

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“__” _____2023 р.

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

на тему:

**«Моніторинг поточного стану заглибного насоса з
розробкою заходів підвищення його експлуатаційної
надійності»**

Виконав здобувач вищої освіти
ІІ курсу, групи ЕЕ-22М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Андрій ОГОРОДНІКОВ
«__» _____2023 р.

Керівник роботи доцент, канд. техн. наук,
_____Руслан ТЕЛЮТА
«__» _____2023 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	<u>будівництва, транспорту та енергетики</u>
Кафедра	<u>електротехнічних систем та енергетичного менеджменту</u>
Рівень вищої освіти	<u>другий (магістерський)</u>
Галузь знань	<u>14 «Електрична інженерія»</u>
Спеціальність	<u>141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»</u>
Освітньо-професійна програма	<u>Електротехнічні системи електроспоживання</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор

_____ Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” _____ 2023 р.

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

_____ Огородніков Андрій Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Моніторинг поточного стану заглибного насоса з розробкою заходів підвищення його експлуатаційної надійності

Monitoring the current state of the submersible pump with the development of measures to improve its operational reliability

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 21.12.2023 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є полягає у вдосконаленні експлуатаційної надійності заглибних електродвигунів за допомогою проведення функціонального моніторингу їхніх режимів роботи, що планується здійснити на основі математичної моделі процесу швидкості зносу ізоляції протягом періоду їхньої експлуатації. Завдання роботи: 1. Провести аналіз експлуатаційної надійності заглибних електродвигунів; 2. Розглянути методи та параметри моніторингу заглибного електродвигуна; 3. Розробка системи моніторингу стану заглибного електродвигуна; 4. 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. 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Видача та узгодження тематики роботи</i>	9.10.2023	
2	<i>Складання змісту магістерської роботи</i>	16.10. 2023	
3	<i>Вступ. Аналіз експлуатаційної надійності заглибних електродвигунів</i>	31.10.2023	
4	<i>Методи та параметри моніторингу заглибного електродвигуна</i>	10.11. 2023	
5	<i>Розробка системи моніторингу стану заглибного електродвигуна</i>	20.11. 2023	
6	<i>Розглянути та запропонувати заходи з охорони праці</i>	30.11. 2023	
7	<i>Загальні висновки</i>	15.12. 2023	
8	<i>Перелік посилань</i>	20.12. 2023	
9	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	21.12. 2023	
10	<i>Оформлення презентації магістерської роботи та подання магістерської роботи до захисту</i>	25.12. 2023	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2023 р.

Підпис керівника

_____ Руслан ТЕЛЮТА

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2023 р.

Підпис здобувача

_____ Андрій ОГОРОДНІКОВ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 88 с.; 17 рис.; 8 табл.; 88 джерел.

Огородніков А. М. Моніторинг поточного стану заглибного насоса з розробкою заходів підвищення його експлуатаційної надійності. – Рукопис.

Ціллю кваліфікаційної роботи є підвищення надійності заглибних насосів за рахунок використання безперервного контролю швидкості теплового зносу ізоляції шляхом створення математичної моделі його моніторингу при різних експлуатаційних режимах.

У роботі проаналізовано причини виходу з ладу та відмов при роботі заглибних насосів в умовах експлуатації. Встановлено, що найбільш пошкоджуваним елемент являється ізоляційна конструкція електродвигуна. Розроблена схема розвитку пошкоджень заглибного електродвигуна.

Існуючі методи які підвищують експлуатаційну надійність заглибних насосів, далеко не завжди забезпечують необхідний рівень надійності. Приведено класифікацію методів безперервного моніторингу та принципів і пристроїв захисту заглибних електродвигунів.

Аналітично досліджено режими роботи заглибних електродвигунів і швидкості зносу ізоляції під дією експлуатаційних факторів. Отримана закономірність швидкості зносу ізоляції дозволяє оптимізувати його експлуатаційні режими з позиції ресурсозберігання.

Проведені дослідження режимів роботи під впливом зовнішніх факторів.

Розроблені методика моніторингу роботоздатності заглибних насосів та методика моніторингу швидкості зносу ізоляції, розроблена математична модель ресурсозберігаючого режиму роботи та алгоритм його використання.

Запропоновано структурну схему пристрою моніторингу експлуатаційних режимів роботи заглибного електродвигуна насоса.

Ключові слова: заглибний насос, ресурсозбереження, ізоляція обмоток, швидкість зносу ізоляції, моніторинг режимів роботи, математична модель

ABSTRACT

Qualification work: 88 p.; 17 fig.; 7 tables; 23 sources

Ohorodnikov A.M. Monitoring the current state of the submersible pump with the development of measures to improve its operational reliability. - Manuscript.

The purpose of the qualification work is to increase the reliability of submersible pumps through the use of continuous monitoring of the rate of thermal wear of the insulation by creating a mathematical model of its monitoring under different operational modes.

The paper analyzes the causes of failures and failures during the operation of submersible pumps in operating conditions. It was established that the most damaged element is the insulating structure of the electric motor. A scheme of damage development of the submersible electric motor has been developed.

Existing methods that increase operational reliability of submersible pumps do not always provide the required level of reliability. The classification of methods of continuous monitoring and principles and devices of protection of submersible electric motors is presented.

The modes of operation of submersible electric motors and the rate of insulation wear under the influence of operational factors have been analytically investigated. The resulting regularity of the rate of insulation wear allows to optimize its operating modes from the point of view of resource conservation.

Conducted studies of work modes under the influence of external factors.

A technique for monitoring the performance of submersible pumps and a technique for monitoring the rate of insulation wear have been developed, a mathematical model of the resource-saving mode of operation and an algorithm for its use have been developed.

A structural diagram of the device for monitoring the operating modes of the submersible electric motor of the pump is proposed.

Key words: submersible pump, resource saving, insulation of windings, wear rate of insulation, monitoring of operating modes, mathematical model

ЗМІСТ

ЗМІСТ	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ЗАГЛИБНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	12
1.1 Експлуатаційні умови роботи заглибних електродвигунів	12
1.2 Аналіз причин виходу з ладу заглибних електродвигунів	17
1.3 Шляхи забезпечення експлуатаційної надійності заглибних електродвигунів	24
1.4 Висновки до першого розділу	25
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ПАРАМЕТРИ МОНІТОРИНГУ ЗАГЛИБНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА	26
2.1 Методи моніторингу поточного стану заглибних електродвигунів	26
2.2 Засоби, що підвищують експлуатаційну надійність заглибних електродвигунів	31
2.3 Вибір методу моніторингу роботи заглибного електродвигуна	41
2.4 Вибір параметру моніторингу роботи заглибного електродвигуна	46
2.5 Висновки до другого розділу	49
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗАГЛИБНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА	50
3.1 Аналітичне дослідження теплових процесів заглибного електродвигуна під впливом експлуатаційних факторів	50
3.2 Аналітичне дослідження теплової провідності	53
3.3 Теоретичне дослідження параметру моніторингу заглибного електродвигуна	58
3.4 Математична модель моніторингу швидкості зносу ізоляції заглибного електродвигуна	70

3.5	Розробка пристрою моніторингу експлуатаційних режимів роботи заглибного електродвигуна	72
3.6	Алгоритм роботи пристрою моніторингу	76
3.7	Висновки до 3-ого розділу	80
	РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	81
4.1	Загальні вимоги	81
4.2	Засоби з охорони праці	81
4.3	Розрахунок електробезпекових характеристик	83
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	85
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифрового перетворювача

БК – блок комутації

БЖ – блок живлення

БВС – блок виміру фазних струмів

ДСХ – датчик "сухого ходу"

ЕП – електропривод

ЗН – заглибний насос

ЕД – електродвигун

ЕЦВ – електродвигун центробіжний водяний

ЗС – звукова сигналізація

МК – мікроконтролер

МК – мікроконтролер

КЛ – клавіатура

СС – світлова сигналізація

ПЭДВ – заглибний електродвигун водозаповнений

ПП – пристрій програмування

ПК – персональний комп'ютер

РЗ – ресурсозбереження

ЦІ – цифрова індикація

ВСТУП

Експлуатаційний досвід використання електротехнічного устаткування свідчить про високий рівень аварійності електродвигунів, зокрема найбільш поширених асинхронних, які використовуються у системах подачі води населенню, комунальним об'єктам та промисловості. Ця проблема призводить до суттєвих технічних втрат та непередбачуваних ремонтів електротехнічного обладнання. Щорічно близько четвертої частини від загальної кількості експлуатованих електродвигунів виходять з ладу. Нормований термін служби асинхронних електродвигунів для водопостачальних систем складає 14 тисяч годин, але фактично вони виходять з ладу значно раніше, з реальним терміном служби в межах до 4 тисяч годин. Велика аварійність занурювальних електродвигунів в водопостачальних системах пов'язана з особливостями їхньої експлуатації в умовах побутового чи аграрного чи промислового комплексу, до яких відносяться нестабільність якості напруги мережі та низький рівень технічного обслуговування і ремонту.

Специфікою електричних розподільних мереж є комбіноване підключення як трифазних, так і однофазних споживачів, що призводить до асиметрії напруги та струмів. Подача електропостачання споживачам здійснюється через повітряні лінії передачі, які мають значну протяжність, і це часто призводить до випадків обриву та замикання проводів. Інцидентність аварій асинхронних електродвигунів через асиметрію подачі напруги, включаючи випадки обриву фази, становить близько 40% від загальної кількості електродвигунів, що вийшли з ладу. Існуючі системи моніторингу та захисту занурювальних електродвигунів від аварійних режимів проявляють недостатню експлуатаційну надійність. Наукові дослідження, спрямовані на аналіз особливостей режимів роботи заглибних електродвигунів, розробку методів функціонального моніторингу, обґрунтування параметрів моніторингу, а також на цій основі розробку пристроїв для моніторингу

експлуатаційних режимів роботи заглибних електродвигунів, є вкрай актуальними.

Постає необхідність у представлені пристрою дистанційного моніторингу та діагностики стану занурювальних електродвигунів з метою підвищення експлуатаційної надійності у галузі водопостачання всіх сферах життєдіяльності. При цьому пристрій необхідний для забезпечення оперативного виявлення та аналізу відхилень в роботі електродвигунів, що дозволяє уникнути аварійних ситуацій та позапланових зупинок електротехнічного обладнання.

Застосування новітніх методів функціонального моніторингу режимів роботи електродвигунів дозволяє виявляти відмінності в їхній роботі, що може свідчити про потенційні проблеми та вказувати на необхідність технічного обслуговування або ремонту. Збільшення часу безперебійної роботи занурювальних електродвигунів сприятиме оптимізації виробничих процесів та зниженню витрат на ремонтні роботи.

Мета роботи полягає у вдосконаленні експлуатаційної надійності заглибних електродвигунів за допомогою проведення функціонального моніторингу їхніх режимів роботи, що планується здійснити на основі математичної моделі процесу швидкості зносу ізоляції протягом періоду їхньої експлуатації.

Завдання дослідження :

- провести комплексний аналіз та розгляд питань, пов'язаних із підвищенням експлуатаційної надійності заглибних електродвигунів у контексті водопостачання.
- виконати аналітичний огляд теплових перехідних процесів заглибних електродвигунів з метою розуміння їхньої взаємодії та визначення впливу на ефективність роботи.
- дослідити різноманітні режими роботи заглибних електродвигунів, зосереджуючись на впливі зовнішніх чинників, таких як температура, вологість та інші.

- розробити математичну модель для моніторингу швидкості зносу ізоляції заглибного електродвигуна під час його експлуатації та визначити оптимальні параметри для ефективного моніторингу.

- запропонувати схему пристрою для функціонального моніторингу режимів роботи заглибного електродвигуна, який враховуватиме виявлені особливості теплових та електричних процесів під час його функціонування.

Об'єкт дослідження є процеси, що відбуваються в заглибному електродвигуні під впливом різних експлуатаційних чинників.

Предмет дослідження є закономірності витрати ресурсу ізоляції в заглибному електродвигуні в залежності від параметрів експлуатаційних чинників.

Результати роботи можуть бути використані для підвищення надійності асинхронних електродвигунів заглибних насосів від впливу експлуатаційних чинників.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ЗАГЛИБНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

1.1. Експлуатаційні умови роботи заглибних електродвигунів

У сучасний період активно використовується електропривід для підняття води зі свердловин, глибина яких варіюється від 20 до 250 метрів. Цей процес застосовується для різноманітних цілей, таких як зрошування сільськогосподарських полів, водопостачання населених пунктів і промислових об'єктів.

Заглибний електропривід, складаючись з відцентрового насоса типу ЕЦВ та водозаповненого асинхронного електродвигуна типу ПЭДВ (рис. 1.1 та 1.2), грає важливу роль у забезпеченні необхідного рівня води для різноманітних галузей [1]. Його застосування стає ключовим елементом для забезпечення оптимального водопостачання та регулювання вологості в аграрному секторі, а також для задоволення потреб населених пунктів і промислових об'єктів.

Важливим аспектом є те, що заглибний електропривід використовується як у сільському господарстві, так і в промисловому секторі, що свідчить про його універсальність та високу важливість для сучасних господарських виробництв.

Асинхронні електродвигуни ПЭДВ виготовляються у діапазоні номінальних потужностей до 65 кВт, зовнішній діаметр корпусу яких коливається до 270 мм. Важливо відзначити, що їхній конструктивний вигляд суттєво відрізняється від асинхронних двигунів, що входять до єдиної серії. Це пояснюється наявністю специфічних умов експлуатації даних двигунів [1].

Електродвигун, розташований у свердловині вертикально, використовується з метою мінімізації загального діаметру агрегату, що обумовлено обмеженням зовнішнього діаметра електронасосного обладнання. Позиціонування глибинного електродвигуна 14 (рис. 1.2) нижче від входу для

відкачування води відцентровим насосом допомагає скоротити загальний діаметр агрегату та сприяє конструктивній простоті.

Електродвигун завжди розташований на рівні або нижче від рівня відкачуваної води, яка відрізняється за температурою, ступенем забруднення та різним хімічним складом. Присутність механічних домішок у воді вимагає герметизації внутрішньої частини заглибного електродвигуна та впровадження спеціальної дихальної системи, яка компенсує зміни об'єму води, що наповнює цей внутрішній простір.

Вода, що подається до насосу, очищує зовнішню поверхню корпусу заглибного асинхронного електродвигуна, інтенсивно відводячи тепло, охолоджуючи його.

Електронасосний станція розташована на певній, зазвичай глибокій глибині у свердловині, а подача електроенергії до заглибного двигуна відбувається за допомогою спеціального водостійкого кабелю, який характеризується визначений електричним опором і визначає робочі параметри електродвигуна.

Насос води з характеристики вентилятора, значним чином впливають момент опору валу заглибного асинхронного електродвигуна.

При необхідній зупинці у роботі насосного агрегату, що працював у свердловині, і який в своїй конструкції не має зворотному клапану, вода з напірного трубопроводу почне витікати назад через насос у свердловину. Це призведе до того, що насос буде працювати як турбіна, розганяючи ротор заглибного двигуна з підвищеною швидкістю обертання у протилежному напрямку до його номінального встановленого обертання.

У системі водопостачання, а також під час монтажу всього комплексу насосної електроустановки, може виникнути потреба в кількох зупинках та повторних швидких запусках протягом 1-1.5 години.

Підняття та опускання електричного насоса, що досить громіздкий і тяжкий є складним і тривалим процесом, тому профілактичні заходи під час експлуатації зазвичай не проводяться, або проводяться досить рідко.

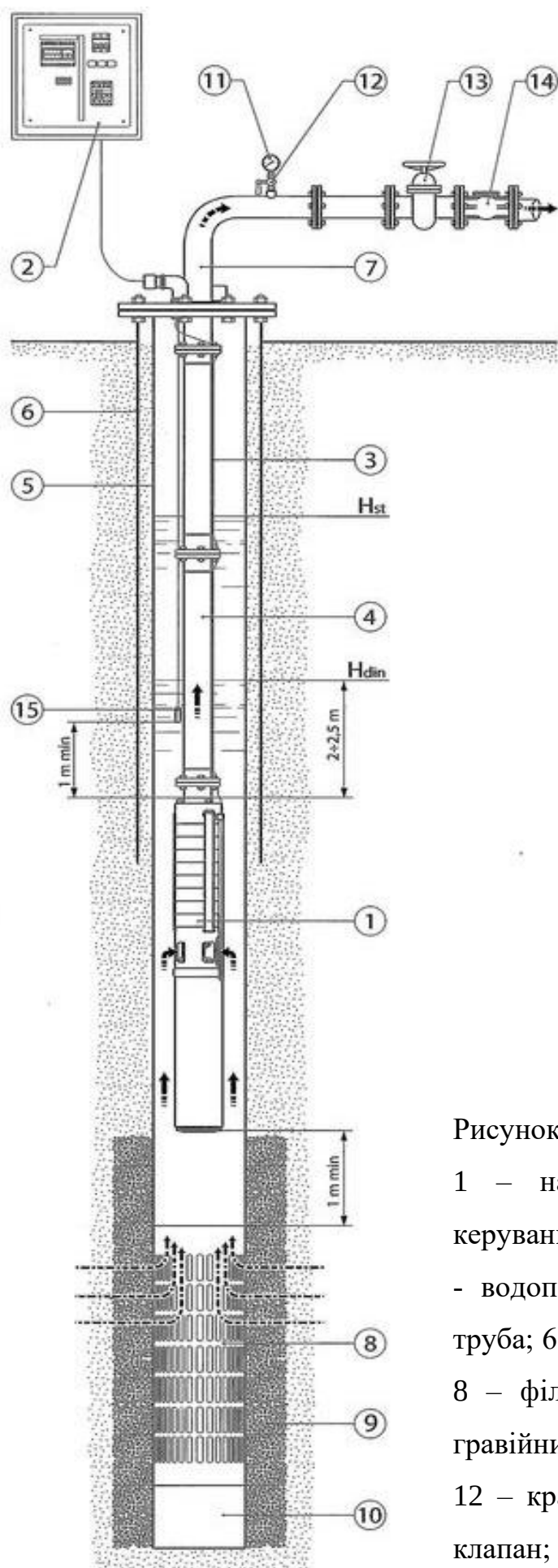


Рисунок 1.1 - Електронасосна установка.

1 – насосний агрегат; 2 – станція керування; 3 – електропровідний кабель; 4 – водопідіймальна колона; 5 – обсадна труба; 6 – кондуктор; 7 – труба (гирлова); 8 – фільтр свердловинний; 9 – фільтр гравійний; 10 – відстійник; 11 – манометр; 12 – кран; 13 – засувка; 14 – зворотній клапан; 15 – датчик сухого ходу.

Електродвигуни спроектовані для ефективної роботи при температурі води до 25 °С і можуть бути включені не більше ніж тричі за годину з інтервалом не менше п'яти хвилин між ними. При запуску електронасосного агрегату необхідно забезпечити рівень напруги в точках підключення виводів двигунів до живильного кабелю, який становить не менше вісімдесяти відсотків для електродвигунів потужністю до 3,0 кВт і шісдесят п'ять відсотків для електродвигунів більше 3,0 кВт в порівнянні з номінальною напругою.

Характеристикою ізоляції є значення опору ізоляції обмоток статора електродвигуна відносно корпусу наповненого водою і утримується таким чином принаймні одну годину, має бути не менше 10 МОм і 500 кОм при температурі робочого двигуна.

Для двигунів із потужністю до і включно 2,8 кВт, швидкість із якою вода омиває заглибний електродвигун повина становити не менше - 0,1 м/с; для двигунів до і включно 16 кВт не менше 0,3 м/с; для двигунів понад 16 кВт повина становити не менше - 0,6. м/с

Ізоляція обмотки статора виготовляється за допомогою дротів із водостійкою ізоляцією, з припустимою температурою нагріву 80 °С. Пазова ізоляція виконується за допомогою плівки із поліхлорвінілу марки В, а кінці обмотки з'єднуються за допомогою проводу з поліетиленовою ізоляцією марки ЗПС чи ВПВ.

Середньостроковий ресурс експлуатації до проведення першого регламентованого капітального ремонту повинен бути не менше 12,5 тисяч годин роботи для двигунів типорозмірів 69 - 150 мм, і 14 тисяч годин для діаметрів 180 - 270 мм.

Загально середній термін служби заглибних електродвигунів становить близько 5 років.

