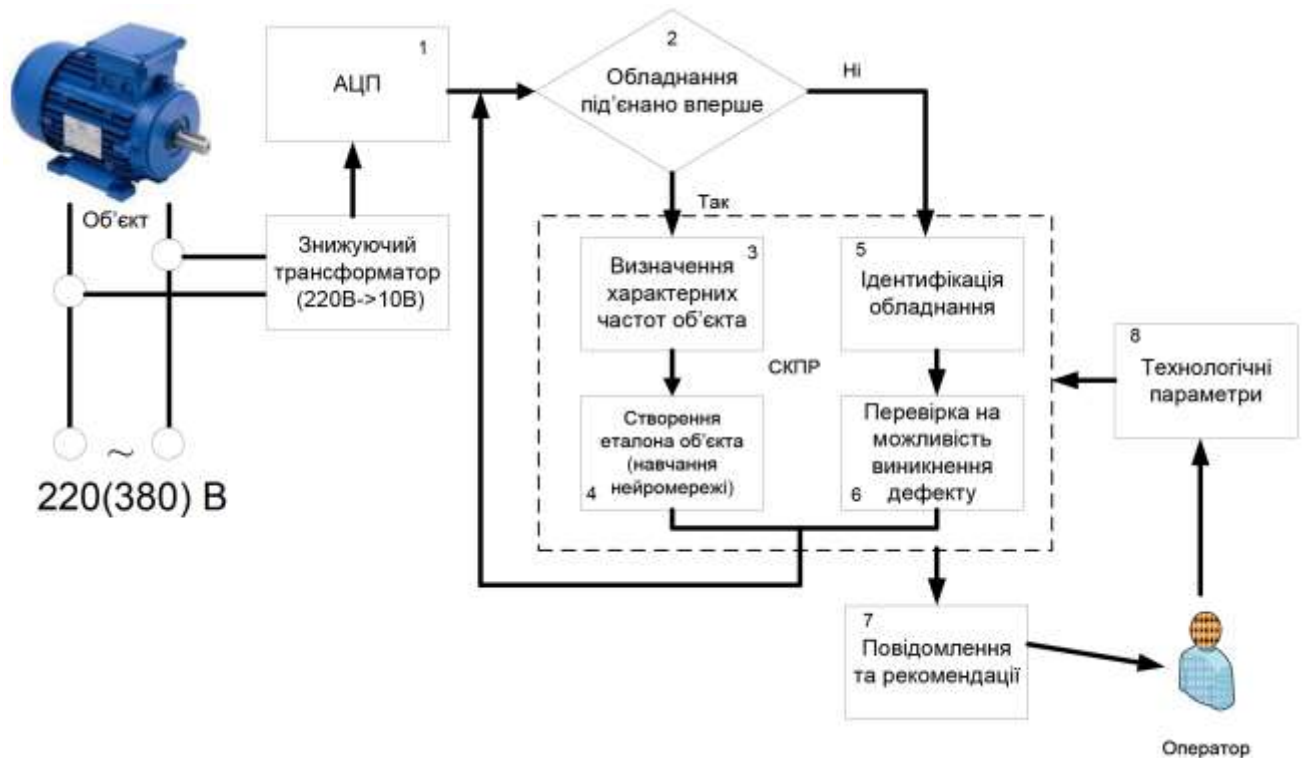


Рис. 4.11. Логіко-функціональна схема СКПР.

У випадку визначення характерних частот, відбувається створення еталонного зразка досліджуваного об'єкта (блок 4).

У випадку, якщо обладнання під'єднано невперше, відбувається процес його ідентифікації (блок 5).

Блок 6 відповідає за визначення оцінки (моніторинг) про поточний стан електрообладнання, а саме: у базі знань відбувається пошук відповідних варіантів рішення задачі (видача результату про можливі види поломки та наслідків неправильної роботи), і на основі отриманих системою результатів оператор приймає відповідне рішення (блок 5).

Блок «оператор» – на основі запропонованих СКПР рішень та поточного стану електрообладнання приймає рішення про технічний стан обладнання (блок 7).

Для розробленої СКПР було запропоновано алгоритм функціонування, при якому оператору надається можливість налаштовувати основні параметри (блок 8) системи і на основі запропонованих варіантів приймати рішення щодо стану об'єктів.

Висновки до розділу 4.

