

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерно-технологічний факультет**  
**Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

До захисту  
Допускається  
Завідувач кафедри енергетики та  
електротехнічних систем  
\_\_\_\_\_  
доцент Чепіжний А.В.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Аналіз методів та розробка системи захисту  
асинхронних двигунів від аварійних режимів роботи»

Виконав

  
(підпис)

Стегній В.О.  
(прізвище, ініціали)

Група

ЕТЕС 2301-2м

(Науковий) керівник:

  
(підпис)

Кравченко В.О.  
(прізвище, ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри енергетики та  
електротехнічних систем

доцент Чепіжний А.В.  
(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

« 11 » 03 2024 року

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ  
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Стегній Віталій Олександрович

(прізвище, ім'я та по батькові)

**1. Тема роботи:** Аналіз методів та розробка системи захисту асинхронних двигунів від аварійних режимів роботи

керівник роботи: Кравченко Володимир Олексійович, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджено наказом по закладу вищої освіти від «26» 02 2024 р. № 572/ос

**2. Термін подання здобувачем закінченої роботи** «11» 11 2024 р.

**3. Вихідні дані до роботи** технічні характеристики промислових асинхронних електродвигунів, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти.

**4. Зміст пояснювальної записки** (перелік питань, що підлягають розробці):

1 Системи захисту асинхронних двигунів (літературний огляд).

2 Система теплового захисту асинхронного електродвигуна.

3 Експериментальне вивчення методу теплового захисту асинхронного електродвигуна

4 Охорона праці.

5 Економічне обґрунтування.

Висновки

Список використаної літератури

## 5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Презентаційний матеріал виконаний в програмі Power Point


## 6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
Охорона праці	доц. Василенько О.О.	09.12.24
Екологічне об'єднання	ст. викл. Шапко С.В.	05.12.2024

## КАЛЕНДАРНИЙ ГРАФІК

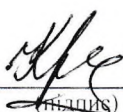
№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 15.08.2024 р.	МФ
2	Складання плану роботи	до 23.08.2024 р.	МФ
3	Написання вступу	до 26.08.2024 р.	МФ
4	Підготовка розділу «Розділ 1»	до 28.08.2024 р.	МФ
5	Підготовка розділу «Розділ 2»	до 16.09.2024 р.	МФ
6	Підготовка розділу «Розділ 3»	до 14.10.2024 р.	МФ
7	Підготовка розділу «Розділ 4»	до 21.10.2024 р.	МФ
8	Написання висновків та пропозицій	до 28.10.2024 р.	МФ
9	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2024 р.	МФ
10	Подання роботи на рецензування	до 05.11.2024 р.	МФ
11	Подання до попереднього захисту	до 12.11.2024 р.	МФ

Здобувач вищої освіти

  
(підпис)

(Стегній В.О.)  
(прізвище, ініціали)

(Науковий) керівник  
дипломної роботи

  
(підпис)

(Кравченко В.О.)  
(прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Аналіз методів та розробка системи захисту асинхронних двигунів від аварійних режимів роботи. Магістерська робота / Стегній Віталій Олександрович – Суми: СНАУ, 2024 р. – 55 с.

Розглянуто конструкція та режими роботи асинхронних електродвигунів. Проведено аналіз методів захисту асинхронних двигунів від аварійних на ненормальних режимів роботи під час експлуатації.

Розроблена математично-фізична модель системи теплового захисту асинхронного двигуна. Експериментально перевірена запропонована система та проведено аналіз результатів та порівняно з іншими системами захисту.

Заходи з охорони праці та аналіз небезпечних факторів під час експлуатації та експериментальних досліджень асинхронних двигунів були наведені відповідно вимог та нормативної бази чинного законодавства України. За допомогою штучного навантаження електродвигуна розроблено запобіжні методи захисту обслуговуючого персоналу.

Проаналізовано економічне обґрунтування впровадження запропонованої системи теплового захисту асинхронного електродвигуна та підтверджено ефективність застосування даної системи в промислово-виробничому секторі країни.

**Ключові слова:** асинхронний електродвигун, тепла система захисту, режим роботи, нагрів, обмотка, статор, ротор, коротке замикання.



5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	49
Висновок до розділу.....	51
ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	54

## **ВСТУП**

Асинхронні двигуни стали невід’ємною частиною сучасної промислової інфраструктури завдяки своїм численним перевагам, таким як простота конструкції, надійність, економічність і тривалий строк служби. Вони використовуються в різних галузях, від важкої промисловості до побутових приладів, що робить їх критично важливими для стабільної роботи виробничих процесів. Проте, попри свою надійність, асинхронні двигуни можуть потрапляти в аварійні режими роботи, які можуть викликати серйозні технічні та економічні наслідки, включаючи збої в процесах, зниження ефективності та великі витрати на ремонт і обслуговування.

Актуальність теми захисту асинхронних двигунів від аварійних режимів роботи зумовлена потребою забезпечення безперебійної та безпечної експлуатації промислових установок. Аварійні режими можуть виникати через різноманітні причини, такі як перепади напруги, перевантаження, дефекти в обмотках або збої в системах керування. Тому розробка ефективних методів і систем захисту є критично важливою для зниження ризиків та покращення загальної надійності двигунів. Оскільки в умовах швидкого розвитку технологій і збільшення складності промислових систем, традиційні методи захисту можуть виявитися недостатньо ефективними, виникає потреба в інноваційних підходах.

Наукові дослідження в цій галузі демонструють різноманітні підходи до вирішення проблеми. Наприклад, наукові роботи з даного напрямку виявили значний потенціал у застосуванні сенсорних технологій для моніторингу стану асинхронних двигунів, а дослідження показали ефективність використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування аварійних режимів і своєчасного реагування на них. Ці

дослідження відкрили нові горизонти для покращення систем захисту, але також показали наявність певних обмежень, таких як висока вартість реалізації та складність інтеграції нових технологій в існуючі системи.

Мета даної роботи полягає в системному аналізі існуючих методів захисту асинхронних двигунів від аварійних режимів і розробці нової інтегрованої системи захисту, яка забезпечить підвищену точність і швидкість реагування. Для досягнення цієї мети передбачено вирішення наступних завдань:

1. Проведення детального аналізу існуючих методів і технологій захисту асинхронних двигунів, зокрема, розгляд їх переваг та недоліків.

2. Розробка концепції нової системи захисту, яка інтегрує сучасні технології і підходи, зокрема сенсори нового покоління та алгоритми обробки даних.

3. Моделювання та експериментальне тестування запропонованої системи в лабораторних умовах для перевірки її ефективності і надійності.

4. Оцінка ефективності нової системи захисту в порівнянні з існуючими рішеннями, а також визначення її економічних і технічних переваг.

Для досягнення цих завдань будуть застосовані методи теоретичного аналізу, комп'ютерного моделювання, експериментального тестування та порівняльного аналізу. Специфічні методи включатимуть системний аналіз, моделювання на основі математичних і програмних інструментів, а також методи обробки та аналізу даних для створення ефективних алгоритмів захисту.

Предметом дослідження є асинхронні двигуни та системи захисту від аварійних режимів роботи. Робота складається з кількох основних розділів: огляд літератури, аналіз існуючих рішень, розробка концепції нової системи захисту, її моделювання та тестування, а також порівняльна оцінка результатів. Така структура дозволяє всебічно охопити тему, врахувати всі аспекти дослідження і запропонувати комплексне рішення для підвищення

надійності та безпеки асинхронних двигунів в умовах сучасної промислової практики.

## 1 СИСТЕМИ ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

Синхронні та асинхронні електродвигуни є основними типами електричних двигунів, які використовуються в різних галузях промисловості та побуті, і мають значні конструктивні відмінності.

Синхронні електродвигуни працюють на основі принципу синхронізації швидкості обертання ротора з обертаючим магнітним полем статора. Це означає, що ротор обертається з такою ж швидкістю, як і магнітне поле статора, яке створюється змінним струмом в обмотках статора. Основна частина синхронного двигуна — це статор, що має обмотки, через які проходить змінний струм і створює обертаюче магнітне поле. Ротор може бути постійним магнітом або мати обмотки, які живляться від зовнішнього джерела постійного струму. Синхронні двигуни зазвичай використовуються в ситуаціях, де потрібна висока точність швидкості обертання, таких як в генераторах електростанцій, високоточних сервоприводах, а також в промислових процесах, що потребують стабільної роботи без змін у швидкості.

Асинхронні електродвигуни, відомі також як індукційні двигуни, працюють за принципом індукції [1]. У цих двигунах магнітне поле, що створюється змінним струмом у статора, викликає індукційний струм у роторі. В результаті, ротор обертається з швидкістю, яка трохи менша за швидкість обертаючого магнітного поля (синхронна швидкість). У конструкції асинхронного двигуна статор містить обмотки, через які проходить змінний струм, створюючи обертаюче магнітне поле, тоді як ротор може бути короткозамкненим або обмотковим, без потреби у зовнішньому джерелі струму. Асинхронні двигуни є простішими і дешевшими в порівнянні з синхронними. Вони широко використовуються в побутових приладах, таких як пральні машини та холодильники, а також в промислових системах, включаючи конвеєри, вентиляторах і насосах.

Основна відмінність між синхронними та асинхронними електродвигунами [2] полягає в способі, яким ротор взаємодіє з магнітним полем статора. У синхронних двигунах ротор обертається синхронно з магнітним полем статора, що забезпечує постійну швидкість обертання незалежно від навантаження, за умови, що частота струму залишається стабільною. У асинхронних двигунах ротор обертається з деяким відставанням від магнітного поля статора, що призводить до зменшення швидкості обертання з підвищенням навантаження.

Ще однією ключовою відмінністю є система живлення. Синхронні двигуни потребують постійного струму для ротора, що може вимагати додаткових джерел енергії та ускладнює конструкцію. Водночас асинхронні двигуни не потребують додаткового джерела живлення для ротора, що спрощує їх конструкцію та знижує вартість. Асинхронні двигуни також мають тенденцію до зміни швидкості обертання в залежності від навантаження, тоді як синхронні двигуни підтримують сталу швидкість обертання.

Синхронні та асинхронні електродвигуни мають свої переваги та недоліки, які визначають їхню доцільність у різних застосуваннях.

### **1.1 Принцип роботи асинхронних електродвигунів**

Асинхронні електродвигуни, також відомі як індукційні двигуни, працюють на принципі електромагнітної індукції. Їх основна частина складається з статора (статорна обмотка) і ротора (обертової частини).

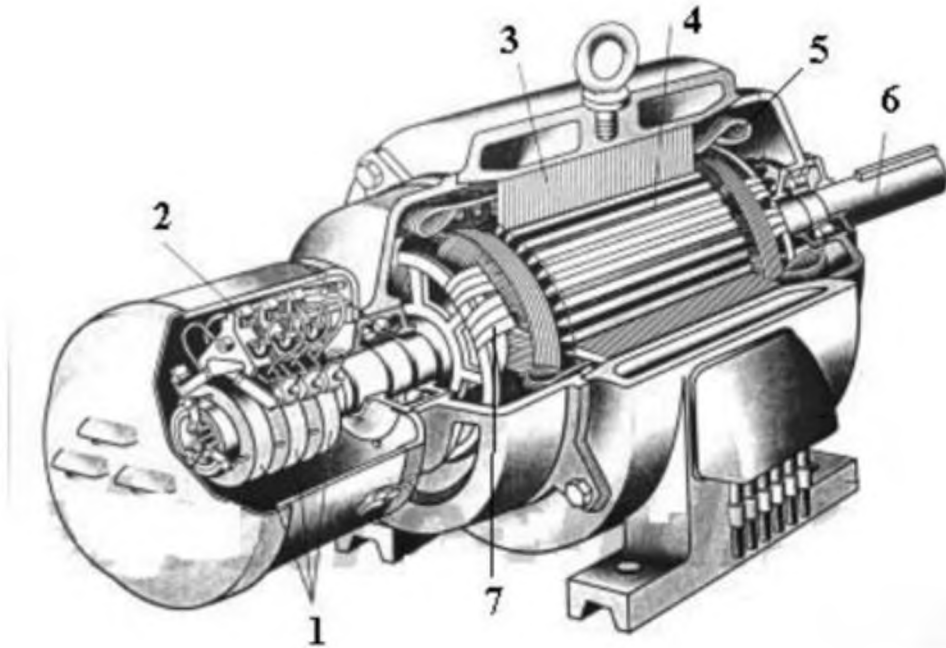


Рисунок 1.1 Асинхронний двигун із фазним ротором:

1 – кільця; 2 – щітки; 3 – осердя статора; 4 – осердя ротора; 5 – обмотка статора; 6 – вал; 7 – обмотка ротора.

Коли змінний струм проходить через обмотки статора, він створює обертове магнітне поле. Це поле обертається з певною частотою, яка визначається частотою змінного струму і кількістю полюсів статора.

Ротор, зазвичай виконаний у вигляді короткозамкненого проводу (наприклад, у конструкції «барабанного ротора»), знаходиться всередині статора. Коли обертове магнітне поле проходить через провідники ротора, воно індукуює в них електричний струм. Цей струм, в свою чергу, створює власне магнітне поле, яке взаємодіє з полем статора, призводячи до обертання ротора.

Однією з основних характеристик асинхронного двигуна є його "слідування" за обертовим полем статора. Розуміння цього принципу є ключовим: ротор завжди обертається повільніше, ніж обертове магнітне поле [26]. Різниця між частотою обертового поля і частотою обертання ротора називається ковзанням. Це ковзання необхідне для генерації моменту сили, який рухає ротор.

Асинхронні електродвигуни мають просту конструкцію, високу надійність і можуть працювати при різних навантаженнях, що робить їх дуже популярними в промисловості, побуті та багатьох інших сферах. Вони можуть працювати з однофазним або трифазним змінним струмом, зокрема трифазні двигуни є найпоширенішими через свою ефективність і здатність забезпечувати більшу потужність.

Окрім цього, асинхронні двигуни не потребують складних систем для запуску, і їх просто контролювати за допомогою зміни частоти живлення, що робить їх універсальними для різних застосувань.