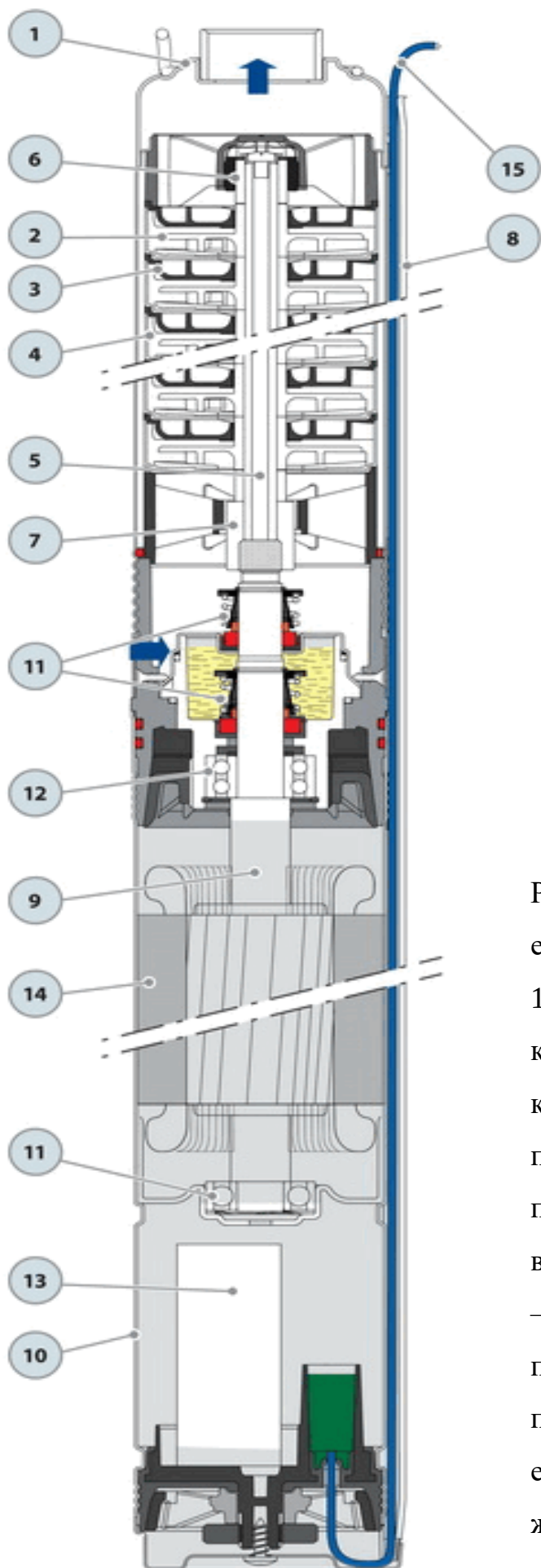


Рисунок 1.2 - Заглибний насос з електродвигуном.

1 – корпус з кришкою; 2 – робоче колесо; 3 – дифузор; 4 – несуча коробка; 5 – вал насоса; 6 – підшипник насоса; 7 – муфта привода; 8 – захист кабеля; 9 – ведучий вал; 10 – кожух двигуна; 11 – подвійне механічне ущільнення з проміжною масляною камерою; 12 – підшипник; 13 – конденсатор; 14 – електродвигун; 15 – кабель живлення.

1.2. Аналіз причин виходу заглибних електродвигунів з ладу

Ефективність та довговічність електродвигунів, використовуваних у системах електроприводу заглибних насосів для свердловин та глибоких водойм, залишає бажати кращого. Розрахунковий термін служби цих електродвигунів складає 14 тисяч годин, проте в реальних умовах експлуатації вони виходять з ладу набагато раніше, і їх фактичний ресурс складає 3-4 тисяч годин. Щорічна кількість виходу із ладу електродвигунів становить близько 20 - 25% від загальної кількості [4]. Така ситуація вимагає уваги та вдосконалення експлуатаційних показників для забезпечення стійкості та безперебійної роботи цих пристроїв.

Існуючі методи, стратегії та засоби, спрямовані на підвищення експлуатаційної надійності систем підймання води, не досягають необхідного рівня ефективності, що спричиняє необхідність у подальшому вдосконаленні цих методів та засобів.

Основні фактори, що спричиняють вихід з ладу заглибних електродвигунів, представлені на рисунку 1.3 та літературних джерелах [4]:

- Відсутність або недостатній рівень технічного обслуговування і ремонту під час експлуатації;
- Перевантаження обладнання та робота в неповнофазному режимі;
- Пошкодження ізоляції, зменшення її опору;
- Низька надійність електричних мереж, низька якість захисту від аварійних режимів;
- Вихід з ладу деталей насосного агрегату, знос підшипників;
- Вплив навколишнього середовища.

Для подальшого вдосконалення систем електроприводу важливо розглядати ці причини та шукати нові методи та засоби для забезпечення стійкої та ефективної експлуатації заглибних електродвигунів у виробничих умовах.

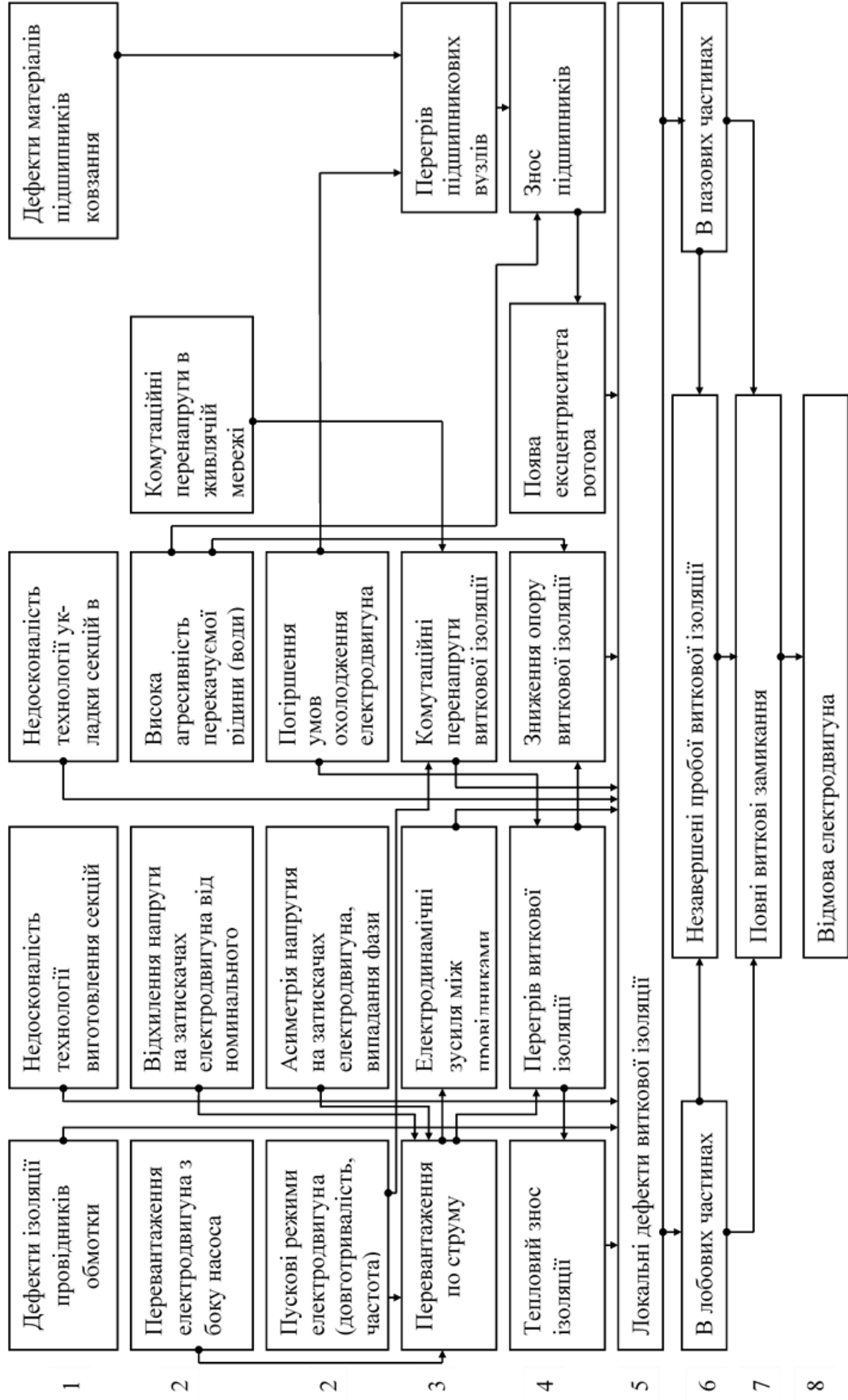


Рисунок 1.3 – Структурна схема розвитку пошкоджень загального електродвигуна. 1 – початкові дефекти технологічного походження; 2 – експлуатаційні впливи, що призводять до розвитку початкових дефектів; 3-8 – наступні стадії розвитку пошкоджень

За статистичними даними [2], на обмотку статора занурювального електродвигуна припадає близько 80% відмов. За іншими даними [2, 3, 4], 85-90% насосів виходять з ладу через несправності в електродвигунах, найчастіше - вигоряє обмотка у зв'язку з неспрацюванням пуско-захистної апаратури.

Детальний аналіз причин відмови електронасосної установки представлено в таблиці 1.1 [2-6].

Таблиця 1.1 Розподіл причин відмов у роботі заглибних електродвигунів

Причина виходу з ладу	За різними джерелами			
	%			
Несиметрія напруги, обрив фази	17,5	44	30	31,3
Перевантаження двигуна	49,5	6	11	32,3
Пробій ізоляції	-	23	33	7,8
Заклинювання ротора двигуна, валу насоса	-	23	9	18,1
Знос підшипників, руйнування	25,6	-	1	-
Причини (не враховані)	7,4	4	16	10,5

На рисунку 1.4 наведено детальніший аналіз причин відмов електронасосних агрегатів.

Втім, наведені дані не можна розцінювати як абсолютно точні, оскільки окремі причини тісно пов'язані одна з одною і часто взаємозалежні. Згідно з [1, 23], головною причиною виходу статорів обмоток електродвигунів з ладу є низька якість систем керування водопідійманням. Важливо відзначити, що багато насосних установок взагалі не обладнані захисними пристроями, або вони є, але виявляються неналаштованими. Отже, підвищення надійності електронасосних агрегатів вимагає комплексного підходу з урахуванням усіх факторів, що впливають на їх роботу.

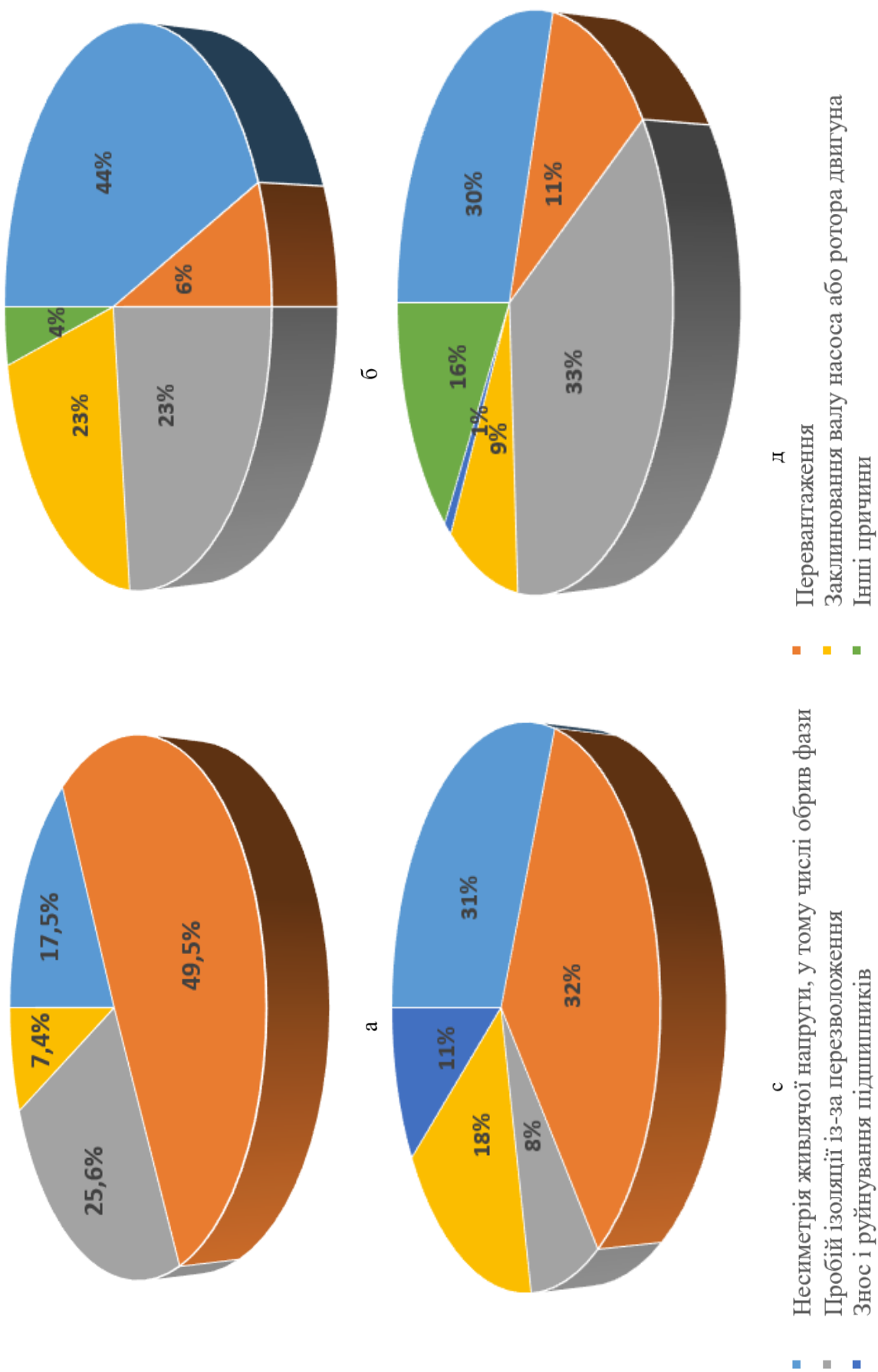


Рисунок 1.4 - Розподіл головних причин відмов загальних електродвигунів

На підставі аналізу чинників, що призводять до відмови заглибних електродвигунів, можна провести класифікацію причин виходу з ладу, розподіливши їх у базові групи (рис. 1.5): дефекти в проектуванні, технологічні дефекти, дефекти, пов'язані з природним зносом матеріалів і дефекти, що залежать від умов експлуатації.



Рисунок 1.5 - Класифікація причин виходу з ладу заглибного електродвигуна

Виходячи з аналізу чинників, що призводять до відмови занурювального електродвигуна, можна класифікувати причини виходу з ладу, розбивши їх на основні групи:

Дефекти проектування. Недоліки проектування є наслідком помилок та прорахунків під час розроблення конструкцій електродвигунів певного типорозміру.

Дефекти технологічного походження зумовлені порушеннями у технологічних процесах виробництва деталей і вузлів. Вони можуть мати як загальний, так і локальний характер.

Експлуатаційні дефекти виникають через недотримання правил і норм технічної експлуатації електроустаткування, а також невідповідності конструкції умовам довкілля чи режиму роботи.

Дефекти, пов'язані з природним зносом матеріалів. Пошкодження внаслідок природного зносу пов'язані зі старінням матеріалів ізоляції, корозією, стиранням робочих поверхонь деталей тощо.

Іншим важливим чинником, що призводить до відмов електродвигунів, є пошкодження ізоляції обмоток після тривалої експлуатації. Такі ушкодження виникають або в лобових ділянках, або безпосередньо в пазах. У лобових частинах пошкодження зазвичай зумовлені частковими механічними ушкодженнями ізоляції під час намотування чи збирання двигуна, а також наявністю сторонніх включень, що з часом призводить до пробую.

Ушкодження ізоляції безпосередньо в пазах викликані переважно перевантаженнями двигуна, оскільки пазова частина обмотки при номінальному навантаженні більше нагрівається і швидко досягає граничних температур [7]. Внаслідок розвитку локальних дефектів у полівінілхлоридному шарі утворюються канали й тріщини, крізь які вода проникає до другого ізоляційного шару з емалі, товщиною 0,05 мм. Оскільки емаль не пристосована до роботи у воді, поєднана дія води, напруги і температури з часом руйнує і цей шар.

Згідно з дослідженнями [2], спочатку через місце пробую чи механічного пошкодження ізоляції починає протікати струм, який поступово нагріває ізоляцію в зоні ушкодження. Нагріта ізоляція руйнується, струм зростає, нагріваючи ізоляцію сусідніх витків обмотки, в яких теж виникають тріщини.

З часом виникає виткове замикання, струм в пошкоджених витках різко збільшується, нагріваючи ізоляцію вздовж усього коротко замкнутого витка. В результаті ізоляція виходить з ладу - спікається і розтріскується.

Також часто зустрічаються корозійні ушкодження: руйнування пакетів ротора і статора, інших елементів конструкції. Це пов'язано з агресивним впливом середовища.

Одним з основних видів пошкоджень занурювальних електродвигунів є ушкодження внаслідок зносу підшипників ковзання - напрямних і упорного. Підшипникова пара складається з напресованої на вал втулки з нержавіючої сталі марки 3X13 або 4X13 та гумової втулки, армованої залізом, чи втулки з текстоліту марки Б. Мастилом слугує вода, що заповнює внутрішню порожнину електродвигуна.

У разі пошкодження вузла ущільнення верхнього кінця валу всередину може потрапляти пісок та інші абразивні частинки. Це призводить до появи кільцевих подряпин на поверхні втулок та стирання матеріалу робочих поверхонь. Під час "сухого ходу", коли підшипники працюють без водяного змащення, втулки з текстоліту можуть перегріватись і руйнуватись. Також відбувається розтріскування робочої поверхні опор та стирання поверхонь тертя.

Таким чином, до чинників, що прискорюють знос підшипників, відносяться:

Перевантаження електродвигунів;

Наявність механічних домішок у воді, що омиває підшипники, її агресивність, погіршення змащувальної здатності;

Робота в режимі "сухого ходу" без водяного змащення.

Знос підшипників призводить до зміни розмірів ротора, його ексцентриситету, внаслідок чого виникає тертя об пакет сталі статора. Це у свою чергу пошкоджує і виводить з ладу обмотку статора [4].

Отже, проблема зносу підшипників є досить серйозною для занурювальних електродвигунів. Її вирішення вимагає комплексу заходів - від удосконалення конструкції вузлів тертя до забезпечення належних умов експлуатації [4].

1.3 Шляхи забезпечення експлуатаційної надійності заглибних електродвигунів

Впровадження новаторських підходів у сфері дослідження заглибних електродвигунів для підвищення експлуатаційної надійності в умовах агропромислового комплексу стає важливим завданням. Насамперед, слід визначити, що електродвигуни цього типу піддаються впливу великої кількості факторів, які можуть негативно впливати на їхню ефективність та тривалість служби.

У результаті статистичного аналізу можна відзначити високий рівень аварійності електродвигунів, який може досягати значних значень, що веде до непередбачуваних витрат на ремонт і заміну обладнання. Проведені дослідження вказують на те, що нормований ресурс роботи заглибних електродвигунів нерідко виявляється недосяжним, а фактичний час служби суттєво скорочується.

Одним із ключових факторів, які варто враховувати при аналізі ефективності роботи електродвигунів, є асиметрія напруги та струмів у розподільних мережах. Підключення як трифазних, так і однофазних споживачів може призводити до дисбалансу, що має прямий вплив на роботу електродвигунів та їхню тривалість служби.

Враховуючи особливості умов експлуатації електродвигунів у сільському господарстві, можна виділити низку факторів, що збільшують ймовірність виникнення аварій. До таких факторів можна віднести низьку

якість напруги в електромережах, обмежений доступ до технічного обслуговування та інші.

Таким чином, завданням дослідження є розробка та впровадження нових методів функціонального моніторингу режимів роботи заглибних електродвигунів. Математична модель, що враховує теплові перехідні процеси, дозволить більш точно визначати швидкість зносу ізоляції під час різних режимів експлуатації. Впровадження пристроїв моніторингу також сприятиме збільшенню оперативності та реагування на можливі аварійні ситуації, зменшуючи витрати на ремонт та підвищуючи загальну ефективність систем електропостачання.

1.4 Висновки до першого розділу

1. На даний час для підйому води зі свердловин глибиною 20-120 м використовуються електронасосні агрегати із занурювальними електродвигунами. При середньому ресурсі роботи 14000 годин, фактично електродвигуни виходять з ладу вже після 4000 годин експлуатації.

2. Аналіз причин відмов показує, що найбільш вразливим елементом є обмотка статора та її ізоляція. Саме через пошкодження ізоляції 80-90% електродвигунів виходить з ладу.

3. Отже, пріоритетним напрямком підвищення надійності має стати розробка системи моніторингу зношення ізоляційної конструкції обмоток статора. Це дозволить значно збільшити термін служби електродвигунів.

4. Також важливі заходи із запобігання перевантаженням, корозії, забрудненню води абразивними частками та іншим факторам, що негативно впливають на роботу електродвигунів під час експлуатації.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ПАРАМЕТРИ МОНІТОРИНГУ ОЦІНЮВАННЯ ЗАГЛИБНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

2.1 Методи моніторингу поточного стану заглибних електродвигунів

У практиці технічного обслуговування занурювальних електродвигунів можна виділити такі основні стратегії [2, 4, 7]:

Обслуговування за потреби - після виходу з ладу електричної машини, електродвигуна;

Планово-профілактичне обслуговування - проведення профілактичних заходів незалежно від технічного стану;

Планово-діагностичне обслуговування - профільна з урахуванням технічного стану шляхом періодичної діагностики (моніторингу).

