

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ** **ВИЩОЇ ОСВІТИ**

на тему:

«Моніторинг стану витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна в процесі його експлуатації»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи ЕЕ-23М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____Юрій ЯБЛУНОВСЬКИЙ

« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи доцент, канд. техн. наук,

_____Руслан ТЕЛЮТА

« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

_____ Яблунівський Юрій Володимирович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Моніторинг стану витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна в процесі його експлуатації

Monitoring the state of insulation life consumption of an asynchronous electric motor during its operation

2. керівник роботи (проекту) Телюта Руслан Васильович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 16.12.2024 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є підвищення надійності асинхронних електродвигунів за рахунок розробки та впровадження методу визначення витрати ресурсу ізоляції. Завдання роботи: 1. Аналіз проблеми ресурсозберігання в асинхронних електродвигунах; 2. Методи та параметри діагностування технічного стану асинхронних електродвигунів в процесі їх експлуатації; 3. Теоретичне дослідження витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна; 4. Розробка системи діагностування експлуатаційних режимів роботи асинхронного електродвигуна; 5. Розглянути та запропонувати заходи з охорони праці.

5. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н., доц. Савеленко І.В.</i>		

6. Дата видачі завдання 09. 10. 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Видача та узгодження тематики роботи</i>	<i>4.10.2024</i>	
2	<i>Складання змісту магістерської роботи</i>	<i>11.10. 2024</i>	
3	<i>Вступ. Аналіз проблеми ресурсозберігання в асинхронних електродвигунах</i>	<i>21.10.2024</i>	
4	<i>Методи та параметри діагностування технічного стану асинхронних електродвигунів в процесі їх експлуатації</i>	<i>28.10. 2024</i>	
5	<i>Теоретичне дослідження витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна</i>	<i>11.11. 2024</i>	
6	<i>Розробка системи діагностування експлуатаційних режимів роботи асинхронного електродвигуна</i>	<i>25.11. 2024</i>	
7	<i>Розглянути та запропонувати заходи з охорони праці</i>	<i>2.12. 2024</i>	
8	<i>Висновки</i>	<i>9.12. 2024</i>	
9	<i>Перелік посилань</i>	<i>11.12. 2024</i>	
10	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>13.12. 2024</i>	
11	<i>Оформлення презентації магістерської роботи та подання магістерської роботи до захисту</i>	<i>14.12. 2024</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2024 р.

Підпис керівника

_____ Руслан ТЕЛЮТА

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2024 р.

Підпис здобувача

_____ Юрій ЯБЛУНОВСЬКИЙ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 96 с.; 19 рис.; 8 табл.; 24 джерел.

Яблуновський Ю. В. Моніторинг стану витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна в процесі його експлуатації. – Рукопис.

Ціллю кваліфікаційної роботи є підвищення надійності асинхронних електродвигунів шляхом визначення витрати ресурсу ізоляції через удосконалення математичних моделей діагностування в експлуатаційних режимах.

У роботі проаналізовано проблеми експлуатаційної надійності асинхронних електродвигунів, виділено основні види пошкоджень, зокрема конструкційні, технологічні та експлуатаційні. Найбільш вразливим елементом є ізоляційна конструкція електродвигуна, яка піддається численним впливам під час роботи.

Досліджено режими роботи та витрати ресурсу ізоляції під впливом експлуатаційних факторів, таких як перевантаження, зміни температури, та умов навколишнього середовища. Це дозволяє оптимізувати режими експлуатації з точки зору ресурсозбереження і зниження ймовірності відмов. Існуючі методи підвищення надійності не завжди забезпечують необхідний рівень, що свідчить про потребу в безперервному діагностуванні для своєчасного виявлення можливих проблем.

Розроблено систему діагностування асинхронного електродвигуна з акцентом на ресурсозбереження, включаючи методики діагностування робочого стану та витрати ресурсу ізоляції. Окрім того, створена математична модель ресурсозберігаючого режиму та алгоритм її використання, що забезпечує підвищення ефективності обслуговування електродвигунів і продовження їх експлуатаційного терміну.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, надійність, ресурсо-збереження, ізоляція обмоток, витрати ресурсу ізоляції, діагностування режимів роботи, математична модель.

ABSTRACT

Qualification work: 96 p.; 19 fig.; 8 tables; 24 sources

Yablunovskyi Y.V. Monitoring the state of insulation life consumption of an asynchronous electric motor during its operation. - Manuscript.

The purpose of the qualification work is to increase the reliability of asynchronous electric motors by determining the insulation resource consumption through the improvement of mathematical models of diagnostics in operational modes.

The work analyzes the problems of operational reliability of asynchronous electric motors, identifies the main types of damage, in particular structural, technological and operational. The most vulnerable element is the insulating structure of the electric motor, which is exposed to numerous influences during operation.

Operating modes and insulation resource consumption under the influence of operational factors, such as overload, temperature changes, and environmental conditions, are studied. This allows optimizing operating modes in terms of resource conservation and reducing the probability of failures. Existing methods of increasing reliability do not always provide the required level, which indicates the need for continuous diagnostics for timely detection of possible problems.

An asynchronous electric motor diagnostics system has been developed with an emphasis on resource conservation, including methods for diagnosing the operating state and insulation resource consumption. In addition, a mathematical model of the resource-saving mode and an algorithm for its use have been created, which ensures increased efficiency in servicing electric motors and prolongs their service life.

Key words: asynchronous electric motor, reliability, resource conservation, winding insulation, insulation resource consumption, diagnosing operating modes, mathematical model.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ В АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНАХ	12
1.1 Експлуатаційна надійність асинхронних електродвигунів	12
1.2 Походження дефектів в асинхронних електродвигунах	13
1.3 Аналіз впливу експлуатаційних дій на розвиток процесів ушкодження асинхронних електродвигунів	18
1.4 Висновки до першого розділу роботи	22
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ПАРАМЕТРИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПРИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	23
2.1. Класифікація методів діагностування асинхронних електродвигунів ..	23
2.2 Попередження процесів ушкодження ізоляції обмоток асинхронних електродвигунів.....	26
2.3 Параметри діагностування стану теплового зносу ізоляції асинхронних електродвигунів при їх експлуатації.....	28
2.3.1 Температура сталі електродвигуна як параметр діагностування	29
2.3.2 Сила струму електродвигуна як параметр діагностування.....	32
2.3.3 Температура обмотки як діагностичний параметр теплового процесу	36
2.3.4 Швидкість теплового зносу ізоляції як параметр діагностування	37
2.4 Вплив поштовхів, ударів і вібрацій, агресивності і вологості довкілля на стан ізоляції обмотки електродвигуна	41
2.5 Дослідження впливу погіршення тепловіддачі на тепловий режим роботи електродвигуна.....	42
2.6 Висновки до другого розділу роботи	44
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТИ РЕСУРСУ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПІД ДІЄЮ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ	46
3.1 Аналіз теплових процесів в електродвигуні.....	46

3.2 Закономірності теплового старіння ізоляції електричних машин	49
3.3 Аналіз впливу графіка навантаження на процес теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна	52
3.4 Дослідження витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна у функції завантаження	57
3.5 Дослідження витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна у функції рівня напруги живлення й завантаження	62
3.6 Висновки до третього розділу роботи	66
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИТРАТИ РЕСУРСУ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА І ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДІАГНОСТУВАННЯ.....	68
4.1 Обґрунтування критерію моніторингу асинхронного електродвигуна..	68
4.2 Розробка схеми пристрою моніторингу електродвигуна.....	71
4.3 Математична модель моніторингу витрати ресурсу ізоляції електродвигуна.....	74
4.4 Розробка структурної схеми пристрою моніторингу режимів роботи асинхронного електродвигуна	77
4.5 Розробка принципової електричної схеми пристрою моніторингу	80
4.6 Висновки до четвертого розділу роботи	82
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86
ДОДАТОК.....	89
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

А – асинхронний

АЕД – асинхронний електродвигун

АЦП – аналого-цифрового перетворювача

БВТ - блок вимірювання температури;

БВС - блок виміру фазних струмів;

БЖ – блок живлення

БК - блок комутації;

БС – блок сполучення;

ДСТ – державний стандарт

ЕД – електричний двигун

ЕЗ – енергозбереження

ЕП – електропривод

ЗС - звукова сигналізація;

МК – мікроконтролер

КЛ - клавіатура;

КМ - магнітний пускач;

ПП – пристрій програмування

ПК – персональний комп'ютер

РЗ – ресурсозбереження

СС - світлова сигналізація;

ТО – технічне обслуговування

ЦІ - блок цифрової індикації.

QF - автоматичний вимикач;

ВСТУП

У сучасному світі електроенергія є основою більшості стаціонарних технологічних процесів. Стан електрообладнання та надійність електропостачання відіграють ключову роль у визначенні результатів виробничої діяльності. Серед різноманітного електрообладнання особливе місце займають асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором, які становлять близько 90% від загальної кількості електроприводів на поточкових технологічних лініях. На них припадає понад половину споживання електричної енергії в промисловості.

Незважаючи на високу конструкційну надійність асинхронних електродвигунів, їх експлуатаційна надійність часто не відповідає вимогам виробництва. Специфічні умови експлуатації, які не можуть бути повністю враховані при проектуванні, призводять до порівняно високого відсотку виходу двигунів з ладу. Це спричиняє незаплановані матеріальні витрати через порушення технологічних процесів, що негативно впливає на кількісні та якісні показники виробництва.

Статистика показує, що щорічно виходять з ладу близько 20-25% асинхронних електродвигунів. Причини відмов можна класифікувати наступним чином: недоліки конструкції - 15%, невідповідність двигуна умовам експлуатації - 35%, проблеми системи експлуатації - 50% (з яких близько 70% припадає на несвоєчасне проведення профілактичних і захисних заходів).

Окрім прямих втрат від виходу з ладу двигунів, існує проблема додаткових втрат активної енергії під час аварійних режимів роботи, що призводить до перегріву електродвигунів. Це не лише знижує ефективність роботи обладнання, але й прискорює зношування ізоляції, що є критичним компонентом для надійності двигуна.

У зв'язку з цим, актуальною є проблема підвищення експлуатаційної надійності асинхронних електродвигунів шляхом удосконалення методів

контролю, діагностування та захисту. Особливу увагу слід приділити моніторингу стану витрати ресурсу ізоляції, оскільки саме стан ізоляції часто визначає загальний ресурс двигуна.

Існуюча система обслуговування і ремонту електроустаткування в промисловості передбачає планове діагностування, яке зазвичай обмежується контролем узагальненого параметра (найчастіше - опору ізоляції обмотки статора) та візуальним оглядом. Однак такий підхід має ряд недоліків, включаючи високі витрати часу та коштів на діагностування, відсутність повного контролю стану електродвигунів протягом тривалого періоду, а також неможливість прогнозування функціонування двигуна в заданому режимі роботи.

Для вирішення цих проблем необхідно розробити нові підходи до діагностування та моніторингу стану асинхронних електродвигунів, зокрема, зосередившись на безперервному контролі витрати ресурсу ізоляції. Це дозволить не лише своєчасно виявляти потенційні проблеми, але й оптимізувати режими роботи двигунів, продовжуючи їх термін служби та підвищуючи загальну ефективність виробничих процесів.

Метою даної магістерської роботи є підвищення надійності асинхронних електродвигунів за рахунок розробки та впровадження методу визначення витрати ресурсу ізоляції. Це планується досягти шляхом удосконалення математичних моделей діагностування при дослідженні експлуатаційних режимів роботи двигунів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану проблеми підвищення експлуатаційної надійності асинхронних електродвигунів та визначити перспективні напрямки її вирішення.
2. Здійснити аналітичне дослідження режимів роботи асинхронних електродвигунів під впливом різноманітних експлуатаційних факторів.
3. Дослідити процес витрати ресурсу ізоляції асинхронних електродвигунів під дією експлуатаційних факторів.

4. Проаналізувати існуючі методи безперервного діагностування технічного стану асинхронних електродвигунів в процесі їх експлуатації та визначити їх переваги і недоліки.
5. Розробити удосконалену математичну модель діагностування витрати ресурсу ізоляції асинхронних електродвигунів та обґрунтувати вибір параметрів діагностування.
6. Обґрунтувати структуру пристрою діагностування експлуатаційних режимів роботи асинхронних електродвигунів, здатного здійснювати моніторинг стану витрати ресурсу ізоляції.

Об'єктом дослідження в даній роботі є процеси, що протікають в асинхронному електродвигуні під впливом експлуатаційних факторів, з особливим акцентом на процеси, пов'язані зі зношуванням ізоляції.

Результати цього дослідження матимуть як теоретичне, так і практичне значення для підвищення надійності та ефективності використання асинхронних електродвигунів у різних галузях промисловості.

Предметом дослідження є методи та засоби моніторингу стану витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна в процесі його експлуатації, математичні моделі оцінки зношування ізоляції під впливом експлуатаційних факторів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ В АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНАХ.

1.1 Експлуатаційна надійність асинхронних електродвигунів.

Надійна робота сучасних підприємств багато в чому визначається безперебійним функціонуванням електричних машин, оскільки електрифікація є основою механізації та автоматизації виробничих процесів. В умовах сучасної промисловості експлуатуються значні потужності трансформаторних підстанцій і численні електродвигуни, що робить електротехнічне обладнання ключовим елементом ефективності підприємств. Особливо широке поширення отримали асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, які заслужено вважаються найбільш надійними серед електричних машин.

Однак, практичний досвід показує, що через специфічні режими та умови експлуатації, не завжди враховані на етапі проектування, відсоток відмов таких двигунів може бути досить високим. У деяких господарствах щороку замінюється до 20-25% електродвигунів через їх вихід з ладу, що спричиняє суттєві фінансові витрати та збої у виробничих процесах.

Проблеми надійності електродвигунів можна умовно поділити на дві основні категорії: конструкційну та експлуатаційну. Перша визначається якістю застосованих матеріалів, точністю конструкції та надійністю виготовлення кожної деталі. Експлуатаційна ж надійність залежить від умов навколишнього середовища, у яких працює обладнання, коректного вибору режимів експлуатації, відповідності двигунів їх характеристикам та якості технічного обслуговування.

Для підвищення експлуатаційної надійності електродвигунів необхідно вживати цілий ряд заходів. Серед них можна виділити вдосконалення конструкцій електродвигунів, їх модернізацію, впровадження ефективних систем захисту від аварійних режимів, організацію планово-

попереджувального ремонту та технічного обслуговування, а також використання методів планової діагностики для виявлення потенційних проблем на ранніх стадіях.

Окрім цього, важливою складовою підвищення надійності є розвиток технологій, спрямованих на моніторинг стану електродвигунів в режимі реального часу. Впровадження автоматизованих систем управління і діагностики дозволяє зменшити ймовірність непередбачених відмов, підвищити ефективність експлуатації та знизити витрати на технічне обслуговування.

1.2 Походження дефектів в асинхронних електродвигунах.

Експлуатаційна надійність асинхронних електродвигунів значною мірою залежить від стану їхніх обмоток, оскільки саме якість ізоляції є ключовим фактором довготривалої та безперебійної роботи двигунів. Протягом експлуатації електродвигуни піддаються різноманітним зовнішнім впливам, які можна умовно поділити на два основні типи: режимні та кліматичні.

До режимних впливів відносяться фактори, що безпосередньо пов'язані з роботою двигуна і навантаженням на нього. Серед них можна виділити такі проблеми, як (рис. 1.1)::

- перевантаження від робочих машин;
- нестабільна напруга в мережі (підвищення, зниження або асиметрія напруги);
- неповнофазний режим роботи;
- робота двигуна під напругою в режимі перекидання;
- погіршення охолодження;
- підвищена температура двигуна та навколишнього середовища.

Найчастіше перевантаження електродвигунів зумовлені недосконалістю робочих машин або механізмів. Це може бути наслідком відсутності

автоматизації та систем контролю навантаження. Наприклад, дробарки, кормороздавачі, шнеки, норії можуть включатися під навантаженням, що особливо небезпечно в зимовий період, коли рухомі частини часто змерзаються, що збільшує масу робочих органів через налипання залишків кормів чи інших матеріалів. Це веде до збільшення сил тертя і махових моментів.

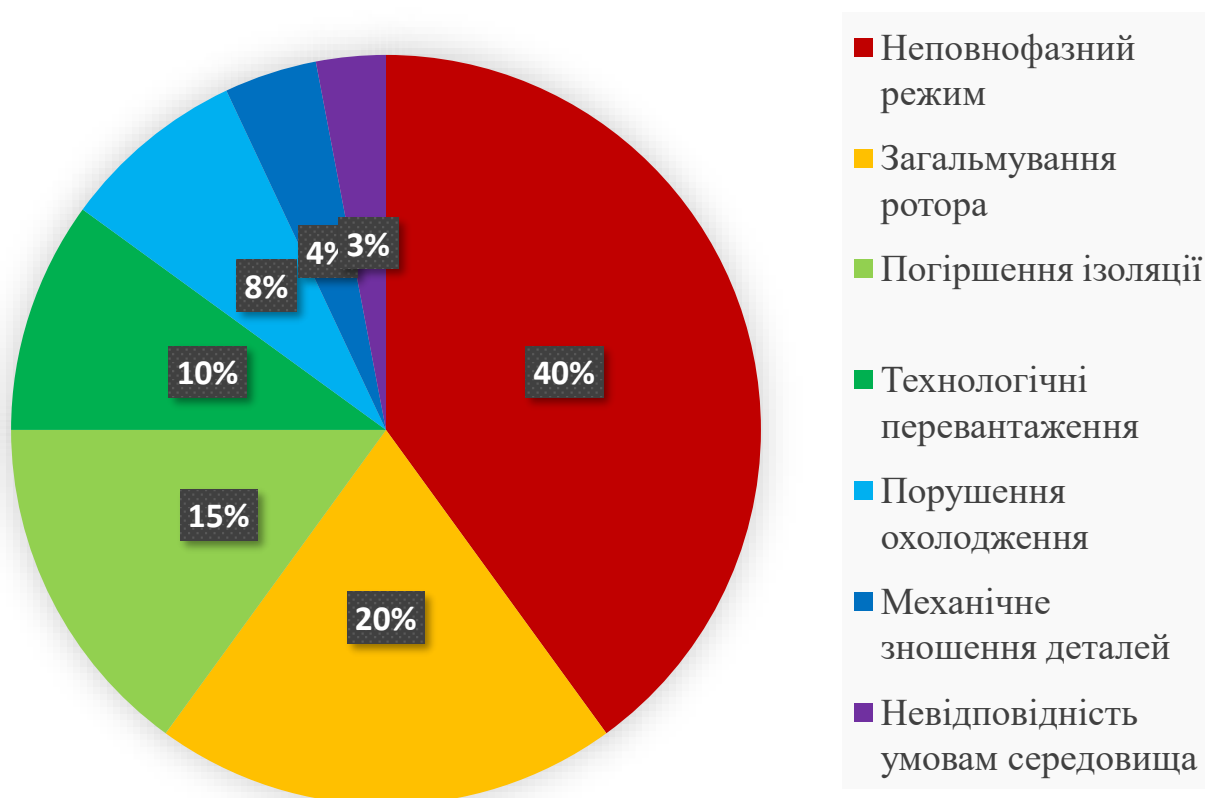


Рисунок 1.1 – Розподіл головних причин відмов асинхронних електродвигунів

Перевантаження також можуть бути наслідком зношення механізмів, перекосів або недостатнього змащення рухомих частин. У результаті таких проблем двигуни стикаються зі збільшеним тертям, що веде до затяжних пусків і роботи в критичних режимах. Незважаючи на те, що середнє навантаження на електродвигуни часто не перевищує 50-80% від номінального (коефіцієнт завантаження), значна частина з них виходить з ладу через перевантаження.

У таких умовах важливим є впровадження систем автоматизованого контролю за робочими параметрами електродвигунів. Сучасні системи можуть відслідковувати зміни навантаження, коливання напруги та температури, своєчасно попереджаючи про можливі перевантаження і відмови. Технічне обслуговування та своєчасна діагностика допомагають виявити проблеми на ранніх стадіях, що значно підвищує надійність експлуатації обладнання і знижує витрати на ремонт (рис 1.2) [1].



Рисунок 1.2 – Основні функціональні зв'язки при аварійних режимах електродвигунів

Одним із найбільш небезпечних впливів на ізоляцію асинхронних електродвигунів є надструм. Його виникнення часто пов'язане із затяжними пусками, роботою двигуна в режимі перекидання, зниженням напруги або

неповнофазними режимами. Крім того, заклинювання робочих машин також може призвести до різкого збільшення струму, що виводить двигун з ладу.

Сезонні коливання навантаження, особливо в умовах сільських електромереж, значно ускладнюють стабільність роботи двигунів. Потужність окремих споживачів іноді наближається до потужності трансформаторів, що викликає значні коливання напруги в мережах 0,38 кВ. Наприклад, у мережах, підключених до державних систем електропостачання, напруга може змінюватися в межах від 0,85 до 1,15 від номінального значення. При живленні від місцевих електростанцій ці коливання ще більші — від 0,8 до 1,2 від номінальної напруги. У моменти запуску електродвигунів, особливо за умов рівнозначної потужності, напруга може знижуватися до 0,65 від номінального значення, що значно підвищує ризик надструму і теплових перевантажень.

Однією з частих причин неповнофазного режиму є пошкодження запобіжника на трансформаторній підстанції або обрив однієї з ліній електропередачі. Також це може бути наслідком порушень у контактах пускової апаратури, коробки електродвигуна, живильного кабелю, або через окислення алюмінієвих проводів у місцях контактів. Усі ці фактори здатні спричиняти неповнофазний режим, що знижує експлуатаційну надійність двигуна і збільшує ймовірність аварій.

Ще однією важливою проблемою є погіршення умов охолодження електродвигунів. Часто це відбувається через засмічення поверхонь двигуна пилом, залишками оброблених матеріалів або через зняття вентилятора. У таких випадках порушується нормальний тепловий баланс двигуна, що призводить до перегріву і зниження його ресурсу.

Крім того, ізоляція обмоток асинхронних двигунів страждає від комутаційних перенапруг, які можуть перевищувати номінальну напругу в 10 разів або більше. Ці перенапруги нерідко стають прямою причиною міжвиткових замикань у обмотках. Комутаційні перенапруги є випадковими явищами і залежать від частоти включень і відключень електродвигуна, тобто від тривалості його експлуатації. З кожною новою операцією комутації зростає

ймовірність виникнення таких перенапруг, що може призводити до передчасного виходу двигуна з ладу.