## 1.2 Режими роботи асинхронних електродвигунів

Асинхронні електродвигуни можуть працювати в різних режимах, залежно від умов навантаження та управління. Основні режими роботи включають:

*Номинальний режим:* це стандартний режим роботи двигуна, коли він працює на номінальному навантаженні. У цьому режимі двигун забезпечує максимальну ефективність, а ковзання (різниця між частотою обертового поля і частотою обертання ротора) знаходиться в межах 2-5%. Двигун працює стабільно, забезпечуючи потрібну потужність без перегріву.

*Режим перевантаження:* у цьому режимі двигун працює з навантаженням, яке перевищує номінальне. Це може призвести до збільшення ковзання та зростання температури. Двигун може витримувати короточасні перевантаження, але тривала робота в цьому режимі може призвести до його пошкодження.

*Режим холостого ходу:* коли двигун працює без навантаження, він знаходиться в режимі холостого ходу. У цьому випадку обертання ротора відбувається з мінімальним ковзанням, а споживана потужність є дуже низькою. Двигун споживає лише енергію, необхідну для подолання втрат на тертя і магнітні втрати.

*Режим гальмування:* двигун може працювати в режимі гальмування, коли ротор обертається проти напрямку обертового магнітного поля. У цьому випадку двигун фактично стає генератором, перетворюючи механічну енергію на електричну. Цей режим корисний для швидкого зупинення механізмів.

*Режим реверсування:* асинхронні двигуни можуть змінювати напрямок обертання шляхом зміни послідовності фаз у трифазній мережі. Це дозволяє використовувати їх у системах, де потрібен реверсивний рух, наприклад, у конвеєрах або підйомниках.

*Режим частотного управління:* завдяки використанню перетворювачів частоти, асинхронні двигуни можуть працювати в широкому діапазоні частот, що дозволяє змінювати швидкість обертання ротора. Це робить двигуни дуже гнучкими у використанні, дозволяючи адаптувати їх під різні технологічні процеси.

### **1.3 Особливості аварійних режимів роботи асинхронних електродвигунів**

Аварійний режим роботи асинхронного електродвигуна виникає в ситуаціях, коли двигун зазнає несподіваних відхилень від нормальних умов експлуатації. Це може статися через різні причини, такі як перевантаження, коротке замикання, збої в системі живлення, механічні пошкодження або несправності в системах охолодження.

У аварійному режимі двигун може працювати в умовах, які не відповідають його проектним характеристикам, що призводить до кількох критичних моментів. По-перше, ковзання між обертовим полем і ротором може істотно зрости, що викликає підвищення температури. Якщо двигун працює на перевантаженні, він може перегріватися, що, у свою чергу, може призвести до руйнування ізоляції обмоток і виходу з ладу самого двигуна.

По-друге, в аварійному режимі можливі електричні перевантаження, які можуть викликати коротке замикання або зниження напруги. Це

негативно вплине на ефективність роботи не лише самого двигуна, але й на всю систему, до якої він підключений. Такі перевантаження можуть призвести до зупинки або навіть до пошкодження електричних компонентів.

Механічні проблеми, такі як знос підшипників або порушення роботи системи охолодження, також можуть вивести двигун в аварійний режим. Якщо підшипники зношуються, це може викликати вібрацію, що, у свою чергу, призводить до додаткового навантаження на ротор і може спричинити його деформацію.

Важливо відзначити, що багато сучасних асинхронних електродвигунів обладнані системами моніторингу, які можуть виявити відхилення в роботі двигуна, такі як підвищення температури, вібрацій або зміни в споживаній потужності. Ці системи можуть автоматично відключати двигун або сигналізувати про проблему, запобігаючи подальшим ушкодженням.

Отже, аварійний режим роботи асинхронного електродвигуна є критично важливим для забезпечення його безпеки та надійності. Ретельне моніторинг і своєчасне обслуговування можуть допомогти виявити потенційні проблеми до того, як вони призведуть до серйозних пошкоджень.

#### **1.4 Перелік наукових робіт з розробки систем захисту асинхронних двигунів**

У статті [3] описується розробка адаптивного онлайн-естиматора температури обмоток статора для асинхронних електричних машин. Стаття фокусується на створенні методики для точного та адаптивного оцінювання температури обмоток статора в реальному часі. Це важливо для забезпечення надійної роботи асинхронних електродвигунів, оскільки перегрів обмоток може привести до зниження їхнього терміну служби або навіть до поломки. Пропонується використання гібридної теплової моделі, яка поєднує в собі різні підходи до моделювання термічної поведінки електродвигунів. Ця модель дозволяє краще враховувати різні фактори, що впливають на

температуру обмоток статора, такі як навантаження, швидкість обертання, а також умови навколишнього середовища.

Розроблений метод включає адаптивний алгоритм, який дозволяє коригувати оцінки температури в залежності від реальних умов експлуатації. Це забезпечує високу точність вимірювань і можливість оперативного реагування на зміни в режимі роботи двигуна. Однією з ключових особливостей є можливість онлайн-оцінювання температури обмоток, що дозволяє здійснювати моніторинг в режимі реального часу. Це важливо для систем захисту та контролю, які можуть вчасно попереджати про перегрів і вживати заходів для запобігання можливим проблемам. У статті наведені результати випробувань та показано, як запропонована методика дозволяє покращити точність оцінювання температури обмоток статора. Вона також підкреслює можливі переваги в застосуванні цієї технології для підвищення надійності та довговічності асинхронних електродвигунів у різних промислових системах.

Загалом, стаття описує інноваційний підхід до моніторингу температури обмоток статора, який поєднує в собі сучасні теоретичні моделі і практичні рішення для досягнення високої точності та адаптивності в реальних умовах експлуатації електродвигунів.

Автори статті [4] розглядають проблему спрощення теплових моделей асинхронних електричних машин для використання в реле захисту від термічного перевантаження. Основною метою роботи є розробка та оптимізація спрощених теплових моделей асинхронних машин, які використовуються в реле захисту від термічного перевантаження. Це допомагає підвищити ефективність і швидкість роботи таких реле, які захищають електродвигуни від перегріву і можливих пошкоджень.

На риунку 1.1 зображені механічні та робочі характеристики асинхронного електродвигуна, які були використані під час дослідження.

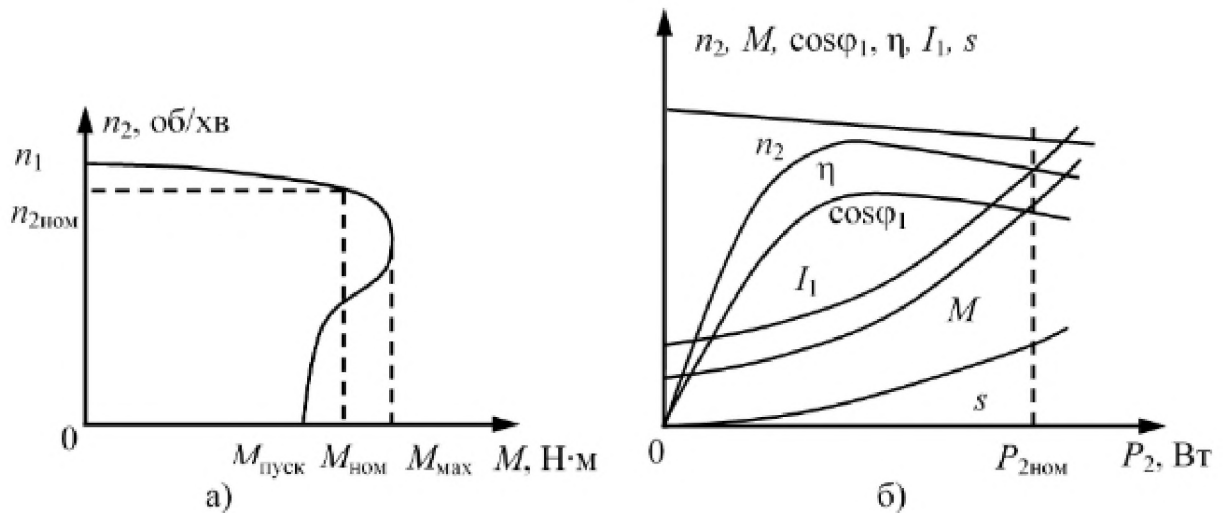


Рисунок 1.2 – Вид характеристик трифазного асинхронного двигуна:

а) – механічна; б) – робоча.

Характеристика механічної складової описує залежність швидкості обертання вала ротора  $n_1$ , відносно моменту валового навантаження  $M$ .

Робоча характеристика електродвигуна описує швидкість обертання ротора  $n_2$ , корисна потужність  $P_2$ , обертальний момент  $M$ , коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_1$ , ККД  $\eta$ , сила струму  $I_1$ .

Стаття пропонує підхід, заснований на використанні передавальних функцій для спрощення теплових моделей. Передавальні функції є інструментом для опису динамічних систем у частотній області, і їх застосування дозволяє спростити складні теплові моделі, зберігаючи при цьому необхідну точність для розрахунків і управлінських функцій.

Розглядаються методи зменшення складності теплових моделей, щоб забезпечити їх більш легке інтегрування в реле захисту. Це включає оптимізацію параметрів моделей, що дозволяє досягти балансу між точністю моделі та її складністю, що в свою чергу вплине на швидкість і надійність реле захисту. Стаття містить результати випробувань, що демонструють ефективність запропонованих методів у порівнянні з традиційними підходами. Автори аналізують точність спрощених моделей і їх вплив на роботу реле захисту, а також показують, як ці моделі можуть бути застосовані для реального захисту електричних машин від перегріву. Описані

моделі і методи мають практичне застосування в системах захисту електродвигунів у промисловості. Вони сприяють покращенню ефективності захисту від термічного перевантаження і допомагають запобігти пошкодженням машин через перегрів.

Стаття пропонує новий підхід до спрощення теплових моделей асинхронних машин з використанням передавальних функцій, що дозволяє підвищити ефективність і швидкість роботи реле захисту від перегріву. Результати дослідження демонструють, що спрощені моделі можуть забезпечити адекватний захист електричних машин при збереженні необхідної точності для практичних застосувань у промисловості.

У патенті [3] пропонується конкретний технічний засіб для контролю температури обмоток у електричних машинах, що є важливим для їх надійної та ефективної роботи. Патент описує пристрій, що призначений для точного вимірювання температури обмоток електричних машин. Важливою частиною пристрою є метод або конструкція, що забезпечує точність і надійність у вимірюванні температури, що критично для правильного функціонування електричних машин.

Робота вказує на особливості методу вимірювання температури, який може включати використання спеціальних датчиків, термопар або інших термометричних елементів, що інтегруються з обмотками електричної машини. Можливо, описуються конкретні способи кріплення датчиків і їх взаємодія з електричними обмотками. Пристрій призначений для використання в електричних машинах, де контроль температури є критичним для запобігання перегріву та забезпечення довговічності машини. Це може включати генератори, трансформатори, електродвигуни та інші електричні пристрої, де наявність надійного температурного моніторингу є важливим. Патент містить опис технічних рішень, які можуть включати конструктивні особливості пристрою, такі як розташування датчиків, тип використовуваних матеріалів, методи калібрування та способи інтеграції пристрою в електричну машину.

Запропоноване рішення може забезпечити підвищену точність вимірювань, надійність у роботі, а також можливість своєчасного виявлення і запобігання перегріву обмоток, що дозволяє уникнути можливих пошкоджень і зниження ефективності роботи електричних машин.

У статті [5] обговорюється розробка та впровадження активних систем захисту обмоток статора для змінних електродвигунів. Даний матеріал зосереджений на вдосконаленні систем захисту обмоток статора змінних електродвигунів (АС мотори) від перегріву. Метою є забезпечення більш ефективного і надійного захисту від термічного перевантаження, що є критичним для збереження довговічності та безпеки роботи електродвигунів. Описується концепція активного захисту, яка включає застосування спеціальних методів і технологій для моніторингу і контролю температури обмоток статора в реальному часі. Це дозволяє не лише виявляти перевищення температури, але і вживати відповідні заходи для запобігання перегріву, такі як регулювання навантаження або вимикання двигуна. У статті детально розглядаються різні методи і технології для реалізації активного захисту. Це може включати використання датчиків температури, системи моніторингу та контролю, а також алгоритми обробки даних, які дозволяють своєчасно реагувати на зміни температури і здійснювати коригування в роботі двигуна.

Розглядається можливість застосування запропонованих рішень у промислових системах, зокрема у паперовій та целюлозній промисловості, де електродвигуни є критичними для процесів виробництва. Надійний захист обмоток статора може допомогти уникнути аварій і зменшити витрати на обслуговування і ремонт. Наведені результати випробувань і ефективність запропонованих систем захисту. Показано, як активні системи можуть забезпечити кращу точність і швидкість реагування на перегрів, що підвищує загальну надійність і безпеку електродвигунів.

Стаття пропонує новий підхід до захисту обмоток статора змінних електродвигунів, зосереджуючи увагу на активних системах моніторингу і

контролю температури. Це забезпечує підвищену надійність і ефективність у запобіганні перегріву та зменшенні ризику поломок електродвигунів, що є важливим для промислових застосувань, де електродвигуни грають критичну роль.

В роботі [6] розглядається метод термічного захисту векторно-керованих асинхронних приводів, заснований на впорскуванні постійного струму.

Основною метою статті є розробка та оцінка методу термічного захисту для векторно-керованих асинхронних приводів, що використовує впорскування постійного струму. Це рішення спрямоване на покращення захисту приводів від перегріву, що може виникнути внаслідок перевантаження або несправностей. У статті детально описується метод впорскування постійного струму як засіб термічного захисту. Метод передбачає введення додаткового постійного струму в обмотки статора для моделювання умов перевантаження і оцінки термічних реакцій системи. Це дозволяє здійснювати контроль за температурними режимами і запобігати перегріву. Векторно-керовані приводи (векторне управління або поле-орієнтоване управління) забезпечують точне регулювання швидкості і крутного моменту асинхронних двигунів шляхом розділення керування струмами на компоненти, що керують магнітним полем і моментом. Стаття описує, як метод впорскування постійного струму інтегрується з векторним управлінням для забезпечення термічного захисту.