Однак жодна з цих стратегій не дозволяє контролювати динаміку розвитку пошкодження та зносу окремих вузлів і деталей, насамперед – ізоляційної конструкції. Для підвищення ефективності технічного обслуговування доцільно використовувати системи безперервно діагностування (моніторингу).

Методи безперервного моніторингу [5], що більш збільшують термін служби занурювальних електродвигунів, базуються на стратегії раннього попередження розвитку процесів пошкодження та зносу ізоляції обмоток та інших елементів. Суть відбувається в постійному контролі параметрів, що характеризують поточний технічний стан ізоляції, та своєчасному інформуванні персоналу про ненормальний розвиток процесів з планом подальшої моніторингу під час технологічних простоїв без зупинки електродвигуна.

Відключення має відбуватися лише у випадку, коли подальша робота може спричинити різке зниження технічного стану або вихід з ладу. Захист від аварійних режимів має розглядатися як крайній захід [8]. Такий підхід

дозволить мінімізувати простоту, запобігти раптовим відмовам та максимально продовжити термін експлуатації електродвигунів без зайвих технологічних витрат.

Відповідно до класифікації (див. рис. 2.1), методи безперервного моніторингу охоплюють теплові процеси, що відбуваються в електричних двигунах. Ці процеси можуть бути супроводжувані надмірними струмами або виникати в умовах неповного фазного режиму. Крім того, вони дозволяють визначати технічний стан ізоляції електричних двигунів. Зокрема, методи безперервного моніторингу можуть бути застосовані для аналізу теплових процесів, що виникають під час роботи електричних двигунів. Це важливо для виявлення можливих несправностей та попередження перегріву. Також, вони дозволяють відстежувати та контролювати надмірні струми, що можуть виникнути внаслідок різноманітних експлуатаційних умов.

Методи безперервного моніторингу стають особливо корисними при роботі електричних двигунів в неповнофазних режимах, де можуть виникнути специфічні проблеми. Такий підхід дозволяє вчасно виявляти та усувати аномалії, що можуть виникнути в таких умовах. Позаяк стан ізоляції електричних двигунів є критичним фактором для їхньої надійної роботи, методи безперервного моніторингу також забезпечують оцінку цього параметра. Це важливо для запобігання виникненню витоків струму та забезпечення тривалої та безперебійної експлуатації електричного обладнання.

Аналіз структурної схеми на рис. 1.3 показує, що основними параметрами для функціонального моніторингу електродвигунів є швидкість теплового зносу ізоляції та механічна потужність на його валу. Саме контроль цих двох параметрів дозволяє комплексно оцінити працездатність електродвигунів з урахуванням як стану ізоляції, так і процесу електромеханічного перетворення енергії безпосередньо в самій машині.

Крім основних параметрів швидкості теплового зносу ізоляції та механічної потужності, непрямыми параметрами моніторингу

електродвигунів також є: температура сталі, перевищення температури обмотки, сила струму, ковзання, напруга зсуву нейтралі та момент.

Проведені дослідження вказують, що система безперервного моніторингу обов'язково має охоплювати:

- Теплові процеси в електричних машинах;
- Процеси з перевантаженнями та надструмами;
- Режими несиметричного навантаження;
- Поточний стан ізоляції.

Моніторинг саме цих процесів дозволить комплексно оцінювати технічний стан та оперативно виявляти несправності електродвигунів під час роботи. Існує декілька основних методів безперервного моніторингу теплових процесів в електродвигунах:

- Безперервний контроль струму та порівняння з номінальним значенням.
- Безперервний контроль перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища.
- Безпосередній контроль абсолютного значення температури обмотки.
- Аналогічний контроль температури сталі статора та ротора.
- Безперервний контроль швидкості теплового старіння ізоляції обмоток.
- Підрахунок інтегрального теплового зносу ізоляції.
- Облік квадрата струму для оцінки теплових втрат.
- Моделювання теплових процесів в електричних колах за допомогою аналогових і цифрових електричних моделей.

Вибір конкретного методу залежить від умов експлуатації, вимог та наявних технічних засобів. Комплексне використання декількох методів підвищує достовірність моніторингу.

Існують такі основні методи безперервного моніторингу процесів з перевантаженням та надструмами:

- Контроль імпульсів надструму та порівняння з допустимими

значеннями.

- Підрахунок кількості виникаючих надструмів та аналіз динаміки.
- Облік інтегрального пошкодження ізоляції від сумарної дії підвищеної температури та надструмів.

Такий комплексний контроль дозволяє виявляти як раптові стрибки струму, так і накопичення поступових пошкоджень ізоляції обмоток. Це сприяє своєчасному запобіганню відмовам через перевантаження та перегрів електродвигунів.

Для безперервного моніторингу процесів за несиметричних режимів навантаження можуть використовуватися такі основні методи:

- Контроль імпульсів надструму при перекиданнях електродвигуна та порівняння з допустимими значеннями.
- Безпосередній контроль напруги нульової послідовності в електричних колах живлення.
- Контроль струмів витоку статора, зумовлених несиметрією навантаження.

Моніторинг даних параметрів дозволяє своєчасно виявляти виникнення та розвиток аварійних режимів, пов'язаних з обривом фаз, перекосами напруг та несиметричним навантаженням. Це дає змогу уникати пошкоджень електродвигунів.

Для безперервного контролю поточного стану ізоляції електродвигунів може використовуватися метод безперервного вимірювання струмів витоку та порівняння їх із допустимими значеннями. Зростання струмів витоку вказує на зниження питомого опору ізоляції, що є ознакою розвитку поступових дефектів або наближення граничного стану.

Класифікація методів та параметрів безперервного моніторингу електричних машин на прикладі заглибного електродвигуна приведена на рис.

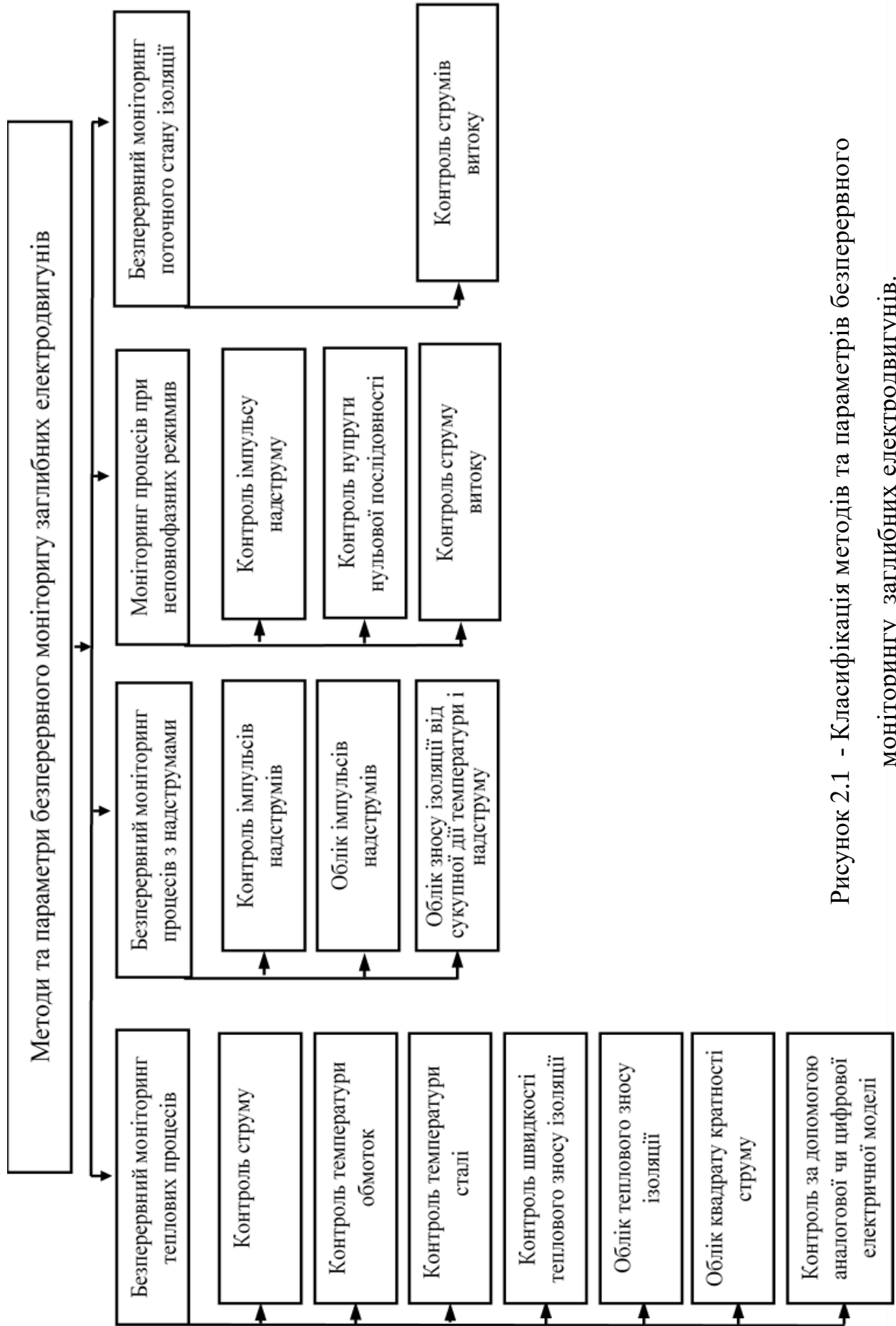


Рисунок 2.1 - Класифікація методів та параметрів безперервного моніторингу заглибних електродвигунів.

2.2 Засоби, що підвищують експлуатаційну надійність заглибних електродвигунів

Для захисту занурюваних електродвигунів від аварійних режимів на даний час використовуються як спеціалізовані станції керування та захисту, так і типові пристрої серійного виробництва. Спеціалізовані станції дозволяють реалізувати системи комплексного моніторингу з урахуванням особливостей конкретного устаткування та технологічного процесу. Проте їх недоліком є висока вартість та необхідність налаштування під задачу. Типові релейні захисти та автоматика значно дешевші, проте мають обмежені функціональні можливості. Їх перевагою є простота обслуговування та заміни. Отже, вибір засобів захисту має базуватися на аналізі потреб конкретного застосування, вимог до функцій моніторингу і бюджетних обмежень.

Існуючі пристрої захисту електродвигунів реагують на певні види аварійних режимів (рис. 2.2): перевантаження, несиметрію напруги, зниження опору ізоляції, короткі замикання, заклинювання ротора [4, 8].

Принцип захисту визначається фізичною природою параметра, який контролює вимірювальний перетворювач або чутливий елемент.

Доцільно класифікувати пристрої захисту за контрольованим параметром:

- Теплові (контроль перегріву);
- Струмові (контроль струмів);
- Температурні (контроль температури);
- Фільтрові (контроль вищих гармонік);
- Комбіновані (декілька параметрів);

Така класифікація дозволяє систематизувати існуючі технічні рішення та підібрати оптимальний варіант захисту під конкретні вимоги.

У пристроях теплового захисту контролюється струм, а реакція відбувається на теплове навантаження нагрівальних елементів, ввімкнених послідовно з фазами статора. Так працюють реле ТРН, ТРП, РТТ, TSA, ТРА,

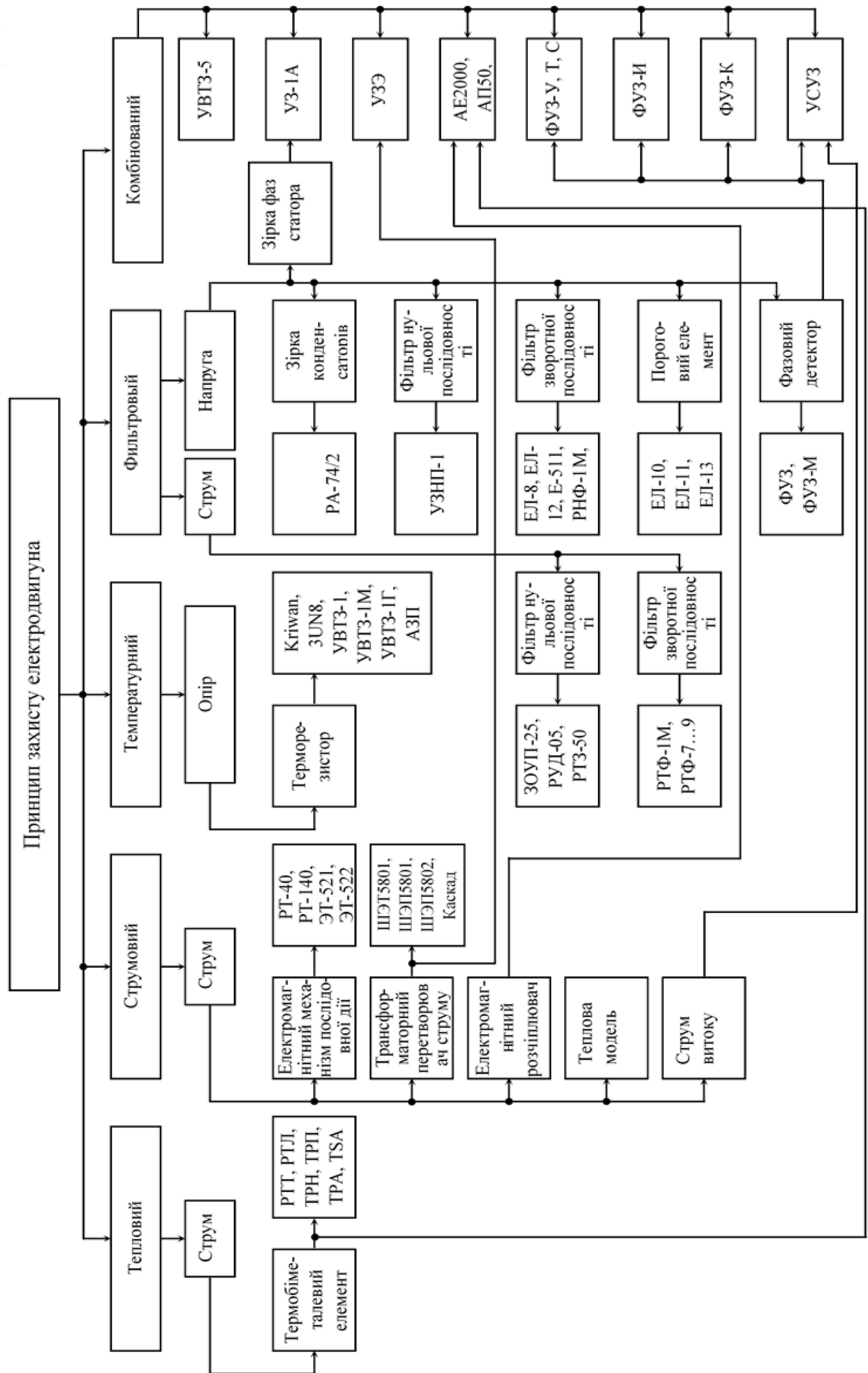


Рисунок 2.2 - Класифікація принципів і пристроїв захисту заглиблених електродвигунів

РТЛ та інші. Основним елементом теплових реле є біметалева пластина з двох матеріалів з

різними температурними коефіцієнтами розширення. Під дією нагрівання струмом вона вигинається. Перевагою таких реле є простота конструкції та монтажу. Однак їх спрацювання сильно залежить від початкового стану - час спрацювання на холодному та нагрітому реле відрізняється.

Під час пуску електродвигунів нагрівальні елементи теплових реле шунтуються для запобігання хибного спрацювання [11]. Після розгону шунтування знімається. При перевантаженнях на 20% теплові реле спрацювають за 30 хв, а при $(5-7) \cdot I_n$ - за 10-20 с [7]. Проте при тривалих невеликих перевантаженнях час спрацювання має великий розкид і захист є ненадійним. Оскільки стала часу нагрівання обмоток і термоелементів реле різняться, можливе повторне ввімкнення до охолодження обмотки згідно з літературою [10]. Це ускладнює визначення часу повторного вмикання персоналом. За статистикою, при захисті тепловими реле щорічно виходять з ладу до 10% електродвигунів [15].

Захист електродвигунів від перевантажень та аварійних режимів роботи є важливим завданням. Як у пристроях теплового захисту, так і в пристроях струмового захисту ключовим контрольованим параметром виступає сила струму електродвигуна. Ідеальний пристрій струмового захисту має часострумову характеристику, що збігається або трохи нижча за перевантажувальну характеристику двигуна.

Захист асинхронних електродвигунів, зокрема заглибних, здійснюється за допомогою струмових реле, таких як реле мінімального струму ET-521, реле максимального струму PE-2111, P-4000, PE-570T тощо. Чутливим елементом цих струмових реле виступає електромагнітний механізм, що виконує функцію порогового елемента.

Реле мінімального струму розриває ланцюг живлення електродвигуна при зникненні струму в будь-якій фазі, тому його встановлюють в кожній фазі

живлення. Реле максимального струму, навпаки, спрацьовує при збільшенні споживаного електродвигуном струму. [4, 8].

Додатково відомо, що деякі сучасні мікропроцесорні пристрої дозволяють підвищити надійність захисту електродвигунів. Вони здатні контролювати не лише струм, але й напругу, потужність, температуру обмоток та підшипників.

Отже, теплові реле доцільно використовувати спільно з іншими видами захисту в комплексних системах для підвищення надійності.

Автоматичні вимикачі мають низку суттєвих переваг, таких як проста конструкція та можливість комутації силових ланцюгів. Саме тому вони оснащені всіма станціями керування заглибними електродвигунами, зокрема й станцією керування ПЕТ, де автоматичний вимикач виконує функцію єдиного захисту від захисту. Водночас, поряд із беззаперечними перевагами, автоматичним вимикачам притаманні й певні недоліки. Який, відсутній контроль неповнофазного режиму роботи електродвигунів, один великий розкид параметрів теплових розчіплювачів.

За результатами статистичного аналізу, щорічно з ладу виходить близько 8,02% електродвигунів, захищених тепловими реле та автоматичними вимикачами [10]. Це про недостатню надійність існуючих засобів захисту та потребу їх вдосконалення.

Ефективним засобом захисту електродвигунів від перевантаження та коротких замикань є автоматичні вимикачі різних серій, зокрема АЕ-2000, ВА-51 тощо. Такі вимикачі мають електромагнітний або комбінований розчіплювач, додатково оснащений електротепловим розчіплювачем. Деякі вимикачі можуть комплектуватися розчіплювачами мінімальної напруги, що відмикають автоматично при недопустимому зниженні напруги в мережі, а також розчіплювачами дистанційного керування.

Автоматичне спрацьовування вимикача при коротких замиканнях відбувається завдяки тому, що якийсь електромагнітний розчіплювач під дією електромагнітних сил притягується до механізму відключення. Тепловий

розчіплювач реагує на відносно невеликі, але тривалі перевантаження за принципом, аналогічним тепловому реле.

Сучасні автоматичні вимикачі з комбінованими розчіплювачами – відносно надійний засіб захисту електродвигунів від різних аварійних режимів. Отже, незважаючи на очевидні переваги простоти конструкції та здатності комутації потужності, автоматичні вимикачі потребують удосконалення для підвищення надійності захисту електродвигунів від аварійних режимів.

Трансформаторні датчики струму (ТДТ) широко застосовуються в сучасних струмових захисних пристроях за рахунок пропорційності їх вихідної напруги вхідного струму. ТДТ є невід'ємною частиною таких станцій керування заглибними насосами, як ШЕТ-5801, ШЕП-5801, ШЕП-5802, «Каскад», а також пристрої захисту РДЦ із літератури [4]. У цих системах ТДТ забезпечує роль первинних перетворювачів струму навантаження електродвигунів.

Конструктивно в кожній фазі живлення електродвигуна встановлено первинну обмотку ТДТ. Вторинні обмотки всіх трьох фаз з'єднані в зірку, напруга з якої надходить спочатку на трифазний випрямляч, а потім на ланцюг затримки спрацьовування та пороговий елемент [4, 8]. За умови перевантаження чи обриву однієї з фаз, струм в інших двох фазах зростає, відповідно додається вихідна напруга випрямляча. При перевищенні цієї напругою порогу спрацювання відбувається відключення живлення електродвигуна.

Водночас, захист на основі ТДТ має певні недоліки: наявність реагування на обрив фази за умови недовантаження електродвигуна, нестабільність спрацювання через зміну опори контактних з'єднань та корозію елементів системи тощо. Це необхідно для подальшого вдосконалення таких станцій керування.

Для оцінки стану ізоляції обмоток асинхронних електродвигунів використовує метод контролю струмів витoku. Він дозволяє порівнювати

нормування та фактичні значення опору ізоляції статора, оскільки безпосередній вимір опору фактично не завершується.