Одним із руйнівних впливів на ізоляційні системи асинхронних електродвигунів є вібрація. Вібраційні навантаження поступово призводять до руйнування лакового покриття обмоток, внаслідок чого порушується їхня цементация, і окремі провідники отримують можливість переміщуватися. Це сприяє зношенню виткової ізоляції у місцях контакту сусідніх провідників, що може призвести до коротких замикань. Дослідження показали, що величина вібраційного зсуву у електродвигунах може коливатися від 0,005 мм до 0,09 мм, а частота вібрації корпусів двигунів здебільшого становить 50 Гц. Вібрація є особливо характерною для двигунів дробарок та інших машин з високими механічними навантаженнями.

Крім вібрацій, на електродвигуни негативно впливають волога та хімічно активні середовища. Волога часто проникає в ізоляцію саме тоді, коли двигун не працює, а особливо інтенсивно – під час охолодження двигуна. В цей період у порах ізоляції виникає знижений тиск, що сприяє втягуванню вологи. Вода, завдяки своїм фізичним властивостям, легко проникає в дрібні пори, руйнуючи полімерні ланцюги ізоляційних матеріалів та знижуючи їхню електричну міцність. Це створює передумови для виникнення струмів витоку та пошкодження двигуна.

Хімічно агресивні речовини, такі як аміак, вуглекислий газ та сірководень, що присутні у повітрі тваринницьких приміщень, також негативно впливають на ізоляцію двигунів. Ці гази сприяють швидкому старінню ізоляційних матеріалів, активізуючи їхні руйнівні процеси.

Процеси старіння ізоляції прискорюються під впливом різних факторів. Теплове старіння, навіть при відносно низьких температурах, викликає всихання, випаровування летких компонентів, зменшення еластичності та підвищення крихкості ізоляції. Це підвищує ризик механічного зносу ізоляції, що з часом призводить до її розшарування, утворення тріщин і, як результат,

іонізаційних явищ, які можуть стати причиною пробою у найбільш вразливому місці [14].

Таким чином, асинхронні електродвигуни повинні витримувати широкий спектр експлуатаційних впливів: коливання навантаження, температурні умови навколишнього середовища, перевантаження від робочих машин, пускові режими (тривалість і частоту), відхилення напруги, асиметрію фаз, погіршення охолодження (через забруднення або роботу без вентилятора), комутаційні перенапруги, удари та вібрації з боку обладнання, вологість і хімічно агресивні середовища. Всі ці фактори активно впливають на стан ізоляції та експлуатаційну надійність двигунів, знижуючи їхній термін служби та збільшуючи ймовірність відмов.

1.3 Аналіз впливу експлуатаційних дій на розвиток процесів ушкодження асинхронних електродвигунів

Обмотка статора асинхронного електродвигуна є найбільш вразливим елементом конструкції електричних машин, а в обмотках електродвигунів найвразливішою є їхня ізоляційна конструкція. Отже, надійність електродвигуна переважно залежить від надійності ізоляції. Аналіз робіт [14–26] дозволяє представити механізм пошкодження ізоляції електричних двигунів у процесі експлуатації (рис. 1.3).

Кожен асинхронний електродвигун має вроджені дефекти, які можна класифікувати на дві основні групи:

Дефекти проектування — пов'язані з помилками в конструкторських рішеннях.

Дефекти технології виробництва — виникають під час виготовлення і зумовлені відхиленнями від виробничих стандартів (рис. 1.4).

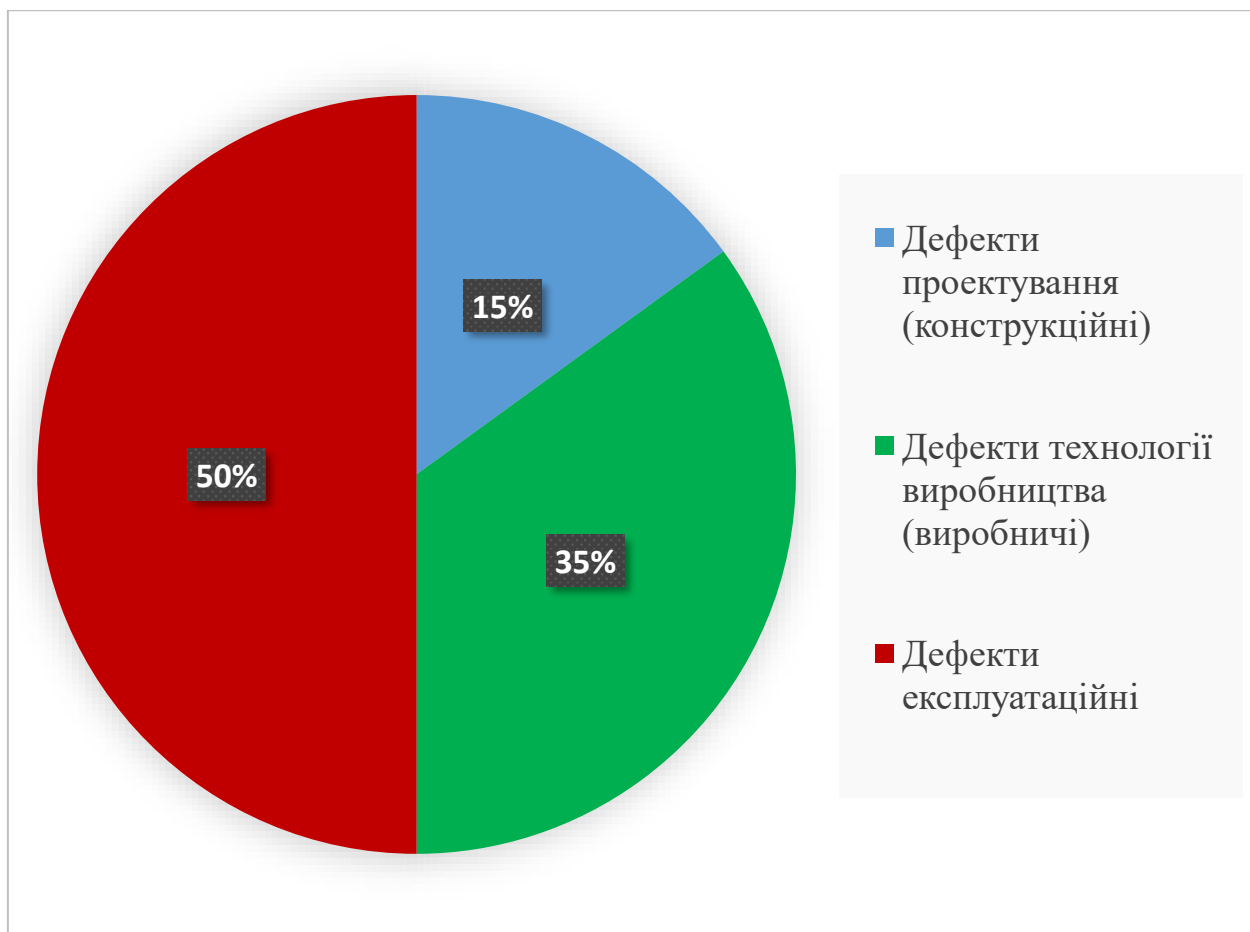


Рисунок 1.3 - Загальні причини відмов у роботі асинхронних електродвигунів

Ці дефекти створюють передумови для прискореного старіння ізоляції, що може спричинити передчасний вихід двигуна з ладу.

Дефекти проектування характерні для всіх електродвигунів одного типорозміру і можуть включати:

Високий коефіцієнт заповнення пазів, що ускладнює охолодження обмоток.

Малий запас теплостійкості ізоляції, що призводить до прискореного старіння.

Малий повітряний зазор, який може спричиняти механічні навантаження.

Недостатню жорсткість конструкції, що робить її вразливою до вібрацій.

Дефекти технології виробництва можуть бути як загальними, так і індивідуальними, серед яких:

Низька якість матеріалів і комплектуючих.

Локальні дефекти ізоляції провідників обмотки.

Недосконалість технології виготовлення та укладання секцій.

Дефекти пайки контактів.

Недосконала технологія просочення та сушіння обмотки.

Дефекти матеріалів корпусної ізоляції.

Недоліки у виготовленні сердечника статора.

Ці фактори суттєво впливають на експлуатаційну надійність електродвигунів.

Рівень дефектів кожного електродвигуна носить випадковий характер, що визначає індивідуальну конструкційну надійність. Початкові дефекти технологічного походження можуть розвиватися залежно від умов експлуатації, що включають сукупність експлуатаційних впливів. Наприклад:

Недосконале центрування двигуна, поштовхи, вібрації з боку робочої машини викликають вібрацію обмотки, що призводить до розвитку локальних дефектів виткової ізоляції.

Перевантаження по струму через особливості роботи машини, часті пуски, відхилення або несиметрія напруги на затискачах, випадання фази сприяють перегріву обмоток, прискорюючи термічне зношення ізоляції.

Погіршені умови охолодження (засмічення або робота без вентилятора), висока температура навколишнього середовища також викликають перегрів і прискорюють зношування ізоляції.

Волога та агресивні середовища знижують опір ізоляції, прискорюючи її деградацію.

Комутаційні перенапруги в живильній мережі можуть викликати додаткові пошкодження виткової ізоляції, сприяючи її поступовій деградації.

Розвиток локальних дефектів виткової ізоляції, особливо у лобових і пазових частинах, призводить до спочатку незавершених пробоїв, а потім до

повних виткових замикань і відмов двигуна. Паралельно відбувається розвиток дефектів корпусної ізоляції, що може призвести до замикань на корпус і теж закінчитися відмовою електродвигуна.

1.4 Висновки до першого розділу роботи.

1. Експлуатаційна надійність асинхронних електродвигунів залишається на невисокому рівні.

2. Відсутній системний підхід до дослідження витрат ресурсу ізоляції асинхронних електродвигунів. Належною мірою не враховуються експлуатаційні фактори, що впливають на режими роботи, такі як перевантаження на валу, відхилення напруги від номінального значення, асиметрія живлення, неповнофазний режим, підвищена температура навколишнього середовища та погіршення охолодження. Ці впливи можуть проявлятися як окремо, так і в комплексі, що значно погіршує ситуацію.

3. Існуючі методи та технічні засоби контролю, діагностики й захисту асинхронних електродвигунів є індивідуальними, зазвичай враховують лише одну з експлуатаційних дій.

4. Захисні пристрої електродвигунів переважно працюють на відключення, що призводить до переривання технологічного процесу, простоїв і економічних збитків.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ПАРАМЕТРИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПРИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.

2.1. Класифікація методів діагностування асинхронних електродвигунів

Проведені дослідження свідчать про необхідність безперервного діагностування критичних процесів, які відбуваються в електричних машинах. Цей підхід охоплює такі ключові аспекти, як теплові процеси, явища надструмів, умови неपूर्णфазних режимів роботи та стан ізоляції електричних машин.

Безперервне діагностування теплових процесів

Діагностування теплових процесів у електричних машинах можна здійснювати за допомогою низки методів:

1. Контроль струму: Постійний моніторинг струму, споживаного електричною машиною, і його порівняння з номінальним значенням, щоб виявити будь-які відхилення.
2. Температурний контроль обмоток: Безперервне спостереження за перевищенням температури обмотки над температурою довкілля, а також безпосереднє вимірювання температури обмоток і їх порівняння з встановленими нормами.
3. Температурний контроль сталі: Вимірювання перевищення температури сталі над навколишнім середовищем, що дозволяє виявити потенційні проблеми в конструкції.
4. Швидкість теплового зносу: Безперервний контроль швидкості теплового зносу ізоляції та облік накопиченого зносу ізоляційного матеріалу, що забезпечує своєчасну інформацію про стан ізоляції.
5. Моделювання: Використання аналогових та цифрових електричних моделей для симуляції теплових процесів, що дозволяє передбачити можливі аномалії в роботі.

Діагностування процесів з надструмами

Для діагностування процесів, що супроводжуються надструмами, можна застосовувати такі методи:

1. Контроль імпульсів надструму: Постійний моніторинг імпульсів, які виникають внаслідок надструмів, та їх порівняння з допустимими значеннями для запобігання перевантаження.
2. Облік імпульсів: Ведення обліку виникаючих імпульсів надструмів з наданням інформації про накопичені дані, що допомагає в аналізі зносу ізоляції.
3. Взаємодія температури і надструму: Безперервний облік зносу ізоляції під впливом температури обмотки та надструмів, що дозволяє виявити загрози для працездатності електричної машини.

Діагностування неपूर्णфазних режимів

Для процесів, що виникають при неपूर्णфазних режимах, діагностування можна проводити за допомогою:

1. Контроль імпульсів надструму: Моніторинг надструму, що виникає при переході електродвигуна в неपूर्णфазний режим, порівняння з допустимими значеннями.
2. Нульова послідовність: Постійний контроль напруги нульової послідовності, щоб виявити можливі аномалії.
3. Струми витоку: Безперервний моніторинг струмів витоку та їх порівняння з допустимими значеннями для забезпечення належного стану ізоляції.

Діагностування стану ізоляції

Для оцінки поточного стану ізоляції застосовують:

1. Контроль струмів витоку: Постійний моніторинг зміни струмів витоку та їх порівняння з допустимими значеннями, що є критично важливим для запобігання можливим відмовам.

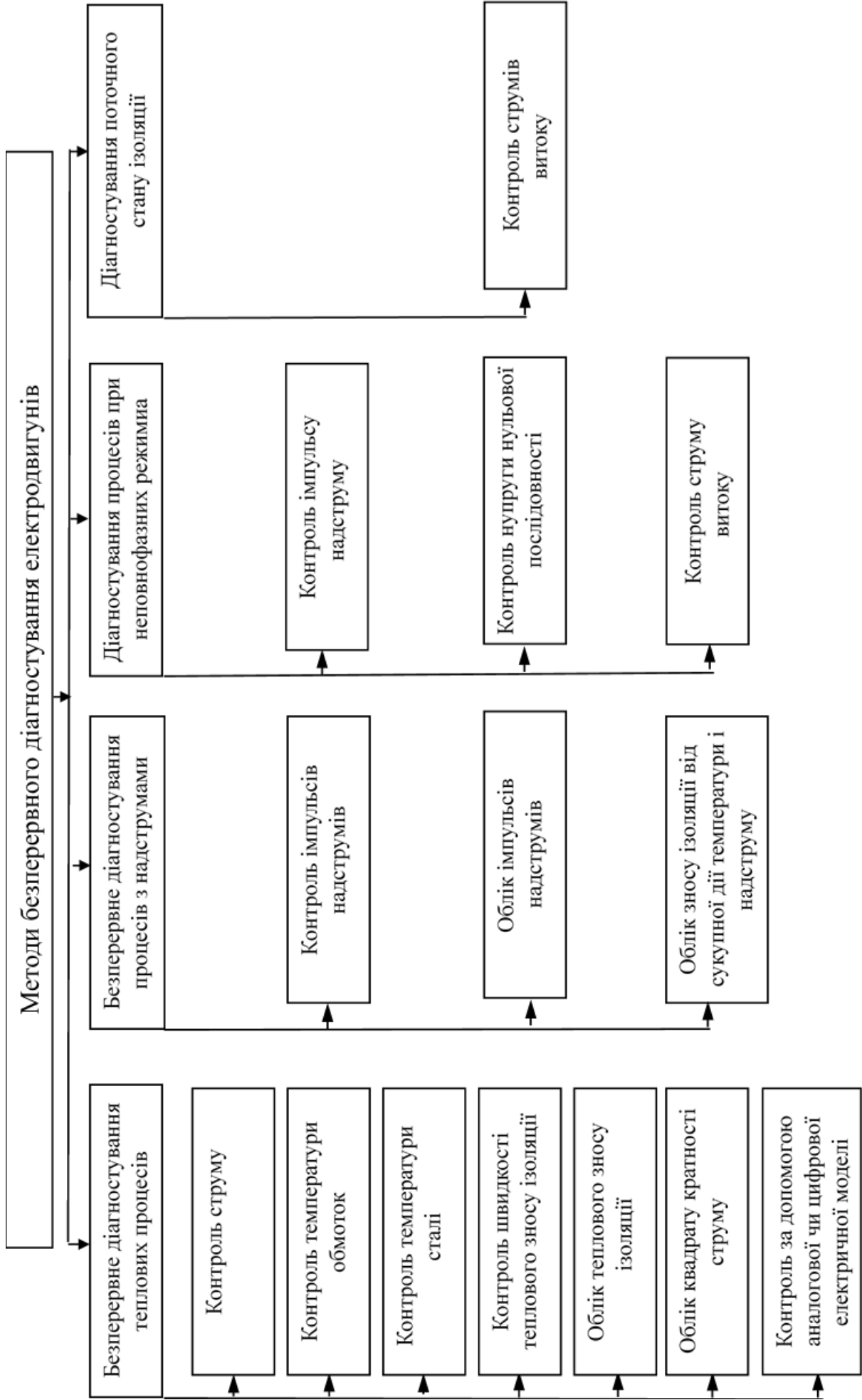


Рисунок 2.1 - Класифікація методів безперервного діагностування асинхронних електродвигунів.

Класифікація методів безперервного діагностування електричних машин, представлена на рисунку 2.1, демонструє різноманітність підходів до забезпечення надійності та безпеки роботи електричних систем. Впровадження цих методів дозволить значно підвищити експлуатаційну надійність асинхронних електродвигунів і зменшити ризик їх відмов, забезпечуючи більш ефективне управління технологічними процесами.

2.2 Попередження процесів ушкодження ізоляції обмоток асинхронних електродвигунів

У практиці технічного обслуговування електричних машин виділяють три основні стратегії, кожна з яких має свої особливості та переваги:

1. **Обслуговування по необхідності:** Ця стратегія передбачає проведення обслуговування тільки в разі виникнення несправностей або виходу електричної машини з ладу. Вона зосереджується на реакції на конкретні проблеми, що вже трапилися, але, на жаль, не забезпечує запобігання їх виникненню. Таким чином, ця стратегія може призвести до незапланованих простоїв у роботі та потенційних збитків, пов'язаних із простоєм техніки.

2. **Планово-профілактична стратегія:** У рамках цієї стратегії профілактичні заходи здійснюються незалежно від фактичного технічного стану машини. Це означає, що обслуговування виконується за встановленим графіком, без врахування конкретних умов експлуатації. Хоча така стратегія може бути ефективною для запобігання певним відмовам, вона не завжди є оптимальною, оскільки може призвести до зайвих витрат на обслуговування, особливо якщо машини обслуговуються частіше, ніж це дійсно потрібно.

3. **Планово-діагностична стратегія:** Ця стратегія ґрунтується на проведенні профілактичних заходів з урахуванням фактичного технічного стану електричної машини, що визначається шляхом періодичного діагностування. Вона дозволяє більш точно визначити, коли необхідно провести обслуговування, базуючись на реальних показниках роботи машини. Проте, незважаючи на те, що

ця стратегія є більш адаптивною, вона все ж не забезпечує безперервного моніторингу стану електричних машин, що може призвести до того, що деякі проблеми залишаться непоміченими до моменту їх критичного розвитку.

В цілому, жодна з цих стратегій не гарантує повного контролю за розвитком процесів ушкодження та зносу окремих елементів конструкції електричних машин. Тому важливо розглянути впровадження методів безперервного діагностування, які могли б забезпечити проактивний підхід до технічного обслуговування, що дозволяє знижувати ризик відмов і підвищувати ефективність експлуатації електричних машин.

Жодна з існуючих стратегій технічного обслуговування не забезпечує ефективного контролю за розвитком процесів ушкодження та зносу окремих елементів конструкції електричної машини, зокрема ізоляційної конструкції. Саме тому впровадження методів безперервного діагностування та прогнозування технічного стану електричних машин у процесі їх експлуатації є вкрай важливим.

Стратегія раннього попередження

Суть стратегії раннього попередження полягає в безперервному контролі одного або кількох параметрів, які характеризують процеси ушкодження та зносу ізоляції обмоток асинхронних електродвигунів. Ця стратегія передбачає:

Постійний моніторинг: Систематичний моніторинг параметрів, що відображають поточний технічний стан ізоляції, дозволяє вчасно виявляти потенційні проблеми та уникати серйозних ушкоджень. Це включає контроль температури, струмів витoku, а також інших критичних показників, що можуть вказувати на розвиток дефектів.

Своєчасна подача сигналів: У разі виявлення ненормальних процесів у електричній машині, обслуговуючий персонал отримує своєчасний сигнал. Це дає можливість провести додаткове діагностування стану електродвигуна під час технологічних пауз, без необхідності вимикати машину, що допомагає уникнути технологічних збитків.

Важливо, щоб відключення електричної машини здійснювалося лише в тих

випадках, коли її подальша робота в ненормальних умовах може призвести до серйозного погіршення технічного стану або виходу з ладу до завершення технологічного процесу. У таких ситуаціях необхідно, щоб відновлювальна вартість електричної машини не перевищувала потенційні технологічні збитки, щоб забезпечити економічну доцільність.

Захист електродвигунів від роботи в аварійних режимах слід розглядати як крайню міру, що гарантує безпеку та надійність електричних систем. Впровадження цієї стратегії може суттєво підвищити надійність електричних машин, зменшуючи ризик їх відмов та забезпечуючи безперервність технологічних процесів. Це, в свою чергу, сприятиме покращенню загальної ефективності виробництва та зниженню витрат на обслуговування та ремонти.

2.3 Параметри діагностування стану теплового зносу ізоляції асинхронних електродвигунів при їх експлуатації

Аналіз структурної схеми розвитку процесів витрати ресурсу ізоляції електродвигунів і електромеханічного перетворення енергії в електродвигунах (див. рис. 1.2) виявляє ключові параметри функціонального діагностування, серед яких найважливішими є швидкість теплового зносу ізоляції та механічна потужність на валу. Контроль цих параметрів є критично важливим для оцінки працездатності електродвигунів, оскільки вони безпосередньо впливають на надійність та ефективність їх роботи.

Основні параметри функціонального діагностування:

- Швидкість теплового зносу ізоляції: Цей показник дозволяє виявити темпи, з якими відбувається деградація ізоляційних матеріалів під впливом температури. Висока швидкість зносу може свідчити про ненормальні умови експлуатації, такі як перевантаження чи недостатнє охолодження.
- Механічна потужність на валу: Вона відображає реальну продуктивність електродвигуна і допомагає визначити, чи відповідає потужність

на виході заявленим характеристикам. Зниження потужності може вказувати на технічні проблеми, такі як знос або пошкодження елементів.

Непрямі параметри функціонального діагностування:

Додатково, для комплексної оцінки стану електродвигунів використовуються й непрямі параметри, до яких належать:

- Температура сталі: Вимірювання температури елементів конструкції допомагає виявити можливі перегріву, що можуть призвести до відмов.
- Перевищення температури обмотки: Визначення різниці температур між обмотками та навколишнім середовищем може сигналізувати про неефективне охолодження або надмірне навантаження.
- Сила струму: Спостереження за струмом, споживаним електродвигуном, дозволяє виявити перевантаження або короткі замикання.
- Ковзання: Цей параметр вказує на ступінь зносу підшипників і інших механічних частин.
- Напруга зміщення нейтралі: Вимірювання цього параметра може допомогти виявити проблеми з живленням та асиметрію у фазах.
- Момент, що розвивається: Контроль за моментом дозволяє оцінити механічну ефективність електродвигуна.