Стаття містить результати експериментальних досліджень, які демонструють ефективність застосованого методу. Оцінюється, як впорскування постійного струму впливає на термічний захист і як воно може бути використане для покращення надійності і безпеки роботи векторно-керованих приводів. Метод має практичне застосування в промислових системах, де використовуються векторно-керовані асинхронні приводи. Це включає різні типи промислових процесів і автоматизацію, де критично важливо забезпечити стабільну і безпечну роботу електродвигунів.

Ця робота пропонує новий підхід до термічного захисту векторно-керованих асинхронних приводів, використовуючи метод впорскування постійного струму. Це рішення дозволяє поліпшити контроль за температурними режимами електродвигунів, запобігти їх перегріву і підвищити загальну надійність системи. Результати дослідження підтверджують ефективність даного методу в умовах реальної експлуатації.

### **Висновок до розділу**

У цьому розділі було розглянуто основи роботи асинхронних електродвигунів, їх конструктивні особливості та різноманітні режими експлуатації. Асинхронні електродвигуни, відомі своєю простотою та надійністю, функціонують на основі принципу електромагнітної індукції, що забезпечує їм широке застосування в промисловості та побуті. Переваги асинхронних двигунів, такі як відсутність потреби в зовнішньому живленні для ротора і можливість роботи в різних режимах, роблять їх ідеальними для використання в різноманітних технологічних процесах.

Обговорення режимів роботи асинхронних двигунів, таких як номінальний, перевантаження, холостий хід, гальмування, реверсування та частотне управління, підкреслює їхню універсальність. Кожен режим має свої особливості та вимоги, які необхідно враховувати для забезпечення ефективності та надійності роботи двигуна.

Крім того, акцент на аварійних режимах підкреслює важливість систем захисту. Аварійні ситуації можуть виникати внаслідок перевантажень, коротких замикань або механічних збоїв, що може призвести до серйозних пошкоджень. Сучасні системи моніторингу дозволяють своєчасно виявляти відхилення у роботі двигунів і запобігати аваріям.

Дослідження, представлені в огляді, свідчать про активну роботу в напрямку покращення систем захисту асинхронних електродвигунів. Розробка нових методів моніторингу, адаптивних алгоритмів та систем активного захисту відкриває нові можливості для підвищення надійності і

безпеки їх експлуатації. Таким чином, комплексний підхід до захисту асинхронних двигунів є ключовим для забезпечення їх безвідмовної роботи в сучасних промислових умовах.

## **2 СИСТЕМА ТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА**

### **2.1 Огляд найпоширеніших систем теплового захисту**

У загальному випадку, будь-яка система теплового захисту складається з двох основних компонентів: моніторингового блоку, який надає інформацію про поточну температуру обмотки, і виконавчого блоку, що обробляє цей сигнал і, з урахуванням заданого порогу перегріву, відключає електродвигун від джерела живлення при перевищенні допустимої температури або подає відповідний сигнал.

При апаратній реалізації ці два функціональні блоки можуть бути об'єднані в один єдиний модуль. Реалізація виконавчого блоку зазвичай є досить простою і включає електромеханічні та логічні компоненти. Електромеханічний блок може бути реалізований, наприклад, у вигляді релейного захисту, заснованого на електромеханічних або електронних реле та пускачах.

Ключовими проблемами при створенні системи теплового захисту є реалізація моніторингового блоку, оскільки його точність і надійність критично важливі для коректної роботи всієї системи. Моніторинговий блок може базуватися як на прямому вимірюванні температури, так і на непрямому методі визначення температури через моніторинг певних фізичних параметрів, що впливають на нагрівання обмотки.

Підходи до проектування моніторингового блоку можна розділити на кілька груп:

- непрямі методи, що використовують вимірювання струму статора.
- методи, засновані на використанні вбудованих термодатчиків.
- методи, що використовують теплову модель машини.
- методи, що базуються на оцінці електричних параметрів машини.
- гібридні методи, що комбінують вищезазначені підходи.

Непрямі методи теплового захисту, які базуються на моніторингу струму статора, широко застосовуються на практиці для захисту від перевантаження. Проте, такі методи не передбачають прямого вимірювання температури обмоток статора, що може призвести до ненадійного захисту у випадках значного перегріву, наприклад, при тривалому запуску двигуна під навантаженням. Крім того, ці методи не враховують зміни температури навколишнього середовища або умов охолодження та теплопередачі, що стосується і теплового захисту асинхронних двигунів.

Серед простих методів теплового захисту є ті, що базуються на прямому вимірюванні температури за допомогою температурних датчиків, вбудованих у обмотки машини. Зазвичай датчики розміщують у виступаючих кінцевих котушках обмотки статора, на стороні, протилежній вентилятору. Однак, цей підхід рідко застосовується в електроприводах через значні недоліки, такі як необхідність установки датчиків на етапі виробництва, що може бути складним і дорогим для малих машин. Іншим важливим недоліком є локальність показань датчиків і значна теплова інерція між датчиком і обмоткою, що ускладнює своєчасне відключення машини при різкому підвищенні температури обмотки. Таким чином, методи, що використовують вбудовані температурні датчики, не завжди забезпечують надійний тепловий захист електричних машин, особливо в нестабільних або аварійних режимах.

Іншим підходом є використання теплової моделі електродвигуна (ТМЕД) для визначення температури обмотки. ТМЕД дозволяє алгоритмічно розраховувати температури різних частин двигуна на основі моніторингу струму в режимі реального часу і конструкційних параметрів машини. Точність таких розрахунків залежить від складності ТМЕД; точніші моделі вимагають детального знання всіх внутрішніх теплових параметрів та точного опису процесів нагрівання і охолодження, що ускладнює реалізацію розрахунку в режимі реального часу. Через це на практиці часто використовують спрощені теплові моделі. Наприклад, у роботі [7] автори

пропонують спрощену теплову модель асинхронного двигуна, що використовує передатну функцію замість складної теплової моделі, що дозволяє зменшити порядок моделі і спростити її реалізацію, зберігаючи прийнятну точність і надійність контролю нагрівання.

Однак, застосування спрощених ТМЕД не завжди дозволяє точно врахувати умови охолодження, що критично важливо для двигунів, які працюють у змінних умовах, таких як неопалювані приміщення або на відкритому повітрі. Робота [8] представляє гібридну теплову модель, яка враховує різницю в теплових режимах роботи двигунів з однаковою потужністю і системою охолодження. Автори показують, як теоретичний аналіз і математичне моделювання можуть бути використані для теплового контролю двигуна в динамічних умовах охолодження, і пропонують алгоритм онлайн-налаштування параметрів для адаптації гібридної теплової моделі до змін у теплових режимах роботи двигуна, що забезпечує ефективний захист від перевантажень.

Запровадження теплової моделі електродвигуна (ТМЕД) для реального захисту машин змінного струму [9] є надзвичайно складним через відсутність точної інформації про реальні умови експлуатації та охолодження машини. Оцінка параметрів теплової моделі, як експериментально, так і математично, є дуже складним завданням, і ця інформація часто недоступна для вже експлуатованих машин змінного струму. Тому широке впровадження систем теплового захисту на основі ТМЕД має обмежені перспективи для масового виробництва.

Згідно з аналізом професійної літератури, одним з найбільш перспективних сучасних методів теплового контролю та захисту є метод, заснований на оцінці електричних параметрів машини, зокрема на контролі активного опору обмотки статора. Оскільки активний опір обмотки прямо залежить від її температури, цей метод дозволяє використовувати обмотку як температурний датчик і визначати її середню температуру  $T$ , аналізуючи

зміни активного опору внаслідок нагрівання обмотки, відповідно до наступного рівняння:

$$T = (R_{c,0} - R_{c,l})/\alpha \cdot R_{c,l} + T_x, \quad (1)$$

де  $R_{c,0}$  — це величина, що представляє опір, який є робочим,  $R_{c,l}$  — опір, що є на початку даної обмотки при температурі, яка є відомою  $T_x$ , а  $\alpha$  — опору-електричного фізичної величини як температура коефіцієнт (який залежить від обмоткового матеріалу).

Таким чином, ми розглянемо методи теплового захисту на основі контролю опору обмотки статора  $R_1$  більш детально. Найпростіший спосіб визначення значення  $R_c$  — це метод "вольтметр–амперметр", при якому до обмотки прикладається постійна напруга.

$$R_c = U_{oc}/I_{oc}, \quad (2)$$

де  $U_{oc}$  і  $I_{oc}$  — це падіння напруги та струм обмотки статора.

Одночасно, для забезпечення теплового захисту необхідно контролювати значення  $R_c$  безпосередньо під час роботи асинхронного двигуна (АД). Це можна реалізувати шляхом введення невеликого постійного струму (DC) в робочу схему змінного струму (AC). Теоретично це можна здійснити за допомогою додаткового зовнішнього джерела постійного струму. Таке джерело може бути підключене або послідовно до обмотки статора через спеціальну схему [10], або між нейтралом обмоток двигуна і нейтралом мережі живлення [11]. Однак ці системи введення інструментального постійного струму ефективно використовуються для вимірювання температури обмотки без відключення АД від джерела живлення, наприклад, під час лабораторних випробувань [12]. Але ці методи не є економічно доцільними для теплового захисту. Можливість отримання постійного струму з робочого змінного струму була запропонована в [13], а застосування цього методу для теплового контролю описано в [14] і показано на Рисунку1.

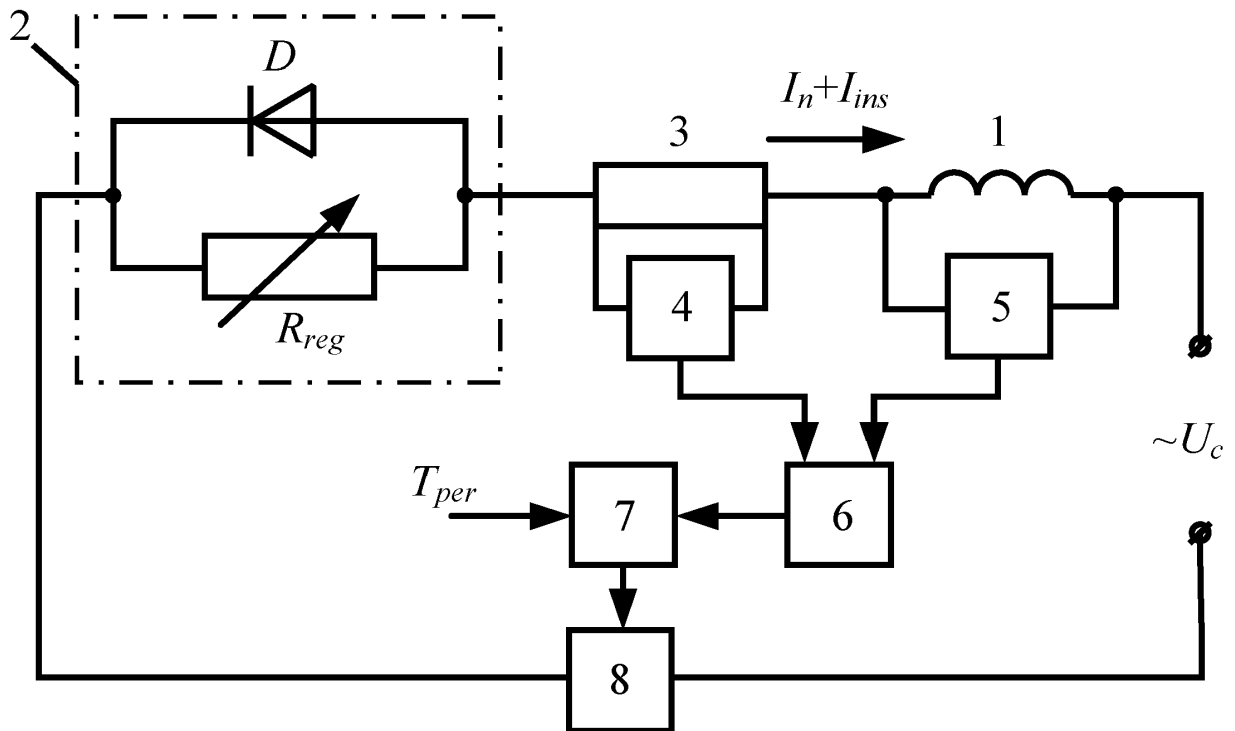


Рисунок 2.1. Схематична блок-схема пристрою теплового захисту, що генерує інструментальний струм з робочого змінного струму: 1 — термодатчик; 2 — блок введення постійного струму (ПС); 3 — вимірювальний шунт; 4 — блок вимірювання значення інструментального постійного струму  $I_{ins}$ ; 5 — блок вимірювання значення падіння напруги на термодатчику, викликаного струмом  $I_{ins}$ ; 6 — обчислювальний блок; 7 — пороговий перемикач; 8 — виконавчий блок.

З огляду на нерівномірність опорів для різних півхвиль напруги живлення, у схемі виникає постійний струм  $I_{ins}$ , значення якого можна регулювати шляхом зміни опору резистора  $R_{reg}$ .

Блок 6 розраховує поточну температуру  $T$  обмотки, використовуючи рівняння (1) та (2). Якщо ця температура перевищує допустиме значення  $T_{per}$  у робочих умовах, пороговий елемент генерує сигнал, який подається на виконавчий блок 8. Цей блок відключає обмотку від силового кола  $U_c$ . Головною складністю практичної реалізації цього рішення є необхідність усунення впливу робочого струму на вимірювальні схеми.

Багато досліджень присвячено формуванню інструментального постійного струму безпосередньо з робочого змінного струму. Наприклад, у роботах [15,16] представлено огляд сучасних методів теплового захисту для асинхронних двигунів, які запускаються під навантаженням, мають плавний пуск і використовують інверторне живлення. Ці активні методи теплового захисту зазвичай контролюють середню температуру статора, оцінюючи опір статора через значення напруги та струму, і застосовують різні способи для генерації інструментальної постійної напруги. Ми розглянемо основні з цих методів.