Контроль струмів виток виконується перед кожним попуском електродвигуна в таких системах, як станція управління УСУЗ, пристрої комбінованого захисту тощо [13]. В них пороговим елементом є неонові лампи з паралельним включенням конденсатора. Заряд конденсатора струмами виток через резистори причиною до спрацювання лампи, що сигналізує про порушення ізоляції. Відомо, що струми виток перед введенням електродвигунів в експлуатацію становлять 1,5-6 мкА. З часом ці струми зростають на кілька порядків, що вказує на зниження ізоляційних властивостей.

Основним критерієм нормального режиму роботи електродвигунів є допустима обмотка статора. Це зумовило створення ряду пристроїв температурного захисту - УВТЗ-1, УВТЗ-1М, УВТЗ-1Г, АЗП, Kriwan, 3UN8 та інші. Вони забезпечують надійне відключення електродвигунів при всіх аварійних режимах, пов'язаних з перегрівом обмоток.

Принцип дії таких пристроїв базується на вимірюванні опору вмонтованих в обмотку статора терморезисторів (позисторів). За умови перевищення температури порогу спрацювання позистора, його опір різко зростає і подається команда на відключення живлення [4, 7, 8, 15].

Недоліком є деяке запізнення спрацювання через температурні бар'єри між обмоткою та датчиком і динамічні похибки для швидкого розгону температури. У заглибних двигунах компенсація динамічної похибки не застосовується через ускладнення конструкції.

Пристрої вбудованого температурного захисту мають низку недоліків, що унеможлиблює їх надійне застосування для охорони заглибних електродвигунів, таким чином, вони не забезпечують безпечного захисту за умови загальмованого ротора, неповнофазних режимів та обриву фази в недовантажених двигунах.

Крім того, довгі лінії підключення терморезисторів, що проходять разом із силовими проводами, сприяють виникненню завад, помилковим спрацюванням і навіть виходу з ладу пристроїв захисту. За статистикою щорічно виходить з ладу понад 6,0% таких двигунів.

Установка терморезисторів одночасно в обмотках статора, як у пристроях УВТЗ, неможлива для заглибних насосів через невідповідність температурного спрацювання захисту та граничної температурної ізоляції. Для захисту заглибних насосів пристрої типу УВТЗ не підходять через невідповідність температурного захисту захисту та граничної температурної ізоляції обмоток. Існують модифікації для облікових записів розміщення в нагрівальні елементи, але вони мають значне запізнення спрацювання та обмежену довговічність.

Актуальним завданням є розробка спеціального температурного захисту для заглибних електродвигунів з високою надійністю та швидкістю. Отже, необхідні подальші дослідження для створення надійного та швидкого температурного захисту заглибних двигунів.

Для перевірки стану ізоляції та вимірювання струмів потоку в обмотках електродвигунів розроблені захисні пристрої, що базуються на фільтровому принципі. також, в пристроях РУД-05, ЗОУП-25 використовують фільтр струмів нульової компенсації.

Він містить трансформатор струму нульової залежності (ТТНП), первинною обмоткою якого є три фази, що здійснюють живлення двигуна. Для нормального стану ізоляції вторинна обмотка не має напруги. Проте при пошкодженні ізоляції виникає струм витоку по контуру "фаза-ізоляція-корпус-нуль", який створює магнітний потік у сердечнику ТТНП. Це індукує напругу у вторинній обмотці, що подає сигнал про несправність та подається на відключення живлення електродвигуна.

Отже, фільтри струмів нульової послідовності можуть ефективно контролювати стан ізоляції обмотки та своєчасно реагувати на її погіршення.

Для контролю повнофазної роботи електродвигунів також використовують захист за струмом нульової активності на основі трьох трансформаторів режиму струму. За умови обриву фази на виході такого фільтра з'являється струм, достатній для спрацювання захисту.

Однак основним недоліком цього методу є ймовірність помилкових спрацювань в несиметричних електричних мережах.

Також використовується захист на базі фільтрів зворотної взаємодії, вихідний сигнал якого залежить від величини та симетрії фазних струмів. Цей сигнал зростає при обривах фази чи заклинюваннях ротора. Проте основним недоліком є нестабільність роботи через асиметрію мережі живлення.

Отже, необхідні подальші дослідження з розробки надійного та стійкого до зовнішніх чинників струмового захисту електродвигунів від обриву фази.

Існує також спосіб реалізації захисту електродвигунів за напругою нульової послідовності з використанням контролю повнофазного режиму. Один з них забезпечує створення штучної нульової точки за допомогою з'єднання трьох резисторів чи конденсаторів у зірці УЗНП-1. Інший - використання спеціального реле напруги нульової послідовності РА-74/2 [4]. Обидва методи можуть виявити порушення симетрії фазних напруг.

Проте перший спосіб не реагує на обрив фази разом на клемнику двигуна чи в мережі. Другий потребує доступу до нульової точки обмоток статора та застосування додаткових провідників. Тому актуальною задачею залишається розробка удосконаленого захисту від обриву фази на основі контролю напруги нульової комісії з урахуванням особливостей підключення конкретних електродвигунів.

Промислові підприємства виробляють спеціальні прилади захисту - реле контролю фазних напруг типів РНФ-1М, Е-511, РСН-13, ЕЛ-8, ЕЛ-12, які призначені для запобігання пошкодження електроустановок, зокрема електродвигунів, внаслідок обриву фази [4]. Чутливим елементом цих реле є фільтр напруги зворотної послідовності на базі RC-ланцюга. Сигнал з вихідного фільтра надходить на вхід порогового пристрою, який запобігає

хибному спрацюванню реле за умови несиметрії напруги в межах допустимих значень. Коло затримки часу виключає хибне спрацювання під час короточасних аварійних режимів. Реле Е-511 має дещо спрощену конструкцію без ланки затримки. Покращені дані реле є їх висока чутливість до обриву фази як на низьковольтній, так і на високовольтній стороні. Недоліком є наявність у фільтрі конденсаторів [8], які можуть створювати з котушками статора резонансні LC-контури, що впливають на розкид спрацювання реле. Для підвищення надійності релейного захисту доцільно передбачити резервування та використовувати мікропроцесорні та цифрові реле з розвиненою самодіагностикою. Також варто змінити адаптивні алгоритми налаштування установок і зон чутливості з урахуванням поточних режимів роботи електроустановок.

Реле типів ЕЛ-10 та ЕЛ-11 забезпечують функції контролю симетрії фазних напруг, подібно до реле ЕЛ-8 та ЕЛ-12. Проте на перевагу від останнього, де використовують фільтр напруги зворотної послідовності, в ЕЛ-10 і ЕЛ-11 в якості чутливого органу використовується схема з трьох компараторів напруги та логічним елементом АБО-НІ. За нормального симетричного режиму трифазної напруги прямої послідовності на виходах порогових пристроїв формується послідовність імпульсів з параметрами, які з урахуванням частоти та фази зсувають напругу мережі. Порухення симетрії або виникнення фазового захворювання до порушення синдрому виходу логічного елемента. Будь-які неприпустимі відхилення симетрії або порушення порядку фази призводять до порушення системних імпульсів на виході логічного елемента. Після закінчення часу затримки відбувається спрацювання реле та відключення електроустановки. Така схема має кращу завадостійкість та швидку хворобу з фільтровими реле. Застосовується для захисту потужних асинхронних електродвигунів та розподільних мереж.

У реле ЕЛ-13 в якості чутливого елемента використовується трифазний випрямляч. За умови симетричного режиму рівень пульсації на виході випрямляча має певне значення. При виникненні несиметрії фазних напруг у

контрольованій мережі рівень пульсації зростає. Сигнал, що працює про асиметрію, подається на вхід порогового елемента реле. Даний метод контролю фазних напруг за допомогою випрямляча є простим та надійним. Він швидко дозволяє реагувати на несиметрію як за характером (порушення процесу між фазними напругами), так і за положенням (порушення режиму відвідування фази). Переважно є технологічність та невисока вартість реалізації завдяки фільтровим реле.

Подальшим етапом розвитку фільтрових пристроїв контролю фази є схема ФУЗ зі спеціальним трансформатором струму, що повертає фазу, та фазовим детектором, на виході якого під'єднане реле. Перевагами цієї схеми є реагування як на обрив, так і на повторне підключення фази. Недоліками є реакція на незначні тривали перевищення допустимих навантажень у робочих режимах, а також спрацьовування на пускові струми електродвигунів через малу інерційність. Для покращення характеристик ФУЗ перспективним є використання програмованих мікропроцесорних або цифрових реле з адаптивними алгоритмами обробки параметрів захисту. Актуальним є також об'єднання фільтрових та порогових методів контролю напруги в одному багатофункціональному пристрої.

Вдосконалений ФУЗ-М містить додатковий захисний вузол, що покращує реакцію на невеликі тривалі перевантаження. Проте він не реагує на деякі опосередковані причини перегріву обмоток. Тому було створено комплексні пристрої, які контролюють одночасно кілька параметрів. Наприклад, у ФУЗ-У, ФУЗ-С, ФУЗ-Т додатково відстежується температура корпусу чи обмоток двигуна. У ФУЗ-І та інших пристроях додано контроль опору ізоляції обмоток та їх нагрівання. На основі ФУЗ-М розроблено станцію УСУЗ для захисту від зниження опору ізоляції заглибних двигунів. У пристрої УВТЗ-5 одночасно контролюється температура обмоток і напруга нульової консистенції. Такий комбінований підхід дозволяє підвищити надійність та повноту захисту електродвигунів.

Останнім часом в публікаціях, технічній літературі та патентах обговорюється ідея розробки пристроїв захисту, принцип роботи яких базується на відтворених теплових процесах в електродвигунах. Перевагами таких пристроїв є простота монтажу поруч із комутаційною апаратурою, усунення потреби прокладання додаткових провідників та встановлення термодатчиків на обмотках статора.

Використання теплових аналогів та математичних моделей для розрахунку параметрів нагріву є перспективним напрямком удосконалення пристроїв захисту електродвигунів. Це дозволяє підвищити надійність та гнучкість налаштування захисту.

2.3 Вибір методу моніторингу роботи заглибного електродвигуна.

До основних експлуатаційних факторів, які впливають на нагрів обмоток статора заглибних електродвигунів, належать тривалі перевантаження за струмом та несиметрія напруги живлення, включаючи неповнофазні режими.

Завданням дослідження теплових режимів електродвигунів є визначення середньої температури активних частин машини, а в ряду - дослідження максимальної температури та температурного поля. Аналіз цих параметрів необхідний для забезпечення надійного та ефективного теплового захисту електродвигунів.

Відповідно до тривалої роботи розрізняють два основних теплових режиму електродвигунів:

а) сталий тепловий режим, який має місце за тривалу роботу електродвигуна, коли подальше зростання температури практично припиняється;

б) несталий тепловий режим, який відповідає короткочасним режимам роботи електродвигуна.

Розрізнення цих режимів необхідне для коректного аналізу та прогнозування теплового стану електродвигунів та вибору засобів їх захисту.

Для обґрунтування вибору параметрів моніторингу технічного стану таких електродвигунів потрібно досліджувати максимальні температури їх обмоток статора в різних експлуатаційних режимах. Адже саме перевищення допустимої температури обмоток є однією з основних причин виходу електродвигунів з ладу. Тому аналіз максимальних температур дасть змогу правильно вибрати параметри і пороги спрацьовування захисних пристроїв та систем моніторингу.

Електродвигун є комбінацією матеріалів з різними теплофізичними характеристиками. Тому температура окремих його частин є неоднаковою. Стаціонарне температурне поле асинхронного електродвигуна можливо описати диференціальним рівнянням теплопровідності [6]:

$$\lambda_{ix} \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial x^2} + \lambda_{iy} \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial y^2} + \lambda_{iz} \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial z^2} + p_0 = 0 \quad (2.1)$$

де $\lambda_{ix}, \lambda_{iy}, \lambda_{iz}$ - коефіцієнти, Вт/(м·°C);

θ_i - температура, °C;

p_0 - питома потужність джерела тепла, Вт/м³.

Для аналізу теплових режимів електродвигунів використовують такі основні методи:

Метод температурних полів - базується на розв'язанні диференціального рівняння теплопровідності для різних точок електродвигуна.

Метод еквівалентних теплових схем - передбачає заміну електродвигуна схемою з концентрованими тепловими параметрами.

Метод еквівалентних гріючих втрат - заснований на заміні дійсних джерел тепла еквівалентними гріючими втратами.

Знання цих методик дозволяє обґрунтовано підійти до аналізу і прогнозування теплових режимів електродвигунів та їх захисту.

Метод температурного поля, цей метод базується на розв'язанні крайових задач теорії теплопровідності і передбачає використання системи диференціальних рівнянь з урахуванням внутрішніх джерел теплоти. Зазвичай розглядаються одно- чи двовимірні задачі, адже тривимірна задача призводить до громіздких обчислень [26]. Результати розрахунків методом температурного поля значно залежать від точності вихідних даних - розподілу втрат, параметрів вентиляції тощо. Тому за певної невизначеності вихідних даних доцільніше застосовувати спрощені швидкодіючі методи.

Метод еквівалентних гріючих втрат, він базується на принципі суперпозиції - сумарна температура активного елемента двигуна складається з перевищень температур, зумовлених окремими джерелами тепла в цьому чи інших елементах. Також, цей метод еквівалентних гріючих втрат ґрунтується на принципі накладення - температура активного елемента дорівнює сумі нагрівів від окремих джерел тепла.

Наприклад, перевищення температури обмотки статора визначається як сума:

$$\tau_1 = (P_{m1} + k_c P_c + k_{m2} P_{m2}) A_s \quad (2.2)$$

де k_c, k_{m2} - коефіцієнти впливу втрат;

A_s - еквівалентна теплова провідність, Вт/°С;

P_{m1} - втрати потужності в обмотці статора, Вт;

P_{c1} - втрати потужності в статорі, Вт;

P_{m2} - втрати потужності в обмотці ротора, Вт;

A_s - еквівалентна теплова провідність, Вт/°С.

Цей метод може застосовуватися для розрахунку середніх перевищень температур активних елементів електродвигунів, що працюють у повторно-короткочасних та стаціонарних режимах. Теплові параметри визначають експериментально або методом еквівалентних теплових схем. Вони є сталими лише для певного типорозміру двигуна [23]. Цей метод дозволяє спростити

розрахунок теплових режимів електродвигунів за умови наявності дослідних даних або попередньо побудованої еквівалентної теплової схеми.

Метод еквівалентних теплових схем, метод ґрунтується на аналогії між тепловими потоками та електричними струмами. Така аналогія базується на однаковій формі рівнянь теплообміну (закон Фур'є) та електричних кіл (закон Ома):

$$P = \Lambda \cdot \Delta \tau, \quad (2.3)$$

де $\Delta \tau$ – різниця перевищень температур, °С;

Λ - теплова провідність, Вт/°С;

$$I = g \cdot \Delta \varphi, \quad (2.4)$$

де $\Delta \varphi$ – різниця потенціалів, В.

g - електрична провідність, См;

Справді, головне допущення цього методу полягає у заміні розподілених в об'ємі джерел теплоти та теплопровідності зосередженими параметрами. Це дає змогу звести складну теплову задачу до розрахунку лінійного електричного ланцюга із зосередженими елементами за допомогою стандартних методів теорії електричних кіл та алгебри. Це дозволяє будувати еквівалентні електричні схеми замість складних теплових розрахунків.

Так, згідно методу еквівалентних теплових схем, електродвигун можна умовно зобразити у вигляді сукупності n однорідних тіл з внутрішніми джерелами теплоти P та перевищеннями температур τ [22]. Відведення теплоти у навколишнє середовище відбувається від деякого тіла з номером n , яке з'єднане теплопровідністю Λ_{n0} .

Відповідно для такої еквівалентної теплової схеми можна записати систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} A_{12}(\tau_1 - \tau_2) + A_{13}(\tau_1 - \tau_3) + \dots + A_{1n}(\tau_1 - \tau_n) &= P_1; \\ A_{21}(\tau_2 - \tau_1) + A_{23}(\tau_2 - \tau_3) + \dots + A_{2n}(\tau_2 - \tau_n) &= P_2; \\ \dots \\ A_{n1}(\tau_n - \tau_1) + A_{n2}(\tau_n - \tau_2) + \dots + A_{n(n-1)}(\tau_n - \tau_{(n-1)}) + A_{n0}(\tau_n - \tau_0) &= P_n. \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Складна теплова задача зводиться до розв'язку системи лінійних рівнянь.

Розв'язуючи систему лінійних алгебраїчних рівнянь еквівалентної теплової схеми (2.5) за відомих значень теплопровідностей (провідностей) і потужностей втрат у окремих елементах, можна обчислити перевищення температур цих елементів. Інакше кажучи, маючи вихідні дані про питомі втрати в елементах електродвигуна та коефіцієнти теплопередачі між ними, в результаті розв'язання отримуємо розподіл температур для кожного елемента теплової схеми, що відповідає розподілу температури в електричній машині.

Методом еквівалентних теплових схем визначаються середні температури окремих елементів електродвигуна. Одним з недоліків є складність у визначенні коефіцієнтів теплопровідності між елементами. Ще одна проблема - ускладнення розрахунків при збільшенні кількості еквівалентних тіл через зростання розмірності системи рівнянь.

Тому на практиці кількість еквівалентних тіл обмежують, розглядаючи лише найбільш нагріті вузли електричної машини.

Поєднуючи використання перерахованих вище методів, надає більше можливостей для температурному аналізу елементів заглибного електродвигуна.

Так, з урахуванням розглянутих особливостей методів, доцільно поєднати їх переваги наступним чином: за допомогою методу еквівалентних теплових схем змодельовати складові елементи електродвигуна та теплообмін між ними і зовнішнім середовищем, тобто визначити конфігурацію та параметри еквівалентної теплової схеми. Для розрахунку перевищення температури обмотки статора як найбільш важливого параметру скористатися методом

еквівалентних гріючих втрат з урахуванням даних побудованої теплової моделі.

Такий комбінований підхід дозволить врахувати переваги обох методів і підвищити точність та адекватність розрахунків теплових режимів електродвигуна.

2.4 Вибір параметру моніторингу роботи заглибного електродвигуна.

Із приведеного вище матеріалу видно, що найоб'єктивнішим моніторинговим параметром, який характеризує поточний стан теплового процесу в електродвигуні, є швидкість теплового зносу ізоляції ε , що залежить від температури обмотки:

$$\varepsilon = e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta}\right)} \quad (2.6)$$

$$\theta = \vartheta + 273. \quad (2.7)$$

Цей параметр дійсно є важливою інтегральною характеристикою теплового режиму двигуна та його впливу на старіння ізоляції. Тому контроль швидкості теплового зносу дасть змогу опосередковано оцінювати ступінь перегріву обмоток та прогнозувати залишковий ресурс ізоляції.

Оскільки швидкість теплового зносу ізоляції постійно змінюється, то для оцінки загальної тенденції теплового процесу за період часу t_U доцільно використовувати усереднену швидкість зносу ізоляції ε_c , тоді маємо наступний вираз

Так же, як і температура, швидкість теплового зношення ізоляції знаходиться в постійній зміні (рис. 2.6). Тому в якості моніторингового параметра, який характеризує загальний напрямок теплового процесу за

певний проміжок часу t_U , можна прийняти середнє значення швидкості теплового зношення ізоляції ε_c . Очевидно, що

$$\varepsilon_c \neq e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta_c}\right)} \quad (2.8)$$

$$\theta_c = \vartheta_c + 273 \quad (2.9)$$

З метою інтегральної оцінки теплового зношення ізоляції пропонується запровадити показник середньоеквівалентної температури за певний період експлуатації ϑ_{ce} . Ця величина дозволяє опосередковано врахувати сукупний вплив температурних режимів двигуна на старіння ізоляційних матеріалів за заданий проміжок часу.

$$\varepsilon_c = e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta_{ce}}\right)} \quad (2.10)$$

$$\theta_{ce} = \vartheta_{ce} + 273 \quad (2.11)$$

Перевагою даного підходу є можливість комплексної оцінки динаміки перебігу теплових процесів в електродвигуні на основі аналізу єдиного узагальненого показника. Крім того, порівняння поточного значення ϑ_{ce} з граничнодопустимим дасть змогу прогнозувати ступінь виснаження ресурсу ізоляції та запобігти передчасним відмовам.

Безперервний моніторинг інтегрального теплового зносу ізоляції електродвигуна у вигляді величини $\int \varepsilon dt$ протягом усього строку експлуатації дасть змогу прогнозувати залишковий ресурс і ймовірність безвідмовної подальшої роботи. Шляхом порівняння поточного інтегрального зносу з граничним (базовим) значенням можна визначити

ступінь вичерпання ресурсу ізоляції та оцінити запас міцності щодо теплових перевантажень.

Такий підхід дозволить реалізувати принципи попереджувального обслуговування на основі фактичного технічного стану, що сприятиме підвищенню надійності електродвигунів та оптимізації строків їх заміни або ремонту.

На рис. 2.3 приведена структурна схема безперервного моніторингу (діагностування) процесів теплового зносу ізоляції заглибного електродвигуна по температурі його обмотки.