Контроль цих параметрів у комплексі дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормальної роботи електродвигунів, що, в свою чергу, може запобігти серйозним поломкам та підвищити надійність їх експлуатації.

2.3.1 Температура сталі електродвигуна як параметр діагностування

Продемонструємо метод визначення швидкості деградації ізоляційного шару в обмотках електричних двигунів шляхом аналізу температурних показників сталевих компонентів. Цей процес теплового зношення ізоляційних матеріалів можна математично описати за допомогою спеціальної формули, яка враховує температурні режими роботи. Слід зазначити, що вимірювання

температури сталі дає можливість непрямого контролю стану ізоляції без втручання в конструкцію самого двигуна.

$$\varepsilon = e^{B \left(\frac{1}{\theta_H} - \frac{1}{\theta_1} \right)} \quad (2.1)$$

У сталому режимі абсолютна температура обмотки ми можемо визначити наступним чином:

$$\theta_1 = \tau_{1y} + \vartheta_{cp} + 273 \quad (2.2)$$

Запишемо формулу залежності для випадку перевищення температури сталі у функції перевищення температури обмотки, також прийнявши при цьому, що напруга номінальна:

$$t_{2y} = \frac{k^2 P_{1H} + P_{2H} - L_1 \tau_{1y}}{P_{1H} + P_{2H} - L_1 \tau_{1H}} \tau_{2H} \quad (2.3)$$

Перепишемо (2.3) в наступному виді:

$$t_{2y} = \frac{k^2 + a - \frac{L_1 \tau_{1y}}{P_{1H}}}{1 + a - \frac{L_1 \tau_{1H}}{P_{1H}}} \tau_{2H} \quad (2.4)$$

Знайдемо $(k^2 + a)$ з відомими теоретичними відомостями та без урахування росту опору обмоток при її нагріванні:

$$k^2 + a = (a + 1) \frac{\tau_{1y}}{\tau_{1H}} \quad (2.5)$$

Підставимо формулу (2.5) в формулу (2.4) і отримаємо наступне:

$$\tau_{2y} = \frac{(a + 1) \frac{\tau_{1y}}{\tau_{1H}} - \frac{L_1 \tau_{1y}}{P_{1H}}}{a + 1 - \frac{L_1 \tau_{1H}}{P_{1H}}} \tau_{2H} \quad (2.6)$$

Залежність відповідної формули $\tau_{2y} = f(\tau_{1y})$ є лінійною залежністю (рис.2.2).

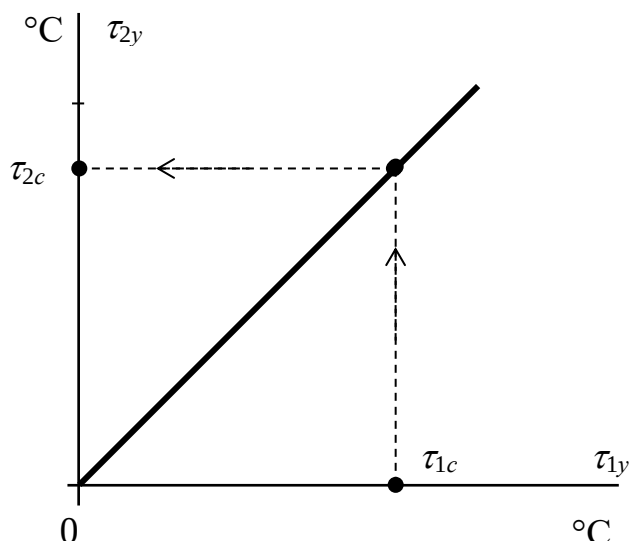


Рисунок 2.2. - Залежність значення $\tau_{2у} = f(\tau_{1у})$ при номінальній напрузі.

Для забезпечення надійної та довготривалої експлуатації електричної машини необхідно контролювати інтенсивність теплового старіння ізоляційних матеріалів. Ключовим критерієм оцінки працездатності електродвигуна є показник швидкості теплової деградації ізоляції обмоток, який у нормальних умовах роботи не повинен перевищувати встановлену норму в 1 базову годину на годину реальної експлуатації (1 бгод/год).

Це можна виразити наступним чином:

$$\theta_H = \tau_1 + \vartheta_{cp} + 273, \quad (2.7)$$

Значення перевищення температури обмотки при заданій температурі довкілля можна знайти, використовуючи формулу, яка враховує теплові характеристики електродвигуна. Важливо враховувати, що точні значення можуть відрізнятися в залежності від типу електродвигуна та його конструкційних особливостей. Сигналізація чи повідомлення обслуговуючого персоналу повинна бути налаштована на специфічні порогові значення, визначені виробником. Зазвичай, для цього використовують наступний підхід:

$$\tau_1 = \theta_H - \vartheta_{cp} + 273. \quad (2.8)$$

Перепишемо вираз (2.8) в іншому виді:

$$\tau_1 = \vartheta_H - \vartheta_{cp}, \quad (2.9)$$

Підставивши (2.8) в (2.6), знаходимо значення перевищення температури сталі при заданій температурі довкілля, яке слідус прийняти за те, при якому пристрій діагностування повинен подавати сигнал обслуговуючому персоналу про порушення номінальної працездатності електродвигуна і температуру спрацювання.

Підставивши формулу (2.8) в (2.6), ми можемо отримати значення перевищення температури сталі при заданій температурі довкілля. Це значення важливе для визначення моменту, коли пристрій діагностування має подати сигнал обслуговуючому персоналу про порушення номінальної працездатності електродвигуна.

$$\vartheta_2 = \tau_2 + \vartheta_{cp}. \quad (2.10)$$

Значення перевищення температури сталі слід порівняти з допустимим значенням перегріву, яке визначається технічними характеристиками електродвигуна. Коли значення перевищення температури сталі перевищує допустиме значення, діагностичний пристрій повинен спрацювати, подавши сигнал обслуговуючому персоналу.

Таким чином, підставлення формул і обчислення перевищення температури сталі дозволяє своєчасно виявити ненормальні умови роботи електродвигуна і запобігти його відмові.

2.3.2 Сила струму електродвигуна як параметр діагностування

Сила струму, що споживається електродвигуном під час його роботи, змінюється в залежності від завантаження робочої машини, яке часто має випадковий характер через відсутність регулюючих пристроїв. Короткочасні підвищення струму зазвичай спостерігаються при запуску двигуна або випадкових перевантаженнях. Через це сила струму не може бути надійним діагностичним параметром для постійної оцінки працездатності електродвигуна або подачі сигналу про несправність персоналу.

Однак у випадках надструмів, починаючи з півторакратного значення і вище, сила струму може стати єдиним об'єктивним показником поточного стану роботи двигуна як перетворювача електроенергії. Тому в таких ситуаціях важливо звертати увагу на цей параметр, оскільки він може свідчити про ненормальні умови експлуатації.

Дослідження теплових перехідних процесів при надструмах показує, що при перевищенні допустимих значень може виникнути потреба у припиненні роботи, щоб уникнути перегріву обмотки і її виходу з ладу. Тому правильне відстеження надструмів є критично важливим для забезпечення надійності електродвигуна.

Оскільки теплові процеси при надструмах відбуваються дуже швидко, можна з достатньою точністю припустити, що вони протікають в адіабатичному режимі. Це означає, що тепло, яке виділяється в обмотках двигуна в результаті підвищеного струму, не встигає розсіятися в навколишнє середовище. Тому температура обмотки зростає пропорційно до часу дії надструму і може швидко досягти критичних значень, що збільшує ризик пошкодження ізоляції та виходу двигуна з ладу.

Приймаючи, що процеси є адіабатичними, можна значно спростити математичний аналіз теплових перехідних процесів, що дозволяє ефективніше оцінювати вплив надструмів на ізоляцію та передбачати потенційні збої в роботі двигуна.

Запишемо формулу рівняння теплового балансу для обмотки у такому вигляді:

$$Cd\tau = P_0(1 + \alpha\tau)dt, \quad (2.11)$$

Приведемо формулу враховуючи вираз рівняння до наступного виду:

$$T_n \frac{d\tau}{dt} - \tau - \frac{1}{\alpha} = 0, \quad (2.12)$$

$$\text{де } T_n = \frac{C}{\alpha P_{10}}. \quad (2.13)$$

Виходячи із виразу формули (2.12), знаходимо поточного значення перевищення температури обмотки. При цьому прийmemo початкове перевищення температури рівним його номінальному значенню, таким маємо чином:

$$\tau = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_n \right) e^{\frac{t}{T_n}} - \frac{1}{\alpha} = 0 \quad (2.14)$$

Потім знаходимо швидкість наростання температури обмотки електричного асинхронного двигуна, попередньо визначивши похідну перевищення температури за часом:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{T_n} \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_n \right) e^{\frac{t}{T_n}} \quad (2.15)$$

Визначимо втрати потужності в обмотці електродвигуна при температурі навколишнього середовища:

$$P_{10} = 3r_0 I^2, \quad (2.16)$$

Підставивши вираз (2.13) та вираз (2.16) в формулу (2.14), отримуємо наступне:

$$\tau = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_n \right) e^{\frac{3\alpha r_0 I^2 t}{C}} - \frac{1}{\alpha} \quad (2.17)$$

З отриманої формули величину, що має наступний вираз $I^2 t$ дамо назву імпульс квадрата надструму.

Позначимо імпульс квадрата надструму таким чином:

$$\Pi = I^2 t. \quad (2.18)$$

Перепишемо формулу (2.17) з врахуванням прийнятого позначення (2.18) імпульс квадрата надструму

$$\tau = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_n \right) e^{\frac{3\alpha r_0 \Pi}{C}} - \frac{1}{\alpha} \quad (2.19)$$

Також проведемо спрощення виразу та введемо поняття критерію нагрівання обмотки при надструмі. Даному критерію дамо позначення K_n , та перепишемо формулу:

$$K_n = \frac{3\alpha r_0 \Pi}{C} \quad (2.20)$$

Тоді вираз (2.19) запишемо

$$\tau = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_n \right) e^{K_n} - \frac{1}{\alpha} \quad (2.21)$$

Представимо залежність (2.21) та представимо у графічному вигляді (рис. 2.3).

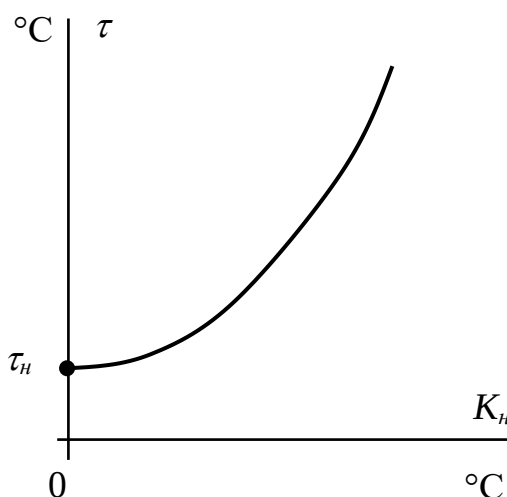


Рисунок 2.3. - Залежність перевищення температури обмотки у функції критерію нагрівання $\tau = f(K_n)$.

Перепишемо формулу (2.18) таким чином:

$$\Pi = K_c^2 I_n^2 t, \quad (2.22)$$

Тоді вираз (2.20) запишеться:

$$K_n = \frac{3\alpha r_0 I_n^2}{C} \Pi_k \quad (2.23)$$

Для спрощення подальших розрахунків введемо позначення:

$$\gamma_K = \frac{3\alpha r_0 I_n^2}{C}; \quad (2.24)$$

$$\Pi_k = K_c^2 t \quad (2.25)$$

Назвемо та дамо позначення конструктивним коефіцієнтом - γ_k , а позначення Π_k - імпульсом квадрата кратності надструму. Тоді перепишемо критерій нагрівання наступним чином:

$$K_H = \gamma \Pi_k \quad (2.26)$$

2.3.3 Температура обмотки як діагностичний параметр теплового процесу.

Перевищення температури обмотки над температурою довкілля може бути корисним діагностичним параметром теплового процесу, але воно не враховує вплив самої температури навколишнього середовища. Це обмежує його об'єктивність при оцінці загального стану теплового процесу. Більш точним параметром для діагностування є температура обмотки, оскільки вона безпосередньо відображає тепловий стан електродвигуна, незалежно від зовнішніх умов.

Графік теплового процесу зазвичай є змінним, і короткочасні підвищення температури не завжди відображають реальний хід теплових процесів, що відбуваються в електродвигуні (рис. 2.4). У зв'язку з цим, доцільно використовувати середнє значення температури обмотки ϑ_c за певний проміжок часу t_U , яке краще характеризує сукупний вплив теплового навантаження.

Таким чином, температура обмотки може служити надійним параметром для функціонального діагностування електродвигуна, дозволяючи оцінити стан теплового процесу та вчасно виявити можливі відхилення, що можуть призвести до пошкодження ізоляції або інших елементів двигуна.

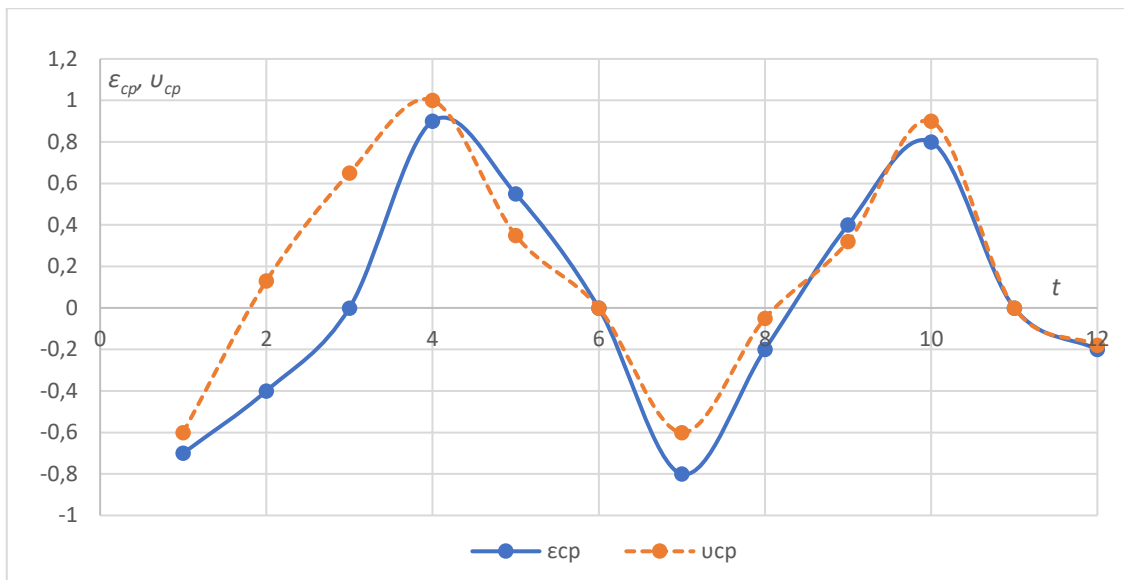


Рисунок. 2.4. - Графік температурного режиму обмотки електродвигуна.

2.3.4 Швидкість теплового зносу ізоляції як параметр діагностування

Найоб'єктивнішим діагностичним параметром, який характеризує поточний стан теплового процесу електродвигуна, є швидкість теплового зносу ізоляції ε . Вона дозволяє точно оцінити, наскільки інтенсивно відбувається деградація ізоляційного матеріалу внаслідок впливу теплових навантажень. Оскільки стан ізоляції є критичним для тривалої та безперебійної роботи електродвигуна, моніторинг саме цього параметра дає можливість завчасно попередити про можливі проблеми, що можуть виникнути через перегрів чи тривале перевантаження.

Швидкість теплового зносу ізоляції ε враховує як перевищення температури обмотки, так і тривалість її впливу, що робить цей параметр більш точним і важливим для діагностики, ніж просто температура або перевищення температури обмотки над температурою довкілля. Тому контроль ε дає змогу ефективніше прогнозувати час, коли необхідно вжити профілактичні заходи для уникнення виходу електродвигуна з ладу.

Швидкість теплового зносу ізоляції ε , також є функцією температури обмотки

$$\varepsilon = e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta}\right)} \quad (2.27)$$

$$\theta = \vartheta + 273 \quad (2.28)$$

Так само, як і температура, швидкість теплового зносу ізоляції постійно змінюється (рис. 4.5). Це обумовлено тим, що теплові процеси в електродвигуні є динамічними й залежать від багатьох факторів, таких як змінне навантаження, зміна умов охолодження, а також тривалість роботи двигуна.

Тому як діагностичний параметр, що характеризує загальний напрямок теплового процесу за певний проміжок часу t_U , доцільно використовувати середнє значення швидкості теплового зносу ізоляції ε_c .

Очевидно, що вираз стане

$$\varepsilon_c = e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta_c}\right)} \quad (2.28)$$

$$\theta_c = \vartheta_c + 273 \quad (2.29)$$

Це дозволяє отримати більш точну картину теплового навантаження на електродвигун протягом тривалого періоду, зокрема, враховуючи короточасні пікові навантаження, які можуть не впливати суттєво на загальний процес, але є важливими для оцінки стану ізоляції.

Для характеристики середнього значення теплового зношення ізоляції доцільно ввести поняття середньої еквівалентної температури ϑ_{ce} за певний проміжок часу. Це дозволяє узагальнити вплив змін температури на зношення ізоляції, враховуючи як короточасні підвищення, так і стабільні температурні режими.

$$\varepsilon_c = e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta_{ce}}\right)} \quad (2.30)$$

$$\theta_{ce} = \vartheta_{ce} + 273 \quad (2.31)$$

Середня еквівалентна температура ϑ_{ce} дозволяє більш точно оцінити кумулятивний вплив теплових процесів на стан ізоляції протягом певного часу,

що є важливим показником для прогнозування терміну служби електродвигуна та планування технічного обслуговування. Вона відображає еквівалентну температуру, при якій швидкість теплового зношення ізоляції була б постійною, еквівалентною реальним умовам експлуатації за цей час.

Якщо безперервно враховувати тепловий знос ізоляції електродвигуна протягом всього періоду його експлуатації у вигляді інтегральної функції $\int \epsilon dt$, це дозволяє отримати накопичене значення зносу. Порівнюючи цей показник із базовим ресурсом теплового зносу ізоляції, можна прогнозувати ймовірність подальшої безвідмовної роботи електродвигуна.

Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти потенційні проблеми і запобігати серйозним відмовам, що може суттєво підвищити надійність і ефективність роботи електричних машин. Введення системи моніторингу теплового зносу в реальному часі забезпечить оперативну інформацію для обслуговуючого персоналу, що допоможе приймати обґрунтовані рішення щодо технічного обслуговування та ремонту.

Для безперервного діагностування і прогнозування процесів теплового зносу ізоляції електродвигунів застосовують різноманітні методи та пристрої. Один із них — це використання температури обмоток статора.

Постійний моніторинг температури обмоток статора дозволяє оперативно виявляти відхилення від номінальної температури, що може свідчити про процеси зносу або інші аномалії. Для цього використовують спеціальні датчики та системи, що забезпечують безперервний контроль температури.

Переваги метода:

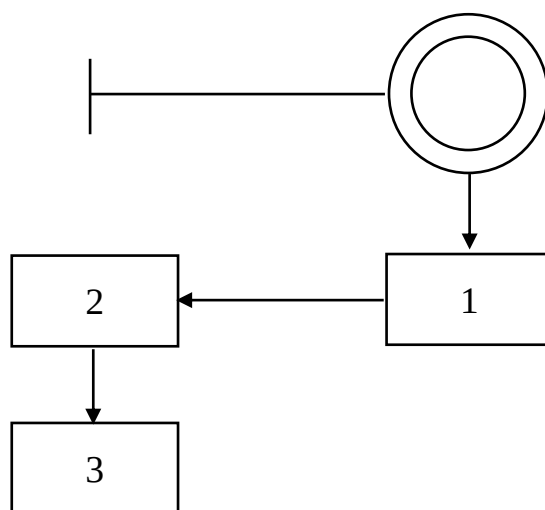
- Об'єктивність: Температура обмоток статора є об'єктивним параметром, що відображає реальний стан теплового процесу.
- Постійний моніторинг: Безперервний контроль дозволяє вчасно виявляти потенційні проблеми.
- Спрощення діагностики: Порівняння температури обмотки з номінальним значенням допомагає швидко визначити наявність порушень.

На рис. 2.4 наведено структурну схему пристрою безперервного діагностування і прогнозування процесів теплового зносу ізоляції електродвигуна по температурі обмотки. Ця схема включає:

- Датчики температури обмотки: Реєструють поточну температуру обмоток.
- Порівняння з номінальним значенням: Підсумовування показників для визначення відхилень.
- Сигналізація: Сповіщення обслуговуючого персоналу про необхідність подальшого діагностування у разі відхилень.

Метод безперервного діагностування температури обмоток статора є ефективним засобом для контролю за тепловим процесом у електродвигунах. Він дозволяє підвищити надійність і безпеку роботи електричних машин, а також знизити ризики, пов'язані з тепловим зносом і відмовами.

На рис. 2.5 приведена структурна схема пристрою безперервного діагностування і прогнозування процесів теплового зносу ізоляції електродвигуна по температурі обмотки.



1 - перетворювач температури; 2 - функціональний перетворювач;

3 - рахунковий пристрій

Рисунок 2.5 - Структурна схема пристрою безперервного діагностування і прогнозування процесів теплового зносу ізоляції електродвигуна по температурі обмотки.

2.4 Вплив поштовхів, ударів і вібрацій, агресивності і вологості довкілля на стан ізоляції обмотки електродвигуна

Вібрація є одним із найбільш руйнівних чинників для ізоляційної конструкції асинхронних електродвигунів під час експлуатації. Вона поступово руйнує просочувальний лак, що порушує цементацію обмотки, і окремі провідники отримують можливість переміщення. Це призводить до пошкодження виткової ізоляції в місцях дотику сусідніх провідників. Вібрація особливо характерна для електродвигунів, що працюють з важкими машинами, такими як дробарки.

Іншим руйнівним чинником є волога, яка проникає в ізоляцію переважно під час простою електродвигунів. Процес особливо активний під час охолодження, коли в порах і капілярах ізоляції створюється тиск, нижчий за атмосферний. Вода, завдяки своїм фізичним властивостям, проникає в мікропори ізоляції, що сприяє гідролітичному руйнуванню матеріалів і розпаду полімерних ланцюгів. Це знижує електричну міцність та опір ізоляції, створюючи умови для виникнення струмів витоку.