У працях [17,18,19] показано, що замість діода  $D$  (див. Рисунок 1) можна використовувати польовий транзистор метал-оксид-півпровідник (ПТМОНП) для введення постійного струму. Зміна еквівалентного опору контуру для введення постійного струму досягається шляхом управління перемиканням ПТМОНП при проходженні струму в різних напрямках. Фактично, значення постійної напруги можна контролювати, регулюючи опір  $R$  у сигнальному контурі введення.

Методи контролю опору обмотки статора асинхронного двигуна, підключеного до мережі через пристрій плавного пуску, описані в роботах [20,21,22,23]. Інструментальний постійний струм вводиться шляхом регулювання кута затримки тиристорів у пристрої плавного пуску. Рівень постійного струму контролюється цим кутом затримки. Сигнал управління тиристорами викликає коротку затримку на півхвилі для однієї фази двигуна, після чого постійні складові отримуються з аналізу Фур'є струму та напруги. Використовуючи ці постійні сигнали, можна розрахувати опір і температуру обмотки статора. Для точнішого визначення температури обмотки пропонується обробляти ці дані за допомогою спеціального програмного забезпечення разом з іншими параметрами.

Тепловий захист двигунів з інверторним живленням розглянуто в роботах [24,25,26]. У відкритому контурі приводу двигуна постійна напруга періодично вводиться в двигун шляхом зміни просторово-векторної

широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Для цього пропонується модифікована схема просторового вектора ШІМ, яка дозволяє автоматично вводити постійні складові поряд з оригінальними сигналами живлення, змінюючи положення перемикачів силової електроніки.

Проте, слід враховувати, що використання різних алгоритмів для введення додаткового інструментального постійного струму в обмотку статора може впливати на характеристики асинхронного двигуна, зокрема, викликати пульсацію крутного моменту і негативний момент від постійної складової. Тому важливо розділяти постійні складові фазових струмів і напруг. Методологія цього підходу описана в роботах [27,28]. Крім того, наявність постійного струму змінює умови нагрівання машини. Щоб зменшити додаткове тепловиділення від інструментального постійного струму, ці сигнали можна вводити періодично (наприклад, у схемах плавного пуску). Перерви можуть тривати від 3 до 5 хвилин в залежності від типу двигуна та умов експлуатації. Після кожного подання сигналу постійного струму і контролю нагріву обмотки, в обмотку подається "чиста" робоча напруга змінного струму. Це дозволяє зберегти ефективність теплового захисту асинхронного двигуна завдяки тепловій інерції машини. Проте такі процедури ускладнюють конструкцію пристроїв теплового захисту асинхронного двигуна.

## **2.2 Постановка наукової проблеми**

Як показано вище, існуючі методи, що базуються на вимірюванні змін у значенні активного опору обмотки статора через нагрівання, не можуть забезпечити точний контроль температури обмотки без порушення нормальної роботи машини. Очевидно, що найкращим варіантом теплового захисту є метод, який не потребує введення додаткового інструментального постійного струму. Одним з можливих рішень цієї проблеми описано в [29], де автори пропонують метод оперативного контролю температури, заснований на вимірюванні опору змінних обмоток електричної машини

(EM) під час її роботи. Це досягається шляхом розділення відповідних компонентів фазних напруг і струмів за допомогою синхронних детекторів [30]. Для контролю активного опору обмотки використовуються два незалежні "асиметричні" вимірювальні канали, які вимірюють активні компоненти струму і напруги обмотки і на їх основі розраховують її опір. Для моніторингу струму в колі обмотки вводиться датчик струму у вигляді вимірювального шунта 1 з відомим активним опором (див. Рисунок 2).

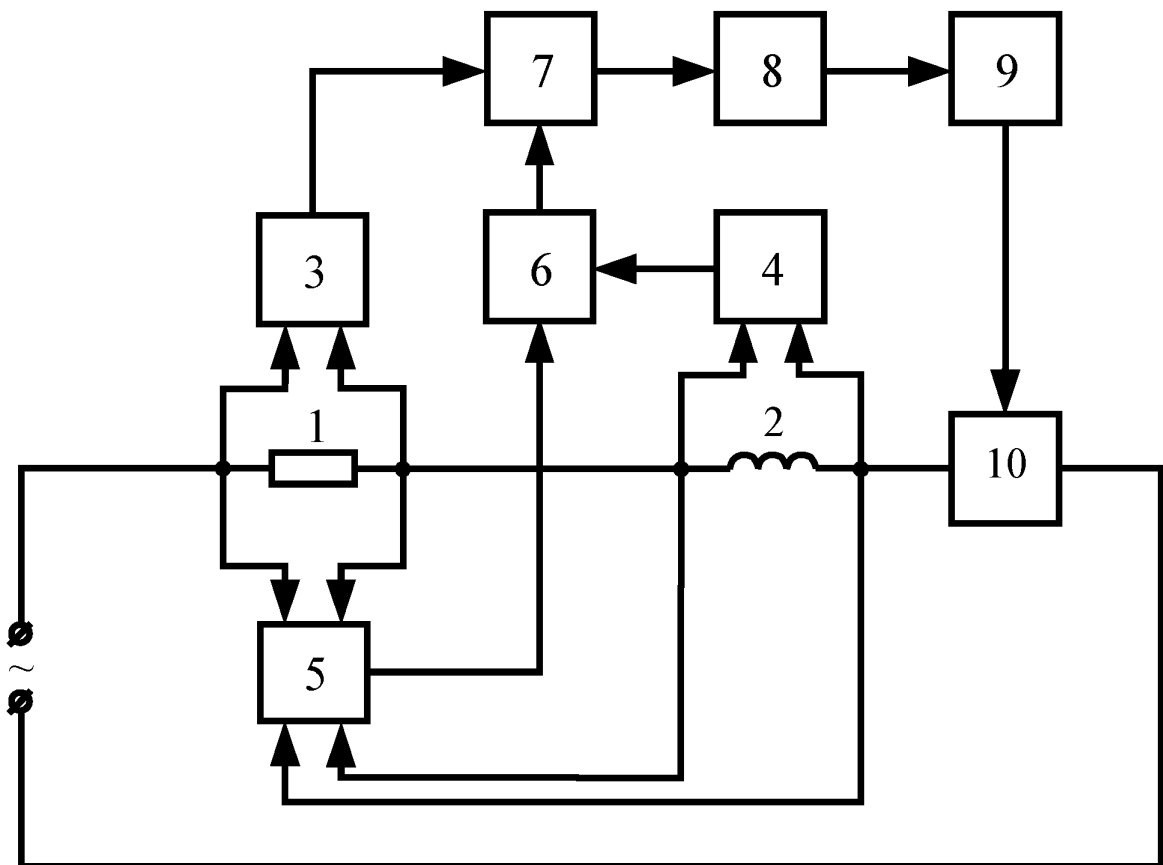


Рисунок 2.2. Блок-схема схематична пристрою для теплового захисту з функцією виключення постійних компонентів з чергових в колі фазних напруг і струмів: 1 — вимірювальний шунт; 2 — датчик температури обмотки-статора; 3, 4 і 5 — перший, другий і третій блоки запису; 6 і 7 — первинний і вторинний обчислювальні блоки; 8 — блок для запису температури обмотки 2; 9 — блок порівняння; 10 — виконавчий блок.

Блоки запису 3 і 4 функціонують як амплітудні детектори, тоді як блок 5 виконує функцію фазового детектора. Перший обчислювальний блок 6 відповідає за множення аналогових сигналів, а другий обчислювальний блок

7 — за аналогове ділення двох сигналів. Блок 3 генерує електричний сигнал, який пропорційний амплітуді струму в схемі, в той час як блок 5 видає сигнал, пропорційний  $\cos\varphi$ . Блок 6 множить сигнали з блоків 5 і 4, що призводить до виходу сигналу, пропорційного амплітудному значенню активної складової падіння напруги на опорі обмотки 2. Блок 7 виконує аналогове розрахування опору обмотки 2 і, враховуючи рівняння (1), алгоритмічно визначає її температуру. Блок 9 порівнює обчислену температуру з допустимим значенням і, якщо необхідно, надсилає сигнал до виконавчого блоку 10.

Проте наявність шунта 1, який підключений послідовно до силового кола обмотки 2, має ряд недоліків, головний з яких — втрати потужності в шунті, що призводять до його нагрівання і створюють гальванічний зв'язок з робочим колом.

Таким чином, можна зробити висновок, що проблема теплового захисту електричних машин не була повністю вирішена, і необхідно розробити нові принципи конструкції систем захисту, які не впливають на нормальну роботу обладнання.

### 2.3 Аналітична складова дослідження

В раніше розглянутих системах теплового контролю активний опір обмотки використовувався як індикатор її температури, оскільки значення активного опору точно визначає температуру обмотки згідно з рівнянням (1). Проте для контролю активного опору потрібно вимірювати падіння напруги  $U_{OC}$  і струм  $I_{OC}$  обмотки статора, що вимагає або використання інструментального постійного струму, або встановлення вимірювального шунта і подальшого розрахунку параметрів з  $U_{OC}$  і  $I_{OC}$ . Це значно ускладнює практичне впровадження такого підходу, порушуючи нормальний режим роботи електричної машини і знижуючи надійність системи.

Для подолання цих проблем пропонується новий метод оперативного температурного контролю, що забезпечує тепловий захист електричної

машини. Цей метод базується на графічній інтерпретації та аналітичній генералізації інформації про функціональні взаємозв'язки між виміряними даними через відповідні фазові співвідношення.

Запропонований підхід включає непрямий моніторинг теплового стану обмотки статора, використовуючи результати прямого вимірювання та подальший алгоритмічний розрахунок фізичної величини, що пов'язана з фазовою різницею  $\varphi$  між векторами  $U$  і  $I$ . Ця фазова різниця залежить від значень активних  $r$  і реактивних  $x$  компонентів імпедансу обмотки статора, які, в свою чергу, залежать від температури обмотки. Таким чином, метод контролю фактично ґрунтується на властивості фазової різниці  $\varphi$  між векторами  $U$  і  $I$ , яку можна виразити як функцію від температури  $T$ :

$$\varphi = f[r(T); x(T)] = F(T).$$

Подальше обґрунтування нового методу теплового контролю включає аналіз компонент повного імпедансу обмотки статора електричної машини та особливостей пристроїв, які використовуються для його реалізації. Схему підключення електричної машини до електричної мережі можна уявити як стандартну синусоїдальну схему струму (див. Рисунок 3).

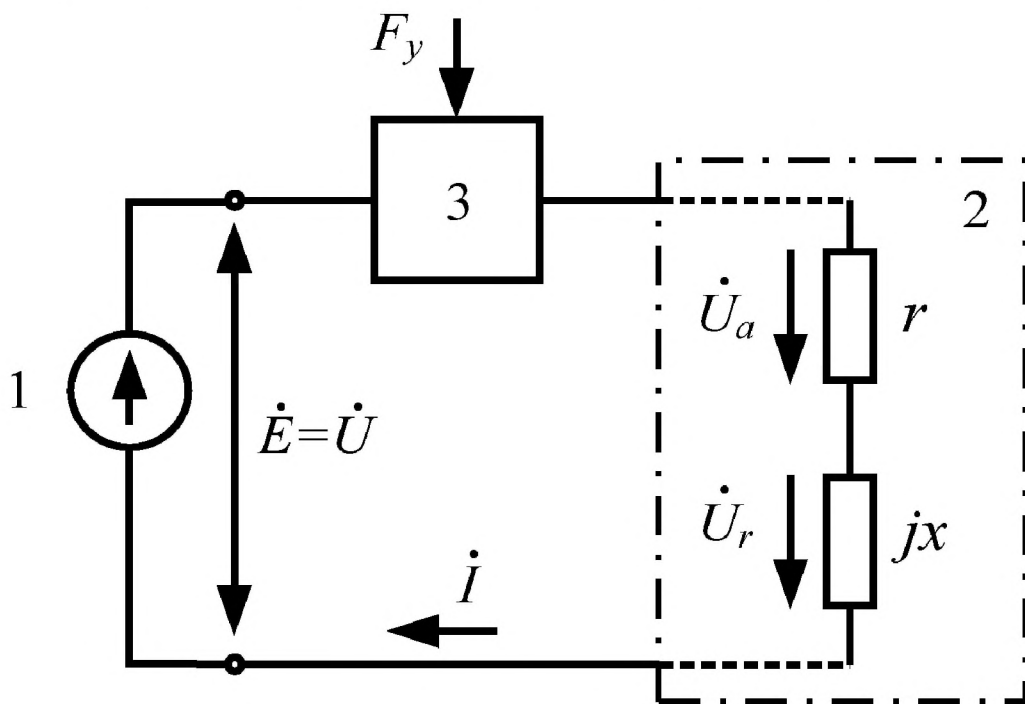


Рисунок 2.3. Блок-схема загальна активації ЕД: 1 — джерело живлення мережевої напруги; 2 — обмотка статора ЕД; 3 — керований комутаційний пристрій;  $i_{Fu}$  — сигнал управління, що підключає або відключає ЕД від мережі.

Вимірюючи напругу живлення обмотки статора (ОС) та струм у колі цієї обмотки, можна визначити імпеданс обмотки статора ЕД за допомогою наступного рівняння:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j\psi_U}}{Ie^{j\psi_I}} = \frac{U}{I}e^{j\varphi} = Ze^{j\varphi} = r + jx, \quad (3)$$

де  $U$  і  $I$  — комплексні ефективні значення напруги і струму в колі обмотки,  $\psi_U$  — кут між вектором  $U$  і реальною віссю на комплексній площині,  $\psi_I$  — кут між вектором  $I$  і реальною віссю на комплексній площині,  $\varphi = \psi_U - \psi_I$  — кут (фазова різниця) між векторами  $U$  і  $I$ ,  $r$  — активна компонента імпедансу обмотки статора ЕД,  $x = \omega L$  — реактивна компонента імпедансу обмотки статора ЕД,  $\omega$  — циклічна частота напруги живлення обмотки статора ЕД,  $L = f(\mu, \{Qi\})$  — індуктивність обмотки статора ЕД,  $\mu$  — магнітна проникність матеріалу статора ЕД, і  $\{Qi\}$  — набір конструктивних параметрів обмотки та самого статора ЕД.