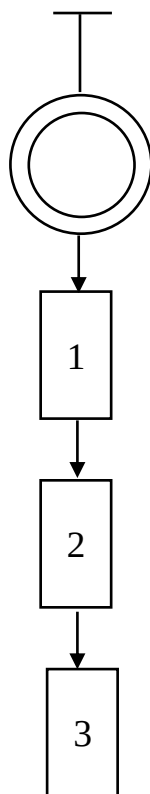


Рисунок 2.3 - Структурна схема безперервного моніторингу процесів теплового зносу ізоляції електродвигуна по температурі його обмотки: 1 - перетворювач температури; 2 – перетворювач (функціональний); 3 - обчислювальний пристрій.

2.5 Висновки до другого розділу

Основні висновки за розділом:

1. Існуючі стратегії обслуговування заглибних електродвигунів не дозволяють контролювати поточний розвиток пошкоджень. Безперервний моніторинг дає можливість раннього виявлення ушкоджень ізоляції.
2. Для захисту двигунів від аварійних режимів використовуються в основному струмові та комбіновані системи захисту. Вони не повною мірою забезпечують необхідний рівень надійності.
3. Існує необхідність подальшого розвитку засобів безперервного контролю експлуатаційних режимів з урахуванням перевантажувальної здатності двигунів.
4. Пропонується удосконалити струмовий захист шляхом моделювання теплових процесів в електродвигунах.
5. Потрібні подальші дослідження теплових перехідних процесів, впливу умов експлуатації та розробка моделей моніторингу режимів роботи заглибних двигунів.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗАГЛИБНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

3.1 Аналітичне дослідження теплових процесів заглибного електродвигуна під впливом експлуатаційних факторів

Під час дослідження процесів нагрівання електричних машин часто використовують еквівалентні теплові схеми. Вони можуть розбити складну конструкцію на окремі простіші елементи з відомими тепловими властивостями.

Існує залежність: чим більше таких еквівалентних елементів використовується для моделювання реальної конструкції, тим точнішими є результати розрахунків. Водночас, посилене ускладнення моделі не завжди виправдане, оскільки потребує додаткових витрат ресурсів. При побудові теплових схем необхідно мати оптимальний баланс між точністю та простою моделлю. З аналізу літературних джерел [20] випливає, яка кількість елементів має вибиратися з конкретних завдань та наявних обчислювальних ресурсів.

Розглянемо підходи до побудови еквівалентних теплових схем занурених електродвигунів з використанням моделювання їх нагрівання. Спочатку використовувалися найпростіші моделі з одним тепловим елементом, що представляє весь двигун [18, 19]. Згодом стали доступні точніші схеми з двома елементами - для моделювання нагрівання обмотки та сталі статора окремо [5, 20, 21]. У деяких дослідженнях двигун поділяється на три частини - обмотку, статор і ротор [16]. Ще детальніші моделі включають окремий елемент для підшипників [28]. Найскладніші схеми створення до п'яти ключових теплових елементів електродвигуна. Таким чином, тенденція виникає в поступовому ускладненні моделей для поточного відображення реальних теплових процесів в електродвигунах. Проте кожен раз потрібно отримати оптимальні показники складності та адекватності моделі поставленої мети.

В подальшому для більш точного моделювання теплових процесів у занурених асинхронних електродвигунах типу ПЕДВ та врахування впливу тепловиділення в різних вузлах на нагрів обмотки статора пропонується використовувати еквівалентну теплову схему з трьох основних елементів:

- (1) Обмотка статора;
- (2) Обмотка ротора;
- (3) Сталь статора та ротора.

Такий поділ обраний тому, що саме ці три елементи є основним у сумарних втратах тепла електродвигуна даного типу. Запропонована схема дозволяє детальніше врахувати вплив тепловиділення в кожного з цих вузлів на нагрів обмотки статора. Крім того, вона не є сильно громіздкою і дає можливість оптимально збалансувати складність та адекватність моделі.

Схема еквівалентної теплової моделі асинхронного електродвигуна ПЕДВ для умов симетричного живлення із зазначеними трьома основними тепловими елементами представлена на рис. 3.1.

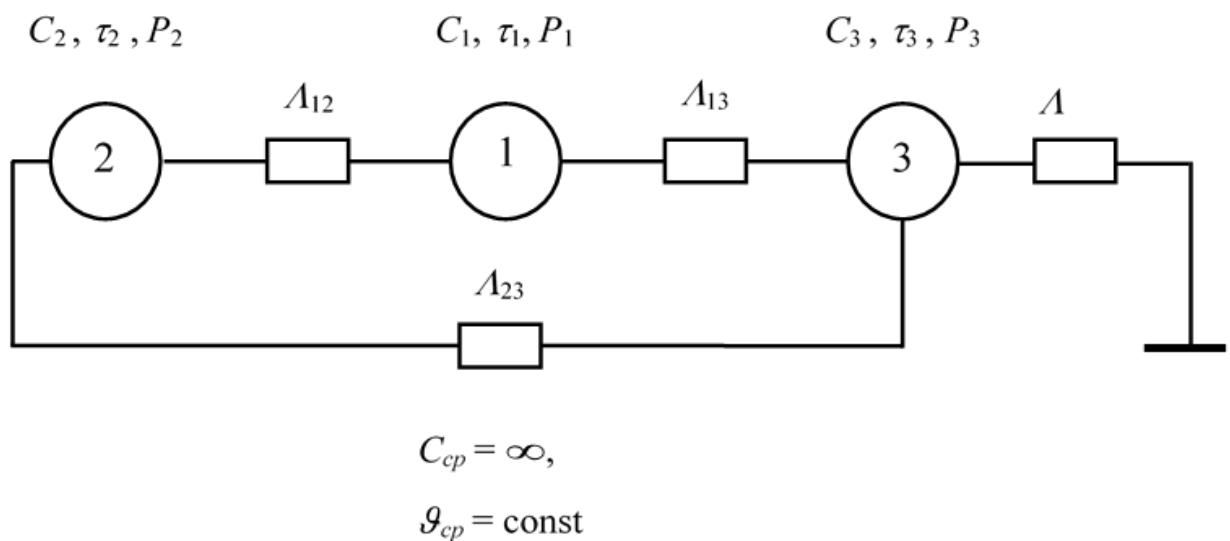


Рисунок 3.1 - Теплова схема заміщення електродвигуна ПЕДВ.

На схемах приведені наступні умовні позначення:

C_1, C_2, C_3 - теплоємності відповідних складових тіл, Дж/°С;

τ_1, τ_2, τ_3 – перевищення температур відповідних тіл над температурою довкілля, °C;

P_1, P_2, P_3 - втрати активної потужності у відповідних тілах, Вт;

$\Lambda_{12}, \Lambda_{13}, \Lambda_{23}$ – теплова провідність між відповідними тілами, Вт/°C;

$\Lambda_{1AB}, \Lambda_{1BC}, \Lambda_{1CA}$ - теплова провідність між обмотками статора різних фаз, Вт/°C;

Λ – теплова провідність між третім тілом і довкіллям, Вт/°C;

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

ϑ_{cp} - температура довкілля, °C.

У занурених електродвигунах здійснюється теплообмін між основними вузлами та передача теплових потоків у наступних напрямках:

1. Від пазової частини обмотки статора 1 до зубців та спинки статора 3.
2. Від обмотки ротора 2 до статора 3 та обмотки статора 1.
3. Від ротора і обмотки статора до статора.
4. Від статора до перекачуваної рідини (води).

Тобто, вода в середині електродвигуна перетворює роль теплоносія, що переносить теплову енергію між ротором, обмоткою статора та корпусом (статором). Завдяки цьому відбувається відведення теплоти від нагрітих вузлів двигуна та запобігання їх перегріву. Тому при моделюванні теплових процесів в занурених двигунах обов'язково слід врахувати наявність води як додаткового теплоносія.

При побудові наведеної еквівалентної теплової схеми електродвигуна (рис. 3.1) та моделюванні теплових процесів було зроблено таке пробне припущення:

1. Відсутність переміщення теплоти в поперечному перерізі (двовимірна задача).
2. Визначає температуру в межах кожного з трьох теплових елементів схеми (обмотки і магнітопровода статора та ротор).
3. Незалежність втрат у сталі статора від температури.

4. Стійкість теплофізичних властивостей в робочій зоні температури.
5. Задана теплоємність становить $-\infty$, температура постійна величина.
6. Нехтування деякими вторинними чинниками теплопередачі.

Зазначені спрощення не порушують загальну фізичну картину процесів, внесені незначні похибки результатів та є прийнятними для практичних досліджень даного типу електродвигунів. Вони могли спростити модель і зробити задачу розв'язною із збереженням загальної адекватності.

У подальших дослідженнях теплових процесів, що відбуваються в асинхронному електродвигуні заглибного насоса, використовується ЕТС, приведена на рис. 3.1. При складанні ЕТС з урахуванням [23] прийняті наступні допущення:

1.2 Аналітичне дослідження теплової провідності

Оскільки точне визначення теплопровідності вузлів електродвигуна впливає на достовірність теплових розрахунків, для занурювальних двигунів це завдання ускладнюється глибиною їх розташування. Визначення даного параметра можливе лише з певною похибкою. Один із підходів полягає у використанні експериментальних даних про перевищення температури окремих компонентів двигуна під час роботи на холостому ході чи короткому замиканні. Це дозволяє опосередковано оцінити теплопровідність на основі теплових моделей. Проте похибка залишається внаслідок припущень та спрощень моделей. Тому актуальним завданням є розробка методик більш точного вимірювання теплопровідності елементів занурювальних двигунів безпосередньо під час експлуатації.

Правильне визначення теплопровідності деталей електродвигуна є важливим фактором для отримання достовірних результатів теплового розрахунку. У випадку глибинних двигунів цей параметр встановити складніше, тому можлива певна похибка. Одним з методів оцінки теплопровідності є використання експериментальних даних про перевищення

температури окремих вузлів двигуна під час роботи на холостому ході чи короткому замиканні.

Відповідно до системи рівнянь теплового балансу в усталеному режимі холостого ходу, можна розрахувати значення теплопровідності між ключовими вузлами електродвигуна, враховуючи теплові втрати, які обчислюються аналітично.

Комбінований підхід з використанням як експериментальних даних, так і розрахункових методів, дає змогу точніше визначити параметри теплопередачі для конкретного типу занурювального електродвигуна. Це в свою чергу підвищує надійність оцінювання теплового стану та довговічності двигуна в процесі експлуатації.

Достовірне визначення теплопровідності є важливим для точності теплових розрахунків. Для занурюваних електродвигунів цей параметр важко виміряти безпосередньо, тому його можна оцінити лише з певною похибкою [1]. Виходячи з припущення, що перевищення температури окремих вузлів двигуна в режимах холостого ходу та короткого замикання можна отримати експериментально, а їх теплові втрати розрахувати, існує можливість визначити теплопровідність між цими вузлами комбінованим методом.

Розглянемо систему рівнянь теплового балансу (3.1) для усталеного режиму холостого ходу:

$$\left. \begin{aligned} (A_{12} + A_{13})\tau_{1x} - A_{12}\tau_{2x} - A_{13}\tau_{3x} &= P_{1x}; \\ -A_{12}\tau_{1x} + (A_{12} + A_{23})\tau_{2x} - A_{23}\tau_{3x} &= P_{2x}; \\ -A_{13}\tau_{1x} - A_{23}\tau_{2x} + (A_{13} + A_{23})\tau_{3x} &= P_{3x}. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Такожведемо і для режиму к.з. :

$$\left. \begin{aligned} (A_{12} + A_{13})\tau_{1\kappa} - A_{12}\tau_{2\kappa} - A_{13}\tau_{3\kappa} &= P_{1\kappa}; \\ -A_{12}\tau_{1\kappa} + (A_{12} + A_{23})\tau_{2\kappa} - A_{23}\tau_{3\kappa} &= P_{2\kappa}; \\ -A_{13}\tau_{1\kappa} - A_{23}\tau_{2\kappa} + (A + A_{13} + A_{23})\tau_{3\kappa} &= P_{3\kappa}. \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Після проведення перегрупування системи рівнянь формули (3.1) і (3.2) матимуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} (\tau_{1\kappa} - \tau_{2\kappa})A_{12} + (\tau_{1\kappa} - \tau_{3\kappa})A_{13} &= P_{1\kappa}; \\ -(\tau_{1\kappa} - \tau_{2\kappa})A_{12} + (\tau_{2\kappa} - \tau_{3\kappa})A_{23} &= P_{2\kappa}; \\ -(\tau_{1\kappa} - \tau_{3\kappa})A_{13} - (\tau_{2\kappa} - \tau_{3\kappa})A_{23} + A\tau_{3\kappa} &= P_{3\kappa}. \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

$$\left. \begin{aligned} (\tau_{1\kappa} - \tau_{2\kappa})A_{12} + (\tau_{1\kappa} - \tau_{3\kappa})A_{13} &= P_{1\kappa}; \\ -(\tau_{1\kappa} - \tau_{2\kappa})A_{12} + (\tau_{2\kappa} - \tau_{3\kappa})A_{23} &= P_{2\kappa}; \\ -(\tau_{1\kappa} - \tau_{3\kappa})A_{13} - (\tau_{2\kappa} - \tau_{3\kappa})A_{23} + A\tau_{3\kappa} &= P_{3\kappa}. \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

Для подальшого визначення теплової провідності (рис. 3.1) використаємо систему чотирьох рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{12\kappa}A_{12} + \tau_{13\kappa}A_{13} &= P_{1\kappa}; \\ \tau_{12\kappa}A_{12} + \tau_{13\kappa}A_{13} &= P_{1\kappa}; \\ -\tau_{12\kappa}A_{12} + \tau_{23\kappa}A_{23} &= P_{2\kappa}; \\ -\tau_{13\kappa}A_{13} - \tau_{23\kappa}A_{23} + \tau_{3\kappa}A &= P_{3\kappa}. \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

де $\tau_{12\kappa} = -\tau_{21\kappa} = t_{1\kappa} - t_{2\kappa}$;

$\tau_{13\kappa} = t_{1\kappa} - t_{3\kappa}$;

$\tau_{12\kappa} = t_{1\kappa} - t_{2\kappa}$;

$$t_{13\kappa} = -t_{31\kappa} = t_{1\kappa} - t_{3\kappa};$$

$$t_{23x} = t_{2x} - t_{3x};$$

$$t_{23\kappa} = -t_{32\kappa} = t_{2\kappa} - t_{3\kappa}.$$

Визначники системи рівнянь (3.5) матимуть наступний вираз:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \tau_{12x} & \tau_{13x} & 0 & 0 \\ \tau_{12\kappa} & \tau_{13\kappa} & 0 & 0 \\ \tau_{21x} & 0 & \tau_{23x} & 0 \\ 0 & \tau_{31\kappa} & \tau_{32\kappa} & \tau_{3\kappa} \end{vmatrix} = \tau_{23x}\tau_{3\kappa}(\tau_{12x}\tau_{13\kappa} - \tau_{12\kappa}\tau_{13x}) \quad (3.6)$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} P_{1x} & \tau_{13x} & 0 & 0 \\ P_{1\kappa} & \tau_{13\kappa} & 0 & 0 \\ P_{2x} & 0 & \tau_{23x} & 0 \\ P_{3\kappa} & \tau_{31\kappa} & \tau_{32\kappa} & \tau_{3\kappa} \end{vmatrix} = \tau_{23x}\tau_{3\kappa}(\tau_{13\kappa}P_{1x} - \tau_{13x}P_{1\kappa}) \quad (3.7)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \tau_{12x} & P_{1x} & 0 & 0 \\ \tau_{12\kappa} & P_{1\kappa} & 0 & 0 \\ \tau_{21x} & P_{2x} & \tau_{23x} & 0 \\ 0 & P_{3\kappa} & \tau_{32\kappa} & \tau_{3\kappa} \end{vmatrix} = \tau_{23x}\tau_{3\kappa}(\tau_{12x}P_{1\kappa} - \tau_{12\kappa}P_{1x}) \quad (3.8)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} \tau_{12x} & \tau_{13x} & P_{1x} & 0 \\ \tau_{12\kappa} & \tau_{13\kappa} & P_{1\kappa} & 0 \\ \tau_{21x} & 0 & P_{2x} & 0 \\ 0 & \tau_{31\kappa} & P_{3\kappa} & \tau_{3\kappa} \end{vmatrix} = \tau_{21x}\tau_{3\kappa}(\tau_{13x}P_{1\kappa} - \tau_{13\kappa}P_{1x}) \quad (3.9)$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} \tau_{12x} & \tau_{13x} & 0 & P_{1x} \\ \tau_{12\kappa} & \tau_{13\kappa} & 0 & P_{1\kappa} \\ \tau_{21x} & 0 & \tau_{23x} & P_{2x} \\ 0 & \tau_{31\kappa} & \tau_{32\kappa} & P_{3\kappa} \end{vmatrix} = P_{1\kappa}(\tau_{12x}\tau_{13\kappa}\tau_{23x} - \tau_{13x}\tau_{21x}\tau_{32\kappa}) - \quad (3.10)$$

$$- P_{1x}\tau_{13\kappa}(\tau_{12\kappa}\tau_{23x} - \tau_{21x}\tau_{32\kappa}) + P_{3\kappa}(\tau_{12x}\tau_{13\kappa}\tau_{23x} - \tau_{13x}\tau_{12\kappa}\tau_{23x}).$$

У режимі холостого ходу ковзання ротора електродвигуна дорівнює нулю ($s \approx 0$), тому втрати в роторі незначні ($P_{2x} \approx 0$). В режимі короткого замикання ротор загальмований, відповідно механічні втрати відсутні та дорівнюють нулю. Окрім того, напруга на затискачах двигуна складає у 5-7 раз менше від номінального значення, через що втрати в осерді мінімальні ($P_{3\kappa} \approx 0$). Отже, при аналізі даних вимірювань для цих режимів, з системи рівнянь теплового балансу можна визначити шукані значення теплопровідностей між обмоткою статора, ротором та магнітопроводом.

$$\mathcal{A}_{12} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{\tau_{13\kappa}P_{1x} - \tau_{13x}P_{1\kappa}}{\tau_{12x}\tau_{13\kappa} - \tau_{12\kappa}\tau_{13x}}; \quad (3.11)$$

$$\mathcal{A}_{13} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{\tau_{12x}P_{1\kappa} - \tau_{12\kappa}P_{1x}}{\tau_{12x}\tau_{13\kappa} - \tau_{12\kappa}\tau_{13x}}; \quad (3.12)$$

$$\mathcal{A}_{23} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{\tau_{21x}(\tau_{13x}P_{1\kappa} - \tau_{13\kappa}P_{1x})}{\tau_{23x}(\tau_{12x}\tau_{13\kappa} - \tau_{12\kappa}\tau_{13x})}; \quad (3.13)$$

$$\Lambda = \frac{\Delta_4}{\Delta} = \frac{P_{1\kappa}(\tau_{12\kappa}\tau_{13\kappa}\tau_{23\kappa} - \tau_{13\kappa}\tau_{21\kappa}\tau_{32\kappa}) + P_{3\kappa}\tau_{23\kappa}(\tau_{12\kappa}\tau_{13\kappa} - \tau_{13\kappa}\tau_{12\kappa})}{\tau_{23\kappa}\tau_{3\kappa}(\tau_{12\kappa}\tau_{13\kappa} - \tau_{12\kappa}\tau_{13\kappa})} - \frac{P_{1\kappa}\tau_{13\kappa}(\tau_{12\kappa}\tau_{23\kappa} - \tau_{21\kappa}\tau_{32\kappa})}{\tau_{23\kappa}\tau_{3\kappa}(\tau_{12\kappa}\tau_{13\kappa} - \tau_{12\kappa}\tau_{13\kappa})}. \quad (3.14)$$

Так, на основі даних вимірювань перевищення температури активних частин електродвигуна в режимах холостого ходу та короткого замикання, можна визначити теплопровідність між основними елементами прийнятої еквівалентної теплової схеми зануреного асинхронного двигуна ПЕДВ.

При цьому для спрощення розрахунків використовуються припущення про мінімальність деяких складових втрат в зазначених режимах. Така комбінація експериментального та аналітичного підходів дає можливість отримати уточнені дані про теплопередачу між обмоткою статора, ротором та осердям зануреного асинхронного електродвигуна для наступного адекватного моделювання його теплових режимів.

3.3 Теоретичне дослідження параметру моніторингу заглибного електродвигуна

Термін служби ізоляції електричних машин значною мірою визначається її тепловим старінням. Саме тому під час аналізу експлуатаційних режимів такі важливі методики розрахунку швидкості старіння ізоляції та прогнозування строку її придатності.

Ретельне дослідження теплових процесів дає змогу оцінити інтенсивність деструкції ізоляції та заздалегідь запобігти передчасному виходу електричної машини з ладу. Це особливо важливо для відповідальних і важкодоступних агрегатів, до яких належать занурені електродвигуни свердловин.