Крім того, хімічно активні середовища, такі як аміак, вуглекислий газ і сірководень, також чинять значну шкоду ізоляції електродвигунів. Загазованість виробничих приміщень цими речовинами призводить до швидкого руйнування ізоляційних матеріалів, що ще більше прискорює знос електродвигунів.

Враховуючи вищезазначене, швидкість теплового зношення ізоляції можна вважати залежною не тільки від внутрішніх параметрів електродвигуна, але й від агресивності та вологості довкілля.

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta_c}\right)} m^c n^\eta \quad (2.32)$$

m – постійний коефіцієнт, що враховує хімічно-активне середовище.

c – концентрація агресивного агента (для певного об'єкта).

n – постійний коефіцієнт, що враховує вологу.

η – відносна вологість.

Вплив зовнішніх чинників, таких як хімічно активні речовини та волога, значно прискорює процеси деградації ізоляційних матеріалів. Тому важливо враховувати ці фактори при прогнозуванні терміну експлуатації електродвигуна та оцінці його працездатності.

Для більш точного визначення швидкості теплового зношення ізоляції доцільно доповнити діагностичні системи параметрами, що відображають умови довкілля, зокрема рівень вологості та наявність агресивних хімічних речовин у повітрі. Це дозволить точніше прогнозувати тривалість безвідмовної роботи електродвигуна і приймати своєчасні заходи для запобігання його виходу з ладу.

2.5 Дослідження впливу погіршення тепловіддачі на тепловий режим роботи електродвигуна

У виробничих умовах часто спостерігаються випадки забруднення поверхонь електродвигунів продуктами виробництва, що погіршує теплообмін. Крім того, електродвигуни можуть працювати без вентиляторів, що також сприяє їх перегріву. Ці фактори ведуть до підвищення температури двигунів, що пришвидшує процес теплового зносу ізоляції. Як наслідок, це знижує термін експлуатації електродвигуна, збільшує ризик відмови та потребує додаткового контролю за температурними режимами.

Якщо розглядати електродвигун як однорідне тіло з точки зору процесу нагріву, то стале перевищення його температури визначається двома основними факторами: втратами активної потужності в електродвигуні та ефективністю тепловіддачі:

$$t_{1y} = \frac{\Delta P}{L}, \quad (2.33)$$

де ΔP - втрати потужності в асинхрон.ел-двигуні, Вт;

L - тепловіддача асинхрон.ел-двигуна, Вт/°С.

Втрати в асинхронному електродвигуні можна записати наступним чином:

$$\Delta P = \Delta P_{сн} + k^2 \Delta P_{мн}, \quad (2.34)$$

де $\Delta P_{сн}$ - постійні втрати в сталі (магнітопроводах) при номін. напрузі, Вт;

$\Delta P_{мн}$ - номінальні втрати в міді (обмотці), Вт;

k - кратність пускового струму по відношенню до номінального.

Підставивши (2.34) в (2.33) і отримаємо:

$$t_{1y} = \frac{\Delta P_{сн} + k^2 \Delta P_{мн}}{L}. \quad (2.35)$$

Для подальших розрахунків введемо коеф. погіршення тепловіддачі ($\beta < 1$):

$$\beta = \frac{L}{L_n}, \quad (2.36)$$

де L – тепловіддача електродвигуна, що погіршала, Вт/°С;

L_n - номінальна тепловіддача електродвигуна, Вт/°С.

Номінальну тепловіддачу знайдемо для номінального режиму роботи:

$$t_{1н} = \frac{\Delta P_{сн} + \Delta P_{мн}}{L_n}, \quad (2.37)$$

З формули (2.37) знаходимо:

$$L_n = \frac{\Delta P_{сн} + \Delta P_{мн}}{\tau_{1н}}. \quad (2.38)$$

Погіршена тепловіддача буде становити значення:

$$L = b L_n = b \frac{\Delta P_{сн} + \Delta P_{мн}}{\tau_{1н}}. \quad (2.39)$$

Підставимо (2.39) в (2.35) і отримаємо:

$$t_{1y} = t_{1н} \frac{\Delta P_{сн} + k^2 \Delta P_{мн}}{\beta (\Delta P_{сн} + \Delta P_{мн})}. \quad (2.40)$$

Введемо для спрощення розрахунків та поняття коефіцієнт втрат :

$$a = \frac{\Delta P_{сн}}{\Delta P_{мн}}. \quad (2.41)$$

Тоді з обліком (2.41) вираження (2.40) запишемо так:

$$\tau_{1y} = \tau_{1H} \frac{a + k^2}{\beta(a + 1)}. \quad (2.42)$$

Коефіцієнт погіршення тепловіддачі $\beta < 1$.

З обліком (2.33) і (2.42) отримуємо формулу:

$$\tau_{1y} = \frac{\tau_{1H}}{\beta} \frac{a + k^2}{a + 1 - \alpha \tau_{1H} (k^2 - 1)} \quad (2.43)$$

Таким чином, можна зробити висновки, що стале перевищення температури збільшується зі зменшенням коефіцієнта погіршення тепловіддачі β .

2.6 Висновки до другого розділу роботи

Обслуговування асинхронних електродвигунів, що застосовуються сьогодні, здійснюється за потребою або за планом (профілактичним і діагностичним). Проте ці методи не забезпечують повноцінного контролю за розвитком пошкоджень і зносу окремих елементів конструкції двигунів. На противагу цьому, безперервне діагностування, яке базується на стратегії раннього попередження, дозволяє своєчасно виявляти ознаки зношування ізоляції обмоток.

Існуючі підходи, що підвищують експлуатаційну надійність асинхронних електродвигунів, не завжди гарантують необхідний рівень безперебійної роботи. Це обумовлено тим, що в них не враховується значна перевантажувальна здатність електродвигунів. Тому виникає необхідність подальшого розвитку методів безперервного діагностування та моніторингу експлуатаційних режимів.

Проведені дослідження показали, що процес зносу ізоляції асинхронного електродвигуна є складним і залежить від багатьох чинників: режимних, конструктивних і кліматичних. Основні етапи цього процесу пов'язані зі зміною температури обмотки під впливом струму, температури довкілля та умов охолодження. У свою чергу, швидкість теплового зносу ізоляції обумовлена класом ізоляційної конструкції, що визначає термін експлуатації двигуна.

Крім теплового зношування, на ізоляцію впливають термомеханічні процеси, електродинамічні сили, вібрації, агресивне та вологе середовище, а також перенапруження в мережі. Для вчасного виявлення проблем можна використовувати параметри діагностування, такі як ковзання, квадрат кратності струму, температура обмотки та сталі, швидкість теплового зносу та витрата ресурсу ізоляції.

Таким чином, впровадження безперервного діагностування теплових процесів дозволить не лише продовжити термін безвідмовної роботи асинхронних електродвигунів, але й підвищити їх експлуатаційну надійність, мінімізуючи ризики виникнення аварійних ситуацій.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТИ РЕСУРСУ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПІД ДІЄЮ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ.

3.1. Аналіз теплових процесів в електродвигуні

Для аналізу теплових процесів електродвигун можна представити як систему двох основних компонентів: обмотки і сталі. Обмотка, в якій протікає струм, є джерелом тепла, яке надалі передається сталі через теплопровідність. Такий підхід дозволяє точніше оцінити динаміку температурних змін у кожній із частин електродвигуна, що є критичним для запобігання перегріву і надмірного зносу ізоляції.

Температура обмотки, яка може істотно перевищувати температуру сталі, визначає інтенсивність теплового зносу ізоляції і є основним показником, що сигналізує про потенційні ризики виходу електродвигуна з ладу. Сталь, у свою чергу, виступає як тепловий буфер, поступово розсіюючи накопичене тепло і забезпечуючи стабільніший температурний режим для електродвигуна загалом. [3]. Схему теплового заміщення електродвигуна, як системи двох тіл, приведена на рис.3.1.

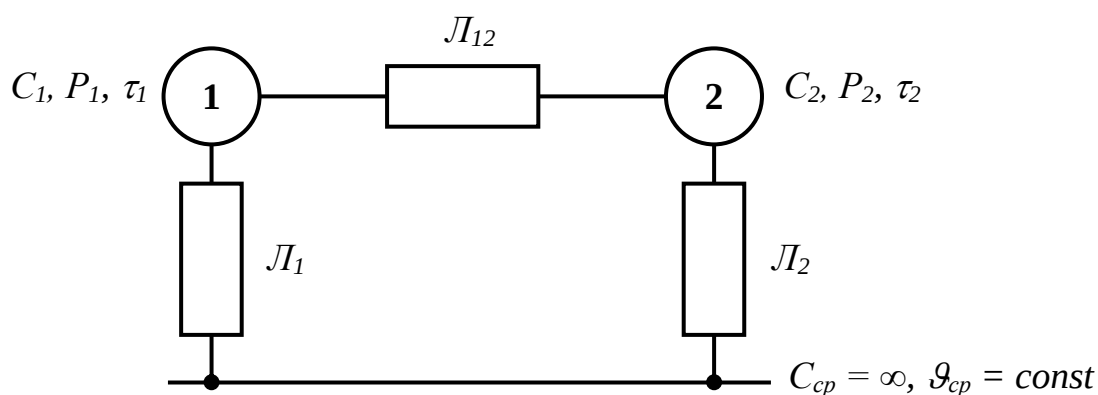


Рисунок 3.1. – Теплова схема заміщення асинхронного електродвигуна

На рис. 3.1 введені умовні наступні позначення:

C_1 - теплоємність обмотки асинхронного електродвигуна, Дж/°C;

C_2 - теплоємність сталі асинхронного електродвигуна, Дж/°C;

P_1 - втрати активної потужності в обмотці асинхронного електродвигуна, Вт;

P_2 - втрати активної потужності в сталі асинхронного електродвигуна, Вт;

τ_1 – перевищення температури обмотки асинхронного електродвигуна, °C;

τ_2 – перевищення температури сталі асинхронного електродвигуна, °C;

P_{cp} - теплоємність довкілля навколо асинхронного електродвигуна, Дж/°C;

ϑ_{cp} температура навколишнього середовища в якому знаходиться ЕД, Дж/°C;

L_1, L_2, L_{12} - теплова провідність відповідно між обмоткою асинхронного електродвигуна і навколишнім середовищем, сталлю асинхронного електродвигуна і довкіллям, обмоткою ЕД і сталлю ЕД, Дж/(с·°C).

Запишемо рівняння теплового балансу для нашого електродвигуна :

$$C_1 \frac{d\tau_1}{dt} + L_1 \tau_1 + L_{12}(\tau_1 - \tau_2) = (1 + \alpha \tau_1) P_{10}; \quad (3.1)$$

$$C_2 \frac{d\tau_2}{dt} + L_2 \tau_2 + L_{12}(\tau_2 - \tau_1) = P_2, \quad (3.2)$$

де P_{10} - втрати активної потужності в обмотці асинхронного електродвигуна при температурі зовнішнього середовища, Вт;

α – температурний коефіцієнт опору матеріалу (міді) обмотки асинхронного електродвигуна, 1/°C;

t - поточний час, с.

Рішення рівнянь (3.1) і (3.2) призводить до виразу, що містить дві експоненти, де кожна включає парціальні компоненти сталих значень температурного перевищення та постійних часу нагріву [3]. Такий підхід дозволяє точніше відстежувати зміну температури електродвигуна у процесі його роботи, враховуючи як короткочасні, так і довготривалі теплові процеси.

Для спрощення аналізу теплових процесів у електродвигуні здійснюється заміна реальної кривої нагріву на еквівалентну:

$$\tau_1 = \tau_{1y}(1 - e^{-t/T_{\Sigma}}) + \tau_{1ноч} e^{-t/T_{\Sigma}}, \quad (3.3)$$

де τ_{1y} - стале перевищення температури обмотки асинхронного ЕД, °С;

T_{Σ} - еквівалентна постійна часу нагріву нашого дослідного асинх-го ЕД, °С;

$\tau_{1ноч}$ - початкове перевищення температури обмотки асинхронного ЕД, °С;

τ_1 - поточне перевищення температури обмотки асинхронного ЕД, °С;

t - поточний час для асинхронного ЕД, с.

При такому підході рівняння нагріву формулюються як для однорідного тіла, що дозволяє використовувати єдині температурні параметри для всієї конструкції електродвигуна. Це спрощує розрахунки та забезпечує необхідну точність при оцінці теплових процесів і зносу ізоляції в умовах експлуатації.

Стале перевищення температури обмотки асинхронного електродвигуна [3]:

$$\tau_{1y} = \tau_{1н} \frac{a + k^2}{a + 1 - \alpha \tau_{1н} (k^2 - 1)}, \quad (3.4)$$

де $\tau_{1н}$ - номінальне перевищення температури обмотки асинхронного ЕД, °С;

a - коефіцієнт втрат для асинхронного ЕД;

k - кратність струму статора для асинхронного ЕД.

Еквівалентна постійна часу нагріву для асинхронного ЕД [5]:

$$T_{\Sigma} = \frac{\sum_1^n m_i c_i \tau_{iн}}{\Delta P_n}, \quad (3.5)$$

де m_i - маса i -го тіла асинхронного ЕД, кг;

c_i - питома теплоємність i -го тіла асинхронного ЕД, Дж/(кг·°С);

$\tau_{iн}$ - номінальне перевищення температури i -го тіла асинхронного ЕД, °С;

ΔP_n - номін. втрати акт. потужності в асинхронному електродвигуні, Вт.

Отже, процес нагріву обмотки асинхронного електродвигуна залежить від класу ізоляції ($\tau_{1н}$) використаного в ЕД, коефіцієнта кратності струму електродвигуна (k), конструктивних параметрів використаного ЕД ($m_i, c_i, \tau_{iн}, \alpha, a$) та номінальних втрат потужності в асинхронному електродвигуні (ΔP_n).

3.2. Закономірності теплового старіння ізоляції електричних машин

Руйнування ізоляції електродвигуна відбувається під впливом нагріву, механічних навантажень (тиск, вібрація, удари), дії вологи та агресивних середовищ, а також інших експлуатаційних чинників. Такі безповоротні зміни структури і хімічного складу ізоляційних матеріалів називають старінням, а процес погіршення її властивостей - зносом. Серед чинників, що впливають на термін служби ізоляції електричних машин, ключову роль відіграє теплове старіння. У межах аналізу експлуатаційних режимів особливе значення надається методам оцінки швидкості теплового старіння ізоляції та прогнозуванню її терміну служби.

Перші дослідження у сфері теплового старіння ізоляції електродвигунів були здебільшого експериментальними та зосереджувалися на ізоляції класу А. Результатом цих робіт стало формулювання так званого «правила восьми градусів». Це правило свідчить, що підвищення температури ізоляції на кожні вісім градусів зменшує її термін служби удвічі [1].

Аналітично дослідити це правило можна виразити наступним чином:

$$D = D_0 \cdot e^{-0,0866 \vartheta} \quad (3.6)$$

де D_0 – термін служби ізоляції для прийнятого електродвигуна при температурі 0°C , год;

ϑ - температура ізоляції для прийнятого електродвигуна, $^\circ\text{C}$.

Завдяки своїй простоті, правило «восьми градусів» широко застосовується для наближених розрахунків, особливо у випадках з невеликими коливаннями температури. Проте рівняння (3.6), на основі якого базується це правило, має емпіричний характер, що створює певні неточності в значеннях числових постійних. Це обмежує надійність отриманих результатів і не дозволяє повною мірою використовувати метод для точних розрахунків довготривалої експлуатації ізоляції.

Більш строгий підхід до аналізу старіння ізоляції полягає у застосуванні загальних законів кінетики хімічних реакцій. Зокрема, Вант Гофф і Арреніус встановили, що швидкість хімічних реакцій має температурну залежність, виражену у вигляді експоненціальної функції. Цей підхід дозволяє точніше прогнозувати процеси старіння ізоляційних матеріалів, враховуючи зміни температури, що значно підвищує надійність оцінки довговічності ізоляції порівняно з емпіричними методами, такими як правило «восьми градусів»:

$$\ln K = \frac{B}{\theta} + A, \quad (3.7)$$

Експериментально встановлено, що окислювальні процеси в ізоляції підпорядковуються мономолекулярним реакціям. Для таких процесів можна

$$\frac{dC}{dt} = KC, \quad (3.8)$$

Наступні розрахунки:

$$K = \frac{1}{t} \ln \frac{C_0}{C}, \quad (3.9)$$

Коефіцієнти A і B у рівнянні швидкості реакції мають важливий фізичний сенс і є пов'язаними з певними постійними, які характеризують хімічний склад та структуру речовини, що бере участь у реакції.

$$A = \ln(PZ), \quad (3.10)$$

$$P = e^{\frac{\Delta S}{R}}, \quad (3.11)$$

$$B = -\frac{E_a}{R}, \quad (3.12)$$

Коефіцієнт A (попередній фактор) відображає частоту зіткнень між молекулами реагентів і враховує геометричні та кінетичні аспекти реакції. Він визначає, наскільки часто частинки зустрічаються в умовах, що сприяють реакції.

Коефіцієнт B (енергетичний коефіцієнт) пов'язаний з активаційною енергією, необхідною для початку реакції. Цей коефіцієнт вказує на те, скільки

енергії потрібно, щоб подолати енергетичний бар'єр, і як температура впливає на цю енергію.

Поєднуючи наведені вище рівняння, можна отримати рівняння Вант Гоффа-Арреніуса, яке описує залежність швидкості хімічних реакцій від температури. Це рівняння має вигляд:

$$K = Ae^{-\frac{E_a}{R\theta}}, \quad (3.13)$$

Вирішуючи спільно рівняння (3.9) і (3.13) Вант Гоффа-Арреніуса і рівняння, що описує теплове старіння ізоляції, можемо виразити термін служби ізоляції D через температуру та інші параметри. Результат такого спільного вирішення дозволяє отримати залежність терміну служби ізоляції від температури, яка має вигляд:

$$D = e^{\frac{E_a}{R\theta} - G}, \quad (3.14)$$

де

$$G = \ln A - \ln \ln \frac{C_0}{C}, \quad (3.15)$$

Знайти термін служби ізоляції D (термін служби ізоляції), при температурі θ можна знаючи термін служби ізоляції D_n (базовий ресурс ізоляції), при температурі θ_n :

$$D = D_n e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta}\right)}, \quad (3.16)$$

Для визначення швидкості теплового зношення ізоляції при заданій температурі, ми можемо використати експериментально доведені співвідношення, які враховують вплив температури на процес старіння ізоляції. Розрахунки швидкості теплового зношення ізоляції проводяться (у базових годинниках за годину).

$$\varepsilon = \frac{D_n}{D}, \quad (3.17)$$

Щоб підставити значення терміна служби D у рівняння (3.16), давайте спочатку визначимо, яке саме рівняння у вас на увазі. Зазвичай, у подібних контекстах рівняння (3.16) може відображати зв'язок між терміном служби ізоляції, температурою та швидкістю теплового зношення.

Підставивши значення D (термін служби ізоляції) у (3.16) отримаємо:

$$\varepsilon = e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta}\right)} \quad (3.18)$$

3.3 Аналіз впливу графіка навантаження на процес теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна.

Для аналізу впливу графіка навантаження на процес теплового зношення ізоляції в якості об'єкта дослідження приймаємо асинхронний електродвигун типу 4A100S2Y3.

На основі проведеного аналізу представимо наступні паспортні дані електродвигуна: $P_{2n} = 4 \text{ кВт}$; $\cos \varphi_n = 0,89$; $\eta_n = 0,865$.

Аналізуючи схему заміщення даного електродвигуна представимо наступні параметри, Ом: $R_1' = 1,5091$; $x_1' = 1,5370$; $R_2'' = 1,0061$; $x_2'' = 2,7672$.

Номінальна фазна напруга асинхронного електродвигуна $U_n = 220 \text{ В}$; Кратність пускового струму $k_n = 7,5$; Критичне ковзання $s_k = 0,28$; Номінальне ковзання $s_n = 0,033$; Кратність критичного моменту $m_k = 2,5$; Кратність пускового моменту $m_n = 2,0$; Кратність мінімального моменту $m_m = 1,6$; Маса проводу (міді) $m_1 = 2,9 \text{ кг}$; Маса магнітопроводу (сталі) $m_1 = 35,3 \text{ кг}$; Клас нагрівостійкості системи ізоляції асинхронного електродвигуна – В.

Перевищення температури міді (проводу електродвигуна) над температурою навколишнього середовища. Даний параметр визначається в номінальному режимі роботи $\tau_{1n} = 90^\circ \text{C}$; Перевищення температури сталі (магнітопроводу електродвигуна) над температурою навколишнього середовища. Даний параметр визначається в номінальному режимі роботи

$\tau_{1n} = 70^\circ\text{C}$; Втрати активної потужності для асинхронного електродвигуна типу 4A100S2Y3 в номінальному режимі роботи $\Delta P_n = 624$ Вт.

Теплоємність міді для асинхронного електродвигуна типу 4A100S2Y3 а $C_1 = 9900 \text{ Дж/}^\circ\text{C}$; Теплоємність сталі для асинхронного електродвигуна типу 4A100S2Y3 $C_1 = 1137000 \text{ Дж/}^\circ\text{C}$; Еквівалентна постійна часу нагрівання для асинхронного електродвигуна типу 4A100S2Y3 $T = 1840$ с.

Для подальших розрахунків задамося графіком навантаження для асинхронного електродвигуна типу 4A100S2Y3 (табл. 3.2) і визначимо теплове зношення ізоляції ЕД за одну годину роботи. Температуру навколишнього середовища ϑ_{cp} приймемо 30°C .

Виконаємо згідно даних таблиці 3.2 графіки навантаження для визначення теплового зношення ізоляції. На рисунку 3.2 представимо 5 варіантів графіків. Також варіант 5 представлений середньоквадратичним графіком навантаження.

Таблиця 3.2 Значення графіків навантаження.