Для аналізу характеристик фізичних процесів, що відбуваються в цій електричній схемі, ми створюємо відповідну векторну діаграму напруги на комплексній площині (Рисунок 4).

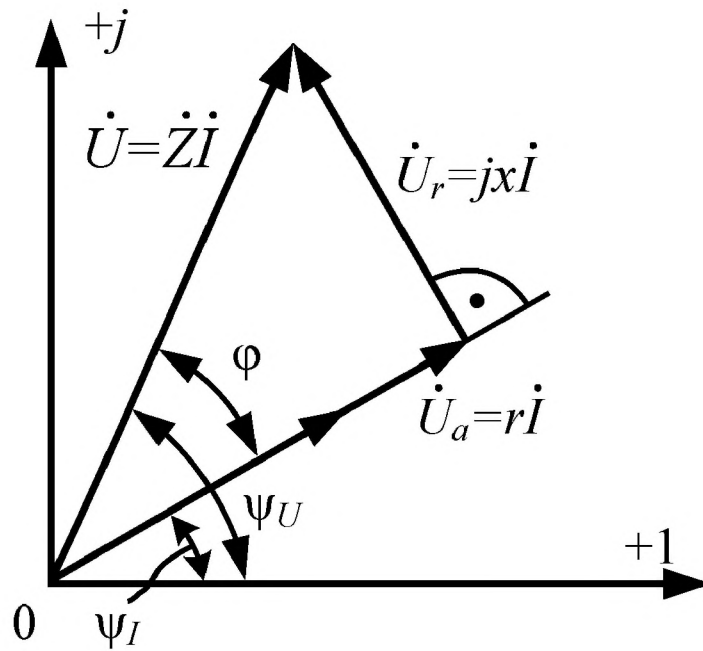


Рисунок 2.4. Векторна діаграма напруг.

Згідно з рівнянням (3) та рисунком 3, ми можемо записати таке рівняння для схеми:

$$\dot{U} = \dot{I} \cdot \dot{Z} = \dot{I} \cdot r + j \cdot \dot{I} \cdot x = \dot{U}_a + \dot{U}_r, \quad (4)$$

де  $U_a = I \cdot r$  — напруга на внутрішньому активному опорі обмотки статора ЕМ, а  $U_r = j \cdot I \cdot x$  — напруга на внутрішньому реактивному опорі обмотки статора ЕМ.

Поєднуючи вектор струму електричної схеми з реальною координатною віссю на комплексній площині матимемо таку діаграму (Рисунок 5).

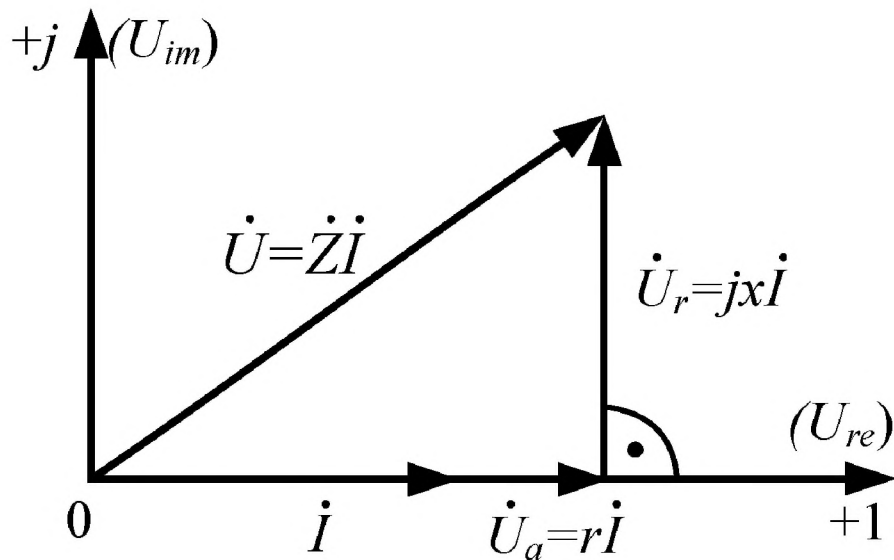


Рисунок 2.5. Напруги, перетворена векторна діаграма.

З аналізу рівняння (4) та рисунка 3 випливає, що, коли вектор струму  $I$  поєднано з дійсною координатною віссю комплексної площини, вектор напруги живлення  $U$  можна умовно розкласти на компоненти, що збігаються за фазою з струмом (реальні)  $U_r$  і на квадратурні (уявні)  $U_i$ .

$$\dot{U} = U \cdot \cos \varphi + j \cdot U \cdot \sin \varphi = I \cdot r + j \cdot I \cdot x = U_{re} + j \cdot U_{im}. \quad (5)$$

Крім того,  $U_a = U_{re}$ , а  $U_r = j \cdot U_{im}$ .

Зазначимо, що питомий опір матеріалу обмотки є функцією температури і, у лінійній апроксимації, визначається залежністю такого виду:

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha_\rho \cdot (T - T_0)], \quad (6)$$

де  $\rho_0$  та  $\alpha_t$  — питомий опір та температурний коефіцієнт питомого опору, що відповідають початку температурного діапазону  $T_0$ , а  $\rho$  — питомий опір при температурі  $T$ .

Відомо, що для феромагнетиків, які використовуються як матеріал для магнітопровідних елементів електричних машин, підвищення температури (до температури Кюрі ( $T_c$ ) в умовах експлуатації) призводить до поступового зниження магнітної проникності. Нагрівання феромагнетика викликає поступову термічну дезорієнтацію спінових магнітних моментів і зменшення

намагніченості. При досягненні певної температури  $T_c$ , коли енергія теплового руху стає співставною з енергією обмінної взаємодії, тепловий рух повністю руйнує магнітний порядок (розпад доменної структури), переводячи феромагнетик у парамагнітний стан. Тому підвищення температури (до температури Кюрі) спричиняє поступове зниження магнітної проникності феромагнетика. Теплова нестабільність індуктивності з феромагнітним осердям переважно обумовлена залежністю коефіцієнта магнітної проникності осердя від температури  $\mu(T)$ . Для температурного коефіцієнта індуктивності, що описує залежність індуктивності обмотки від температури, можна записати:

$$\alpha_L = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{(L - L_0)}{(T - T_0)}, \quad (7)$$

де  $L$  та  $L_0$  — значення індуктивності при поточній температурі та номінальному значенні відповідно, що відповідають нижній межі температурного діапазону  $T_0$ , а  $T$  — поточне значення температури.

Оскільки  $L = \mu \cdot w^2 \cdot l/S$ ,

Рівняння (7) легко перетворюється в наступну форму:

$$\alpha_L = \alpha_\mu = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{(\mu - \mu_0)}{(T - T_0)}, \quad (8)$$

де  $\mu$  та  $\mu_0$  — відповідно поточне та номінальне значення магнітної проникності матеріалу феромагніту, що відповідають нижній межі температурного діапазону  $T_0$ , а  $\alpha_\mu$  — температурний коефіцієнт магнітної проникності.

Тоді, враховуючи існуючу тенденцію зміни  $\mu(T)$  ( $\alpha_\mu < 0$ ) згідно з (8), для коефіцієнта магнітної проникності можна стверджувати, що

$$\mu = \mu_0 \cdot [1 - \alpha_\mu \cdot (T - T_0)]. \quad (9)$$

Фактично, в даному випадку магнітна проникність визначається температурним коефіцієнтом магнітної проникності. У цьому випадку в

межах певного температурного діапазону магнітну проникність можна приблизно розглядати як лінійну функцію. Оскільки реактивний опір обмотки визначається рівнянням  $x = \omega L$ , очевидно, що існує наступна функціональна залежність:

$$\varphi = F(\mu; r). \quad (10)$$

Слід зауважити, що рівняння (6) та (9) вказують на наявність різноспрямованих змін  $r$  та  $x$  під впливом температурних коливань. Відповідно до рівняння (5) та наведених вище зауважень, можна зробити висновок, що будь-які зміни активних або реактивних компонентів імпедансу обмотки статора електродвигуна при зміні її температури призведуть до відповідної зміни кута  $\varphi$  між векторами  $U$  та  $I$  на комплексній площині.

Іншими словами, між кутом  $\varphi$  та температурою ОС ЕД  $T$  існує чітка функціональна залежність, визначена співвідношенням між  $x$  та  $r$ .

$$\varphi = \arctg \frac{x}{r} = \arctg \frac{U_{im}}{U_{re}} = f(T),$$

При зміні температури  $T$  кінець вектора  $U$  рухається по комплексній площині по колу з радіусом  $R=U=const$ , центрованому в точці  $0$ , займаючи позицію, що відповідає співвідношенню  $U_{im}/U_{re}$ . Крім того, наявність різноспрямованих змін  $x$  та  $r$ , спричинених температурою, призводить до значних коливань кута  $\varphi$ , відповідно до рівняння (11).

З рівнянь (5) та (11) видно, що для вирішення задачі контролю температури ОС ЕД достатньо зафіксувати стан фазової різниці  $\varphi$  між векторами  $U$  та  $I$ . Синхронізуючи обробку сигналів за фазою струму в нескладному контурі, можна використати обладнання для реєстрації ефективних значень компонентів напруги живлення  $U_{im}$  та  $U_{re}$ , і таким чином отримати поточне значення  $\varphi_i = f(T_i)$  для забезпечення теплового захисту ЕД. Це фактично означає можливість реалізації нового методу фазового контролю температури ОС ЕД. Для впровадження цього методу контролю температури ОС ЕД автори пропонують відповідну структурну

блокову схему пристрою теплового захисту ЕД (Рисунок 6). Розглянемо особливості роботи запропонованого пристрою теплового захисту ЕД.

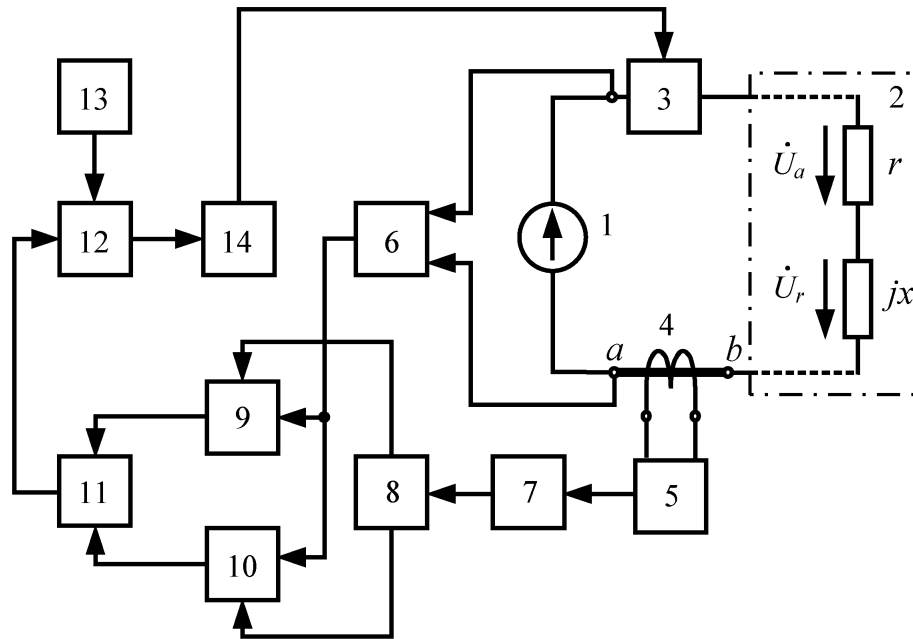


Рисунок 2.6. Блок-схема пристрою теплового захисту ЕД: 1 – джерело живлення ОС ЕД; 2 – ОС ЕД, використовувана як датчик температури; 3 – пристрій перемикання ОС ЕД; 4 – трансформатор струму (ТС); 5 – перетворювач струму в напругу; 6 – аттенюатор реєстратора; 7 – фазовий зсув; 8 – генератор напруги для квадратичної складової; 9 та 10 – синхронні детектори відповідно для фази та квадратичної складової напруги живлення ОС ЕД; 11 – перетворювач у відношення з цифровим виходом; 12 – цифровий компаратор; 13 – блок для налаштування рівня порівняння; 14 – генератор контрольного сигналу.

Оригінальна не розгалужена синусоїдальна схема струму включає датчик електричного струму, ТС, який містить інструментальну шину, що закриває електричне коло через відповідні контактні з'єднувачі а і б.

При активації на напругу живлення 3, синусоїдальна напруга живлення  $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$  з відповідним вектором напруги  $\vec{U} = U e^{j\psi_u}$ , виникає електричний струм  $i = i_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$  у замкнутому електричному колі, з відповідним вектором струму  $\vec{I} = I e^{j\psi_i}$ .

Вимірювальна обмотка ТС реєструє струм  $I^* = K_{CT} \cdot I$ , який через блок 5 перетворюється в напругу.

$$\dot{U}^* = M^* \cdot \dot{I}^* = M^* \cdot K_{CT} \cdot \dot{I}, \quad (12)$$

де  $K_{CT}$  — коефіцієнт перетворення ТС, а  $M^*$  — розмірний коефіцієнт.