Перші дослідження теплового старіння ізоляції електричних машин мали в основному експериментальний характер і стосувалися переважно ізоляції класу А. За результатами цих робіт було сформульоване так зване «правило

восьми градусів», згідно з яким підвищення робочої температури ізоляції на 8°C призводить до скорочення строку її служби вдвічі [5]. Іншими словами, швидкість теплового старіння ізоляції подвоюється з кожним відхиленням температури приблизно на 8 градусів від початкового рівня. Це правило описується аналітичним рівнянням:

$$D = D_0 \cdot e^{-0,0866 \vartheta} \quad (3.15)$$

де D_0 – термін служби для визначеного класу ізоляції ізоляції при температурі 0°C, год;

ϑ - температура для певного класу ізоляції, °C.

Правило "восьми градусів" завдяки своїй простоті набуло широкого застосування та дозволяє робити орієнтовні розрахунки для невеликих діапазонів зміни температури. Однак це рівняння (3.15) має емпіричний характер, що унеможливорює точне визначення числових коефіцієнтів та знижує надійність прогнозних оцінок.

Більш коректний підхід базується на застосуванні для опису процесів старіння ізоляції загальних закономірностей кінетики хімічних реакцій. Зокрема, Вант Гоффом і Арреніусом було встановлено залежність швидкості хімічних перетворень від температури у вигляді рівняння:

$$\ln K = \frac{B}{\theta} + A, \quad (3.16)$$

де K – постійна величина швидкості реакції;

θ – абсолютна температура середовища, К;

B – критерій встановленої ізоляції, К;

A – постійний поправочний коефіцієнт;

$$\frac{dC}{dt} = KC, \quad (3.17)$$

де C – концентрація непрореагувавших молекул у певний розглянутий момент визначеного часу t ;

$$K = \frac{1}{t} \ln \frac{C_0}{C}, \quad (3.18)$$

де C_0 – початкова, з певного відліку часу, концентрація непрореагувавших молекул;

$$A = \ln(PZ), \quad (3.19)$$

$$P = e^{\frac{\Delta S}{R}}, \quad (3.20)$$

$$B = -\frac{E_a}{R}, \quad (3.21)$$

де:

Z - число зіткнень між молекулами реагентів за одиницю часу;

P - ймовірність правильної орієнтації молекул під час зіткнення;

ΔS - ентропія активації, що характеризує частку зіткнень з належною орієнтацією молекул;

R - $R=8,317, \frac{\text{Дж}}{\text{град} \cdot \text{моль}}$ універсальна газова стала;

E_a – енергія активації, додаткова надлишкова енергія, необхідна молекулам для подолання енергетичного бар'єру реакції.

Об'єднуючи ці рівняння, отримуємо загальне рівняння Вант Гоффа-Арреніуса для швидкості хімічної реакції:

$$K = Ae^{-\frac{E_a}{R\theta}}, \quad (3.22)$$

Значення коефіцієнта B для різних ізоляційних матеріалів, визначені експериментальним шляхом [5]. Розв'язуючи спільно рівняння (3.18) та (3.22) і позначивши термін служби ізоляції через Δ , отримуємо наступний вираз:

$$\Delta = e^{\frac{E_a}{R\theta} - G}, \quad (3.23)$$

де

$$G = \ln A - \ln \ln \frac{C_0}{C}, \quad (3.24)$$

Отже, поєднання кінетичного рівняння швидкості реакції та емпіричної залежності ресурсу ізоляції від швидкості старіння дозволяє отримати аналітичний зв'язок між терміном служби ізоляції, її робочою температурою та параметрами прискореного старіння.

Маючи дані про граничний термін служби ізоляції Δ_n , для якоїсь базової температури θ_n , можна розрахувати очікуваний ресурс ізоляції Δ , при іншій робочій температурі θ за формулою:

$$\Delta = \Delta_n e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta}\right)}, \quad (3.25)$$

Для оцінювання інтенсивності теплового старіння ізоляції при заданій робочій температурі зручно використовувати показник швидкості теплового зношення (у базових годинах за годину).

$$\varepsilon = \frac{D_n}{D}, \quad (3.26)$$

де D_n – базовий ресурс ізоляції, (у базових годинах за годину);

D – встановлений термін експлуатації ізоляції при температурі θ , год.

Підставивши значення терміну служби ізоляції D у (3.25) отримаємо:

$$\varepsilon = e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta} \right)}. \quad (3.27)$$

де ε – швидкість теплового зносу встановленого класу ізоляції, бгод/год;

ε_n – номінальна швидкість теплового зносу встановленого класу ізоляції, бгод/год;

θ_n – абсолютна номінальна температура встановленої ізоляції даного класу, К;

θ_y – фактична абсолютна стала температура даного класу ізоляції, К;

B – показник, що характеризує ізоляцію даного класу, К.

При цьому фактична температура ізоляції та її перевищення залежать від кратності струму навантаження електродвигуна згідно співвідношень [1,2]:

$$\tau_y = \tau_n \frac{a + k^2}{a + 1}, \quad (3.28)$$

де τ_n – перевищення номінальних значень температури ізоляції для даного класу, °С;

a – коефіцієнт втрат, що дорівнює відношенню втрат у сталі до втрат у міді;

k – кратність струму навантаження відносно номінального значення.

Знаючи параметри режиму роботи двигуна, можна оцінити швидкість старіння його ізоляції.

Коефіцієнт втрат в свою чергу обчислюється як відношення номінальних втрат в сталі $\Delta P_{сн}$ до номінальних втрат в обмотках з міді $\Delta P_{мн}$:

$$\alpha = \frac{\Delta P_{сн}}{\Delta P_{мн}} . \quad (3.29)$$

Тобто цей коефіцієнт показує співвідношення втрат в осерді і втрат в обмотках для номінального режиму роботи двигуна. Він є однією з основних характеристик двигуна, що використовується в теплових розрахунках. Чим менше значення цього коефіцієнта, тим більш досконалою з теплової точки зору є конструкція двигуна.

Фактичне значення абсолютної температури ізоляції розраховується за формулою:

$$\theta_y = \tau_y + \vartheta_{ср} + 273 , \quad (3.30)$$

де $\vartheta_{ср}$ – температура навколишнього середовища перебування електродвигуна, °С.

273 - абсолютна температура 0°С;

На основі номінальної температури і розрахункового перевищення температури для заданого режиму роботи визначається абсолютне значення поточної температури ізоляції. Це необхідно для подальшого прогнозування інтенсивності теплового старіння ізоляції електродвигуна.

Введемо поняття коефіцієнта втрат електричної енергії в асинхронному двигуні. Він являє собою відношення фактичних втрат активної потужності ΔP до номінальних втрат ΔP_n :

$$k_n = \frac{\Delta P}{\Delta P_n} \quad (3.31)$$

Цей коефіцієнт показує, у скільки разів втрати електроенергії в двигуні за певних умов перевищують втрати в номінальному режимі. Він використовується в теплових розрахунках для прогнозування нагріву двигуна та оцінювання ефективності його роботи.

Номінальні втрати електродвигуна складаються з втрат у сталі $\Delta P_{сн}$ та втрат у міді $\Delta P_{мн}$:

$$\Delta P_n = \Delta P_{сн} + \Delta P_{лн} \quad (3.32)$$

Фактичні втрати активної потужності є сумою номінальних втрат у сталі $\Delta P_{сн}$ та фактичних втрат у міді $\Delta P_{лн}$, які пропорційні квадрату кратності сили струму, що споживає двигун:

$$\Delta P = \Delta P_{сн} + k^2 \Delta P_{лн} \quad (3.33)$$

Врахування залежності втрат від величини струму дає можливість точніше розрахувати фактичні втрати потужності для різних режимів роботи електродвигуна.

Таким чином, враховуючи вирази (3.31) і (3.32) коефіцієнт втрат енергії запишемо наступним виразом:

$$k_n = \frac{\Delta P_{сн} + k^2 \Delta P_{лн}}{\Delta P_{сн} + \Delta P_{лн}}, \quad (3.34)$$

або іншим чином

$$k_n = \frac{a + k^2}{a + 1} \quad (3.35)$$

Для досліджуваного занурюваного електродвигуна ПЭДВ 2,8-140 відомі такі номінальні втрати: $\Delta P_{сн} = 270$ Вт - номінальні втрати в сталі; $\Delta P_{мн} = 564$ Вт - номінальні втрати в міді.

На основі формули для фактичних втрат (3.35) побудовано залежність коефіцієнта втрат електроенергії від кратності перевантаження за струмом для даного двигуна, яка наведена на рис. 3.2. Ця залежність дозволяє проаналізувати зміну втрат енергії та ККД двигуна ПЭДВ 2,8-140 залежно від режиму роботи.

Таблиця 3.1 - Залежність коефіцієнта втрат електроенергії від кратності перевантаження за струмом з заглибного електродвигуна

k	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
k_n	0,33	0,34	0,37	0,41	0,45	0,5	0,58	0,66	0,71	0,87	1,01	1,24	1,36	1,49	1,67	1,88	2,14

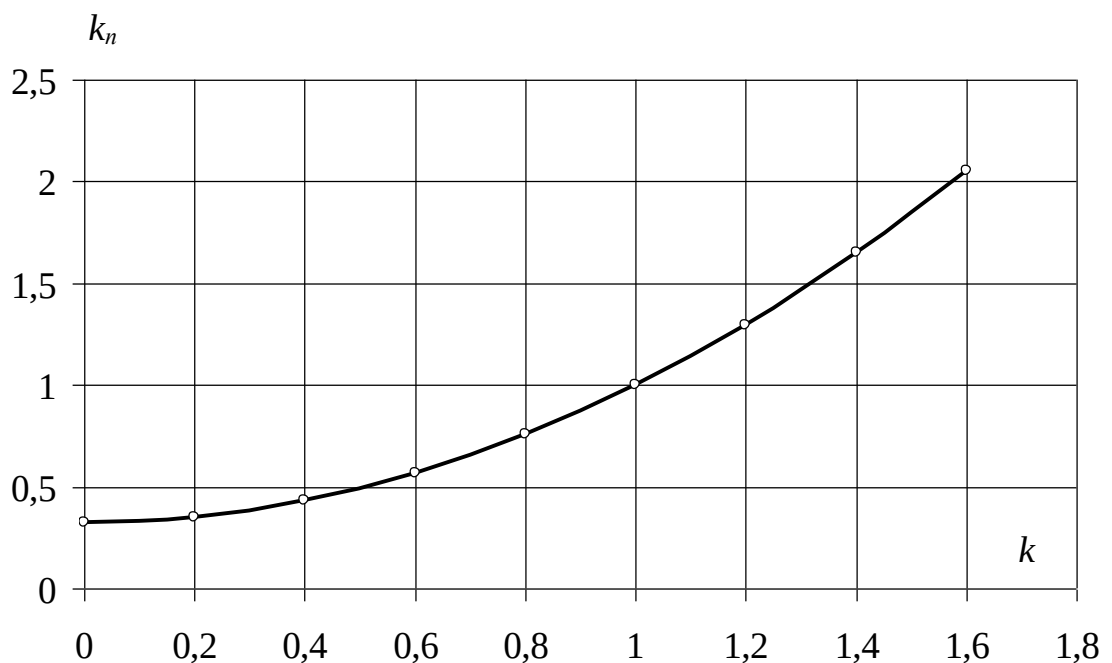


Рисунок 3.2 - Залежність значення коефіцієнта втрат електроенергії від кратності перевантаження за струмом $k_n = f(k)$ занурюваного електродвигуна

Стале перевищення температури даного класу ізоляції ізоляції з урахуванням (3.35) матиме значення:

$$\tau_y = k_n \tau_n \quad (3.36)$$

На основі приведених виразів, швидкість теплового зносу ізоляції матиме наступне значення:

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{k_n \tau_n + \vartheta_{cp} + 273} \right)} \quad (3.37)$$

Дослідимо швидкість теплового зносу ізоляції занурюваного електродвигуна ПЭДВ 2,8-140 залежно від завантаження за струмом. При цьому приймемо сталою температуру навколишнього середовища - температуру води в свердловині $\vartheta_{cp} = 25^\circ\text{C}$.

Розрахунок дозволить встановити вплив перевантажень за струмом на інтенсивність теплового старіння ізоляції обмоток двигуна ПЭДВ 2,8-140 при тривалій роботі в даних умовах охолодження. На основі цього можна визначити гранично допустимі тривалі перевантаження з огляду на ресурс ізоляції.

Двигун ПЭДВ 2,8-140 має наступні технічні характеристики: $\Delta P_{ст.н} = 270$ Вт; $\Delta P_{м.н} = 564$ Вт; $\theta_n = 353$ К; $\vartheta_{ср.н} = 10^\circ\text{C}$; $\tau_n = 70^\circ\text{C}$; $B = 9500$ К; $a = 0,48$.

Результати проведених розрахунків заносимо до табл. 3.2.

На підставі отриманих результатів побудуємо графік залежності швидкості зносу ізоляції від кратності струму навантаження занурюваного електродвигуна ПЭДВ 2,8-140 (рис. 3.3):

Таблица 3.2 Швидкість зносу ізоляції ПЭДВ 2,8-140 заглибного електродвигуна.

k	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
ΔP , Вт	270,0	331,1	382,8	441,3	495,6	559,4	608,4	672,4	721,2	781,9	834,0	891,6	946,8	984,4	1059,6	1601,7	1172,4
k_n	0,33	0,34	0,37	0,41	0,45	0,5	0,58	0,66	0,71	0,87	1,01	1,24	1,36	1,49	1,67	1,88	2,14
ε	0	0,02	0,04	0,06	0,09	0,15	0,21	0,29	0,49	0,76	1,00	1,49	2,02	2,88	3,95	5,95	7,42

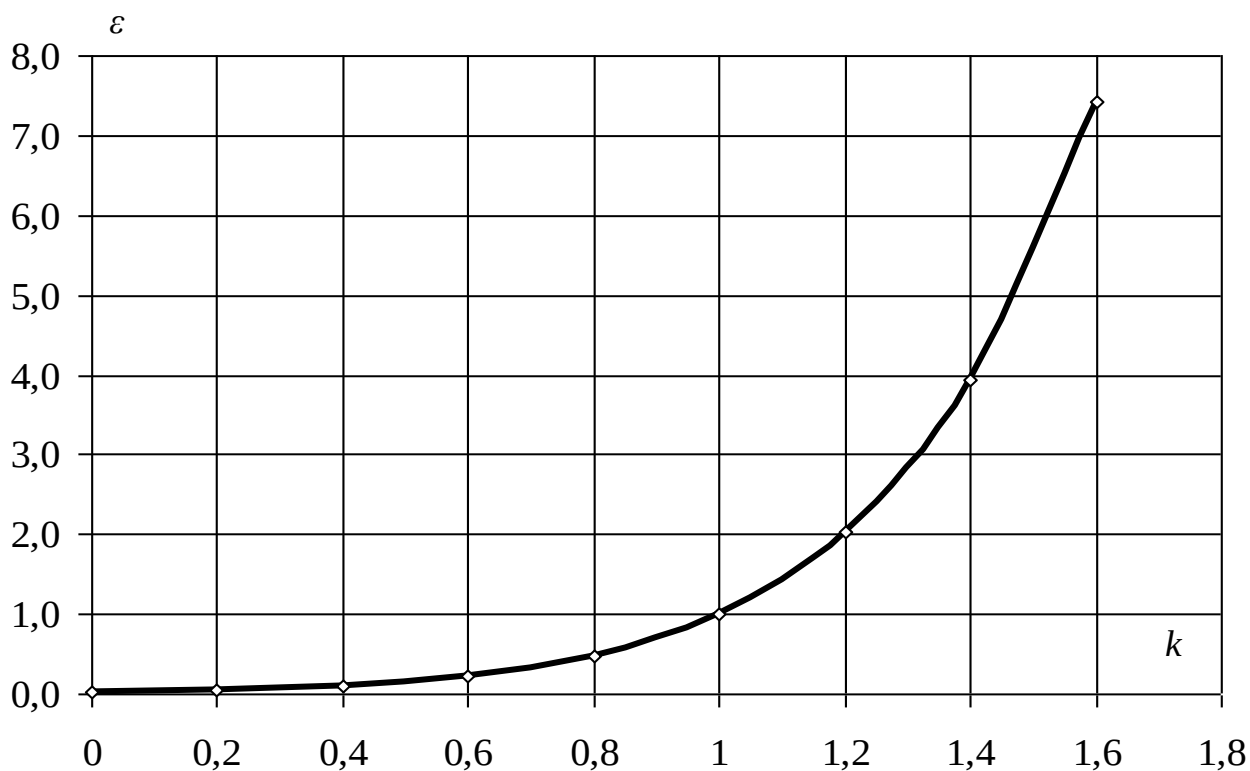


Рисунок 3.3 - Залежність швидкості зносу ізоляції заглибного електродвигуна ПЭДВ 2,8-140 в функції кратності струму навантаження

Таблиця 3.4 Дослідження швидкості зносу ізоляції ПЭДВ 2,8-140 електродвигуна при наступних значеннях температури.

k	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
$\Delta P, \text{ Вт}$	270,0	331,1	382,8	441,3	495,6	559,4	608,4	672,4	721,2	781,9	834,0	891,6	946,8	984,4	1059	1601,7	1172,4
$k_p (\vartheta_{cp} = 10 \text{ }^\circ\text{C})$	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12	0,14	0,17	0,23	0,25	0,32	0,40	0,53	0,70	0,97	1,30	1,98	2,53
$k_p (\vartheta_{cp} = 15 \text{ }^\circ\text{C})$	0,14	0,14	0,15	0,16	0,18	0,20	0,24	0,28	0,34	0,44	0,55	0,71	0,94	1,36	1,72	2,56	3,29
$k_p (\vartheta_{cp} = 20 \text{ }^\circ\text{C})$	0,20	0,20	0,21	0,23	0,25	0,27	0,33	0,39	0,47	0,59	0,74	0,98	1,26	1,72	2,25	3,44	4,24
$k_p (\vartheta_{cp} = 25 \text{ }^\circ\text{C})$	0,28	0,29	0,30	0,32	0,35	0,39	0,45	0,53	0,65	0,76	1,00	1,29	1,67	1,77	2,94	4,32	5,42

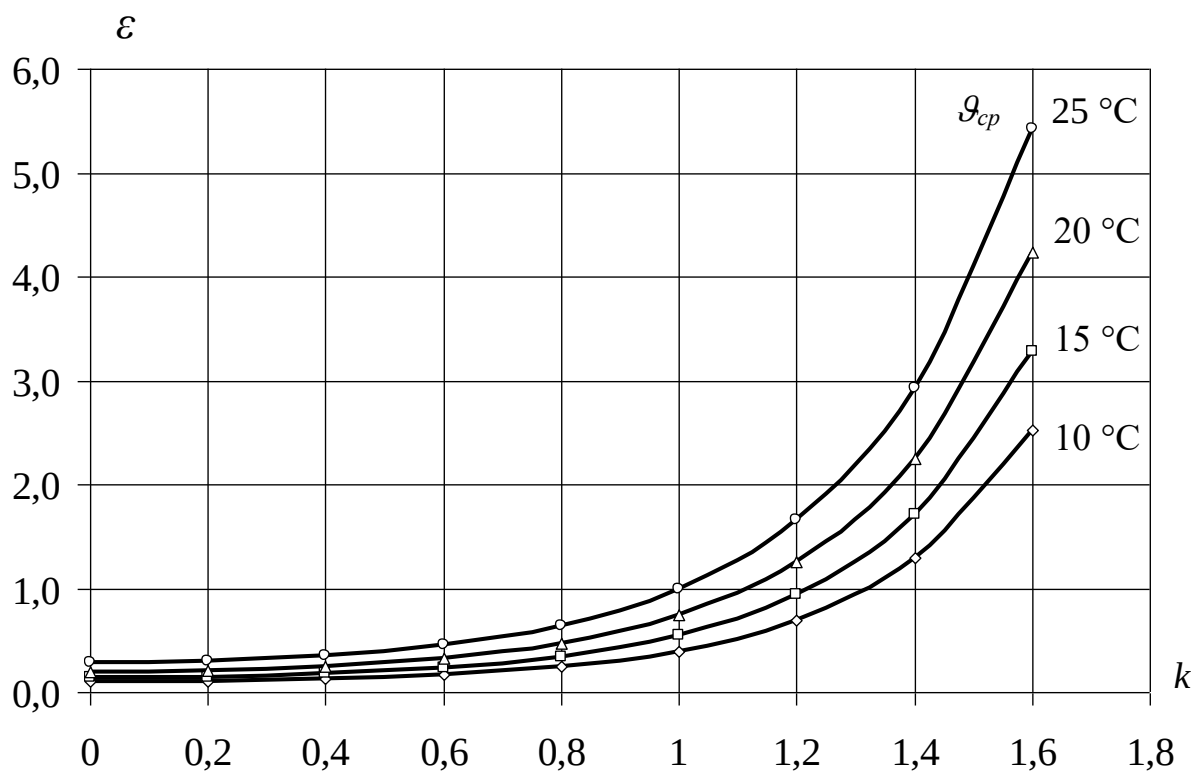


Рисунок 3.4 - Залежність швидкості зносу ізоляції заглибного електродвигуна ПЭДВ 2,8-140 в функції кратності струму завантаження та при заданій температурі.