1. Проаналізовано методи та технічні засоби діагностування асинхронних електродвигунів, які використовують електромагнітний, температурний, віброакустичний методи.

2. Для діагностики електродвигунів в оперативному режимі використовується найбільш поширений метод віброакустичної діагностики.

3. В даний час розроблений метод спектрального аналізу споживаного струму. Кожному виду механічного дефекту відповідає свій спектр струму статора.

3. У результаті виконаного аналізу спектральних характеристик та залежностей однакових АД подальшого розвитку набув метод визначення повної споживчої потужності серед однакових, за параметрами АД, який на відміну від існуючих, враховує та аналізує значення спектрального шуму АД під різними навантаженнями на основі використання нейромережевої системи, що дозволяє, з деякою вірогідністю, виявити електродвигун, який споживає більше електроенергії при однаковому навантаженні.

4. Розроблено СКПР моніторингу поточного стану асинхронних електродвигунів на основі розроблених комп'ютерних моделей запропонованих СКПР та з'ясовано, що для підвищення продуктивності та зменшення навантаженості обчислювальних ресурсів комп'ютерної системи, можна розподілити навантаження між іншими технологічними об'єктами, шляхом розподілення обчислень програмно або апаратно.

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРІОДИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Існуючі методики оцінки економічної ефективності, головним чином, враховують або загальну економічну ефективність від впровадження нової техніки, або метод підвищення експлуатаційної надійності від впровадження конкретних дій спеціалістів [13]. Нажаль, достовірна і проста методика оцінки економічної ефективності впровадження періодичного діагностування серед останніх відсутня.

$$B_{\text{сум}} = B_{\text{серв}} + B_{\text{відм}}, (\text{грн.}) \quad (5.1)$$

де $B_{\text{сум}}$ – сумарні витрати на отримання парка електродвигунів підприємства, *грн.*,

$B_{\text{серв}}$ – витрати на технічний сервіс електродвигунів, *грн.*,

$B_{\text{відм}}$ – витрати з причини відмов електродвигунів, *грн.*

Витрати на сервіс електродвигунів залежать від вартості технічного сервісу електродвигуна певного типорозміру і загальної кількості електродвигунів даного типорозміру, які знаходяться на технічному обслуговуванні, тобто:

$$B_{\text{серв}} = C_{\text{серв}} \cdot N_{\text{заг.і}}, \text{грн.} \quad (5.2)$$

де $C_{\text{серв}}$ – середня вартість технічного сервісу одного електродвигуна, *грн.*,

$N_{\text{заг.і}}$ – кількість електродвигунів даного типорозміру, які знаходяться на технічному обслуговуванні.

$$B_{\text{серв}} = 1268 \cdot 32 = 40576 \text{ грн.}$$

Витрати з причини відмов електродвигунів залежать від вартості ліквідації наслідків відмов асинхронних двигунів певного типорозміру і кількості електродвигунів певного типорозміру, що відмовили і знаходяться на технічному обслуговуванні, тобто:

$$B_{\text{відм}} = C_{\text{відм}} \cdot N_{\text{відм.і}}, (\text{грн.}) \quad (5.3)$$

де $C_{відм}$ – середня вартість ліквідації наслідків відмови одного електродвигуна, грн.,

$N_{відм.i}$ – кількість електродвигунів певного типорозміру, що відмовили і знаходяться на технічному обслуговуванні.

$$B_{відм.} = 1815 \cdot 32 = 58080 \text{ грн.}$$

$$B_{сум} = 40576 + 58080 = 98656 \text{ грн.}$$

Вирази (5.1) та (5.2) відбивають загальні закономірності виникнення матеріальних витрат при технічному сервісі електродвигунів. Якщо розраховувати сумарні витрати за певний проміжок часу, наприклад за рік, то необхідно враховувати середню вартість річного технічного сервісу асинхронних електродвигунів і відсоток електродвигунів, що відмовили, від загальної їх кількості, тобто:

$$B_{сум.p} = C_{серв.p} \cdot N_{заг} + C_{відм} \cdot N_{відм} \cdot K_{відм}, \text{ грн} \quad (5.4)$$

де $B_{сум.p}$ – сумарні річні витрати на отримання парку електродвигунів підприємства, грн.,

$C_{серв.p}$ – середня річна вартість технічного сервісу асинхронних електродвигунів, грн.,