За допомогою фазозсуву 7 початкова діаграма векторів напруги (рисунок 4) перетворюється на робочу діаграму векторів напруги (рисунок 5), при цьому коригується фазова похибка, що виникла в результаті попередніх перетворень зафіксованого сигналу. Далі блок 8 використовує скоригований вхідний сигнал  $U^*$  для формування відповідних квадратичних опорних напруг для синхронних детекторів:

- $u_{oc} = U_{moc} \cdot \cos(\omega t + \psi_0)$  — опорна напруга в фазі;
- $u_{oq} = U_{moq} \cdot \sin(\omega t + \psi_0)$  — квадратична опорна напруга,

де  $\psi_0$  — фаза опорних напруг, синхронізованих з фазою  $\psi_1$  струму електричного кола.

Для перетворених координат на комплексній площині можна записати наступне:

$$\dot{U} = U e^{j\varphi}; \quad \dot{I} = I. \quad (13)$$

Насправді, синхронні детектори 9 і 10 є когерентними перетворювачами, які множать вхідний інформаційний сигнал на вхідну опорну напругу з подальшим низькочастотним фільтруванням отриманого сигналу.

Відповідно до (13), блок 6 масштабує напругу мережі  $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$  до рівня  $u^* = K_M \cdot U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ , яка потім подається на інформаційні входи синхронних детекторів 9 і 10, де вона перетворюється, як потрібно, в наступні відповідні сигнали на виході синхронних детекторів 9 і 10:

$$\begin{aligned} U_{re} &= K_{SD} \cdot K_M \cdot U_m \cdot \cos(\psi_0 - \varphi); \\ U_{im} &= K_{QD} \cdot K_M \cdot U_m \cdot \sin(\psi_0 - \varphi), \end{aligned} \quad (14)$$

де  $U_{re}$  і  $U_{im}$  є, відповідно, компонентами напруги живлення в фазі і в квадратурі;  $K_{SD}$  і  $K_{QD}$  є коефіцієнтами перетворення синхронних детекторів 9 і 10 відповідно; а  $K_M$  є масштабним коефіцієнтом для блоку 6.

Блок 11 перетворює вхідні сигнали  $U_{re}$  і  $U_{im}$  за допомогою обчислювальної процедури відповідно до наступного рівняння:

$$\Theta(\varphi) = \arctg \frac{U_{im}}{U_{re}}. \quad (15)$$

Блок 11 також виконує аналогово-цифрове перетворення  $\Theta(\varphi)$ :

$$F : [\Theta(\varphi)] \rightarrow \Theta_D(n/f_d) \quad (16)$$

де  $F$  — оператор аналогово-цифрового перетворення;  $n/f_d$  — дискретна функція часу;  $f_d$  — частота дискретизації сигналу;  $n=0, 1, 2, \dots$ .

З виходу блоку 11 цифровий сигнал  $F(T)$  подається до блоку 12, який порівнює  $F(T)$  з заданим контрольним значенням  $F(T)$ , що надходить з блоку 13.

На основі результатів операції порівняння блок 12 генерує бінарний сигнал  $D$  логічного рівня 0 або 1, відповідно до таких умов:

$$D = \begin{cases} 1, & \text{if } \Theta_D(n/f_d) \geq \Theta^*_D(n/f_d); \\ 0, & \text{if } \Theta_D(n/f_d) < \Theta^*_D(n/f_d). \end{cases} \quad (17)$$

Після цього сигнал  $D$  подається на вхід блоку 14, який, залежно від стану сигналу  $D$ , генерує необхідний контрольний сигнал для пристрою перемикачів 3. У критичній ситуації, коли рівень вихідного сигналу блоку 12 дорівнює 1 ( $D = 1$ ), тобто температура  $T$  перегріву електромагнітної системи електродвигуна перевищує допустиме значення  $T^*$ , блок 3 відключає електричну обмотку від джерела живлення, запобігаючи таким чином виникненню надзвичайної ситуації на працюючому електрообладнанні.

### Висновок до розділу

Розглянута математична модель була застосована для аналізу та дослідження протікання сили струму та напруги в обмотках статора та ротора асинхронного електродвигуна. Розроблена блок-схема пристрою теплового захисту електродвигуна теоретично задовольняє функціональну стабільність в межах допустимих відхилень.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИВЧЕННЯ МЕТОДУ ТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Експерименти були проведені з використанням двох ідентичних асинхронних електродвигунів типу 4А63V4 з номінальною потужністю 0,37 кВт. Один з двигунів (базовий) використовувався як еталон для перевірки точності результатів другого двигуна (тестового). Обидва двигуни були підключені до мережі змінного струму 380 В. Всі вимірювання проводились без навантаження у режимі S1 за стабільного теплового стану.

Для експериментів була розроблена спеціалізована випробувальна установка, яка зображена на структурній блок-схемі (Рисунок 3.1). Загальний вигляд цієї установки представлений на Рисунку 3.2.

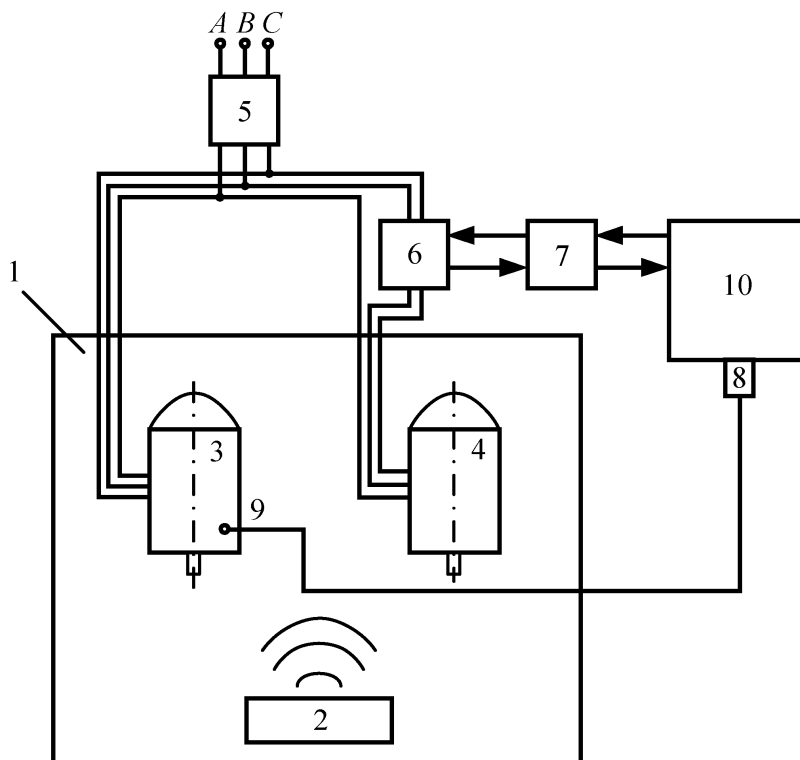


Рисунок 3.1. Випробувальна установка, блок-схема

1 - випробувальна камера; 2 - регульований повітряний обігрівач; 3 - базовий АД; 4 - тестовий АД; 5 - вимикач живлення; 6 - пристрій термозахисту АД, що реалізує новий метод фазового управління температурою ОС ЕД; 7 - система збору даних типу УСПД164-01Б; 8,

мініатюрний електронний термометр (МЕТ) з дистанційним цифровим температурним датчиком 9; 10 - персональний комп'ютер (ПК).

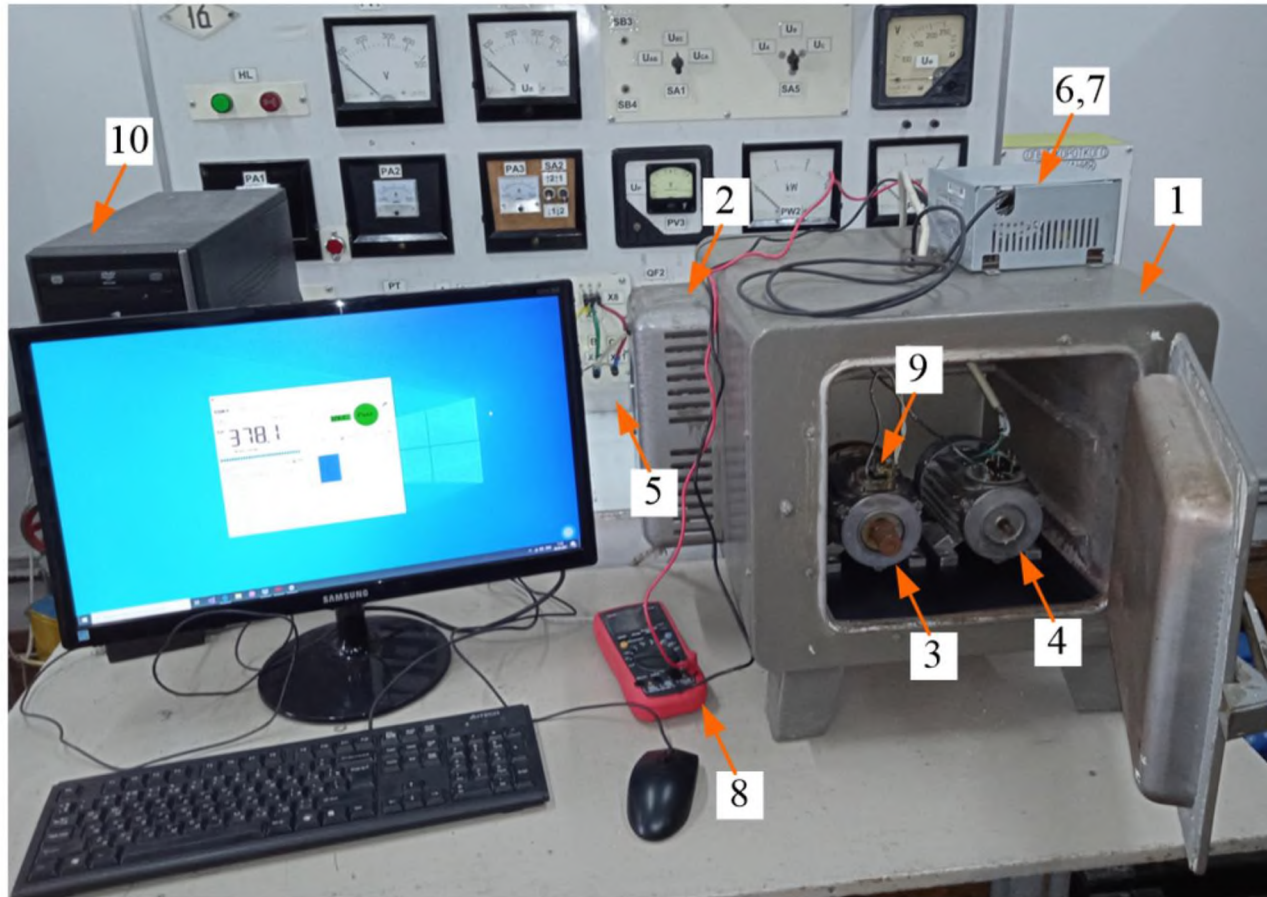


Рисунок 3.2. Загальний вигляд випробувальної установки

1 - випробувальна камера; 2 - регульований повітряний обігрівач; 3 - базовий ЕД; 4 - тестовий ЕД; 5 - вимикач живлення; 6 - пристрій термозахисту ЕД, що реалізує новий метод фазового управління температурою ОС ЕД; 7 - система збору даних типу УСПД164-01Б; 8 - мініатюрний електронний термометр (МЕТ) з дистанційним цифровим температурним датчиком 9; 10, персональний комп'ютер (ПК).

Регулюючи обігрівач 2, створювали різні температурні умови у випробувальній камері 1, де розміщені електродвигуни 3 і 4. Температура їхніх обмоток вимірювалася за допомогою мініатюрного електронного термометра (МЕТ) і термозахисного пристрою АД 6 відповідно. Отримані дані реєструвалися на ПК 10 через спеціалізований апаратно-програмний

інтерфейс, після чого проводився їх порівняльний аналіз і фінальний розгляд результатів експериментів.

Мініатюрний електронний термометр (MET) 8 з дистанційним цифровим датчиком температури 9, розроблений спеціально для цієї задачі і підключений до USB-порту ПК, використовувався для вимірювання температури. Особливістю MET є його управління мікроконтролером (MC) PIC18F14K50 з вбудованим USB-модулем і чутливим термоелементом (цифровий датчик (DS) LM75AD), з'єднаним з MC через 5-метровий екранований витий парний кабель ( $Z = 90 \text{ Ом}$ ). MET також має індикацію режиму роботи за допомогою світлодіода.

Для коректного функціонування MET на комп'ютері був встановлений відповідний програмний драйвер, що створює віртуальний COM-порт з конфігурацією: вісім інформаційних бітів, без парності та один стоп-біт, а також автоматичне визначення швидкості передачі даних. Мікроконтролер опитувався кожні 5 секунд, а в режимі "запит комп'ютера" інформація надходила не частіше ніж раз на секунду. Програма дозволяє вносити корекції для компенсації систематичних помилок, регулюючи показання MET з точністю до  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура кінцевих котушок обмоток базового АД вимірювалася контактним методом за допомогою спеціального DS.

MET демонстрував високу точність, помилка вимірювання в діапазоні  $10 + 125 \text{ }^\circ\text{C}$  не перевищувала  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Система збору даних УСПД164-01Б забезпечила коректну інтеграцію ПК з термозахисним пристроєм АД. УСПД164-01Б є універсальним 16-бітним модулем вводу/виводу, здатним обробляти до 32 аналогових і 17 цифрових сигналів, і підключається до персонального комп'ютера через інтерфейси USB 2.0 (високошвидкісний) та 100 Мбіт Ethernet. Модуль підтримує частоту перетворення до 2 МГц і дозволяє обробку даних у режимі реального часу.

Фактично ПК через систему збору даних 7 виконував сканування результатів вимірювань блоком 6 фази  $\phi$  для параметрів  $U$  і  $I$ , формуючи

послідовний розрахунок можливих значень для цієї фази. Якщо результат вимірювання від блоку 6 збігався з поточним цифровим значенням фази, встановленим ПК, це значення фіксувалося і використовувалося для визначення температури за калібрувальною кривою  $\varphi=f(T)$ .