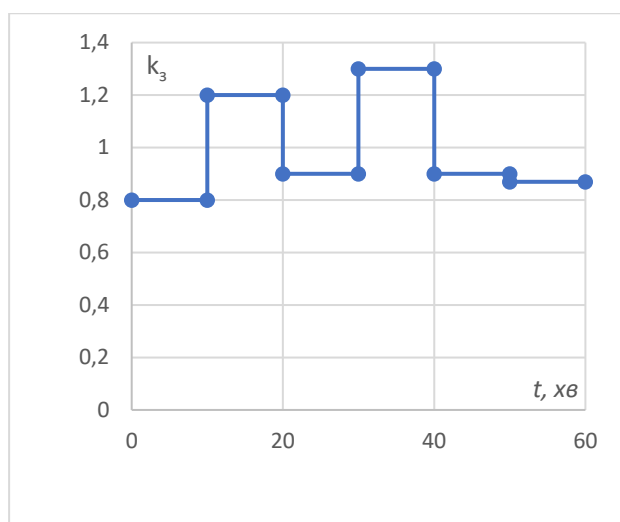
№ п/п	Значення графіка навантаження, k_3					Час роботи t , хв
	1	2	3	4	5	
1	0,8	0,8	1,3	0,8	1	0
2	0,8	0,8	1,3	0,8	1	10
3	1,2	0,8	1,2	0,9	1	20
4	0,9	0,85	0,9	1,2	1	30
5	1,3	0,85	0,9	1,3	1	40
6	0,9	1,2	0,7	0,9	1	50
7	0,87	1,3	0,7	0,8	1	60

Для подальших розрахунків використаємо наступну методику визначення теплового зношення ізоляції електродвигуна.

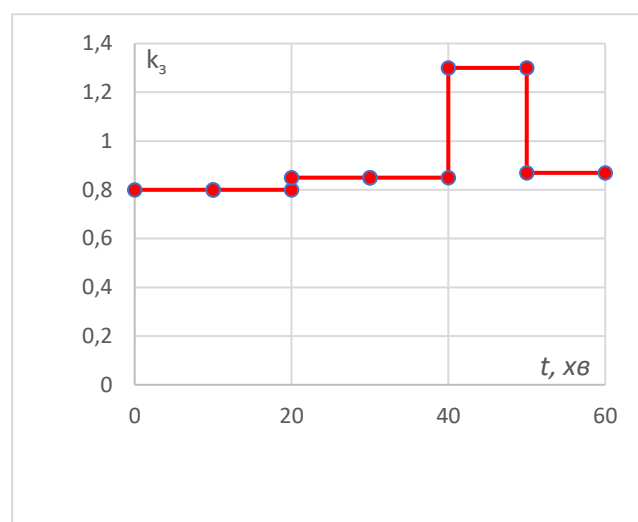
Так перевищення температури обмотки ЕД на початку циклу становитиме:

$$\tau_0 = \frac{1-b}{1-b^n} \sum_{i=1}^n b^{n-i} \tau_{iy}, \quad (3.19)$$

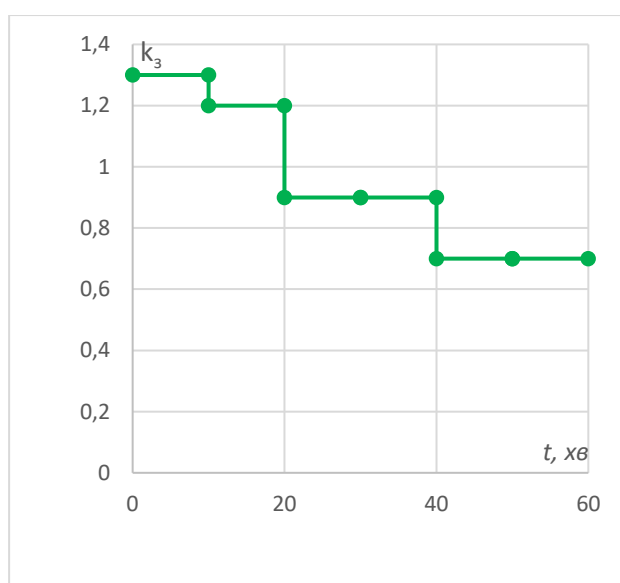
де $i = 1, 2, 3, \dots, n$.



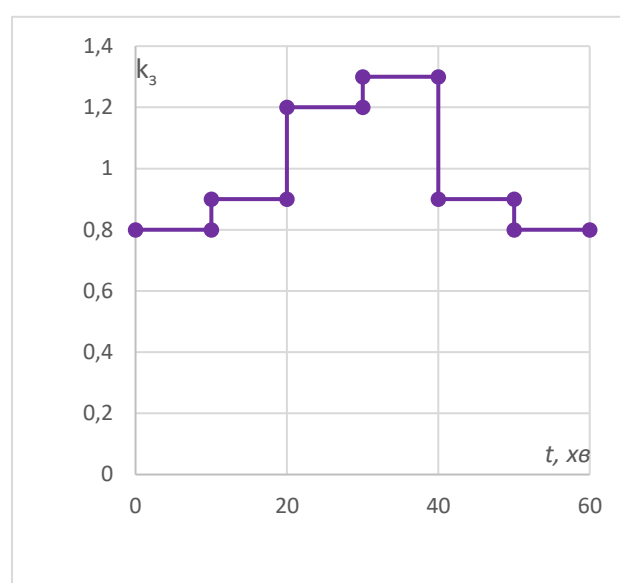
№1



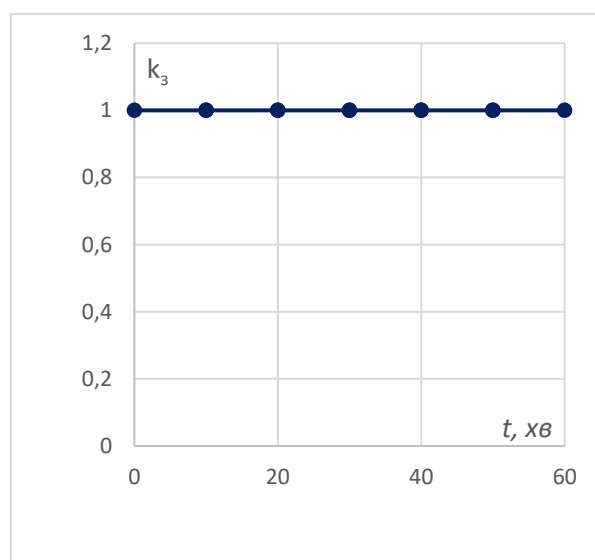
№2



№3



№4



№5

Рисунок 3.2. – Графіки навантаження для визначення теплового зношення ізоляції.

Визначимо на i -ій ділянці графіка значення сталого перевищення температури обмотки за виразом:

$$\tau_{iy} = \tau_n \frac{a + \kappa_i^2}{a + 1 - \alpha \tau_n (\kappa_i^2 - 1)}. \quad (3.20)$$

Визначаємо коефіцієнт втрат активної потужності нашого електродвигуна наступним чином:

$$a = \frac{\Delta P_{const.H}}{\Delta P_{var.H}}. \quad (3.21)$$

Змінні втрати електродвигуна при номінальному режимі роботи визначаємо за наступними формулами (3.22) і (3.23):

$$\Delta P_{var.H} = 3(R'_1 + R''_2) I'^2_n, \quad (3.22)$$

$$I'^2_n = \frac{U_n^2}{(R'_1 + R''_2 / s)^2 + (x'_1 + x''_2)^2}, \quad (3.23)$$

Визначаємо при номінальному режимі роботи постійні втрати асинхронного електродвигуна за (3.24) і (3.25):

$$\Delta P_{const.H} = \Delta P_n - \Delta P_{var.H}, \quad (3.24)$$

$$\Delta P_n = \frac{P_{2n}}{\eta_n} - P_{2n}. \quad (3.25)$$

Визначимо на i -ій ділянці графіка квадрат кратності струму навантаження асинхронного електродвигуна за виразом (3.26):

$$k_i^2 = \frac{(R'_1 + R''_2 / s_n)^2 + (x'_1 + x''_2)^2}{(R'_1 + R''_2 / s_i)^2 + (x'_1 + x''_2)^2}. \quad (3.26)$$

Визначимо наприкінці i -ої ділянки графіка перевищення температури перевищення температури за виразом (3.27):

$$\tau_i = \tau_{iy} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}} \right) + \tau_{i-1} e^{-\frac{t_i}{T}}. \quad (3.27)$$

Визначимо на i -ій ділянці теплове зношення ізоляції обмотки асинхронного електродвигуна наступним чином як $\int \varepsilon_i dt$ з урахуванням виразу (3.27):

$$E_i = \int_0^{t_i} e^B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\tau_{iy} (1 - e^{-t/T}) + \tau_i e^{-t/T} + \vartheta_{cp} + 273} \right) dt \quad (3.28)$$

За цикл роботи асинхронного електродвигуна визначимо сумарне теплове зношення ізоляції наступним чином:

$$E_{\eta} = \sum_1^n E_i, \quad (3.29)$$

Теплове зношення ізоляції асинхронного електродвигуна за одну годину роботи в квазісталому режимі визначають через аналіз умов теплового балансу на різних рівнях навантаження. Використовуються розрахункові параметри температури обмотки та сталі, які залежать від характеристик навантаження. Зазвичай, це здійснюється шляхом інтеграції швидкості теплового зношення, враховуючи клас ізоляції, температурний коефіцієнт та тривалість кожного навантажувального етапу за заданим графіком:

$$E = \frac{3600}{n \cdot t_i} E_{\eta}. \quad (3.30)$$

Таблиця 3.3 містить результати досліджень впливу різних режимів навантаження на процес теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна. У ній відображено зміни теплового зношення ізоляції за умов стандартного графіка навантаження та при змінній черговості навантаження, а також порівняння з еквівалентним навантаженням. Це дозволяє виявити найбільш агресивні режими, що прискорюють старіння ізоляції, та оцінити вплив кожного навантажувального етапу на загальний ресурс двигуна.

Температуру навколишнього середовища для розрахунків теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна ми приймаємо на рівні 30°C.

Таблиця 3.3 Вплив варіантів графіка навантаження на процес теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна.

Вплив графіка навантаження на теплове зношення ізоляції електродвигуна (базових годинах, бгод.)				
Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
0,631	0,661	0,651	0,671	0,531

На підставі проведеного дослідження встановлено такі основні висновки:

1. Вплив графіка навантаження на теплове зношення ізоляції: Графік навантаження формує тепловий профіль обмоток електродвигуна, що визначає середню швидкість теплового зношення ізоляції протягом одного циклу роботи двигуна.

2. Сумарне теплове зношення: Незважаючи на варіації форми графіка навантаження, сумарне теплове зношення ізоляції за цикл роботи змінюється незначно, з розбіжністю у межах 3-6%.

3. Середньоквадратичне значення навантаження: Використання середньоквадратичного значення навантаження для оцінки теплового зношення ізоляції дає занижене значення на 16–22% порівняно з реальним графіком навантаження. Це свідчить про недостатню точність такого підходу для оцінки теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна, що вимагає розгляду реального графіка навантаження для більш достовірних результатів.

3.4 Дослідження витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна у функції завантаження.

Витрата ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна безпосередньо залежить від режиму його роботи, що визначається тепловим зношенням ізоляції. Швидкість теплового зношення ізоляції показує, яка частка з базових 20,000 годин експлуатаційного ресурсу витрачається протягом кожної години роботи двигуна й визначається наступним виразом:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_n e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta_c} \right)}. \quad (3.31)$$

де $\mathcal{E}$ - швидкість теплового зношення ізоляції асинхронного електродвигуна, $\text{бгод} / \text{год}$;

$\mathcal{E}_n$ - номінальна швидкість теплового зношування ізоляції асинхронного електродвигуна, $\text{бгод} / \text{год}$;

B - показник характеризуючий ізоляцію даного класу асинхронного електродвигуна, К;

θ_n - абсолютна номінальна температура ізоляції даного класу асинхронного електродвигуна, К;

θ_c - фактична абсолютна стала температура ізоляції асинхронного електродвигуна, К.

Таким чином, інтенсивний режим роботи, що призводить до підвищення температури, збільшує швидкість теплового зношення, скорочуючи загальний термін служби ізоляції електродвигуна.

Стале перевищення температури ізоляції електродвигуна, а також абсолютне значення температури ізоляції залежать від кратності сили струму, який споживає електродвигун.

$$\tau_y = \tau_n \frac{a + \kappa^2}{a + 1}. \quad (3.32)$$

де τ_n - номінальне перевищення температури ізоляції асинхронного електродвигуна даного класу, $^{\circ}\text{C}$;

a - коефіцієнт втрат асинхронного електродвигуна (відношення номінальних втрат у сталі (магнітопроводі) до номінальних втрат у міді (обмотки));

κ - кратність сили електричного струму асинхронного електродвигуна до відносно номінального значення.

При збільшенні навантаження на двигун зростає і споживання електричного струму, що, у свою чергу, підвищує температуру обмоток. Це підвищення призводить до прискореного зношення ізоляції через інтенсифікацію теплових процесів, які знижують термін служби матеріалів, з яких виготовлена ізоляція.

Тоді фактична абсолютна стала температура ізоляції асинхронного електродвигуна

$$\theta_c = \tau_y + \vartheta_{cp} + 273. \quad (3.33)$$

де ϑ_{cp} - температура навколишнього середовища в районі перебування асинхронного електродвигуна, °C.

Коефіцієнт втрат активної енергії в асинхронному електродвигуні являє собою відношення фактичних втрат активної потужності ΔP в асинхронному електродвигуні до номінальних ΔP_n в асинхронному електродвигуні:

$$k_{ne} = \frac{\Delta P}{\Delta P_n}. \quad (3.34)$$

Номінальні втрати в асинхронному електродвигуні складаються з номінальних втрат у сталі $\Delta P_{c.n.}$ асинхронного ЕД і номінальних втрат у міді $\Delta P_{m.n.}$ асинхронного ЕД, а саме:

$$\Delta P_n = \Delta P_{c.n.} + \Delta P_{m.n.}, \quad (3.35)$$

Фактичні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні складаються з номінальних втрат у сталі (в магнітопроводі двигуна), позначених як $\Delta P_{c.n.}$, та втрат у міді, що виникають в обмотках електродвигуна. Ці втрати у міді залежать від квадрату кратності сили струму, який споживає двигун, тобто збільшення навантаження призводить до зростання струму, що спричиняє нелінійне зростання теплових втрат у мідній частині обмоток.

$$\Delta P = \Delta P_{c.n.} + k^2 \Delta P_{m.n.}, \quad (3.36)$$

Внаслідок цього підвищується температура обмоток і, відповідно, зростає швидкість теплового зношення ізоляції, що в цілому знижує термін служби ЕД.

Тоді коефіцієнт втрат активної енергії в асинхронному електродвигуні запишеться наступним чином:

$$k_{ne} = \frac{\Delta P_{c.n} + k^2 \Delta P_{m.n}}{\Delta P_{c.n} + \Delta P_{m.n}}, \quad (3.37)$$

Для спрощення розрахунків запишемо в іншому вигляді:

$$k_{ne} = \frac{a + k^2}{a + 1}. \quad (3.38)$$

Потім з урахуванням формули (3.32) запишемо стале перевищення температури ізоляції електродвигуна наступним чином:

$$\tau_y = k_{пе} \tau_n. \quad (3.39)$$

Через відношення швидкості теплового зношення ізоляції електродвигуна ε до номінального його значення ε_n , знайдемо коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції:

$$k_{ep} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}, \quad (3.40)$$

Перепишемо у більш інформаційному вигляді:

$$k_{ep} = e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{k_{пе} \tau_n + \theta_{cp} + 273} \right)}. \quad (3.36)$$

Для дослідження витрат ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна 4A100S2Y3 в залежності від завантаження на валу, необхідно врахувати вплив навантаження на теплові процеси в обмотках та сталі двигуна. Зокрема, підвищене навантаження на валу призводить до збільшення споживаного струму, що підвищує активні втрати в міді обмоток і сталі магнітопроводу. Залежність цих втрат від навантаження та теплового зношення ізоляції дозволяє обчислити витрати ресурсу ізоляції для кожного конкретного режиму роботи. Це дослідження допоможе визначити оптимальні режими роботи двигуна для мінімізації теплового зносу ізоляції та продовження терміну його служби.

Проведемо аналітичні дослідження витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3. Витрати ресурсу ізоляції будемо визначати у функції завантаження на валу з боку робочої машини. Результати аналітичних розрахунків зведемо до табл. 3.4.

Таблиця 3.4 Дослідимо витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
ΔP	281,1	294,1	313,2	347,4	382,3	417,8	460,7	522,1	604,4	641,3	716,2
k_{ne}	0,45	0,48	0,5	0,56	0,61	0,67	0,74	0,84	0,97	1,03	1,15
$\vartheta_{cp}, ^\circ\text{C}$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
k_{ep}	0,0051	0,0071	0,0082	0,0121	0,0181	0,0282	0,0473	0,0944	0,1802	0,3213	0,6602
$\vartheta_{cp}, ^\circ\text{C}$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
k_{ep}	0,012	0,016	0,018	0,029	0,041	0,063	0,102	0,196	0,370	0,627	1,243
$\vartheta_{cp}, ^\circ\text{C}$	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
k_{ep}	0,029	0,036	0,042	0,063	0,089	0,133	0,210	0,391	0,710	1,183	2,271

На основі отриманих результатів табл. 3.4, побудуємо графік залежності коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції від коефіцієнта завантаження асинхронного електродвигуна. Для цього слід виконати наступні кроки:

1. Збір даних: Використати отримані результати табл. 3.4, які показують, як витрата ресурсу ізоляції змінюється в залежності від завантаження двигуна та температури навколишнього середовища.

2. Визначення коефіцієнтів: Обчислити коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції табл. 3.4, (наприклад, у годинах на відпрацьовану одиницю часу) для різних значень коефіцієнта завантаження.

3. Побудова графіка:

- По осі X відкласти коефіцієнт завантаження електродвигуна.
- По осі Y відкласти коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції.
- Нанести точки, які відповідають отриманим значенням, і провести криву залежності.

4. Аналіз графіка: Оцінити, як змінюється витрата ресурсу ізоляції із зміною завантаження, що дозволить виявити оптимальні умови експлуатації електродвигуна для зменшення зносу ізоляції, рис. 3.3.

Ця залежність допоможе у прийнятті рішень щодо режимів роботи асинхронного електродвигуна для продовження терміну його служби.

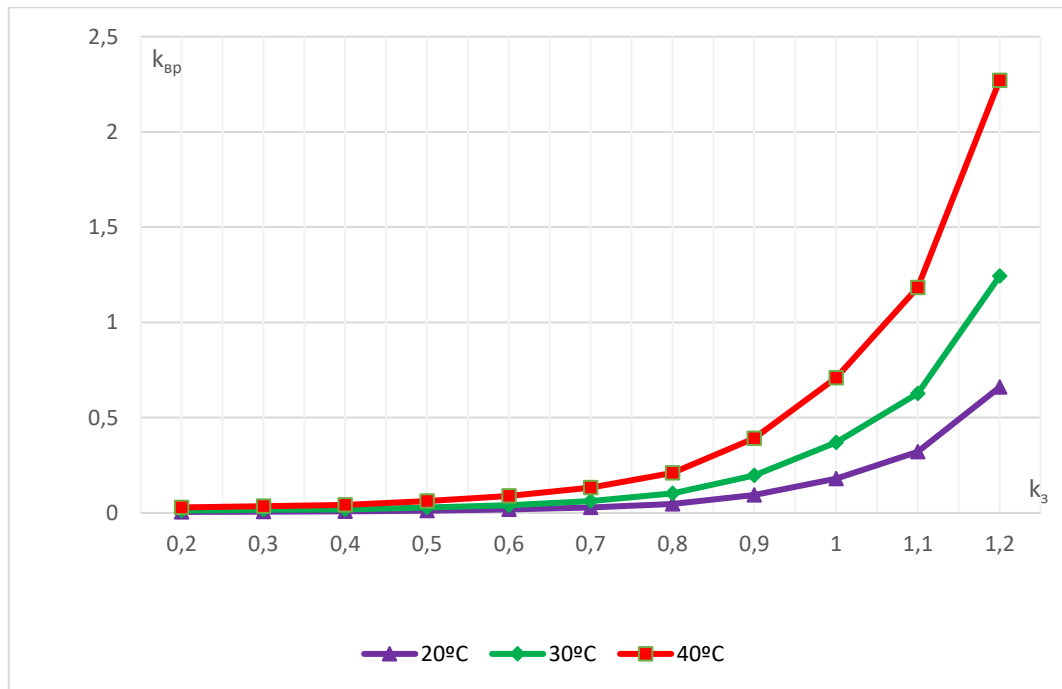


Рисунок 3.3. - Результати розрахунків коеф. витрати ресурсу ізоляції ($k_{вр}$) у функції коеф. завантаження (k_z) ЕД з боку РМ для встановленої температури навколишнього середовища.

3.5 Дослідження витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна у функції рівня напруги живлення й завантаження.

Під час проведення аналітичних досліджень коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції, ми зосередили увагу на аналізі показника результатів розрахунку втрат активної потужності в асинхронному ЕД у функції рівня напруги живлення даного електродвигуна та значення коефіцієнта завантаження ЕД на валу з боку виконавчого механізму будь-якої прийнятої робочої машини. Ці розрахунки

враховують варіації напруги електроживлення та ступінь механічного навантаження з боку виконавчого механізму. Аналітичні дослідження проводились при різних температурних режимах довкілля ($\vartheta_{cp} = 20^{\circ}\text{C}$, 30°C та 40°C) та змінних параметрах прикладеної напруги $k_u = 0,8$. Результати розрахунків зносимо до таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 Дослідження коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції електродвигуна.

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
ΔP	183,1	194,2	213,2	233,1	262,1	282,1	311,1	344,4	386,5	415,2	463,4
k_{ne}	0,291	0,311	0,340	0,372	0,421	0,452	0,509	0,551	0,621	0,672	0,742
$\vartheta_{cp}, ^{\circ}\text{C}$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
k_{sp}	0,0011	0,0021	0,0027	0,0035	0,0045	0,0059	0,008	0,0111	0,0203	0,0282	0,0473
$\vartheta_{cp}, ^{\circ}\text{C}$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
k_{sp}	0,0033	0,0044	0,0059	0,0079	0,0101	0,0121	0,0184	0,0275	0,371	0,0631	0,1024
$\vartheta_{cp}, ^{\circ}\text{C}$	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
k_{sp}	0,0088	0,0105	0,0131	0,0162	0,0234	0,0293	0,0423	0,0592	0,7103	0,1331	0,2104

На основі проведених розрахунків та на підставі отриманих аналітичних результатів виконаємо побудову залежності коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції електродвигуна з боку робочої машини. Також при проведенні розрахунків враховують наперед задану температуру навколишнього середовища при кратності напруги живлення електродвигуна $k_u = 0,8$ (рис. 3.4).

Далі проведемо наступного роду аналітичні розрахунки. Результати проведених розрахунків проводимо при кратності прикладеної напруги до клем електродвигуна $k_u = 0,85$ та температурі навколишнього середовища, що прийняли в попередніх розрахунках $\vartheta_{cp} = 20^{\circ}\text{C}$, 30°C и 40°C .

Проведені розрахунки заносимо в табл. 3.6. результати дослідження при кратності прикладеної напруги $k_u = 0,85$.

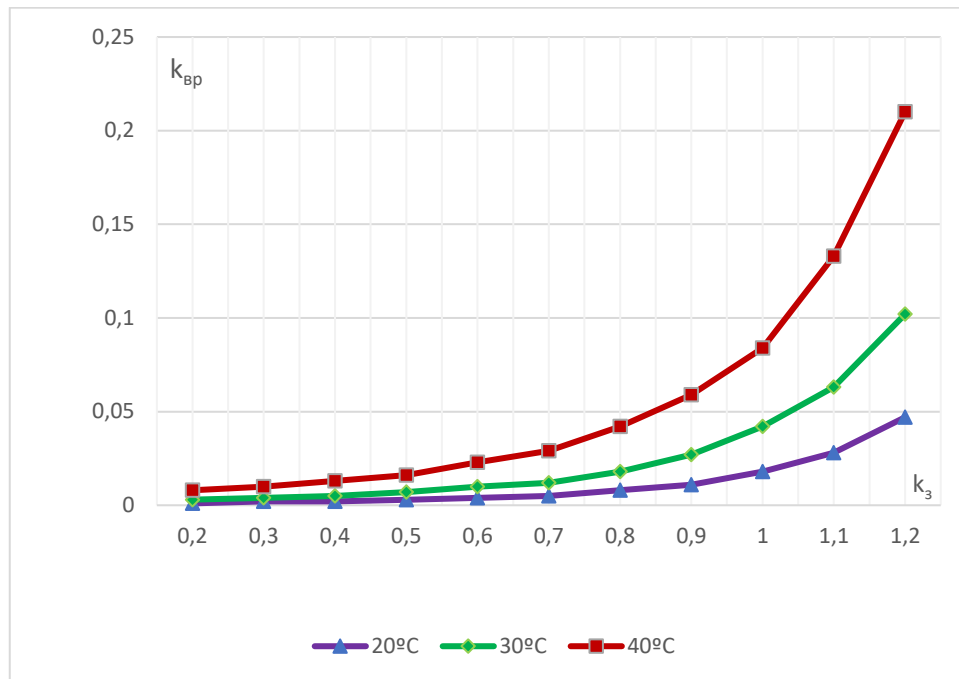


Рисунок 3.4. - Залежність коеф. витрати ресурсу ізоляції $k_{вp}$ у функції коеф. завантаження k_z ЕД при кратності напруги живлення $k_u = 0,8$ з боку РМ для встановленої температури навколишнього середовища

Таблиця 3.6 Результати дослідження при кратності прикладеної напруги

k_z	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
ΔP	210,2	226,3	247,2	274,3	302,1	339,0	375,3	414,2	472,4	514,3	573,1
k_{ne}	0,341	0,361	0,410	0,441	0,482	0,542	0,605	0,661	0,761	0,821	0,922
$\vartheta_{cp}, ^\circ C$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$k_{вp}$	0,0021	0,0024	0,0035	0,0055	0,0074	0,0110	0,0173	0,0264	0,0483	0,0824	0,1603
$\vartheta_{cp}, ^\circ C$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
$k_{вp}$	0,0054	0,0065	0,0085	0,0121	0,0163	0,0254	0,0385	0,0591	0,1003	0,1723	0,3243
$\vartheta_{cp}, ^\circ C$	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
$k_{вp}$	0,0131	0,0152	0,0204	0,0273	0,0364	0,0552	0,0841	0,1251	0,2202	0,3461	0,6311

На підставі отриманих результатів будуюмо залежність коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції $k_{вp}$ у функції коеф. завантаження асинхронного електродвигуна (АЕД) k_z з боку робочої машини (РМ) для заданої температури навколишнього середовища при кратності напруги живлення $k_u = 0,85$ (рис. 3.5).

Далі проведемо розрахунки і результати дослідження при кратності напруги $k_u = 0,9$ й $\vartheta_{cp} = 20^\circ\text{C}$, 30°C и 40°C заносимо до наступної табл. 3.7.

На підставі отриманих результатів будуємо залежність коеф. витрати ресурсу ізоляції k_3 у функції коеф. завантаження асинхронного електродвигуна (АЕД) k_3 з боку робочої машини (РМ) для заданої температури навколишнього середовища при кратності напруги живлення $k_u = 0,9$ (рис. 3.9).

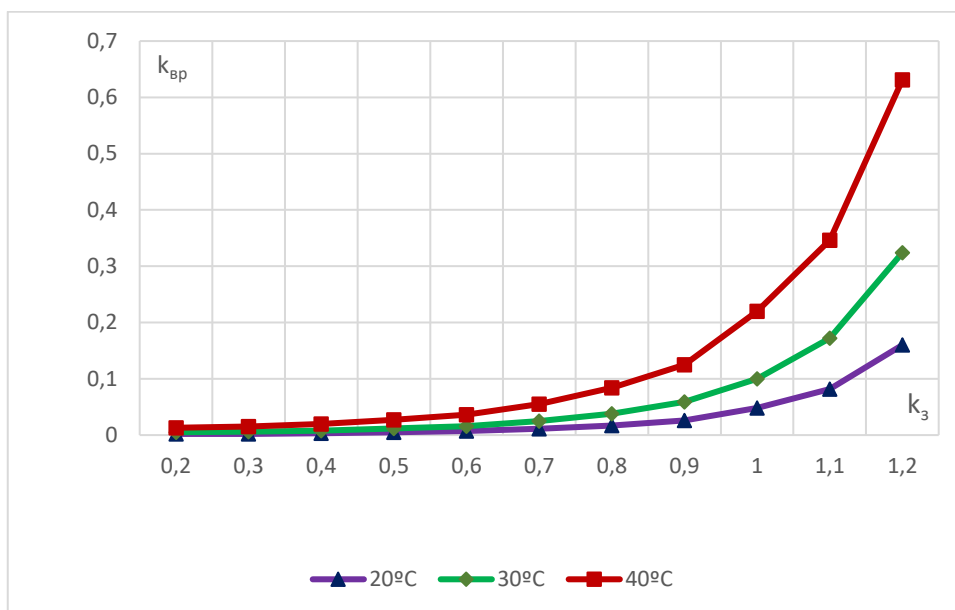


Рисунок 3.5. - Залежність коеф. витрати ресурсу ізоляції $k_{вп}$ у функції коеф. завантаження k_3 ЕД при кратності напруги живлення $k_u = 0,85$ з боку РМ для встановленої температури навколишнього середовища

Таблиця 3.7 Результати дослідження при кратності прикладеної напруги.

k_3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
ΔP	234,2	249,3	269,0	294,1	324,2	359,1	408,1	453,2	500,08	552,1	607,07
k_{ne}	0,381	0,405	0,431	0,472	0,521	0,581	0,652	0,731	0,82	0,881	0,971
$\vartheta_{cp}, ^\circ\text{C}$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$k_{вп}$	0,0031	0,0034	0,0041	0,0064	0,009	0,0144	0,0254	0,0440	0,1801	0,1231	0,2211
$\vartheta_{cp}, ^\circ\text{C}$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
$k_{вп}$	0,0073	0,0085	0,0111	0,0151	0,0211	0,0331	0,0551	0,0951	0,1512	0,2521	0,4392
$\vartheta_{cp}, ^\circ\text{C}$	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
$k_{вп}$	0,0172	0,0201	0,0251	0,0332	0,0481	0,0731	0,1171	0,1971	0,3061	0,4981	0,8432

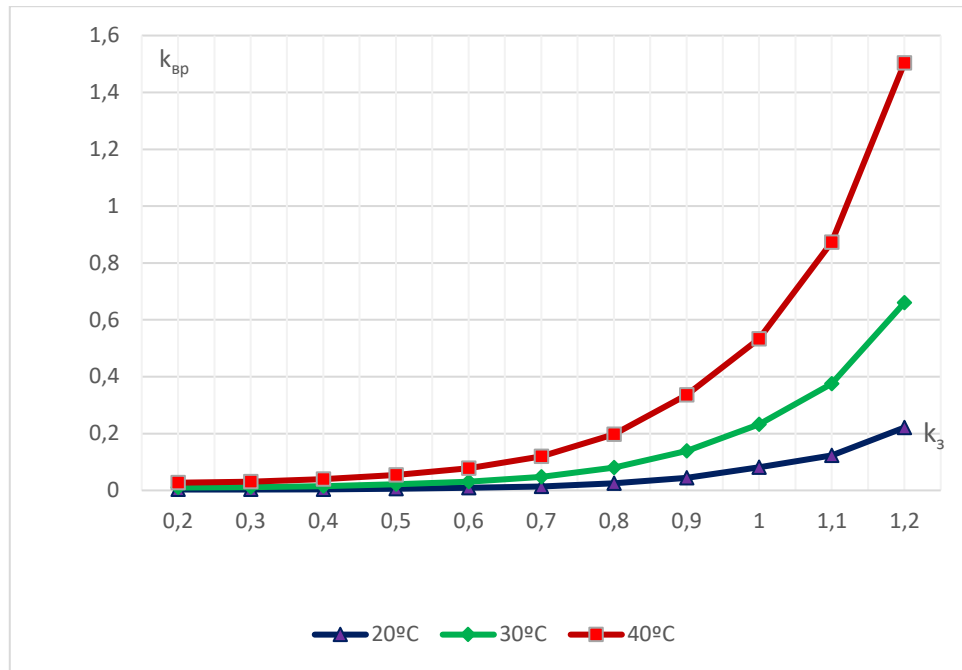


Рисунок 3.6. - Залежність коеф. витрати ресурсу ізоляції $k_{вр}$ у функції коеф. завантаження k_z ЕД при кратності напруги живлення $k_u = 0,9$ з боку РМ для встановленої температури навколишнього середовища.

3.5 Висновки до третього розділу роботи

Дослідження витрат ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна типу 4A100S2Y3 виявило, що ці витрати мають експоненціальний характер, залежачи від коефіцієнта використання ізоляційного ресурсу двигуна, рівня завантаження та температури навколишнього середовища. Наприклад, при коефіцієнті завантаження, що дорівнює одиниці, підвищення температури на 20 °С, 30 °С, 40 °С призводить до значного збільшення коефіцієнта витрат ресурсу ізоляції з 0,19 до 0,7. Ця закономірність дозволяє оптимізувати експлуатаційні режими електродвигуна, сприяючи раціональному використанню ресурсу ізоляції та її збереженню, що є важливим для підвищення надійності і тривалості служби електродвигуна та електричної машини у цілому.

Встановлені закономірності процесу витрати ресурсу ізоляційних матеріалів відкривають нові можливості для оптимізації експлуатаційних режимів електродвигунів. Це дозволяє розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору оптимальних режимів роботи з позиції максимального збереження ресурсу ізоляції та підвищення енергоефективності експлуатації електричних машин.

На основі отриманих даних можливе створення автоматизованих систем керування, які враховуватимуть поточний стан ізоляції та забезпечуватимуть оптимальні режими експлуатації з урахуванням як технологічних вимог, так і завдань ресурсозбереження.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИТРАТИ РЕСУРСУ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА І ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДІАГНОСТУВАННЯ

4.1 Обґрунтування критерію моніторингу асинхронного електродвигуна

Зношення та витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна тісно пов'язані з умовами його експлуатації, зокрема з робочим режимом і частотою навантаження. Загальним чинником, який впливає на цей процес, є теплове зношення ізоляційного матеріалу. Постійні цикли нагріву і охолодження в межах робочого режиму спричиняють поступове погіршення властивостей ізоляції, що призводить до її старіння. Перегрів, тривала робота в умовах високих температур, а також коливання напруги, що супроводжуються перевантаженнями, значно скорочують термін служби ізоляційних матеріалів. Відповідно, для збереження ресурсу двигуна і продовження його експлуатаційного терміну важливо забезпечити оптимальний тепловий режим, з урахуванням температурного профілю та рівня навантаження.

Швидкість теплового зношення ізоляції визначає, скільки годин з базового ресурсу, який становить 20,000 годин, витрачається під час кожної години роботи електродвигуна. Це показник, що залежить від температури, режимів навантаження і умов експлуатації. Чим вища температура і інтенсивніші робочі цикли двигуна, тим швидше відбувається теплове старіння ізоляції, що знижує її загальний ресурс. Відповідно, зниження швидкості зношення ізоляції досягається шляхом підтримки оптимального режиму роботи та уникнення перегріву, що дозволяє більш ефективно використовувати електродвигун в тривалих експлуатаційних циклах, й розраховується за виразом:

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta_c}\right)} \quad (4.1)$$

Стабільне перевищення температури ізоляції електродвигуна, а також її абсолютне значення визначаються, зокрема, коефіцієнтом кратності сили струму, який споживає двигун. Вищий струм при однакових умовах навантаження збільшує температуру обмоток, що сприяє прискоренню процесів теплового старіння ізоляції. Така залежність підкреслює важливість дотримання номінальних режимів роботи двигуна, оскільки навіть невеликі перевищення допустимих значень струму можуть значно вплинути на скорочення загального терміну служби ізоляційних матеріалів.

Стале перевищення температури ізоляції електродвигуна:

$$\tau_y = \tau_n \frac{a + \kappa^2}{a + 1} \quad (4.2)$$

Тоді, наступним етапом є визначення фактичної абсолютної сталої температури ізоляції АЕД:

$$\theta_c = \tau_y + \vartheta_{cp} + 273 \quad (4.3)$$

Коефіцієнт втрат активної енергії в асинхронному електродвигуні визначається як відношення фактичних втрат активної потужності ΔP до номінальних втрат ΔP_n .

$$k_{ne} = \frac{\Delta P}{\Delta P_n} \quad (4.4)$$

Цей коефіцієнт відображає, наскільки реальні втрати потужності перевищують або відповідають допустимим значенням, встановленим для номінального режиму роботи. Чим більший цей коефіцієнт, тим інтенсивніше відбувається теплове навантаження на обмотки двигуна, що може сприяти підвищеному зношенню ізоляції і, як наслідок, зменшенню тривалості експлуатаційного ресурсу електродвигуна.

Номінальні втрати потужності в асинхронному електродвигуні складаються з двох основних складових: втрат у сталі ($\Delta P_{с.н.}$) і втрат у міді ($\Delta P_{м.н.}$):

$$\Delta P_{\text{н}} = \Delta P_{\text{с.н}} + \Delta P_{\text{м.н}} \quad (4.5)$$

Втрати в сталі пов'язані з магнітними процесами в осерді електродвигуна, зокрема з явищами гістерезису та вихрових струмів, які виникають під час роботи електродвигуна в змінному магнітному полі. Втрати в міді обумовлені протіканням електричного струму через обмотки статора і ротора, і є результатом електричного опору провідників. Разом ці втрати визначають загальні номінальні втрати потужності, які впливають на тепловий режим двигуна і, як наслідок, на його експлуатаційний ресурс.

Фактичні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні включають номінальні втрати у сталі ($\Delta P_{\text{с.н.}}$) та втрати у міді, які залежать від квадрата кратності електричного струму, що споживається двигуном:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{с.н}} + k^2 \Delta P_{\text{м.н}} \quad (4.6)$$

Втрати у сталі залишаються відносно стабільними за умови постійної частоти, оскільки залежать переважно від магнітних властивостей осердя.

Наступне, коефіцієнт втрат активної енергії можемо записати:

$$k_{\text{не}} = \frac{\Delta P_{\text{с.н}} + k^2 \Delta P_{\text{м.н}}}{\Delta P_{\text{с.н}} + \Delta P_{\text{м.н}}} \quad (4.7)$$

Або спростивши:

$$k_{\text{не}} = \frac{a + k^2}{a + 1} \quad (4.8)$$

Таке співвідношення є корисним для розрахунку енерговитрат асинхронного електродвигуна, оскільки дозволяє зіставити фактичні втрати потужності з номінальними показниками. Це забезпечує можливість більш точного аналізу теплових навантажень та оцінки ефективності двигуна при змінних умовах експлуатації. Зокрема, коефіцієнт втрат активної енергії дає змогу виявити відхилення в режимі роботи, що може вказувати на підвищене теплове навантаження або на ризик пришвидшеного зносу ізоляції, особливо при надмірних перевантаженнях струму.

Тоді стале перевищення температури ізоляції матиме вираз:

$$\tau_y = k_{\text{те}} \tau_n \quad (4.9)$$

Тоді коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції матиме наступне відношення:

$$k_{\text{сп}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n} \quad (4.10)$$

та являє собою поточного відношення швидкості теплового зношення ізоляції ε до номінального значення швидкості теплового зношення ізоляції ε_n

В розширеному вигляді коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції:

$$k_{\text{сп}} = e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{k_{\text{те}} \tau_n + \theta_{\text{сп}} + 273} \right)} \quad (4.11)$$

Отже, маючи інформацію про коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції, можливо оцінити ефективність режиму роботи електродвигуна з точки зору збереження його ресурсу. Це дозволяє здійснювати моніторинг фактичного стану ізоляції, визначати потенційні ризики перевантажень і підвищених теплових навантажень, що, в свою чергу, допомагає приймати обґрунтовані рішення щодо оптимізації режимів роботи. Такий підхід не лише продовжує термін служби ізоляції, а й підвищує загальну надійність та ефективність електродвигуна в умовах змінних навантажень.

4.2 Розробка схеми пристрою моніторингу електродвигуна.

Для створення структурної схеми пристрою моніторингу асинхронного електродвигуна, що оцінює ресурсозбереження, визначимо основні компоненти, необхідні для здійснення моніторингу режиму роботи та стану ізоляції. Схема може включати такі блоки:

1. Датчики вимірювання параметрів: моніторять робочі параметри електродвигуна, такі як струм, напруга, температура обмоток, та навколишня температура. Ці параметри дозволяють розрахувати теплові втрати та швидкість зношення ізоляції.

2. Блок збору даних: зчитує дані з датчиків і передає їх до обчислювального модуля. Забезпечує високу точність і швидкість збору інформації для оперативного аналізу.

3. Обчислювальний модуль: розраховує коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції на основі зібраних даних. Виконує обчислення теплових втрат і аналізує зміну параметрів роботи електродвигуна відповідно до обраних критеріїв діагностування.

4. Блок контролю і відображення: виводить інформацію про стан двигуна, зокрема поточний рівень зношення ізоляції і ресурс, що залишився. Може мати інтерфейс для відображення тривожних повідомлень у разі досягнення критичних значень.

5. Система керування: на основі аналізу ресурсу рекомендує оптимальні режими роботи або автоматично змінює параметри роботи для зменшення навантаження на ізоляцію.

Ця структурна схема дає змогу вчасно виявляти надмірне теплове зношення ізоляції, сприяючи ефективному використанню ресурсу електродвигуна і підвищуючи його надійність.

Вхідними параметрами моделі, що описує швидкість теплового зношення ізоляції обмотки асинхронного електродвигуна, є такі ключові величини:

1. Коефіцієнт B : характеризує клас ізоляції, впливаючи на її стійкість до термічного зношення.
2. Номінальна температура ізоляції θ_n : абсолютна допустима температура, при якій ізоляція може функціонувати без ризику пошкодження.
3. Номінальне перевищення температури τ_n : максимальне допустиме підвищення температури, що впливає на зношення ізоляції в процесі роботи електродвигуна.
4. Номінальний струм електродвигуна I_n : значення струму, яке визначає електричні втрати в обмотках і, відповідно, теплове навантаження на ізоляцію.

5. Постійна часу нагріву T_{ε} : характеризує швидкість, з якою електродвигун досягає робочої температури, та впливає на теплове зношення.
6. Заданий інтервал часу Δt : період, протягом якого проводиться оцінка зміни стану ізоляції.
7. Номінальні втрати активної потужності ΔP_n : загальні втрати потужності в електродвигуні, які складаються з втрат у міді та сталі.
8. Постійні коефіцієнти m і n : відображають вплив хімічно-активного середовища та вологості на зношення ізоляції.

Ці вхідні величини дозволяють моделювати процеси теплового зношення ізоляції, сприяючи глибшому аналізу та підбору оптимальних режимів роботи електродвигуна для забезпечення його надійності і тривалого терміну служби.

Вихідною величиною моделі діагностування являється - витрата ресурсу ізоляції k_{ep} .

Структурна схема пристрою моніторингу наведена на рис. 4.1.

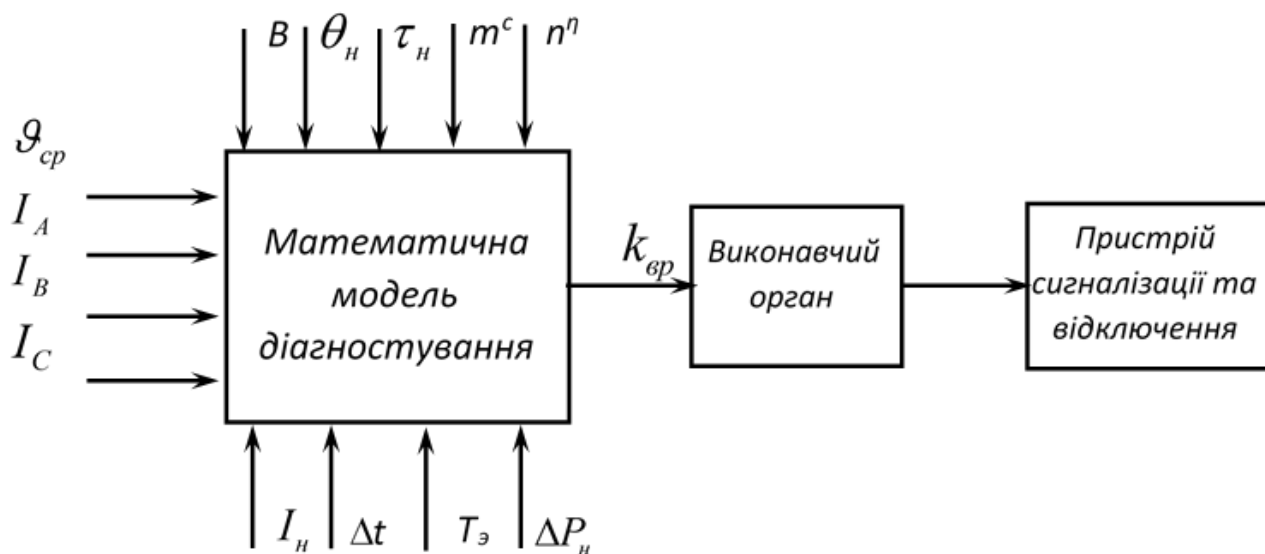


Рисунок 4.1. – Структурна схема пристрою моніторингу електродвигуна.

Умова нормального режиму ресурсу ізоляції в асинхронному електродвигуні визначається кількома ключовими факторами, які забезпечують стабільну і безпечну роботу ізоляції протягом її терміну служби, та являє:

$$k_{ne} \leq 1 \text{ і } k_{ep} \leq 1. \quad (4.12)$$

4.3 Математична модель моніторингу витрати ресурсу ізоляції електродвигуна

Моніторинг витрати ресурсу ізоляції електродвигуна передбачає проведення регулярних оцінок стану ізоляційних матеріалів протягом визначеного інтервалу часу Δt . Це дозволяє виявити зношення ізоляції на ранніх стадіях та запобігти можливим аваріям і несправностям. Регулярне діагностування та оцінка витрати ресурсу ізоляції електродвигуна сприяють підвищенню надійності обладнання, запобіганню аварійним ситуаціям і зменшенню витрат на його обслуговування. Це, в свою чергу, дозволяє забезпечити безперебійну роботу підприємств, що використовують дані електродвигуни в своїх технологічних процесах.

Алгоритм наступний:

1. Вимірювання діючих значень фазних струмів є важливою складовою моніторингу електричних машин, зокрема асинхронних електродвигунів. Цей процес дозволяє оцінити робочі характеристики двигуна, виявити аномалії у його роботі та запобігти можливим неполадкам – I_{Ai} , I_{Bi} , I_{Ci} .

2. Середньоквадратичне діюче значення струму на i -ій ділянці часу може бути розраховано за формулою:

$$I_{ci} = \sqrt{\frac{I_{Ai}^2 + I_{Bi}^2 + I_{Ci}^2}{3}}, \quad (4.13)$$

3. Коефіцієнт завантаження електродвигуна на i -ій ділянці часу можна розрахувати за формулою:

$$k_{zi} = \frac{I_i}{I_n}, \quad (4.14)$$

4. Коефіцієнт перетворення енергії на i -ій ділянці часу можна розрахувати за формулою:

$$k_{ni} = \frac{a + k^2}{a + 1},$$

a – коефіцієнт втрат, формула $a = \Delta P_{ch} / \Delta P_{mn}$, (відношення номінальних втрат в сталі (магнітопроводі) до номінальних втрат у міді (проводах ЕД));

k – кратність сили електричного струму асинхронного електродвигуна до номінального значення того самого асинхронного електродвигуна.

5. Стале перевищення температури ізоляції обмотки електродвигуна на i -ій ділянці часу можна розрахувати за формулою:

$$\tau_{yi} = k_{\pi i} \tau_n,$$

τ_n - номінальне перевищення температури ізоляції асинхронного електродвигуна даного досліджуваного класу, °C.

6. Поточне перевищення температури обмотки статора на i -ій ділянці часу можна розрахувати за формулою:

$$\tau_i = \tau_{iy}(1 - e^{-t/T_9}) + \tau_{inoc} e^{-t/T_9}, \quad (4.15)$$

де τ_{iy} - стале перевищення температури обмотки проводу асинхронного електродвигуна на i -ій ділянці часу, °C;

T_9 - еквівалентна постійна часу нагріву досліджуваного асинхронного електродвигуна, °C;

τ_{inoc} - початкове перевищення температури обмотки досліджуваного асинхронного електродвигуна, °C;

τ_i - поточне перевищення температури обмотки досліджуваного асинхронного електродвигуна на i -ій ділянці часу, °C;

Δt - інтервал часу для досліджуваного асинхронного електродвигуна, с.

7. Вимірюється температура навколишнього середовища де перебуває та працює досліджуваний асинхронний електродвигун – ϑ_{cp} .

8. Коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції обмотки асинхронного електродвигуна на i -ій ділянці часу:

$$k_{epi} = e^{\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\tau_{yi} + \vartheta_{cp} + 273} \right)} m^c n^\eta \quad (4.16)$$

де θ_n - абсолютна номінальна температура, що відповідає класу ізоляції проводу обмотки статора досліджуваного асинхронного електродвигуна, К;

ϑ_{cp} - температура навколишнього середовища в якому перебуває досліджуваний електродвигун, °С.

B - показник, що характеризує ізоляцію обмотки асинхронного електродвигуна даного класу, К.

m – постійний коефіцієнт (хімічно-активне середовища) в якому перебуває досліджуваний електродвигун.

c – концентрація агресивного агента в якому перебуває досліджуваний електродвигун, у відносних одиницях.

n – постійний коефіцієнт (вологи) в якому перебуває досліджуваний електродвигун,.

η – відносна вологість середовища в якому перебуває досліджуваний електродвигун.

Таким чином, розроблено математичний алгоритм функціонального діагностування електродвигуна на основі витрат ресурсу ізоляції. Цей алгоритм включає кілька етапів, які дозволяють систематично оцінити стан ізоляційних матеріалів та ефективність роботи електродвигуна в умовах експлуатації.

Етапи алгоритму:

1. Збір даних: Вимірювання дійсних значень фазних струмів електродвигуна за допомогою спеціалізованих датчиків. Фіксація температури навколишнього середовища та температури електродвигуна.
2. Розрахунок середньоквадратичного струму: Обчислення середньоквадратичного значення струму для кожної ділянки часу.
3. Обчислення коефіцієнта завантаження: Розрахунок коефіцієнта завантаження електродвигуна за формулою, яка порівнює середньоквадратичне значення струму з номінальним значенням.

4. Оцінка швидкості теплового зношення: Використання коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції для визначення швидкості теплового зношення ізоляції в залежності від робочих умов.
5. Аналіз результатів: Порівняння отриманих значень з допустимими межами для діагностики стану ізоляції. Визначення необхідності в обслуговуванні або ремонті електродвигуна на основі аналізу витрат ресурсу.
6. Прогнозування терміну служби: Моделювання терміну служби ізоляції на основі зібраних даних та визначення потенційних ризиків.

Цей математичний алгоритм є потужним інструментом для діагностики стану електродвигуна, що дозволяє оперативно виявляти можливі проблеми і запобігати їх ускладненню. Застосування даного підходу допоможе підвищити ефективність експлуатації електродвигунів та знизити ризик їх відмови, що, в свою чергу, сприятиме ресурсозбереженню та зниженню витрат на обслуговування.

4.4 Розробка структурної схеми пристрою моніторингу режимів роботи асинхронного електродвигуна

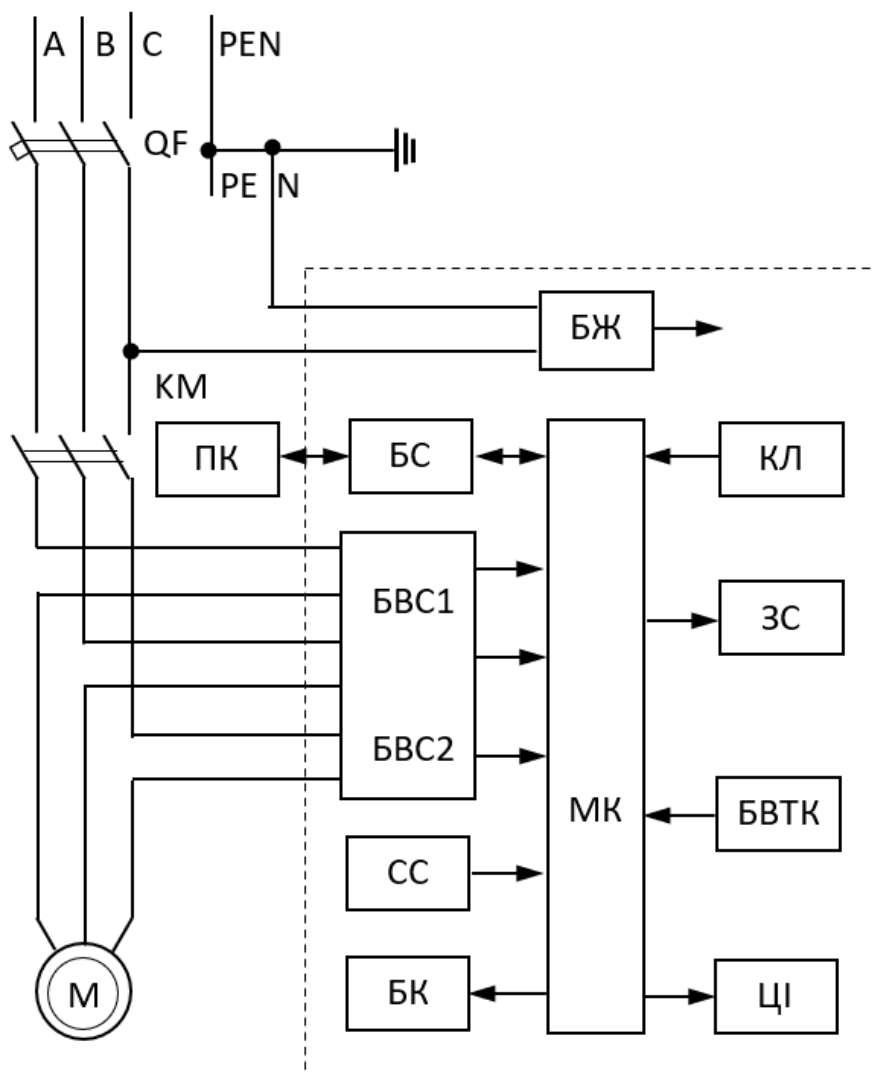
На основі структурної схеми діагностування пускових режимів асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором було розроблено структурну схему пристрою, що забезпечує діагностику режимів роботи асинхронних електродвигунів. Ця схема, представлена на рисунку 4.2, включає в себе різні елементи, які сприяють ефективному моніторингу та аналізу роботи електродвигунів у різних режимах експлуатації.

Пристрій моніторингу експлуатаційних режимів роботи асинхронного електродвигуна складається з кількох ключових елементів, які забезпечують ефективний моніторинг та аналіз його роботи. Основні компоненти системи включають:

1. Блок виміру фазних струмів (БВС) (X5): Цей блок відповідає за вимірювання фазних струмів електродвигуна. Вимірювана напруга,

пропорційна цим струмам, подається на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП) однокристального мікроконтролера (МК).

ЗРЕН ~50 Гц. 220/380 В



БЖ - блок живлення; БК - блок комутації; БВТ - блок вимірювання температури; МК - мікроконтролер; БВС - блок виміру фазних струмів; КЛ - клавіатура; БС – блок сполучення; ЗС - звукова сигналізація; СС - світлова сигналізація; ПК – персональний комп'ютер; М - електродвигун; КМ - магнітний пускач; QF - автоматичний вимикач; ЦІ - блок цифрової індикації.

Рисунок 4.2. – Структурна схема пристрою моніторингу

2. Блок вимірювання температури навколишнього середовища (БВТ) (Х6): Цей блок здійснює моніторинг температури навколишнього середовища, що є важливим параметром для оцінки стану ізоляції електродвигуна.

3. Однокристальний мікроконтролер (МК): Мікроконтролер обробляє дані, отримані від БВС та БВТ, і виконує розрахунки для визначення поточного коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції. Після порівняння з уставками, він формує керуючі сигнали для сигналізації про стан електродвигуна.
4. Блок цифрової індикації (ЦІ): Цей блок забезпечує візуальне відображення поточних значень фазних струмів, температури навколишнього середовища та коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції. Це дозволяє операторам оперативно реагувати на зміни в роботі двигуна.
5. Сигналізація: У разі перевищення нормативних значень коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції мікроконтролер активує світлову (СС) та звукову сигналізацію (ЗС). Якщо значення перевищує критичний поріг, система автоматично відключає електродвигун за допомогою виконавчого елемента (ВЕ).
6. Клавіатура (КЛ): Передбачена для вводу даних та управління пристроєм. Оператори можуть вводити параметри математичної моделі електродвигуна, а також дані про конструктивні та експлуатаційні умови.
7. Блок сполучення (порт) (БС) (Х2): Цей блок забезпечує обмін даними між пристроєм і персональним комп'ютером (ПК), що дозволяє зберігати та аналізувати дані.
8. Блок живлення (БЖ) (Х1): Пристрій живиться від мережі трифазного змінного струму 220/380 В через автоматичний вимикач (QF). Блок живлення перетворює змінний струм у постійний, необхідний для роботи всіх компонентів системи.
9. Блок комутації (БК) (Х4): Відповідає за управління магнітним пускатчем (КМ), який забезпечує включення електродвигуна в робочий режим і його вимкнення у випадку перевищення діагностичних критеріїв.

Загалом, цей пристрій є комплексним рішенням для моніторингу та діагностики асинхронних електродвигунів, що дозволяє підвищити ефективність їх експлуатації та запобігти потенційним аваріям, пов'язаним із перегрівом або зносом ізоляції.

4.5 Розробка принципової електричної схеми пристрою моніторингу

Схема електрична принципова пристрою діагностування експлуатаційних режимів роботи асинхронного електродвигуна, представлена на рис. 4.3, ілюструє архітектуру та ключові компоненти системи. Реалізація алгоритму роботи пристрою покладена на мікроконтролер DD2, в пам'яті якого зберігається програмне забезпечення, що відповідає за обробку даних і управління іншими елементами системи. Усі зовнішні компоненти підключаються до портів введення-виведення мікроконтролера, що забезпечує гнучкість в управлінні.

Завантаження програмного забезпечення в мікроконтролер здійснюється через інтерфейс JTAG, що реалізується через роз'єм X3, що забезпечує зручний доступ для програмування і налагодження.

Для живлення пристрою використовується стабілізоване джерело постійного струму 5 В, яке складається зі знижувального трансформатора Tr1, випрямного моста VD1 та стабілізатора напруги VR1. Індикація роботи джерела живлення та загального функціонування пристрою виконується за допомогою світлодіода LED1, що сигналізує про готовність системи до роботи.

АЦП мікроконтролера використовує джерело опорної напруги, яке виконано на мікросхемі DA4. Це дозволяє забезпечити точність вимірювань.

Блок виміру фазних струмів реалізований на монолітних інтегральних датчиках струму DA1 - DA3 (роз'єм X5), які функціонують на основі ефекту Холу. Ці датчики забезпечують гальванічну розв'язку між вхідними та вихідними ланцюгами. Вихідна напруга, що не перевищує 5 В, подається на виводи ADC0 - ADC2 АЦП мікроконтролера DD2, що дозволяє здійснювати моніторинг струмів електродвигуна в реальному часі.

Блок комутації (БК) (роз'єм X5) містить два електромеханічні реле K1 і K2, які управляються транзисторними ключами VT1 і VT2. Контакти реле K1, що нормально розімкнуті, призначені для пуску двигуна через блок клавіатури (КЛ), тоді як нормально замкнуті контакти реле K2 входять до ланцюга живлення котушки магнітного пускача електродвигуна, що забезпечує його відключення

від мережі у разі анормального режиму роботи або за технологічною необхідністю.

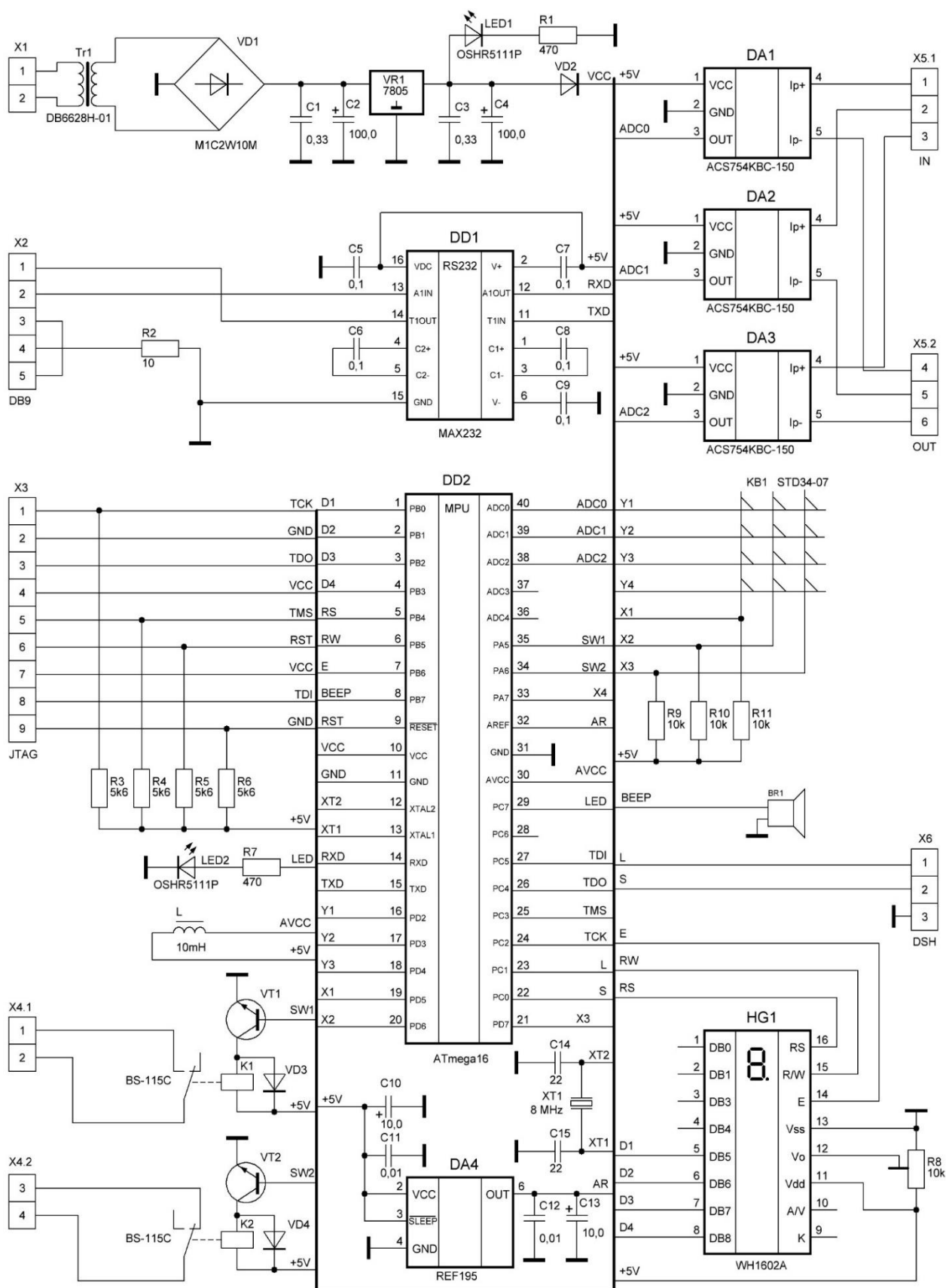


Рисунок 4.3. - Пристрій моніторингу режимів роботи асинхронного електродвигуна, схема принципово-електрична .

Блок цифрової індикації (ЦІ) виконаний на рідкокристалічному букво-цифровому індикаторі HG1 і підключається до мікроконтролера DD2 через чотирьохбітову шину даних D1 - D4. Це дозволяє візуально відображати поточні параметри роботи пристрою.

Клавіатура (КЛ) KB1 складається з дванадцяти кнопок мембранного типу, що підключаються до портів мікроконтролера DD2. Це забезпечує зручний інтерфейс для управління і введення даних.

Блок сполучення, виконаний на інтегральному перетворювачі рівня DD1, відповідає за зв'язок з персональним комп'ютером через стандартний роз'єм COM-порта DB9 (роз'єм X2). Обмін даними з мікроконтролером DD2 здійснюється по шині RXD - TXD, використовуючи вбудований універсальний асинхронний приймач UART мікроконтролера, що дозволяє передавати та отримувати інформацію з ПК.

Таким чином, представлений пристрій є ефективним рішенням для діагностики експлуатаційних режимів асинхронних електродвигунів, що дозволяє своєчасно виявляти відхилення в роботі та запобігати можливим аваріям.

4.6 Висновки до четвертого розділу

У цьому розділі було виконано кілька важливих етапів, які сприяли створенню ефективної системи діагностування та захисту асинхронних електродвигунів.

По-перше, визначено критерії діагностування електродвигуна, зокрема коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції k_{ep} , що дозволяє оцінювати стан ізоляції в режимі реального часу.

По-друге, розроблено структурну схему функціонального діагностування асинхронного електродвигуна, що забезпечує систематичний підхід до моніторингу його роботи та можливих відхилень.

По-третє, створено математичну модель, яка дозволяє точно діагностувати витрати ресурсу ізоляції, що підвищує точність прогнозування та управління режимами роботи електродвигуна.

Таким чином, реалізація зазначених підходів і технологій у проектованому пристрої захисту електродвигунів забезпечить зниження ймовірності виходу з ладу майже на 5...7%, а також надасть можливість вчасно реагувати на небезпечні ситуації, зокрема, при перевищенні номінального струму та температури ізоляції статорної обмотки. Це, в свою чергу, дозволить максимально використовувати перевантажувальну здатність двигуна в межах допустимих температурних значень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Експлуатаційна надійність асинхронних електродвигунів залишається недостатньо високою, що зумовлено недостатнім врахуванням експлуатаційних впливів на їх роботу. Основними факторами, які негативно впливають на надійність електродвигунів, є перевантаження на валу, коливання напруги, асиметрія живлення, неповнофазний режим, підвищена температура довкілля та погіршення умов охолодження. Ці експлуатаційні дії можуть діяти як окремо, так і в комбінації, що додатково ускладнює ситуацію.

У ході дослідження було проведено детальний аналіз причин відмов електродвигунів, який показав, що найслабшою ланкою є ізоляційна конструкція, зокрема ізоляція обмоток. Сучасні методи контролю та діагностування АД зазвичай не враховують всі експлуатаційні фактори, зосереджуючись лише на одному з них. Пристрої захисту, які зазвичай реалізують функцію відключення, призводять до зупинок технологічних процесів, що спричиняє збитки.

На основі проведеного аналізу визначені ключові етапи розвитку зносу ізоляції електродвигуна під впливом експлуатаційних дій. Процес витрати ресурсу ізоляції АД залежить від режимних чинників, таких як момент опору на валу, величина і асиметрія підведеної напруги, а також конструктивних параметрів, включаючи номінальну напругу і момент. Загальний процес зносу ізоляції складається з кількох компонентів: теплового зносу, термомеханічного зносу, дії електродинамічних сил, вібрацій, агресивного середовища і вологості, а також комутаційних перенапружень.

Діагностичні ознаки, що свідчать про розвиток ушкоджень АД, включають підвищений споживаний струм, нагрів обмоток і сталі, вібрацію корпусу, вологість і агресивність навколишнього середовища. В якості основного параметра для діагностування обрано витрату ресурсу ізоляції. Дослідження показало, що руйнування ізоляції відбувається через нагрівання, механічні

зусилля, вплив вологи та агресивних середовищ, причому ці чинники можуть діяти як окремо, так і в комплексі.

З отриманих результатів видно, що витрата ресурсу ізоляції має експоненціальний характер в залежності від коефіцієнта використання ресурсу, завантаження і температури навколишнього середовища. Існуючі методи обслуговування АД, зокрема планово-профілактичне і планово-діагностичне обслуговування, не забезпечують контролю за поточним станом елементів конструкції. Безперервне діагностування, яке базується на стратегії раннього попередження, може суттєво підвищити ефективність контролю зносу ізоляції.

На основі дослідження визначено критерії діагностування АД — коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції k_{ep} . Розроблено структурну схему функціонального діагностування та математичну модель діагностування витрати ресурсу ізоляції.

Розроблений пристрій захисту електродвигунів сприяє зменшенню виходу з ладу, а також можливості видавати сигнали при перевищенні номінального струму чи відключати двигун у випадках небезпечного підвищення струму або температури ізоляції статорної обмотки. Ці заходи дозволять підвищити експлуатаційну надійність АД і зменшити ризики, пов'язані з їх експлуатацією.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В.В. Овчаров // – К.: УСХА, 1990. – 168 с.
2. Єрмолаєв С.О., Мунтян В.О., Яковлев В.Ф. Експлуатація і ремонт електрообладнання та засобів автоматизації / За редакцією С.О. Єрмолаєва. -К: Урожай, 2003. -543 с..
3. Калитвянский В.И. Общие закономерности теплового старения полимерных диэлектриков / В.И. Калитвянский // Электричество. – 1955. – № 3. – С, 57 – 61.
4. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник /А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, О. Р. Пастух. – Київ.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 456 с
5. Бахрушин В.Є. Математичні основи моделювання систем: Навчальний посібник для студентів. - Запоріжжя: Класичний приватний університет, 2009. – 224 с.
6. Денисенко М.А. Спеціальні питання електропостачання: навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2009 – Ч. I.: Вибір елементів електропостачальних систем на основі стохастичного моделювання процесів, що відбуваються в них. - 288 с.
7. Широков О.Г., Зализный Д.И. Тепловые схемы замещения электроэнергетический устройств // Наукоемкие технологии. – 2008. - №2. – с. 63-67.
8. Мишин В.Н. Моделирование аварийных режимов электродвигателей в сельском хозяйстве/В.Н.Мишин И.В.Собор. – Кишинев: Штиинца, 1991.– 127с
- 9.А. с. 1394319. СССР, МКИ 4 Н02 Н7/08. Устройство для защиты асинхронного электродвигателя от аномальных режимов работы / В.Я. Жарков (СССР). – № 3985209/24-07; заявл. 09.12.85; опубл. 07.05.88, Бюл. № 17.
- 10.А. с. 1117763. СССР, МКИ 4 Н02 Н7/08. Устройство для защиты асинхронного электродвигателя от перегрузки / В.Я. Жарков (СССР). – № 3587596/24-07; заявл. 10.05.83; опубл. 07.10.84, Бюл. № 37.

11. Сыч И.П. Совершенствование тепловой защиты электродвигателей в сельских сетях / И.П. Сыч // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1980. – № 3. – С. 29-31.

12. А. с. 1557620. СССР, МКИ 4 Н02 Н5/04. Устройство для тепловой защиты трехфазного электродвигателя / В.П. Калявин, А.В. Мозгалеvский, Д.Н. Палишкин (СССР). – № 4458233/24-07; заявл. 19.05.88; опубл. 15.04.90, Бюл. №14.

13. А. с. 1772861. СССР, МКИ 4 Н02 Н5/04 Устройство для тепловой защиты трехфазных асинхронных электродвигателей / В. М. Ходырев, Ф.Г. Марьяхин (СССР). – № 4867698/07; заявл. 20.09.90; опубл. 30.10.92, Бюл. № 40.

14. Курашкін С.Ф. Безупинне діагностування теплових процесів асинхронних електродвигунів заглибних насосів / С.Ф. Курашкін, В.В. Овчаров // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 1998. – Вип. 1, Т. 7. – С. 7-10.

15. Курашкін С.Ф. Теоретичні передумови застосування операторного методу розрахунку електричної моделі теплової схеми заміщення електродвигуна / С.Ф. Курашкін // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2000. – Вип. 1, Т. 17. – С. 85-88.

16. Курашкін С.Ф. Математична модель нагріву заглибного електродвигуна / С.Ф. Курашкін // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2001. – Вип. 1, Т. 19. – с. 105-108.

17. Степин Ю.А. Тепловой расчет асинхронного электродвигателя при несимметрии напряжений по методу эквивалентных тепловых схем / Ю.А. Степин // Повышение эксплуатационной надежности силового сельскохозяйственного электрооборудования. – К.: УСХА, 1987. – С. 36-40.

18. Овчаров С.В. Исследование потерь мощности в асинхронном электродвигателе / С.В. Овчаров, Р.В. Телюта // Проблемы энергосбережения та енергозбереження в АПК України: Збірник наукових праць. – 2009. – С. 53-57.

19. Белов А.В. Конструирование устройств на микроконтроллерах / А.В. Белов. – СПб.: Наука и Техника, 2005. – 256 с.

20. Курашкін С.Ф. Визначення параметрів теплової схеми заміщення заглибного електродвигуна / С.Ф. Курашкін, І.О. Попова // Електрифікація та

автоматизація сільського господарства. Науково-виробничий журнал. – 2004. – № 1 (6). – С. 39-42.

21. Курашкін С.Ф. Діагностування перетворення електричної енергії в заглибному електродвигуні / С.Ф. Курашкін, С.В. Овчаров, А.В. Островский // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – Вип. 15. – С. 153-157.

22. Курашкін С.Ф. Математична модель і пристрій діагностування експлуатаційних режимів роботи електродвигуна заглибного насосу/ С.Ф. Курашкін // Вісник Харківського національного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 102. – С. 131-132.

23. Белов А.В. Создаем устройства на микроконтроллерах / А.В. Белов. – СПб.: Наука и Техника, 2007. – 304 с.

24. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С, Сторожук В. М. та ін. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / За ред. канд. техн. наук, доцента В. Ц. Жидецького. - Львів, Афіша, 2000 - 352 с.

ДОДАТОК

Додаток А. ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Заходи з охорони праці

А.1.1 Небезпечні і шкідливі виробничі фактори.

Небезпечні й шкідливі виробничі фактори підрозділяються по природі дії на фізичні, хімічні, біологічні й психофізіологічні (за ДСТ 12.0.003-74). По заводу а саме в його об'єктах наявні та можливі наступні небезпечні і шкідливі виробничі фактори .

1. Фізичні фактори : машини, що рухаються, і механізми, рухливі частини виробничого встаткування, що пересуваються вироби, заготовки, матеріали, що руйнуються і конструкції; підвищена або знижена температура поверхонь устаткування, матеріалів та повітря робочої зони; підвищені на робочому місці рівні шуму, вібрації, інфразвукових коливань, ультразвуку; підвищена або знижена вологість, рухливість або іонізація повітря; підвищений рівень іонізуючого випромінювання в робочій зоні; підвищене значення напруги в електричному колі, замикання яке може пройти через тіло людини; недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла й знижена контрастність; пряма й відбита освітленість; підвищена пульсація світлового потоку; гострі краї, зазубреність й шорсткість на поверхнях заготівель, інструментів і встаткування; розташування робочого місця на значній висоті щодо поверхні землі (підлоги); невагомість.

2. Хімічні фактори по характері впливу на організм людини підрозділяються на: загальотоксичні - викликають отруєння всього організму (окис вуглецю, свинець, ртуть, миш'як й ін.); подразнюючі - викликають роздратування дихального тракту й слизових оболонок (хлор, аміак, ацетон і ін.); сенсibiliзуючі - діють як алергени (формальдегід та ін.); канцерогенні - викликають ракові захворювання (азбести); мутагенні - приводять до зміни спадкоємної інформації (свинець, марганець); впливові на репродуктивну (дітородну) функцію (ртуть, свинець ін.).

3. *Біологічні фактори* включають наступні біологічні об'єкти: патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, гриби, найпростіші) і продукти їхньої життєдіяльності; макроорганізми (рослини й тварини) практично відсутні.

4. *Психофізіологічні фактори* залежать від ваги й напруженості праці.

На безпеку праці працівника впливають наступні фактори: увага - зосередженість діяльності суб'єкта в цей момент на якому-небудь об'єкті (предметі, події, міркуванні й т.д.). Сприйняття - цілісне відбиття предметів, ситуацій і подій, що виникає при безпосередньому впливі фізичних подразників на рецепторні поверхні органів почуттів. Відчуття - відбиття властивостей предметів об'єктивного миру, що виникає при їхньому безпосередньому впливі на рецептори. Пам'ять (короткочасна, довгострокова, оперативна) - процеси організації й збереження минулого досвіду, що роблять можливими його повторне використання в діяльності людини. Працездатність - потенційна можливість індивіда виконувати доцільну діяльність на заданому рівні ефективності протягом певного часу. Можна виділити максимальну, оптимальну й знижену працездатність. У процесі діяльності рівень працездатності змінюється. Втома - тимчасове зниження працездатності під впливом тривалого впливу навантаження. Емоції - психічне відбиття у формі безпосереднього упередженого переживання життєвого змісту явищ і переживань.

А.1.2 Технічні заходи для забезпечення електробезпеки

Таблиця А.1 Технічні заходи для забезпечення електробезпеки

Для забезпечення електробезпеки використовують окремо або в поєднанні такі технічні заходи:	Захисне заземлення - навмисне електричне з'єднання із землею металевих струмопровідних частин, що можуть опинитися під напругою, за допомогою природних штучних або змішаних заземлювачів
	Занулення - навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих струмонепровідних частин, які можуть опинитися під напругою (корпуси електроустаткування, кабельні конструкції, сталеві труби тощо)
	Зрівнювання потенціалів - досягнення рівності потенціалів провідних частин шляхом електричного з'єднання між собою

продовження таблиці А.1

Для забезпечення електробезпеки використовують окремо або в поєднанні один з одним такі технічні заходи:

Мала напруга (не більше 42 В) - для живлення електроприймачів невеликої потужності

Захисне відімкнення - забезпечує автоматичне відімкнення електроустановки у разі виникнення в ній небезпеки ураження людини струмом. Використовують, коли інші захисні заходи ненадійні, їх важко здійснити, дорого і коштують, до безпеки обслуговування висувають підвищені вимоги, у пересувних електроустановках, мережах до 1000 В, для ручних-електроінструментів. Вимоги до обладнання захисного відімкнення: висока чутливість, малий час відімкнення, селективність дії, здатність здійснювати самоконтроль справності, надійність

Вирівнювання потенціалів - зниження напруги дотику або напруги кроку шляхом укладання в землю чи провідну підлогу або на їх поверхні провідних частин, приєднаних до заземлюваного пристрою

Подвійна ізоляція струмопроводів (робоча та додаткова) захист від дотику до частин, що перебувають під напругою, *Робоча ізоляція* - ізоляція струмопровідних частин і електроустановки. *Додаткова* - виготовлення корпусу із ізоляційного матеріалу (електропобутові прилади)

Огороджу вальні пристрої - призначені для тимчасового огороження струмопровідних частин і запобігання помилковим операціям з комутаційною апаратурою (ізоляційні накладки, ковпаки, переносні заземлення (заземлювачі), щити, клітки, плакати).і бувають суцільні (у вигляді кожухів та кришок використовують в електроустановках напругою до 1000 В) і сітчасті - в електроустановках напругою до 1000 В та вище

Попереджувальна (звукова та світлова) сигналізація; блокування застосовується в електроустановках напругою понад 220 В, в яких часто ведуть роботи на струмопровідних частинах, що огорожують і забезпечує, зняття напруги зі струмопровідної частини електроустановки під час проникнення до неї. *Механічне блокування* використовують в електричних апаратах (рубильниках, автоматах) і виконують за допомогою замків, стопорів, защіпок та інших механічних пристроїв, які стопорять поворотну частину механізму у відімкненому стані. *Електричне блокування* здійснює розрив мережі контактами, що встановлені на дверях огорожу-

продовження таблиці А.1

Для забезпечення електробезпеки використовують окремо або в поєднанні один з одним такі технічні заходи:

вальних пристроїв, кришках і дверцятах кожухів і забезпечує відімкнений напруги за такого розчинення дверей, щоб людина не змогла потрапити за огороження до струмопровідних частин безпосередньо сама або за допомогою інструмента

Електромагнітне блокування здійснюється за допомогою спеціальних електромагнітних замків

Знаки безпеки - для привернення уваги працівників до безпосередньої небезпеки, наказу й дозволу певних дій з метою забезпечення безпеки, а також отримання необхідної інформації. Всі знаки безпеки встановлюють у місцях, перебування в яких пов'язано з можливою небезпекою для працівників, а також на виробничому устаткуванні, що є джерелом такої небезпеки.

Застережні знаки призначені для попередження працівників про підвищену небезпеку. Вивішують такі знаки у вигляді плакатів на захисних засобах, на переносних щитах *Настановні знаки* призначені для дозволу певних дій працівників тільки під час виконання конкретних вимог безпеки праці (наприклад, обов'язкове застосування спеціальних засобів Індивідуального захисту працівників, вжиття заходів щодо забезпечення безпеки праці), вимог пожежної безпеки і для показу евакуаційних шляхів

Вказівні знаки вказують місце знаходження різних об'єктів і пристроїв, пунктів медичної допомоги, складів, майстерень, вогнегасників тощо

Електрозахисні засоби призначені для захисту персоналу, який обслуговує електроустановки: *ізолювальні* (діелектричні рукавиці, боти, калоші, інструмент з ізоляційними ручками тощо), *огорожувальні* (переносні огороження, заземлення тощо) та *запобіжні* (пояси, і захисні окуляри тощо) *Основні засоби індивідуального захисту* - засоби захисту, ізоляція яких довготривалий час витримує робочу напругу і які дозволяють доторкатися до струмопровідних частин, що перебувають під напругою. Ці засоби надійно ; ізолюють та витримують напругу мережі, обладнання, дають можливість працювати з ними. В електроустановках напругою до 1000 В до основних електрозахисних засобів належать: ізоляційні штанги;

ізоляційні та електровимірювальні обценьки; показчики напруги; діелектричні рукавиці; інструмент з ізольованими ручками. *До додаткових засобів електрозахисту* в електроустановках до 1000 В належать: діелектричні калоші, килимки; переносне заземлення; огорожувальні пристрої; плакати та знаки безпеки

7.3 Розрахунок електробезпекових характеристик.

Обчислити струм замикання на землю, напругу дотику і величину струму, який протікає по тілу людини при її доторкуванні до електродвигуна 2 (рис. 7.1).

Дані: $U_{\phi} = 220 \text{ В}$, - фазна напруга; $R_o = 4 \text{ Ом}$, - опір заземлення нейтралі; $R_z = 1 \text{ Ом}$, - опір заземлення електродвигуна; $R_{\text{люд}} = 1500 \text{ Ом}$, - опір тіла людини; $z_{mp} = 0,30 \text{ Ом}$, - опір обмоток силового трансформатора; $z_{\phi} = 0,35 \text{ Ом}$, - опір фазного проводу; $z_o = 0,4 \text{ Ом}$, - опір нульового проводу; вид захисту – автоматичний вимикач; тип електродвигуна - 4A100S2Y3.

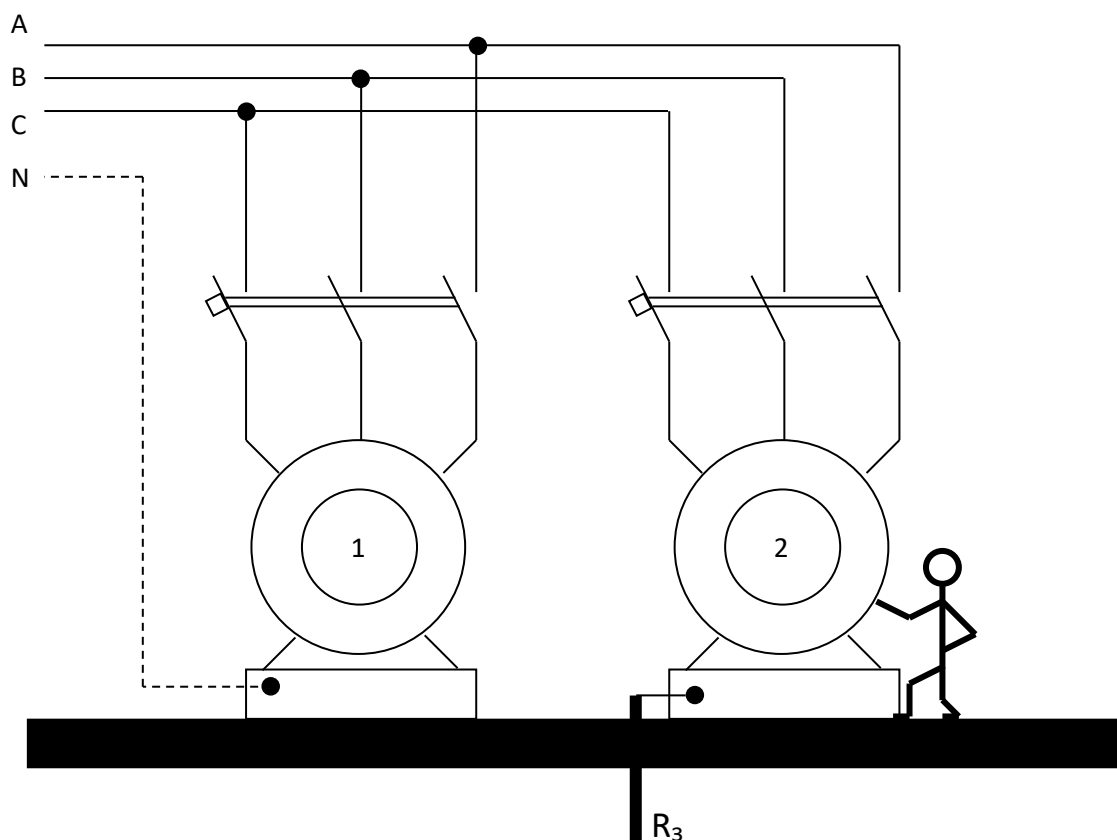


Рисунок А.1 - Схема установки.

Величину струму однофазного короткого замикання електродвигуна 1 визначають за формулою, А:

$$I_{\text{к.з.}}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{z_n + \frac{z_{mp}}{3}} = \frac{220}{0,75 + \frac{0,3}{3}} = \frac{220}{0,85} = 258,82 \text{ А}$$

де, z_n - опір петлі, утвореної фазним та нульовим проводами, Ом.

$$z_n = z_\phi + z_o = 0,35 + 0,40 = 0,75 \text{ Ом}$$

z_{mp} - опір обмоток трансформатора, Ом.

Величину струму замикання на землю, А, електродвигуна 2 обчислюють за формулою.

$$I_3^{(1)} = \frac{U_\phi}{R_3 + R_o} = \frac{220}{1 + 4} = 44 \text{ А}$$

Напругу дотику, тобто величину напруги, В, під яку попадає людина при доторкуванні до корпусу електродвигуна 2 знаходять за формулою.

$$U_\partial = I_3^{(1)} \cdot R_3 = 44 + 1 = 45 \text{ В}$$

Струм, А, який протікає по тілу людини визначають.

$$I_{\text{люд}} = \frac{U_\partial}{R_{\text{люд}}} = \frac{45}{1500} = 0,03 \text{ А}$$

Струм 0,03 А знаходиться в межах порогового невідпускаючого струму (0,006 - 0,01 А) та порогового фібриляційного струму (0,08 – 0,1 А) - які вважаються смертельними для тіла людини.

Виберемо для захисту пристрій - автоматичний вимикач.

Таблиця 7.2. Характеристика електродвигуна.

Тип	$P_H, \text{кВт}$	$I_H, \text{А}$	$K_i = I_{\text{пуск}} / I_H$
4A100S2Y3	4,0	8,5	7,0

Для теплового розчіплювача автоматичного вимикача

Тепловий розчіплювач вибирають:

$$I_{уст.т} \geq k_{кт.} \cdot I_p,$$

$$I_p = I_{н.дв} = 8,5 \text{ А}$$

$$I_{уст.т} \geq k_{кт.} \cdot I_p = 1,1 \cdot 8,5 = 9,35 \text{ А}$$

де $I_{уст.т}$ – струм установки теплового розчіплювача, А;

$k_{кт}$ – коефіцієнт надійності, враховуючий неточність по струму спрацювання теплового розчіплювача (приймаємо 1,1...1,3);

I_p – розрахунковий струм електродвигуна, А, $I_p = I_{н.дв}$, табл. 7.2;

Вибираємо автоматичний вимикач серії *ВА51Г25-34*

Номінальним струмом $I_{a.ном} = 25 \text{ A}$;

Номінальним струмом теплового розчіплювача $I_{н.р.} = 10 \text{ A}$.

Перевірка дії захисту апаратури від короткого замикання.

Для теплового розчіплювача автоматичного вимикача

$$I_{к.з.}^{(1)} \geq 3I_{н.р.}$$

$$3I_{н.р.} = 3 \cdot 10 = 30 \text{ A}$$

$$258,82 \geq 30 \text{ A}$$

де $I_{н.р.}$ - струм уставки теплового розчіплювача вимикача, А.

Для електромагнітного розчіплювача автоматичного вимикача

Визначаємо струми електродвигуна, за розрахунковий струм приймаємо його номінальний струм, тобто $I_p = I_{н.дв}$, а максимальний короткочасний струм визначаємо за формулою:

$$I_{макс} = k_i \cdot I_{н.дв}$$

$$I_{макс} = k_i \cdot I_{н.дв} = 7,0 \cdot 8,5 = 59,5 \text{ A}$$

де k_i – кратність пускового струму електродвигуна ([24]. табл.7.2);

$I_{н.дв}$ – номінальний струм електродвигуна, А.

Перевірка дії захисту апаратури від короткого замикання

Визначаємо струм уставки електромагнітного розчіплювача

$$I_{уст.е} \geq k_{ке} \cdot I_{макс},$$

$$k_{ке} \cdot I_{макс} = 1,4 \cdot 59,5 = 83,3 \text{ A}$$

де $I_{уст.е}$ – струм установки електромагнітного розчіплювача, А;

$k_{ке}$ – коефіцієнт надійності, враховуючий неточність по струму спрацювання електромагнітного розчіплювача (приймаємо $k_{ке} = 1,25$ для автоматичних вимикачів номінальним струмом більше 100А; приймаємо $k_{ке} = 1,4$ для автоматичних вимикачів номінальним струмом до 100А);

Приймаємо уставку по струму спрацювання в зоні короткого замикання:

$$I_{уст.е} = 14 \cdot I_{н.р.} = 14 \cdot 10 = 140 \text{ A}$$