$K_{відм}$ – відсоток електродвигунів, що відмовили, від загальної їх кількості за рік (коефіцієнт відмов).

$$B_{сум.p} = 1268 \cdot 6 + 1815 \cdot 6 \cdot 0,4 = 11964, \text{ грн.}$$

У свою чергу, коефіцієнт відмов має три складові:

$$K_{відм} = K_{відм.поч} + K_{відм.зах} + K_{відм.серв}, \quad (5.5)$$

де $K_{відм.поч}$ – початковий коефіцієнт відмов, обумовлений недосконалістю конструкції і технології виготовлення електродвигунів, а також неправильним їх вибором для конкретних умов роботи;

$K_{відм.зах}$ – коефіцієнт відмов, обумовлений незадовільним захистом асинхронних електродвигунів від аварійних режимів роботи;

$K_{відм.серв.}$ – коефіцієнт відмов, обумовлений низьким рівнем технічного сервісу асинхронних електродвигунів.

$$K_{відм} = 0,05 + 0,12 + 0,23 = 0,4 .$$

Отже, одним зі шляхів зниження сумарних річних витрат є підвищення рівня технічного сервісу. Цього дозволяє домогтись новий варіант технічного сервісу, який передбачає впровадження періодичного діагностування електродвигунів. Річні витрати на його впровадження залежать від вартості додаткового сервісу за рік і загальної кількості електродвигунів, що знаходяться на обслуговуванні, тобто:

$$Z_{впр} = C'_{серв.р} \cdot N_{заг} , \text{ грн} \quad (5.6)$$

де $Z_{впр}$ – річні витрати на впровадження періодичного діагностування електродвигунів, *грн.*;

$C'_{серв.р}$ – середня річна вартість додаткового сервісу електродвигуна, *грн.*

$$Z_{впр} = 280 \cdot 32 = 8960 \text{ грн.} ,$$

Таким чином, сумарні річні витрати на отримання парка електродвигунів підприємства згідно нового варіанту технічного сервісу, який передбачає застосування періодичного діагностування, що дозволить підняти технічний сервіс на необхідний рівень (тобто відмови з його вини повинні припинитись), складуть:

$$B'_{сум.р} = B_{сум.р} - (C_{відм} \cdot N_{відм} \cdot K_{відм.серв} - Z_{впр}) , \text{ грн} \quad (5.7)$$

де $B'_{сум.р}$ – сумарні річні витрати на отримання парка електродвигунів підприємства згідно нового варіанту технічного сервісу, *грн.*

$$B'_{сум.р} = 11964 - (1815 \cdot 32 \cdot 0,23 - 8960) = 11964 - 4398,4 = 7565,6 \text{ грн.}$$

де $B_{відм.i}$ – вартість ліквідації наслідків відмов асинхронних електродвигунів певного типорозміру, *грн.*;

$N_{відм.i}$ – кількість електродвигунів певного типорозміру, що відмовили і знаходяться на технічному обслуговуванні.

Отже, зниження збитків від виходів з ладу асинхронних електродвигунів з причини низького рівня технічного сервісу або річний прибуток сервісної служби буде дорівнювати:

$$P_p = C_{відм} \cdot N_{відм} \cdot K_{відм.серв} - Z_{впр}, (грн.) \quad (5.8)$$

де P_p – річний прибуток сервісної служби підприємства за рік згідно нового варіанту технічного сервісу внаслідок підвищення рівня технічного сервісу, грн.

$$P_p = 1815 \cdot 32 \cdot 0,23 - 8960 = 4398,4 \text{ грн.}$$

Не досить значна сума прибутку сервісної служби підприємства за рік згідно нового варіанту технічного сервісу внаслідок підвищення рівня технічного сервісу обумовлена невеликою кількістю електродвигунів, а саме 32 електродвигуни. З подальшою роботою ремонтної майстерні з обслуговуванням та діагностуванням електродвигунів, кількість буде зростати за рахунок ремонту електродвигунів інших підприємств району, а відповідно і прибуток річний за виконання даних видів робіт також буде збільшуватися.

Підставивши (5.6) і (5.7) у (5.8) та виконавши перетворення, отримаємо:

$$E = \frac{C_{відм} \cdot K_{відм.серв}}{C'_{серв.р}} - 1. \quad (5.9)$$

Розглянемо середню вартість ліквідації наслідків відмов для умовного випадку, коли на балансі сервісної служби знаходиться лише один електродвигун, причому вартість транспортування електродвигуна до місця ремонту і назад враховувати не будемо. Тоді отримаємо:

$$C_{відм} = \Gamma_{дм} + \Gamma_{кр} + \Gamma_{нн}, (грн.) \quad (5.10)$$

де $\Gamma_{дм}$ – грошові витрати на демонтаж і монтаж електродвигуна, грн.;

$\Gamma_{кр}$ – грошові витрати на виконання капітального ремонту електродвигуна, грн.;

$\Gamma_{нн}$ – грошові витрати на виконання пуско-налагоджувальних робіт електродвигуна, грн.

У свою чергу, середня річна вартість додаткового сервісу електродвигуна дорівнює:

$$C'_{серв.р} = \Gamma_{\partial}, \quad (5.11)$$

де Γ_{∂} – річні грошові витрати на проведення періодичного діагностування

електродвигуна, грн.

Виразимо грошові витрати, зазначені у (5.10) і (5.11) через вартість нового електродвигуна ($B_{\text{дв}}$), орієнтовно можна прийняти:

$$\Gamma_{\text{дм}} = 0,01 \cdot B_{\text{дв}}; \Gamma_{\text{кр}} = 0,6 \cdot B_{\text{дв}}; \Gamma_{\text{пн}} = 0,2 \cdot B_{\text{дв}};$$

$$\Gamma_{\text{д}} = 0,01 \cdot B_{\text{дв}}.$$

Підставивши вказані значення у (5.10) і (5.11) отримаємо, що $C_{\text{відм}} = 0,81 \cdot B_{\text{дв}}; C'_{\text{серв.р}} = 0,1 \cdot B_{\text{дв}}$.

Крім того, відповідно до [14] орієнтовно можна прийняти, що $K_{\text{відм.серв}} = 0,04$.

Таким чином, економічна ефективність від впровадження періодичного діагностування буде дорівнювати:

$$E = \frac{0,81 \cdot 0,04}{0,01} - 1 = 2,24.$$

Розрахунки за цією методикою показали, що збитки підприємств від виходів з ладу електродвигунів знизяться більше, ніж у 2 рази, якщо вони будуть застосовувати періодичне діагностування встановлених асинхронних електродвигунів.

Питомий середній економічний ефект визначався згідно з виразом:

$$\Delta \hat{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S - S^*), \quad (5.12)$$

де S, S^* – сумарні питомі витрати на ремонт одного АД, отримані при ремонті по факту та з використанням СКПР відповідно, грн/дв;

N – кількість техніко-економічних оцінок.

На середньо-статистичних аграрних підприємствах використання СКПР дозволить зменшити сумарні питомі витрати на ремонт одного двигуна в середньому на 1,8 - 2,17 %.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз стратегій технічного обслуговування і діагностування електрообладнання дозволив виявити найбільш раціональну форму, а саме: стратегію ТО і Р за прогнозованим технічним станом з проведенням економічно обґрунтованим діагностуванням.

2. Проаналізовано ряд готових виробів та прототипів, що реалізують спектр-струмовий аналіз при визначенні несправностей в АД.

3. У результаті аналізу робіт вітчизняних та іноземних авторів, що присвячені теоретичному та практичному дослідженню спектральних залежностей енергоспоживання, встановлено погіршення синусоїдальності та симетричності струмів напруг у фазах, робочих характеристик та енергетичних показників двигуна, починає виникати шум, вібрації.

4. Аналіз існуючих інформаційних засобів та методів діагностики асинхронних електродвигунів дозволив встановити, що методи спектральної діагностики дістають все більше поширення і є перспективними для оцінки їхнього поточного стану.

5. Розроблені питання електрифікації технологічних процесів сервісної служби станції ТО і ПР, включаючи вибір апаратів керування і захисту: електромагнітний пускач типу ПМЛ, з електротепловим реле типу РТЛ, автоматичний вимикач ВА 47Г-29-34 та комплектних пристроїв керування типу ПР8501, вибрано асинхронний електродвигун серії АИР.

6. Освітлювальна проводка виконується кабелем АВРГ на тросу, освітлювальний щиток приймається типу ОЩВ 25-6 з автоматичними вимикачами ВА 47-29-12. Для освітлення використанні енергозберігаючі подовжені світильники ОПАЛ-SL зі стрічковими світлодіодними лампами G13, а для решти приміщень - незахищені подовжені світильники ОПАЛ-SL зі стрічковими світлодіодами та світлодіодні лампи типу MEGALAMP.

7. Для діагностики електродвигунів в оперативному режимі використовується найбільш поширений метод віброакустичної діагностики.

8. В даний час розроблений метод спектрального аналізу споживаного струму. Кожному виду механічного дефекту відповідає свій спектр струму статора.

9. У результаті виконаного аналізу спектральних характеристик та залежностей однакових АД подальшого розвитку набув метод визначення повної споживчої потужності серед однакових, за параметрами АД, який на відміну від існуючих, враховує та аналізує значення спектрального шуму АД під різними навантаженнями на основі використання нейромережевої системи, що дозволяє, з деякою вірогідністю, виявити електродвигун, який споживає більше електроенергії при однаковому навантаженні.

10. Проведено аналіз існуючих методів обслуговування асинхронних електродвигунів, що дало можливість обґрунтувати склад системи технічного обслуговування. Наведено та описана схема мікропроцесорного пристрою діагностування та захисту групи асинхронних електродвигунів та цілого комплексу приладів для віброакустичного діагностування асинхронних електродвигунів на підприємстві. Збитки підприємств агропромислового комплексу від виходів з ладу електродвигунів знизяться більше, **ніж у 2 рази**.

11. Шляхом аналізу результатів впровадження СКПР на виробництві було з'ясовано, що використання даної інформаційної технології дозволяє зменшити сумарні питомі витрати на ремонт одного двигуна в середньому на **1,8 - 2,17%** у межах свого довірчого інтервалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Закон України «Про енергетику». В редакції від 1 липня 2010 року №2388-VI.
- 2 Закон України «Про енергозбереження». (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2006, №15, ст.126).
- 3 Закон України №555-IV від 20.02.2003 р. «Про альтернативні джерела енергії».
- 4 ДБН А.2.2. –1 – 2003 Проектування. Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств, будинків і споруд.
- 5 ДБН А.2.2. –3 – 2012 Склад та зміст проектної документації.
- 6 ДБН В.2.5. – 23 – 2003. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. Державний комітет України з будівництва та архітектури. – К.: 2004. – 128 с.
- 7 ДБН В.2.5-27-2006 Інженерне обладнання будинків і споруд. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
- 8 Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Харків.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
- 9 ДНАОП 0.00.–1.32–01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних електроустановок.–К.: ПП «Фірма Гранмна», 2001.–117 с.
- 10 Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС). Затверджено наказом Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 91 від 13.02.2012 та № 905 від 16.11.2012) Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 2 березня 2012 р. за № 350/20663.
- 11 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Затверджено Наказ Держнаглядохоронпраці від 09.01.98 №4. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 10.02.98 за № 93/2533ДНАОП 0.00.–1.32–01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних електроустановок. – К.: ПП „Фірма Гранмна”, 2001. – 117 с.
- 12 Правила користування електричною енергією. Затверджено постановою НКРЕ 31.07.1996 №28 у редакції постанови НКРЕ від 17.10.2005 №910. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 18 листопада 2005 р. за №1399/11679.

13 Дипломне проектування енергетичних та електротехнічних систем в агропромисловому комплексі : навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів. 2-е вид., перероб. і доп. / Г.Б.Іноземцев, В.В.Козирський, М.Т.Лут, І.П.Радько, О.Ю. Синявський. – К.: Вид – во ТОВ «АграрМедіаГруп», 2014. – 526 с.

14 Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання АПК.: Підручник для студентів ВНЗ / М.Т.Лут, О.В.Мірошник, І.М.Трунова. – Харків, Факт, 2008. – 438 с.

15 Безпека праці в сільських електроустановках: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / М.Т.Лут, І.П.Радько, В.Г.Тракай, А.І.Чміль. – К.: Вид – во ТОВ «Аграр Медіа Груп», 2012. – 430 с.

16 Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник / Б.В.Клименко. – Харків: Вид-во «Точка», 2012.- 340 с.

17 Червінський Л.С. Електричне освітлення та опромінення: Посібник / Л.С.Червінський, Л.О.Сторожук. – К.: Вид–во ТОВ «Аграр Медіа Груп», 2011. – 214с.

18. Сірий Є.Г. Рейтинг дефектів низьковольтних електродвигунів / Сірий Є.Г. – Х.: Новини Електротехніки, 2007. – 57с.

19. Петухов В.С. Діагностика стану електродвигунів на основі спектрального аналізу споживаного струму / В.С. Петухов, В.А. Соколов // –Х.: Новини Електротехніки. – 2005. – №31.– С. 23–27.

20. Кравченко В.М. Технічне діагностування механічного обладнання / В.М. Кравченко, В.А. Сидоров. – Донецьк: Південь–Схід, 2006. – 330 с.

21. Кузнєцов Д.І. Ідентифікація електроустаткування за допомогою нейромереж / Д.І. Кузнєцов, А.І. Купін // Вісник Криворізького технічного університету.–2011. – №27. – С. 208–210.

22. Кузнєцов Д.І. Моніторинг використання електроенергії електроустаткуванням засобами нейромереж / Д.І. Кузнєцов, А.І. Купін // Системні технології. – 2011.– №26.– С. 78–85.

23. Савина О.А. Розробка імітаційної моделі енергоспоживання промислового підприємства [Електронний ресурс]: Імітаційне моделювання систем / О.А. Савина, А.А. Сличук. – 2003.– С. 122–124.– Режим доступу до журналу: <http://simulation.su/uploads/files/default/immod-2003-2-122-124.pdf>.

24. Бахметова Н.А. Моделювання технологічних процесів за допомогою нейронних мереж / Н.А. Бахметова, С.В. Токарев // Сучасні наукомісткі технології. – 2008. – № 2.– С. 139–140.

25. Кузнецов Д.І. Використання частотного фільтру маски в задачах ідентифікації електрообладнання / Д.І. Кузнецов, А.І. Купін // Комп'ютерні науки для інформаційного суспільства. – 2011. – №2. – С. 144–146.

26. Кузнецов Д.І. Аналіз впливу вхідних характеристик напруги на АЧХ двигуна при використанні апарата нейромереж / Д.І. Кузнецов, А.І. Купін // Зб. наук. праць VI міжнародного симпозіуму «Якість мінеральної сировини». – 2011. – С. 362–365.

27. Кузнецов Д.І. Експертна система розпізнавання дефектів електрообладнання / Д.І. Кузнецов, А.І. Купін // Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг. – 2012. – С.185–187.

28. Кузнецов Д.І. Визначення оптимальних характеристик нейромережі в задачах ідентифікації електрообладнання / А.І. Купін, Д.І. Кузнецов // Інтелектуальні системи в промисловості і освіті: III міжнар. наук. –практ.конф. – 2011. – С. 78–79.

29. Кузнецов Д.І. Ідентифікація пошкоджень електроустаткування засобами нейромереж / Д.І. Кузнецов // Сучасні інформаційні технології. – 2011. – С. 23–24.

30. Коробський В.В. Дослідження фізико-механічних властивостей контактних матеріалів електромагнітних пускачів / В.В.Коробський, О.В.Боярчук // XII Міжнародна науково-технічна онлайн-конференція «Проблеми сучасної енергетики і автоматики у сфері природокористування» (теорія, практика, історія, освіта), 20 листопада 2025 року, місто Київ.

31. Грундуліс А.О. Захист електродвигунів у сільському господарстві / Грундуліс А.О. – К.: Колос, 1982. – 140 с.

32. V. Korobskyi, K. Witaszek, V. Reshetiuk, K. Pilarski. Research on the Morphology of the Working Surfaces of Contacts Used in Starters in the Agro-Industrial Sector. *Materials* 2024, 17(1), 145.

33. Didier G. Fault detection of broken rotor bars in induction motor using a global fault Index / Didier G., Ternisien E., Caspary O // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2006. – vol. 42. – pp. 79–88.

34. Said M. Detection of broken bars in induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensorless estimation / Said M., Benbouzid M., Benchaib A. // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2000. – vol 15, № 1. – pp. 66–70. 77. Thomson W. T. Current signature analysis to detect induction motor faults / W.T. Thomson, M. Fenger // *IEEE Industry Application Magazine*. – 2001. – vol 7, №4. – pp. 26–34.

35. Khadim Moin Siddiqui. Fault diagnosis in induction motors by motor current signal analysis / Khadim Moin Siddiqui, V.K. Giri // *International Journal of Electronics & Communication Technology*. – 2011. – vol 2. – pp 114 – 119.

ДОДАТКИ