Усі необхідні коефіцієнти і вибір калібрувальної кривої  $\varphi=f(T)$  були визначені під час попередньої калібровки вимірювальних каналів термозахисного пристрою і збережені в пам'яті ПК для подальшого використання в експерименті.

Референтний метод вимірювань, що використовувався для контролю температури з точністю не менше 0,5%, базувався на відомій калібрувальній кривій датчика температури, зокрема термістора і стандартного вимірювального перетворювача (МЕТ) з нормалізованими параметрами. Цей метод є одним з найточніших для специфічних умов і має просту технічну реалізацію.

Методологія експерименту була такою: кожні 40 хвилин обігрівач вмикався, підвищуючи температуру в камері на 20 °С; потім вимірювалася температура обмоток електродвигунів, результати чого представлені на Рисунку 9.

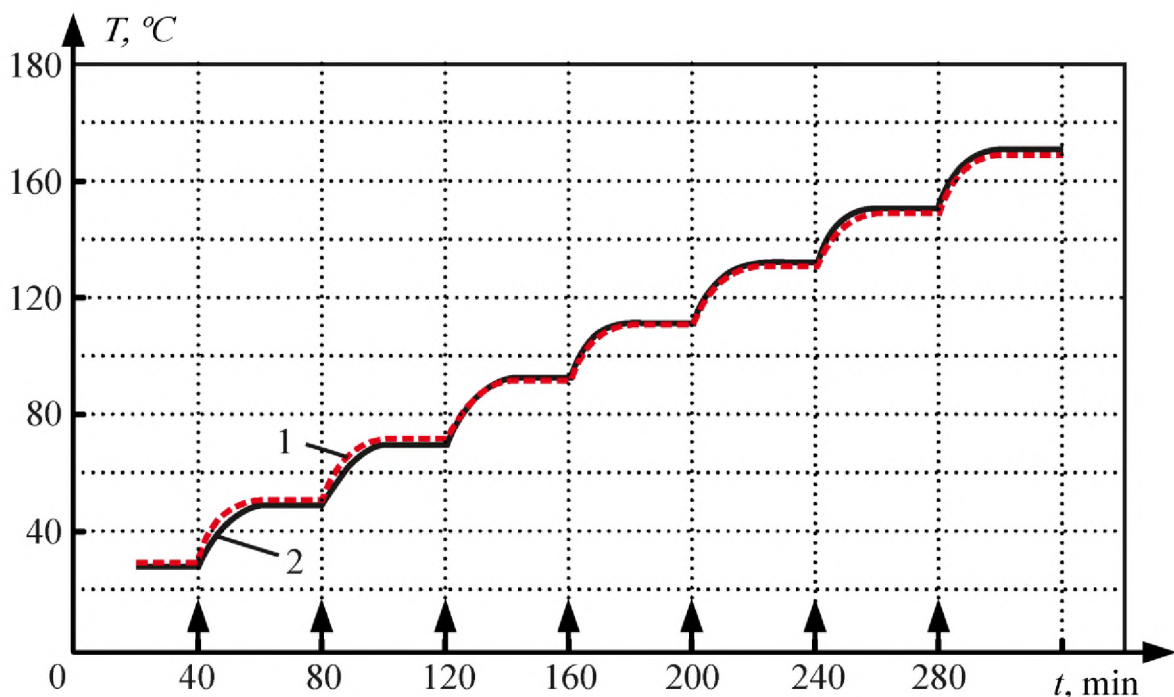


Рисунок 3.3. Результати вимірювання температури статорових обмоток базового (1) і тестованого (2) електродвигунів.

В середньому температура обмоток електродвигуна досягала стабільного рівня приблизно через 20 хвилин після включення обігрівача. Тому на кожному етапі зміни температури обігрівача проводилось кілька вимірювань, включаючи заміри температури електродвигуна в умовах стабільного теплового стану. Для кожного наступного проміжку часу експерименту процеси зміни температури та вимірювання стабільних температур обмоток електродвигунів повторювались циклічно.

На осі абсцис рисунка 9 вертикальні стрілки показують моменти зміни режиму роботи обігрівача. Діаграма на рисунку демонструє високу ступінь відповідності між результатами вимірювань температури обмоток прямим методом за допомогою МЕТ і непрямим фазовим методом за допомогою термозахисного пристрою.

Результати визначення помилки вимірювання температури за фазовим методом у порівнянні з непрямим методом представлені на рисунку 10. Дані про помилки вимірювань зображені у вигляді графіків температурного зростання, що є звичним для електротехніки. Це зумовлено тим, що температура електродвигуна залежить не тільки від навантаження, а й від температури навколишнього (охолоджувального) середовища. Тому для електродвигунів нормалізується не абсолютна температура обмотки, а надлишок температури обмотки  $T$  над температурою навколишнього середовища.

$$T = T_{fact} - T_{bas},$$

де  $T_{fact}$  та  $T_{bas}$  — фактичні та базові температури відповідно.

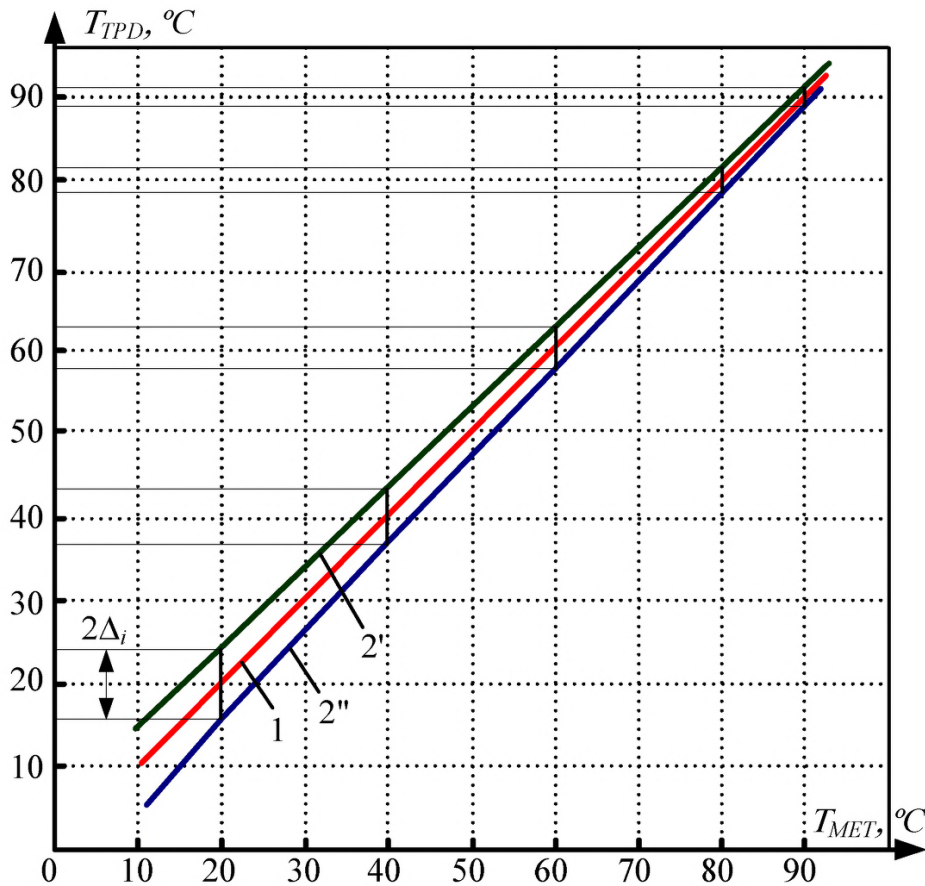


Рисунок 3.4. Результати визначення помилки вимірювання температури за фазовим методом

$T_{TPD}$  – перегрівання ОС АД зафіксоване термозахисним пристроєм АМ;  $T_{MET}$  — перегрівання, виміряне мініатюрним електронним термометром; 1 – діаграма, що відповідає ідеальному випадку, коли параметри точності непрямого методу вимірювання фази за допомогою термозахисту АД повністю відповідають параметрам точності прямого методу вимірювання за допомогою MET; 2' і 2'' – діаграми максимальних відхилень температури ОС досліджуваного АД, що відображають результати багаторазових вимірювань випробувального АД термозахисним пристроєм;  $2\Delta_i$ , розкид діапазону перегріву ОС у тестовому АД, виміряний пристроєм теплового захисту АД.

Значення  $T_{bas} = 40$  °C було визначене як базова температура відповідно до нормативної документації, що відповідає стандартній температурі охолоджуючого середовища.

На рисунку 10 показано, що точність вимірювань покращується в області робочих надлишків температури обмоток. Оскільки саме в цій зоні відбувається термозахист електродвигуна, можна зробити висновок, що запропонований метод контролю, незважаючи на свою простоту, забезпечує високу точність спрацьовування.

Рисунок 10 фактично є узагальненою графічною інтерпретацією результатів обробки кількох вимірювань, з урахуванням особливостей використаної методології експериментальних досліджень.

### **Висновок до розділу**

Аналіз графічних результатів експериментальних досліджень демонструє, що новий фазовий метод контролю температури обмоток електродвигуна є технічно здійсненним і забезпечує досить задовільну точність вимірювання температури в потрібному діапазоні (5 - 3% у межах 10 - 125 °C).

Варто підкреслити, що запропонований метод термозахисту не лише ефективний для електродвигунів, але й підходить для захисту іншого електричного обладнання змінного струму, такого як генератори, трансформатори, реактори, електромагніти тощо.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Правила безпеки під час обслуговування електродвигунів

При роботах, пов'язаних з дотиком до струмоведучих частин електродвигуна або частинами електродвигуна, що обертаються, і механізму, який вони приводять в рух, необхідно зупиняти електродвигун на його пусковому пристрої або клавішах управління і вивішувати плакат «Необхідно не спостерігайте за включенням! Люди працюють».

При роботах на електродвигуні [31] або наведеному ним механізмі, де є контакт з струмопровідними або обертовими частинами, з електродвигуна необхідно зняти напругу і вважати кабель живлення під напругою.

Щіточна система робочого електродвигуна може обслуговуватися одним оператором або кваліфікованим працівником III групи.

При обслуговуванні електродвигунів необхідно дотримуватися таких заходів безпеки:

- працюйте в шапці і комбінезоні, будьте обережні, щоб не потрапити в частини машини, що обертаються;
- використовуйте діелектричне взуття або гумові килимки;
- не торкайтеся струмопровідних частин двох полюсів або струмопровідних частин і землі одночасно.

При роботі на електродвигуні заземлення виконують на кабелі (з відключенням від електродвигуна або без нього) або на його приєднанні до розподільного щита (РУ) або на будь-якій ділянці кабельної лінії, що з'єднує електродвигун з РУ. При роботах на механізмі, не пов'язаних з дотиком до частин [25], що обертаються, а також при розімкнутій муфті кабельну лінію не слід заземлювати.

Якщо на відключеному двигуні не проводяться роботи або якщо вони перериваються на кілька днів, відключену від нього кабельну лінію необхідно заземлити з боку електродвигуна. У випадках, коли перетин жил кабелю не дозволяє застосовувати переносні муфти, для електродвигунів

напругою до 1000 В допускається заземлювати кабельну лінію мідним провідником перерізом не менше, ніж поперечний переріз жили кабелю або жили кабелю з'єднуються та ізолюють один одного. Таке заземлення та з'єднання жил кабелю мають бути враховані в журналі експлуатації поряд із переносними заземленнями.

Плакати «Стоп! Напруга» незалежно від того, чи знаходяться вони в робочому режимі або в режимі очікування.

Під час роботи забороняється знімати захисні кришки частин електродвигунів, які обертаються під час роботи.

Випробування електродвигуна разом із силовим механізмом повинно проводитись за згодою начальника зміни технологічного цеху, в якому вони встановлені. При видачі дозволу робиться запис у журналі роботи технологічного цеху, а прийом цього дозволу вноситься до журналу роботи цеху (будівельного майданчика), проводить випробування.

Ремонт та налагодження електричних ланцюгів електроприводів, не пов'язаних з виконавчим механізмом, регулюючими органами та арматурою, що закриває, можуть бути виконані на замовлення. Дозвіл на їхнє випробування дає працівник, який дав розпорядження про зняття електроприводу для ремонту та регулювання. Про це необхідно зробити запис під час розміщення замовлення. Увімкнення електродвигуна для перевірки до закінчення роботи здійснюється після видалення екіпажу з робочого місця. Після тесту проводиться перезавантаження із реєстрацією на замовлення. Під час роботи знову подається команда на перезапуск.

Притирання кілець ротора на роторному електродвигуні допускається тільки з шайбами з ізоляційного матеріалу, із застосуванням захисного скла.

#### **4.2 Заходи унеможливлення ураження електричним струмом**

Дотримання заходів упередження ураження струмом електричним в електроустановках будівель і споруд є основним правилом в системі заходів [32] та є фактором створення допустимого рівня ризику в електроустановках.

Комбінація основного запобіжного захисту, додаток А [33] на захисту одиничного режиму пошкодження (замикання) або посилений захист, який включає в себе поєднання основного захисту і одиничного захисту, є основним правилом для дотримання унеможливлення електричним струмом.

Впровадження основного захисту повинно бути забезпечено одним із наступних методів:

- унеможливлення протікання фізичної величини як струм, наскрізно через біологічне тіло людини або тварини, шляхом недопущення опосередкованого контакту з відкритими частинами тіла;
- у разі виникнення прямого доторкання, зниження величини струму до значень, при яких струм може протікати без фатальних наслідків

Також широко застосовується автоматичне вимикання електроживлення як метод захисту від ураження фізичної величини струм. Даний спосіб забезпечується уземленням, зрівнюванням потенціалів, вимкненням в автоматичному режимі у разі замикання.

### **Висновок до розділу**

Охорона праці при обслуговуванні електродвигунів є критично важливою для забезпечення безпеки працівників. Основні правила безпеки передбачають обов'язкове відключення електродвигуна перед проведенням робіт, дотримання засобів індивідуального захисту, заземлення кабелів, а також контроль за виконанням усіх процедур. Важливим аспектом є також проведення випробувань лише за дозволом відповідальних осіб та дотримання чіткої документації. Запобігання ураженню електричним струмом передбачає використання комбінованих методів захисту, включаючи автоматичне вимикання живлення та заземлення. Загалом, дотримання зазначених заходів дозволяє знизити ризики та забезпечити безпечні умови праці.