Аналіз процесу перетворення електроенергії в заглибному електродвигуні ПЭДВ 2,8-140 свідчить, що за допомогою коефіцієнта втрат та швидкості зносу ізоляції можлива функціональний моніторинг стану двигунів. При цьому слід враховувати поточну швидкість теплового зносу ізоляції залежно від поточного перевищення температури ізоляції над температурою навколишнього середовища:

$$\varepsilon = e^{\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\tau + \vartheta_{cp} + 273} \right)} \quad (3.38)$$

де τ – поточне перевищення температури ізоляції заглибного електродвигуна ПЭДВ 2,8-140, °С.

Оскільки даний асинхронний електродвигун ПЭДВ з точки зору нагрівання являє собою гетерогенне тіло (різнорідне), тепловий процес в якому описується сумою декількох експонент, замінімо рівняння нагріву двигуна однією еквівалентною експонентою з постійним перевищенням температури обмотки над температурою середовища τ_y та еквівалентною сталою часу нагрівання електродвигуна T_z :

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_z}} \right) + \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_z}} \quad (3.39)$$

Еквівалентна постійна часу нагріву заглибного електродвигуна [5]:

$$T_z = \frac{\sum_{i=1}^n m_i c_i \tau_{in}}{\Delta P_n} \quad (3.40)$$

де m_i - маса i -го тіла заглибного електродвигуна, кг;

τ_{in} - номінальне перевищення температури заглибного електродвигуна i -го тіла, °С;

c_i - питома теплоємність i -го заглибного електродвигуна тіла, Дж/(кг·°С).

3.4 Математична модель моніторингу швидкості зносу ізоляції заглибного електродвигуна

Структурна схема (рис. 3.5) функціонального моніторингу занурюваного електродвигуна включає такі входні дані моделі швидкості теплового зносу ізоляції: коефіцієнт B , характеризуючий клас ізоляції, номінальна температура ізоляції (абсолютна тривало допустима) θ_n , номінальне перевищення температури ізоляції τ_n , номінальний струм електродвигуна I_n , постійна часу нагріву електродвигуна T_θ , заданий інтервал часу Δt , номінальні втрати активної потужності в електродвигуні ΔP_n .

Вихідною величиною моделі моніторингу швидкості теплового зносу ізоляції асинхронного електродвигуна ПЭДВ обмотки являється швидкість теплового зносу ізоляції його обмотки ε . Умовою нормального режиму роботи асинхронного електродвигуна ПЭДВ є виконання наступної умови:

$$k_{\dot{\tau}} \leq 1 \text{ і } \varepsilon \leq 1.$$

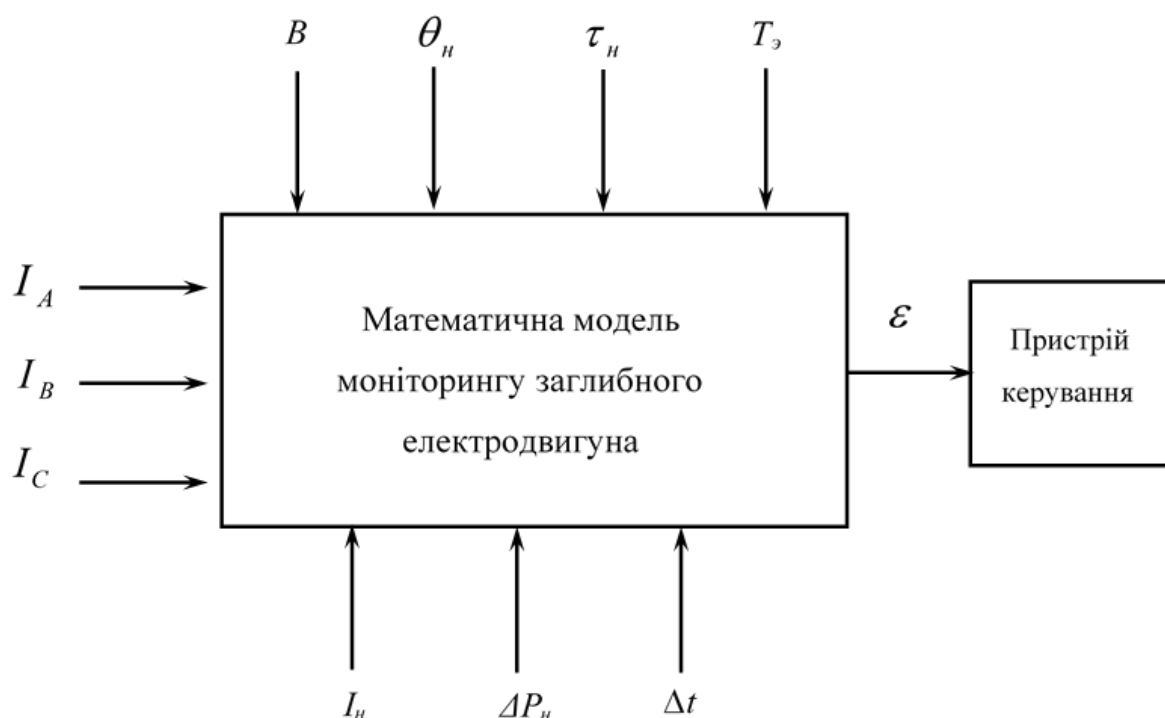


Рисунок 3.5 - Структурна схема пристрою моніторингу заглибного асинхронного електродвигуна.

Робиться припущення, що моніторинг швидкості зносу ізоляції занурюваного електродвигуна відбувається з часовим інтервалом Δt .

Проведемо розрахунок діючого середньоквадратичного значення сили струму на i -ій ділянці часу за виразом:

$$I_{ск,i} = \sqrt{\frac{I_{Ai}^2 + I_{Bi}^2 + I_{Ci}^2}{3}}, \quad (3.41)$$

Коефіцієнт завантаження асинхронного електродвигуна ПЭДВ по струму на i -ій ділянці встановленого часу матиме значення:

$$k_{zi} = \frac{I_{ск,i}}{I_n}, \quad (3.42)$$

де I_n - діюче значення, для асинхронного електродвигуна, номінального фазного струму, А.

Стале перевищення температури обмотки статора асинхронного електродвигуна ПЭДВ на i -ій ділянці встановленого часу :

$$\tau_{iy} = \frac{d_i}{d_{1i}}, \quad (3.43)$$

де d_i , d_{1i} - коефіцієнти теплової моделі заміщення асинхронного електродвигуна ПЭДВ.

Поточне перевищення температури обмотки статора асинхронного електродвигуна ПЭДВ на i -ій ділянці встановленого часу:

$$\tau_i = \tau_{\text{в}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}} \right) + \tau_{(i-1)} e^{-\frac{\Delta t}{T}}, \quad (3.44)$$

де T_e - еквівалентна постійна часу асинхронного електродвигуна ПЭДВ.

Коефіцієнт втрат електроенергії для асинхронного електродвигуна ПЭДВ на i -ій ділянці часу матиме значення:

$$k_{ni} = \frac{\Delta P_{\text{сн}} + k_i^2 \Delta P_{\text{лн}}}{\Delta P_{\text{сн}} + \Delta P_{\text{лн}}}, \quad (3.45)$$

Швидкість зносу ізоляції асинхронного електродвигуна ПЭДВ на i -ій ділянці часу матиме значення:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{н}} e^{B \left(\frac{1}{\theta_{\text{н}}} - \frac{1}{k_{ni} \tau_i + \vartheta_{\text{сп}} + 273} \right)} \quad (3.46)$$

Таким чином, пропонується математичний алгоритм функціонального моніторингу заглибного асинхронного електродвигуна ПЭДВ по швидкості теплового зносу його ізоляції.

3.5 Розробка пристрою моніторингу експлуатаційних режимів роботи заглибного електродвигуна

Форма графіка електричного навантаження суттєво впливає на щоденне теплове зношення ізоляції занурювального електродвигуна, навіть якщо добове перетворення енергії залишається незмінним. Для об'єктивної оцінки режиму роботи занурювального електродвигуна необхідно розробити та встановити лічильник теплового зношення його ізоляції, а також пристрій захисту від перевантаження.

Цей пристрій призначений для моніторингу (діагностики) режимів експлуатації і повинен забезпечувати:

Вимірювання фазних струмів занурювального електродвигуна;

Відключення двигуна від мережі під час тривалого впливу струму перевантаження та надструмів;

Відключення двигуна при досягненні гранично допустимих значень коефіцієнта втрат електроенергії та швидкості витрати ресурсу ізоляції;

Відключення двигуна при обриві однієї з фаз;

Відключення двигуна при раптовому зникненні навантаження (сухий хід насоса).

Крім зазначених функцій, пристрій може вести щоденний облік наробітку двигуна, реєструвати аварійні ситуації, відстежувати температуру обмоток тощо. Це дозволить підвищити надійність та ефективність використання занурювального обладнання.

Даний пристрій захисту може бути реалізований на базі сучасних мікроконтролерів або програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) з використанням алгоритмів цифрової обробки сигналів.

На основі структурної схеми моніторингу пускових режимів занурювального електродвигуна розроблено більш детальну схему пристрою контролю режимів його роботи рисунок 3.6.

Ключовим елементом цього пристрою є однокристальний мікроконтролер (МК). Пристрій моніторингу містить блок виміру фазних струмів (БВС), який може бути реалізований на базі датчиків струму з вбудованими шунтами або трансформаторами струму. Це дозволяє безпосередньо вимірювати струми навантаження в кожній фазі електродвигуна та перетворювати їх у пропорційні напруги. З (БВС) на вхід АЦП (аналого-цифрового перетворювача), що знаходиться в МК, подається, пропорційна фазним струмам ЕД, напруга. АЦП мікроконтролера перетворює ці аналогові сигнали у цифрові коди для подальшої обробки.

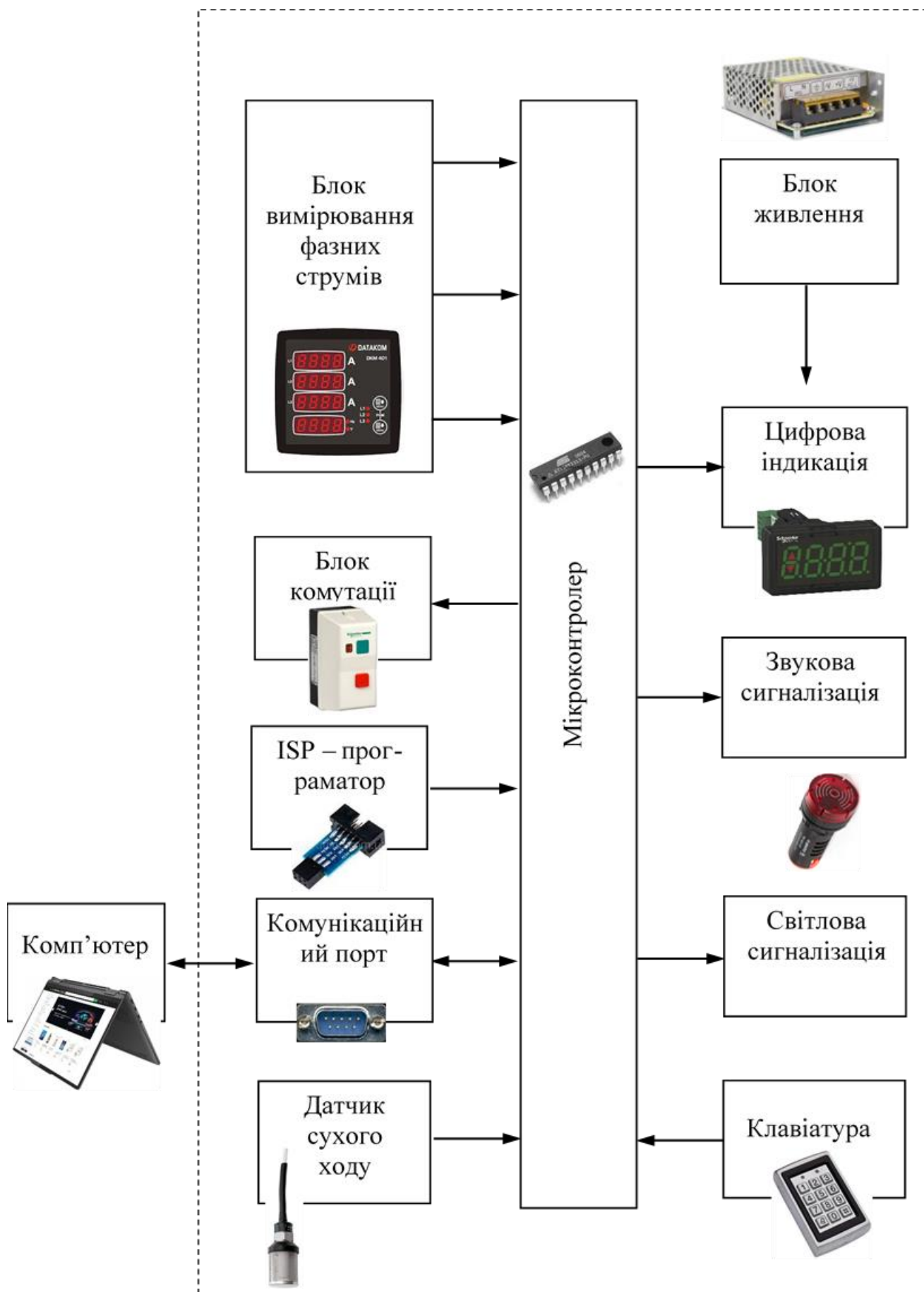


Рисунок 3.6 - Структурна схема пристрою моніторингу

Роздільна здатність перетворення повинна бути достатньою для адекватного представлення вимірних струмів.

Мікроконтролер на основі отриманих даних здійснює обчислення швидкості зносу ізоляції за заданим алгоритмом і порівнює параметри з гранично допустимими значеннями. За результатами обробки формуються сигнали керування та індикації [29].

Обчислення поточної швидкості зносу ізоляції може базуватися на математичній моделі процесу теплового старіння ізоляції в залежності від режимів навантаження електродвигуна. На основі вимірних фазних струмів та з урахуванням параметрів конкретного двигуна розраховується інтенсивність тепловиділення в обмотках і темп накопичення пошкоджень ізоляції. Отримане поточне значення швидкості зносу порівнюється з гранично допустимим рівнем, який задається уставкою. При перевищенні граничного рівня мікроконтролер формує сигнал на відключення електродвигуна, а також увімкнення світлової (СС) та звукової (ЗС) сигналізації для оповіщення оператора про необхідність терміново знизити навантаження. Так реалізується захист обмоток статора від перегріву та прискореного старіння ізоляції.

Таким чином реалізується безперервний контроль та моніторинг стану занурювального електродвигуна, а також своєчасне реагування на нештатні та аварійні ситуації.

Додатково в системі передбачено датчик "сухого ходу" (ДСХ) для запобігання роботі двигуна без води, а також блок індикації (ЦІ) для візуального відображення поточних параметрів.

В проектуємому пристрої передбачено можливості завдання параметрів роботи та налаштування програмного забезпечення безпосередньо під час експлуатації. За допомогою ISP-програматора можна оновлювати вбудоване програмне забезпечення ПЗ мікроконтролера, а через комунікаційний порт (КП) здійснювати зв'язок з персональним комп'ютером (ПК) для:

- передачі даних моніторингу та журналів подій в режимі реального часу;
- віддаленого контролю поточного стану системи;
- зміни налаштувань роботи та порогових значень;

Клавіатура (КЛ) дозволяє оператору безпосередньо на місці встановлення пристрою вводити технічні характеристики конкретного електродвигуна, що контролюється, а також змінювати режими роботи системи, вводу даних і управління пристроєм. Цифрова індикація (ЦІ) відображає поточні значення моніторингових параметрів, попередження та повідомлення про нештатні ситуації. Такі можливості підвищують гнучкість та зручність застосування пристрою моніторингу.

Блок комутації слугує інтерфейсом між системою керування на базі мікроконтролера та силовим колом живлення і керування електродвигуном. До блоку комутації (БК) входить електромагнітний пускач, він керує його роботою через котушку магнітного пускача, яка за командами мікроконтролера забезпечує вмикання або вимикання електродвигуна. Включення його чи виключення здійснюється у разі здійснюється коли моніторингові критерії перевищують задані значення. Автоматичний вимикач виконує функції захисту пристрою від перевантажень та коротких замикань.

Блок живлення (БЖ) забезпечує електроживлення всіх електронних компонентів системи контролю і моніторингу змінним струмом напругою 220/380 В, перетворюючи його у необхідні значення постійної напруги.

3.6 Алгоритм роботи пристрою моніторингу

Програмний алгоритм роботи основної частини наведений на рис. 3.7.

При активації пристрою проводиться ініціалізація апаратної частини, а також змінних моделі і її констант (блоки 2, 3). Наступним етапом є опитування стану датчика "сухий хід" (блоки 4, 5) за допомогою мікроконтролера. У випадку, якщо контакти датчика не знаходяться під

впливом води і залишаються сухими - контакт DSH у розімкненому стані, мікроконтролер видає команду реле K2 на відкривання. Активація електродвигуна стає неможливою.

У випадку, якщо контакт DSH замкнутий, відбувається зчитування значень сили струму асинхронного двигуна насоса за допомогою трьох встановлених датчиків струму (блоки 8, 10, 12). Здійснюється послідовна перевірка на наявність повнофазного режиму роботи двигуна: якщо виявляється відсутність струму хоча б у одній з фаз, котушка реле K2 розмикається, що призводить до неможливості запуску електродвигуна. Це стосується як ситуацій, коли електродвигун ще не був запущений, так і тих, коли він вже працював і відключається від мережі. У випадку повнофазного режиму мікроконтролер обчислює середньоквадратичну силу струму (блок 14) і коефіцієнт завантаження (блок 15). Якщо коефіцієнт завантаження перевищує дві одиниці, заглибний ЕД заглибного насоса відключається від мережі за допомогою реле K2, що отримує команду на розмикання від мікроконтролера (блоки 17, 18).

На основі отриманих даних та початкових умов, згідно з математичною моделлю моніторингу теплового режиму роботи, проводиться визначення значення сталого перевищення температури обмотки заглибного електродвигуна (блок 19), після цього розраховується поточне перевищення температури обмотки ЕД (блок 20), за ним здійснюється визначення коефіцієнта перетворення електричної енергії (блок 21), після чого визначення швидкості зношення ізоляції відповідно (блок 23).

Умовою ефективної роботи заглибного електродвигуна є забезпечення оптимального співвідношення між коефіцієнтом втрат електроенергії k_n і швидкістю зношення ізоляції ε , яке не перевищує встановленого граничного значення. Розрахунки проводяться до того моменту, поки одна з двох умов не буде виконана: k_n і ε або знижується до граничного значення.

У першому випадку коли електродвигун насосу продовжує свою роботу,

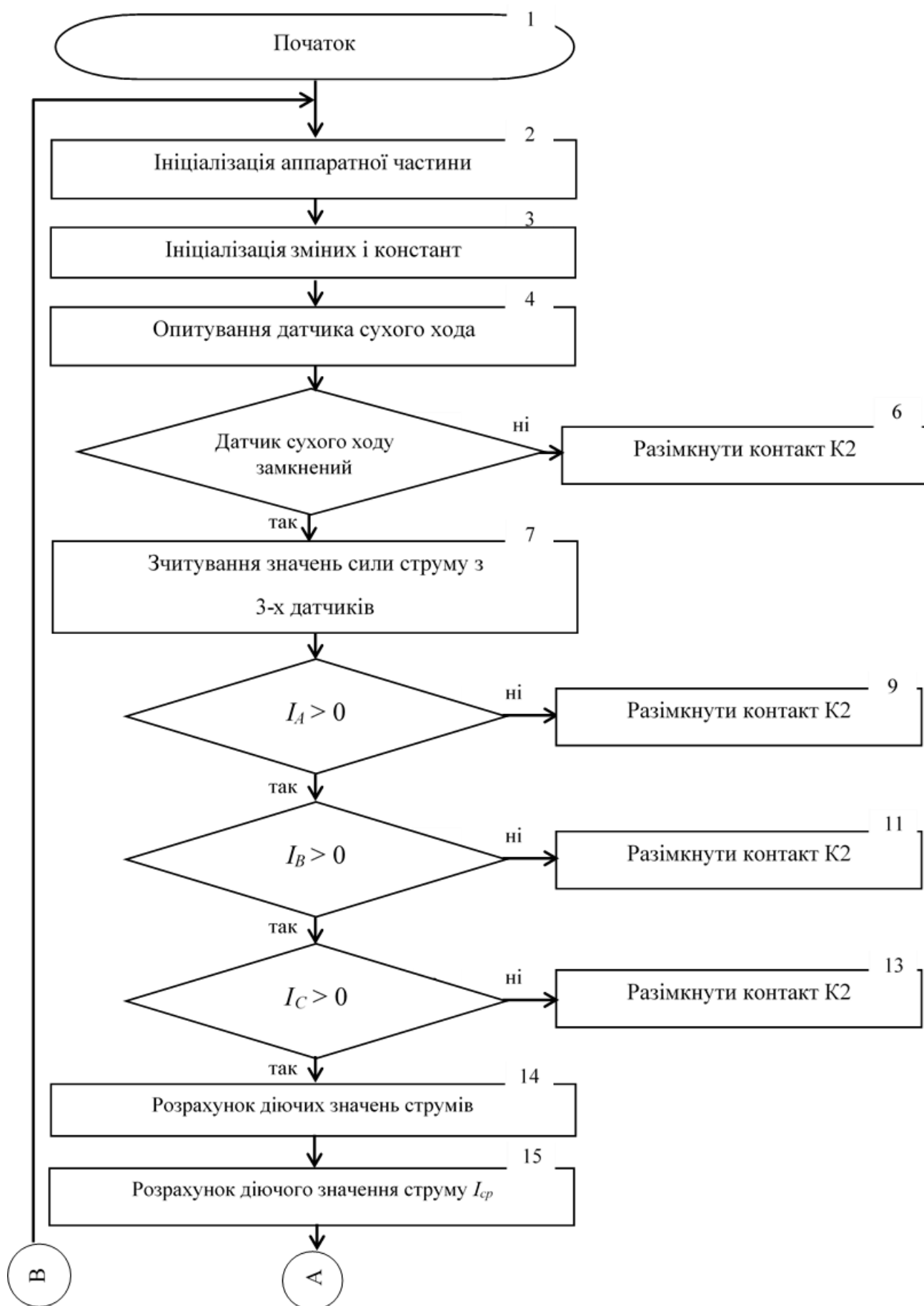


Рисунок 3.7 - Алгоритм роботи пристрою моніторингу
заглибного електродвигуна (початок)

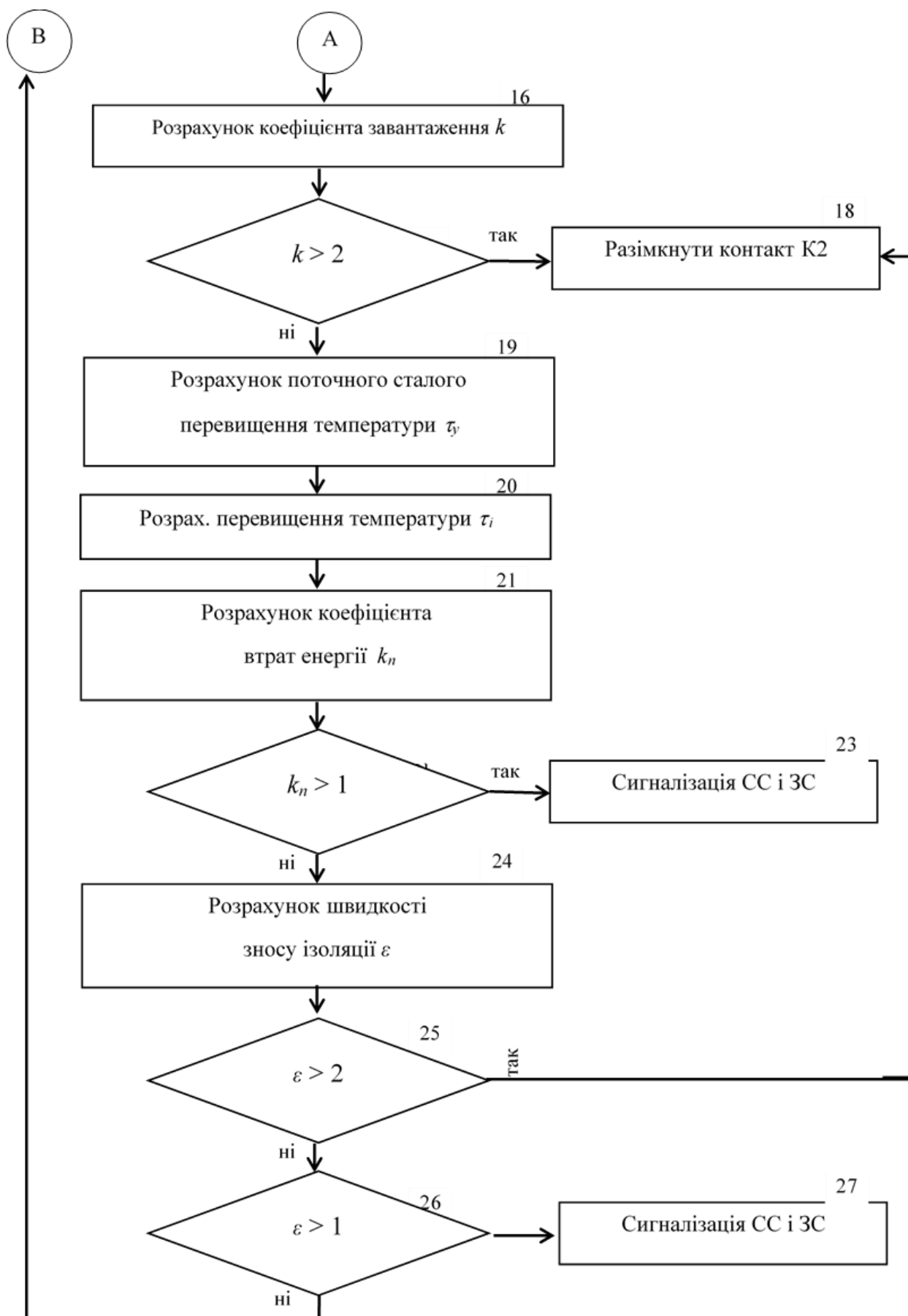


Рисунок 3.7 - Алгоритм роботи пристрою моніторингу
заглибного електродвигуна (закінчення)

виконуючи технологічну операцію $k_n \geq 1 \div 2$ і $\varepsilon \geq 1 \div 2$, тоді як у другому випадку при $\varepsilon \geq 2$ відбувається відключення від електромережі.

Тобто алгоритм роботи розробленого пристрою передбачає безперервне порівняння розрахункових показників - коефіцієнта втрат електроенергії та швидкості зносу ізоляції з їх гранично допустимими значеннями. Допоки розрахункові значення не перевищують порогових рівнів, занурювальний електродвигун продовжує функціонувати в штатному режимі, забезпечуючи необхідний технологічний процес. При перевищенні будь-якого з контрольованих параметрів відповідного порогового рівня, система видає команду на негайне вимкнення електродвигуна з метою уникнення його пошкодження або аварії.

Після фіксованого проміжку часу, необхідного для відновлення показань датчиків струму, алгоритм повторно запускається, що забезпечує циклічний безперервний контроль параметрів електродвигуна протягом усього часу його експлуатації.

3.7 Висновки до третього розділу.

У результаті проведеної роботи можна зробити наступні висновки:

1. Обґрунтовано вибір швидкості зносу ізоляції як основного критерію для моніторингу технічного стану та контролю режимів роботи занурювального електродвигуна.
2. Розроблено структурну схему пристрою, що дозволяє вимірювати параметри, обчислювати швидкість зносу ізоляції та формувати сигнали керування електродвигуном.
3. Для розрахунків побудовано адекватну математичну модель процесу теплового старіння ізоляції з урахуванням режимів роботи.
4. Завдяки безперервному контролю параметрів та своєчасному реагуванню пристрою досягається запобігання передчасним виходам електродвигунів з ладу через пошкодження ізоляції обмоток статора.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Загальні відомості

Електрообладнання на насосних станціях несе потенційну небезпеку для працівників, адже людські органи чуття не здатні на відстані визначити наявність електричної напруги.

Електроенергія використовується в устаткуванні для живлення приводів, що виконують силові операції, а також для освітлення робочих місць та живлення систем керування. Електрифікація полегшує працю персоналу та сприяє підвищенню продуктивності, проте вимагає розробки й реалізації захисних заходів для запобігання ураження працівників електричним струмом [30].

Зокрема, важливим є заземлення та занулення електроустаткування, а також періодичний контроль опору ізоляції. Крім цього, необхідне навчання персоналу правилам безпечної експлуатації електроустановок та використання засобів індивідуального захисту. Впровадження перелічених заходів дозволить знизити ризик ураження електричним струмом працівників насосних станцій.

4.2 Засоби з охорони праці

Пропонується застосувати пристрої захисного відключення. Захисне відключення - це швидкодіючий захист, який забезпечує автоматичне знеструмлення електроустановки у разі виникнення небезпеки ураження людини електричним струмом. Така загроза може виникнути при замиканні кабелю (проводу) на корпус, зниженні опору ізоляції електромережі нижче допустимого рівня, а також при дотику людини до струмоведучих частин, що перебувають під напругою.

Основні вимоги до пристроїв захисного відключення: висока чутливість, мінімальний час спрацювання, селективність, здатність до самоконтролю справності та достатня надійність. Залежно від контрольованих параметрів, пристрої захисного відключення поділяють на типи: реагуючі на потенціал корпусу електроустановки відносно землі, значення струм замикання на землю, струму та напруги нульової послідовності, напругу фази (провідника) відносно землі, оперативний робочий струм, схеми вентильні.

Пристрої захисного відключення, що реагують на появу потенціалу на корпусі електрообладнання. Призначення цих пристроїв - усунення небезпеки ураження людей електричним струмом у разі появи на заземленому або зануленому корпусі підвищеного потенціалу. Зазвичай такі пристрої є додатковим засобом захисту до системи заземлення чи занулення.

На рисунку 4.1 показано принципово-електричну схему такого пристрою з встановленим реле максимальної напруги як датчиком. Реле включене безпосередньо між захисним корпусом та допоміжним заземлювачем.

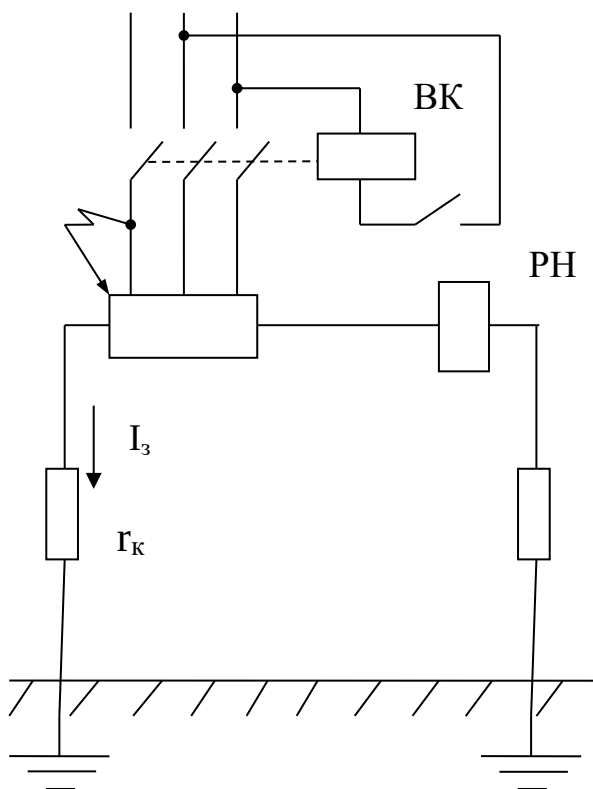


Рисунок 4.1-Принципово-електрична схема пристрою захисного відключення

4.3 Розрахунок електробезпекових характеристик.

Для обчислення струму замикання на землю, напруги дотику і величини струму, який протікає через тіло працівника при її доторканні до корпусу електродвигуна 2, потрібно мати конкретні значення електричних параметрів системи (рис. 4.2).

Вихідні данні приймаємо: тип встановленого заглибного електродвигуна насоса - ПЭДВ 2,8-140; $R_o = 4 \text{ Ом}$, - значення опір заземлення контуру; $U_\phi = 220 \text{ В}$, - значення фазної напруги; $R_{\text{люд}} = 1000 \text{ Ом}$, - прийняте значення опору тіла працівника; $R_z = 1 \text{ Ом}$, - опір прийнятого заземлення електродвигуна; $z_\phi = 0,35 \text{ Ом}$, - прийняте значення опору фазного проводу; $z_{mp} = 0,3 \text{ Ом}$, - прийняте значення опору силових обмоток трансформатора; $z_o = 0,4 \text{ Ом}$, - прийняте значення опору нульового проводу; вид захисту прийнятий автоматичний вимикач.

Для обчислення струму замикання на землю, напруги дотику і величини струму, який протікає через тіло людини при її доторкуванні до електродвигуна, можна використовувати наступні формули.

Величину струму к.з. (однофазного) ЕД №1 визначають наступним чином, 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, створеного у колі між нульовим та фазним проводом, Ом

Величину струму замикання на землю, А, ЕД №1 обчислюють за:

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

Напругу дотику до корпусу електрообладнання, тобто величину напруги, В, під яку попадає працівник при доторкуванні до металевого корпусу ЕД №2:

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

Струм, А, який протікає по тілу людини визначають.

$$I_{\text{люд}} = \frac{U_{\partial}}{R_{\text{люд}}} = \frac{45}{1500} = 0,045A$$

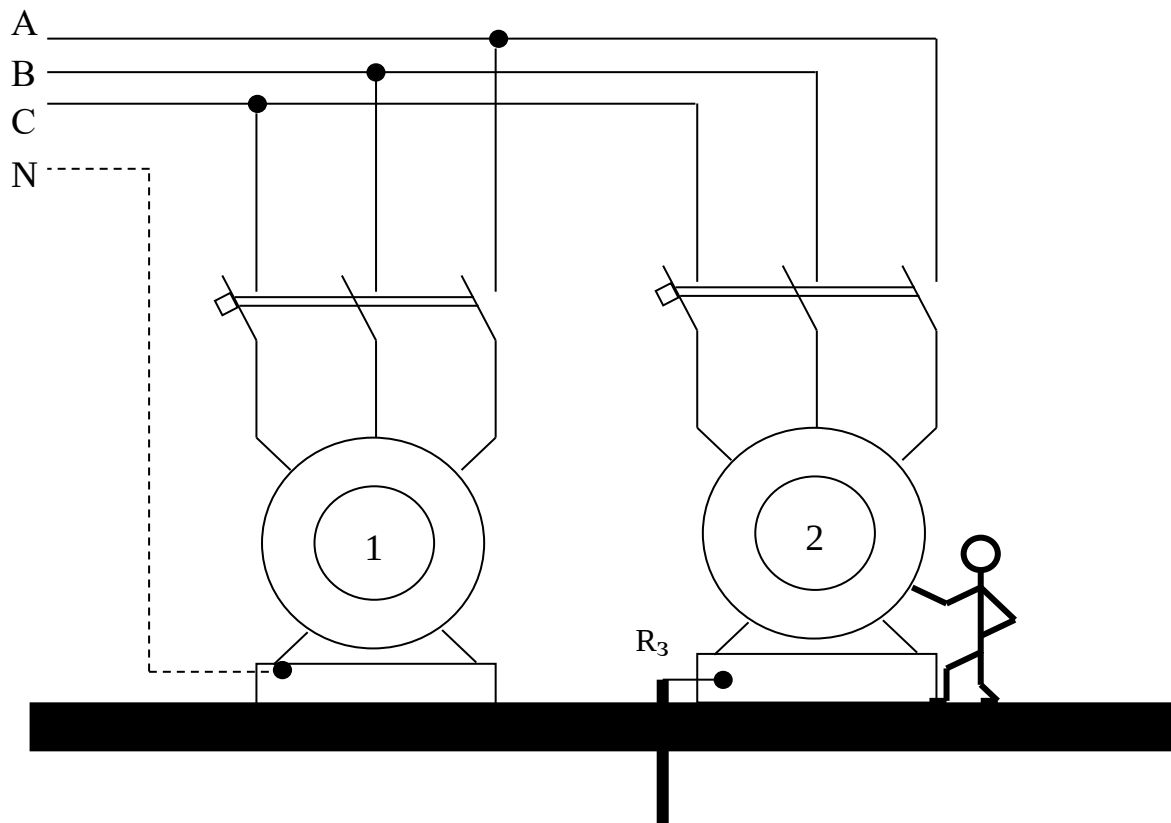


Рисунок 4.2 - Розрахункова схема установки.

Струм 0,045 А знаходиться в небезпечному діапазоні між пороговим невідпускаючим та фібриляційним струмами. Однак варто зазначити, що наведені значення порогових струмів є усередненими та орієнтовними. Насправді ці пороги можуть суттєво відрізнятись для різних людей залежно від фізичного стану, віку, статі тощо. Крім того, ймовірність фібриляції шлуночків зростає із збільшенням тривалості дії струму. Тож за певних умов навіть струм менше 0,045 А може виявитися смертельним та якнайшвидше усунути джерело небезпеки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведено детальний аналіз причин виходу з ладу занурювальних електродвигунів насосів. Встановлено, що основною причиною (понад 60% випадків) є пошкодження ізоляції обмоток статора внаслідок тривалої дії підвищених температур, перевантажень за струмом та інших несприятливих факторів, пов'язаних з недостатнім контролем параметрів у процесі експлуатації.

Зроблено висновок про необхідність застосування систем безперервного моніторингу технічного стану занурювальних електродвигунів на основі контролю параметрів, що безпосередньо характеризують інтенсивність зносу ізоляції обмоток статора в поточних умовах експлуатації.

Аналітично досліджено вплив аварійних режимів роботи (асиметрія напруги, міжфазні короткі замикання, обрив фази) на тепловий стан занурювальних електродвигунів. Встановлено істотне зростання температури обмоток, що свідчить про інтенсифікацію процесів теплового старіння ізоляції та збільшення швидкості її зносу.

Запропоновано та теоретично обґрунтовано математичну модель для розрахунку поточної швидкості зносу ізоляції занурювальних електродвигунів залежно від їх конструктивних особливостей та реальних режимів експлуатації.

Розроблено мікропроцесорний пристрій безперервного контролю параметрів і захисту занурювальних електродвигунів, що втілює запропоновану математичну модель та алгоритми розрахунку швидкості зносу ізоляції. Його впровадження дозволяє ефективно запобігти передчасним виходам двигунів з ладу та суттєво підвищити надійність роботи водопідйомних установок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електродвигуни асинхронні заглибні. Загальні технічні умови: ДСТУ 2649-94. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 30 с. – (Національні стандарти України).
2. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования / В.П. Таран. – К.: Техніка, 1983. – 200 с.
3. Белов Ю.А. Пути повышения надежности защиты погружных электронасосов / Ю.А. Белов // Повышение эксплуатационной надежности силового сх электрооборудования. – К.: УСХА, 1987. – С. 12-14.
4. Мишин В.Н. Моделирование аварийных режимов электродвигателей в сельском хозяйстве / В.Н. Мишин И.В. Собор. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 127с
5. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В.В. Овчаров. – К.: УСХА, 1990. – 168 с.
6. Курашкін С. Ф. Метод і пристрій діагностування експлуатаційних режимів роботи заглибних електродвигунів : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.03. - Мелітополь, 2010. - 20 с. - укр.
7. Корчемный Н.А. Повышение надежности электрооборудования в сельском хозяйстве / Н.А. Корчемный, В.П. Машевский. – К.: Урожай, 1988. – 176 с.
8. Данилов В.Н. Классификация устройств защиты электродвигателей от аварийных режимов / В.Н. Данилов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1987. – № 6. – С. 34-37.
9. Довідник сільського електрика / [Олійник В.С., Гайдук В.М., Гончар В.Ф. та ін.]; за ред. В.С. Олійника. – [3-є вид.]. – К.: Урожай, 1989. – 264 с.
10. Сыч И.П. Направления совершенствования тепловой защиты электродвигателя / И.П. Сыч // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 12. – С. 3-8.
11. 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.
12. 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.

13. Белов Ю.А. Устройство для проверки исправности и наладки блоков защиты погружных электродвигателей / Ю.А. Белов, И. В. Тронин // Технические средства диагностирования электрооборудования. – К.: УСХА, 1988. – С. 10-13.

14. Белов Ю.А. Универсальный стенд для моделирования аномальных режимов электронасосов при настройке станций управления ШЭТ и ШЭП / Ю.А.Белов//Оптимизация режимов и повышение эксплуатационной надежности силового оборудования в условиях сх производства. – К.: УСХА,1983. –С.13-16.

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

16. Хомутов О.И. Разработка защиты электродвигателей на основе моделирования тепловых процессов / О.И. Хомутов, В.В. Усов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1983. – № 12. – С. 51-52.

17. Гутенмахер Л.И. Электрические модели / Л.И. Гутенмахер. – [2-е изд.]. – К.: Техника, 1975. – 176 с.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.
23. 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.
24. Овчаров С.В. Исследование потерь мощности в асинхронном электродвигателе / С.В. Овчаров, Р.В. Телюта // Проблемы энергосбережения та энергосбереження в АПК України: Збірник наукових праць. – 2009. – С. 53-57.
25. Белов А.В. Конструирование устройств на микроконтроллерах / А.В. Белов. – СПб.: Наука и Техника, 2005. – 256 с.
26. 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.
27. 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.
28. 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 енергосбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 102. – С. 131-132.
29. Белов А.В. Создаем устройства на микроконтроллерах / А.В. Белов. – СПб.: Наука и Техника, 2007. – 304 с.
30. 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.