## 5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Розглянута система теплового захисту електродвигунів на виробництві забезпечує ряд економічних переваг, які суттєво впливають на ефективність і витрати в процесі експлуатації обладнання.

По-перше, вона допомагає запобігти перегріванню електродвигунів, що може призвести до їх швидшого зносу або навіть до поломки. Завдяки своєчасному виявленню і запобіганню перегріванню, такі системи дозволяють уникнути частих ремонтів або заміни двигунів. Це зменшує витрати на обслуговування та заміну деталей, які можуть бути досить дорогими, а також знижує витрати на тривалість простоїв виробничих ліній.

По-друге, оптимальне управління температурним режимом електродвигунів дозволяє знизити енергетичні витрати. Перегріті двигуни можуть працювати менш ефективно і споживати більше електроенергії. З допомогою системи теплового захисту можна забезпечити стабільну та ефективну роботу двигунів, що зменшує загальні витрати на електроенергію і підвищує енергоефективність виробництва.

По-третє, зменшення ризику перегрівання і його негативних наслідків також сприяє підвищенню загальної надійності виробничого процесу. Це означає менше аварійних ситуацій, що можуть викликати затримки або зупинки в роботі, а також зменшення ризику пошкодження інших компонентів виробничої лінії.

Фінансові втрати підприємства через несправність електродвигунів  $F$  під час виробничого процесу обчислюються за такою формулою:

$$F = \frac{t \cdot a}{n} - c \cdot t \quad (18)$$

де  $t$  – час електродвигунів в неробочому режимі, год;  $n$  – кількість електродвигунів, що беруть участь у виробничому процесі;  $c$  – вартість електричної енергії, грн/кВт·год;  $a$  – коефіцієнт відповідності, який дорівнює:

$$a = \frac{h}{T} \quad (19)$$

$h$  – кількість виробленого підприємством товару за 1 зміну в грошовому еквіваленті, грн;  $T$  – час робочої зміни, год.

Відповідний розрахунок дає змогу точно розрахувати фінансові втрати конкретного підприємства, в разі поломки чи несправності електричного двигуна (двигунів), під час виробничого процесу.

Для запобігання поломок та аварійних режимів електродвигунів, в даній роботі була представлена та розглянута система захисту від теплових перевантажень. Відповідно рисунку 6, в таблиці 1 представлені складові даної системи захисту та номінальна вартість її компонентів.

Таблиця 5.1.

Пристрій теплового захисту ЕД			
№	Найменування	Шифр	Ціна, грн
3	Комутаційний пристрій обмотки статора	АСКО-УКРЕМ ПМ 1-12-01	300,96
4	Трансформатор струму	DL-CT03CL1.0 (5A/5mA)	29,40
5	Перетворювач струму в напругу	АОС730	115,00
6	Аттенюатор	RFDAT0018G1A	216,00
7	Фазообертач	MAPS-010164	822,00
8	Генератор квадратурної напруги	LM338K	265,00
9	Синхронний детектор синфазної складової напруги	AD8307	985,00
10	Синхронний детектор квадратурної складової напруги	AD8307AR	940,00
11	Коефіцієнтний перетворювач з цифровим виходом	ZKTeco AUX485	451,00
12	Цифровий компаратор	LM339N	7,60
13	Блок встановлення рівня порівняння	K589ИК14 DIP24	20,80
14	Генератор керуючого сигналу	AD9833	785,00
	Всього		4937,76

Час періоду окупності відповідає тому часові, який необхідний для повернення суми, вкладеної в обладнання. Інвестування з меншим терміному

окупності є кращим для бізнесу, так як ризик інвестування зменшується. Термін окупності вкладень розраховують за такою формулою:

$$P_p = \frac{K_0}{ПЧсг}$$

де  $P_p$  – термін окупності,  $K_0$  – сума коштів, вкладених в обладнання,  $ПЧсг$  – чистий прибуток підприємства в середньому за рік.

Для прикладу було проаналізовано товариство з обмеженою відповідальністю "ПРОФІЛЬТЕХ", яке за 2023 рік отримало чистого прибутку на 7351000 грн. Дане підприємство має на своєму балансі приблизно 400 електричних двигунів, які перебувають в постійному режимі роботи. Розрахувавши термін окупності по наведеній формулі, отримаємо такий результат:

$$P_p = \frac{400 \cdot 4937,76}{7351000} = 0,269 \text{ року}$$

$$P_p = 0,269 \text{ року} = 98 \text{ днів}$$

### **Висновок до розділу**

За результатами таблиці, розглянута система захисту асинхронного двигуна від теплового перевантаження, буде коштувати 4937,76 грн. При забезпеченні підприємством тепловим захистом всіх електричних двигунів, термін окупності даної системи для розглянутого підприємства складатиме 98 днів. Маючи такі дані, можна зробити висновок що дана вискоефективна система захисту має відносно низьку ціну її впровадження та короткий термін окупності.

Таким чином, застосування системи теплового захисту електродвигунів не лише покращує довговічність і надійність обладнання, але і веде до зменшення витрат на енергоспоживання та обслуговування, що в кінцевому підсумку забезпечує суттєві економічні вигоди для підприємства.

## ВИСНОВКИ

Проаналізовано причини аварійної роботи та виходу з ладу асинхронного електродвигуна, апарати та системи захисту, що покладені в основу будови. Було запропоновано пристрій теплового захисту електродвигуна і порівняно з існуючими системами та методами.

Проведена аналітична робота над запропонованою системою захисту. Дана система була розглянута за допомогою математично-фізичної моделі, проведені розрахунки та порівняння результатів. Доведено доцільна методика в застосуванні показників температури обмотки статора асинхронного електродвигуна для аналізу і порівняння вихідних даних та впровадження виконавчого механізму, що базується на результуючих даних та порівнюючи їх з базисними, запобігає аварійній роботі асинхронного електродвигуна. Встановлено, що показники якості енергетичного перетворення характеризують енергопроцеси електродвигуна і враховують можливу зміну поточного технологічного стану електродвигуна.

Запропонований метод базується на використанні енергетичних показників нерівномірності навантаження струмом на кожен фазу окремо за рівняннями нагріву обмотки статора асинхронного електродвигуна для впровадження захисної функції захищеності від перегріву в результаті навантажень.

Запропонована модель теплового захисту електродвигуна була розглянута експериментальним методом. Під час проведення експерименту за основу було взято два асинхронних електродвигуна змінного струму, перший в якості базового, другий в якості тестового. Обмотка статора тестового електродвигуна піддавалась поступовому нагріванню до критичної точки нагріву, при досягненні якої спрацьовував пристрій захисту. Всі дані під час експерименту, за допомогою аналогового цифрового пристрою були записані і представлені в результатах проведеного експерименту.

В економічних розрахунках відображені фінансові затрати для впровадження розглянутої теплової системи захисту і доведена економічна доцільність використання даної системи в промисловому виробництві.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhi, G.; Habetler, T.G.; Harley, R.A. An online adaptive stator winding temperature estimator based on a hybrid thermal model for induction machines.
2. Zhang, P.; Du, Y.; Habetler, T.G. A transfer function-based thermal model reduction study for induction machine thermal overload protective relays.
3. Bochkarev, I.V.; Ashmarin, A.V. Device for Measuring the Temperature of the Winding of an Electric Machine. SU Patent No. 998873, G01K 7/16, 23 February 1983.
4. Zhang, P.; Lu, B.; Habetler, T.G. Active stator winding thermal protection for AC motors. In Proceedings of the Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, Birmingham, AL, USA, 21–26 June 2009; pp. 11–19.
5. Matic, P.R.; Gecic, M.A.; Lekić, Đ.; Marcetic, D.P. Thermal protection of vector-controlled IM drive based on DC current injection. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015, 62, 2082–2089.
6. Релейний захист та автоматика [Електронний ресурс] : методичні вказівки до практичних робіт для студентів ОС "Бакалавр" спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / СНАУ. - Суми : СНАУ, 2020. - эл. опт. диск. - Б. ц.
7. Zhi, G.; Habetler, T.G.; Harley, R.A. An online adaptive stator winding temperature estimator based on a hybrid thermal model for induction machines. In Proceedings of the IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, TX, USA, 15 May 2020; pp. 754–761.
8. Zhang, P.; Du, Y.; Habetler, T.G. A transfer function-based thermal model reduction study for induction machine thermal overload protective relays. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2019, 46, 1919–1926.
9. Стадній О. Ю. Аномальні режими роботи двигунів / Матеріали XLVII НТК ВНТУ, м.Вінниця, 23. 03. 18 р.

10. Bochkarev, I.V.; Ashmarin, A.V. A Device for Measuring the Temperature of the Winding of an Alternating Current Electric Machine under Load. SU Patent No. 1108337, G01K7/16, G01R27/08, 15 August 1984.

11. Bochkarev, I.V. Measuring the winding temperature of AC machines under load. *Russ. Electr. Eng.* 1999, 70, 28–32.

12. Albla, A.A.H.; Brkovic, B.M.; Ječmenica, M.M.; Lazarevic, Z.M. Online temperature monitoring of a grid connected induction motor. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2017, 93, 276–282.

13. Bochkarev, I.V.; Ashmarin, A.V. Device for Measuring the Temperature of the Winding of an Electric Machine. SU Patent No. 998873, G01K 7/16, 23 February 1983.

14. Bochkarev, I.V.; Ashmarin, A.V. A Device for Thermal Protection of an Electric Machine. SU Patent No. 1187234, H02H5/04, H02H7/08, 23 October 1985.

15. Zhang, P.; Lu, B.; Habetler, T.G. Active stator winding thermal protection for AC motors. In *Proceedings of the Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, Birmingham, AL, USA, 21–26 June 2009; pp. 11–19.

16. Zhang, P. *Active Thermal Protection for Induction Motors Fed by Motor Control Devices*; Georgia Institute of Technology: Atlanta, GA, USA, 2010; 202p.

17. Lee, S.B.; Habetler, T.G. An on-line stator winding resistance estimation technique for temperature monitoring of line-connected induction machines. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2003, 39, 685–694.

18. Sabaghi, M.; Feshki Farahani, H.; Hafezi, H.R.; Kiani, P.; Jalilian, A. Stator winding resistance estimation for temperature monitoring of induction motor under unbalance supplying by DC injection method. In *Proceedings of the 42nd International Universities Power Engineering Conference*, Brighton, UK, 4–6 September 2007; pp. 217–222.

19. Sabaghi, M.; Farahani, H.F. Monitoring of induction motor temperature under unbalanced supplying by stator resistance estimation. *Indian J. Sci. Technol.* 2012, 5, 2354–2359.

20. Enany, T.A.; Wahba, W.I.; Hassan, M.A. Remote and sensorless stator winding temperature estimation method for thermal protection for induction motor. *Int. J. Syst. Dyn. Appl.* 2014, 3, 53–72.
21. Zhang, P.; Lu, B.; Habetler, T.G. a remote and sensorless stator winding resistance estimation method for thermal protection of soft-starter-connected induction machines. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008, 55, 3611–3618.
22. Zhang, P.; Du, Y.; Lu, B.; Habetler, T.G. A DC signal injection-based thermal protection scheme for soft-starter-connected induction motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2009, 45, 1351–1358.
23. Enany, T.A.; Hassan, M.; Othman, E.S. Induction motor temperature monitoring via signal injection enhanced with adaptive neuro-fuzzy inference system. *Int. Inf. Eng. Technol. Assoc.* 2017, 91–109.
24. Zhang, P.; Lu, B.; Habetler, T.G. An active stator temperature estimation technique for thermal protection of inverter-fed induction motors with considerations of impaired cooling detection. *Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami, FL, USA, 3–6 May 2009.*
25. Matic, P.R.; Gecic, M.A.; Lekić, Đ.; Marcetic, D.P. Thermal protection of vector-controlled IM drive based on DC current injection. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2022, 62, 2082–2089.
26. Tshimanga, T.P.; Bezabih, E.; Iyer, V.R.; Zhang, S.; He, L.; Harley, R.G. Stator temperature estimation of open-loop controlled induction machines via active DC voltage injection. In *Proceedings of the North American Power Symposium (NAPS), Charlotte, NC, USA, 4–6 October 2015.*
27. Baneira, F.; Asiminoaei, L.; Doval-Gandoy, J.; Delpino, H.A.M.; Yepes, A.G.G.; Godbersen, J. Estimation method of stator winding resistance for induction motor drives based on DC-signal injection suitable for low inertia. *IEEE Trans. Power Electron.* 2019, 34, 5646–5654.
28. Yoo, J.; Lee, J.H.; Sul, S.K.; Baloch, N.A. Stator resistance estimation using DC injection with reduced torque ripple in induction motor sensorless drives. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2020, 3744–3754.

29. Bryakin, I.V.; Bochkarev, I.V.; Bagiyev, H.G.; Kelebaev, K.K. Electric AC machines temperature control and overheating protection using leakage currents to evaluate the induction motor insulation condition. Bull. South Ural State Univ. Ser. Power Eng. 2019, 19, 75–84.

30. Brykin, I.V.; Bochkarev, I.V. Method for Measuring Impedance Components and Device for its Implementation. RF Patent No. 2691624, G01R 27/02, 17 July 2019. [Google Scholar]

31. Лашко Ю.В., Чорний А.П. Статистична модель асинхронного двигуна в структурі модуля інтелектуального захисту // Проблеми створення нових машин і технологій. Кременчук: КГПУ. – 2018. – Вип. 2/(9). – С. 324 – 326.

32. ДБН В.1.1-7-2016. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Правила пожежної безпеки в Україні.

33. ДСТУ Б В.2.5-82:2016 ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА В БУДІВЛЯХ І СПОРУДАХ. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом