

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

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО
ЗАХИСТУ
Завідувача кафедри
електротехніки,
електромеханіки
та електротехнологій**

зав.кафедри /ОКУШКО О.В./
вчене звання і ступінь підпис
” _____ ” 2026 р.
число місяць рік

Бакалаврська кваліфікаційна робота

**на тему: «Проектні рішення з розроблення системи
електроспоживання станцій технічного сервісу електродвигунів
середньої потужності»**

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

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., ДОЦЕНТ Синявський О.Ю.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., ДОЦЕНТ Окушко О.В.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконала

(підпис)

(ПІБ)

Балюк О.В.

КИЇВ – 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ

**І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
електротехніки,
електромеханіки
та електротехнологій
/ОКУШКО О.В./

зав.кафедри

вчене звання і ступінь

підпис

число

”

місяць

рік

2026р.

ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи студенту
Балюк Олександрі Вікторівні
(прізвище, ім'я, по-батькові)

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

Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: «Проектні рішення з розроблення системи електроспоживання станцій технічного сервісу електродвигунів середньої потужності».

затверджена наказом ректора НУБіП України від «30» жовтня 2025 р. № 2607 „С”.

Термін подання завершеного проєкту на кафедру 2026.06.01
(рік, місяць число)

Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:

- 1) Правила улаштування електроустановок (ПУЕ).
- 2) Правила будови електроустановок (електрообладнання спеціальних установок).
- 3) Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.
- 4) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
- 5) Правила користування електричною енергією.

Перелік питань, які потрібно розробити:

- 1) Аналіз стану, перспектив і напрямків реалізації завдань, вирішуваних у проєкті.
- 2) Технологічна частина.
- 3) Електротехнічна частина проєкту.
- 4) Спеціальне завдання: «Діагностування та технічний сервіс електродвигунів середньої потужності».
- 5) Заходи з енергозбереження та охорона праці.
- 6) Обґрунтування прийнятих інженерних рішень та заходи щодо раціонального використання електроенергії
- 7) Висновки.Список використаних джерел.
- 8) Додатки.

Перелік графічних документів (за потреби):

1. План станції ТО і діагностування електрообладнання. Силове електрообладнання.
2. План станції ТО і діагностування. Освітлювальна мережа.
3. Функціональна схема пошуку несправностей двигуна.
4. Схема перевірки і діагностування якорів і статорів електричних машин ПУНС 5

Дата видачі завдання _____ 31.10.2025 р.

Керівник кваліфікаційної бакалаврської роботи

К.Т.Н., ДОЦЕНТ

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Окушко О.В.

(ПІБ)

Виконала

(підпис)

(ПІБ)

Балюк О.В.

№ Р я д к а	Фор мат	Позначення	Найменування	К- сть арку шів	№ При мітк и	При мітк а
1	A4	02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Пояснювальна записка	65		

3MICT

ВСТУП	8
1. АНАЛІЗ СТАНУ, ПЕРСПЕКТИВ ТА НАПРЯМІВ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЛЬ ОСІБ, ЯКІ ПРИЙМАЮТЬ РІШЕННЯ В ПРОЕКТІ	9
1.1 Сучасний стан технічної діагностики електродвигунів.....	9
1.2 Аналіз причин відмов електродвигунів потужністю до 15 кВт.....	10
1.3 Напрями підвищення ефективності методів діагностування.....	Ошибка! Закладка не определена.
2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	12
2.1 Обслуговування обладнання на ремонтній станції і технічне обслуговування електрообладнання	12
2.2 Вибір технологічного обладнання.....	14
3. ЕЛЕКТРИЧНА ЧАСТИНА	16
3.1 Розрахунок електропривода робочої машини.....	16
3.2 Вибір апаратів керування і захисту, низьковольтних комплектних пристроїв керування.....	21
3.3 Розрахунок електричного освітлення та освітлювальної мережі	24
3.4 Розрахунок вентиляції та вибір електротехнічного обладнання вентиляційних установок.....	29
4 .СПЕЦІАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ.....	33
4.1 Аналіз сучасних методів діагностики електро двигунів середньої потужності.....	33
4.2 Технічне обслуговування та діагностика електродвигунів змінного струму	35
4.3 Обладнання для перевірки та діагностики обмоток і статорів електричних машин.....	38

	машин.....											38
					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ							
Змін	Лист	номер	Підпис	Дата								
Розробив		Балюк О.В.			Інформація про проект				Лист	Аркуш	Аркуші	
Перевірів		Окушко О.В									64	
Рецензент									НУБіП України			
Н. контроль		Коробський В										
Затвердив		Окушко О.В.										

4.4 Автоматизована система моніторингу та діагностики парку електродвигунів промислового підприємства.....	40
5. ЗАХОДИ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ.....	44
5.1. Заходи для енергозбереження на підприємстві.....	44
5.2. Комплекс організаційно-технічних заходів щодо усунення небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	45
5.3. Розрахунок захисного заземлення у виробничому приміщенні.....	47
5.4 Комплекс заходів щодо захисту від блискавки.....	50
6. ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРИЙНЯТИХ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ ТА ЗАХОДИ ЩОДО РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	56
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСКІ ЛІТЕРАТУРИ.....	62

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ			
Змін	Лист	номер	Підпис	Дата				
Розробив	Балюк О.В.				<u>Інформація про проект</u>		Лист	Аркуш
Перевірів	Окушко О.В							64
Рецензент							НУБіП України	
Н. контроль	Коробський В							
Затвердив	Окушко О.В.							

ВСТУП

Електродвигуни є основою сучасного промислового виробництва — вони приводять у рух насоси, компресори, конвеєри, верстати та десятки інших механізмів. За різними оцінками, електродвигуни споживають понад 60% усієї електричної енергії, що виробляється у промисловості. Серед усього парку електричних машин особливе місце займають електродвигуни середньої потужності — до 15 кВт. Саме ця категорія є найбільш масовою: такі двигуни використовуються практично в кожному виробничому цеху, на кожному підприємстві, в агропромисловому секторі, комунальному господарстві та в малому бізнесі. Незважаючи на відносно невисоку одиничну потужність, сукупний вплив цього парку обладнання на енергоефективність і безперебійність виробничих процесів є надзвичайно значним.

Актуальність роботи зумовлена тим, що незважаючи на широке застосування електродвигунів потужністю до 15 кВт у промисловості, питання їх комплексної діагностики залишається недостатньо вирішеним на практиці. Більшість підприємств досі використовують застарілі методи контролю, що зводяться до вимірювання опору ізоляції та перевірки механічних характеристик.

Метою роботи є розробити та обґрунтувати комплекс заходів і технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності діагностування електродвигунів середньої потужності (до 15 кВт) в умовах реального виробництва з урахуванням сучасних методів технічного контролю та вимог до надійності обладнання.

Предметом бакалаврської роботи є методи, засоби та системи діагностування електродвигунів середньої потужності, включаючи вібраційну діагностику, тепловий контроль, аналіз споживаного струму та автоматизований моніторинг технічного стану.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1. Сучасний стан технічної діагностики електродвигунів

Електродвигуни є одним із ключових елементів будь-якого промислового підприємства. За статистичними даними Міжнародного енергетичного агентства, електродвигуни споживають від 43 % до 46 % усієї електричної енергії, що виробляється у світі, а в промисловому секторі ця частка сягає 68–70 %. Серед усього різноманіття електромеханічного обладнання особливої уваги заслуговують асинхронні двигуни середньої потужності — до 15 кВт, оскільки саме вони становлять найбільш масову частину парку промислових електроустановок. За різними оцінками, на підприємствах машинобудівного, агропромислового та комунального секторів України кількість таких двигунів перевищує 60 % від загальної кількості встановлених електромашин.

Питання технічного стану та надійності електродвигунів протягом останніх десятиліть перебуває у центрі уваги світової науки та інженерної практики. Однак незважаючи на значний прогрес у розробленні діагностичних методів і засобів, реальний стан справ на більшості вітчизняних виробничих підприємств залишає бажати кращого.

Сьогодні технічна діагностика являє собою комплекс методів і засобів, які забезпечують визначення поточного технічного стану об'єкта без його розбирання, а також прогнозування залишкового ресурсу. На практиці для електродвигунів середньої потужності застосовують кілька основних груп методів: методи аналізу вібраційних сигналів, методи аналізу споживаного струму, теплові методи, методи контролю ізоляційних характеристик та акустичні методи.

1.2 Аналіз причин відмов електродвигунів потужністю до 15 кВт

Розуміння механізмів і закономірностей виникнення відмов є фундаментальною основою для побудови ефективної системи діагностики. Без знання того, які несправності найбільш поширені, яка їхня природа та на яких стадіях вони можуть бути виявлені, неможливо правильно спланувати ні систему моніторингу, ні програму технічного обслуговування.

Статистика відмов асинхронних електродвигунів, накопичена провідними виробниками та дослідницькими організаціями, досить добре узгоджена між собою. Розподіл відмов асинхронних двигунів за конструктивними вузлами є таким: пошкодження підшипникових вузлів становлять від 40 % до 50 % усіх відмов, пошкодження статорних обмоток — від 28 % до 38 %, дефекти ротора — від 8 % до 10 %, інші причини (вал, корпус, система охолодження) — від 12 % до 22 %.

1.3 Напрями підвищення ефективності методів діагностування

Аналіз сучасного стану технічної діагностики електродвигунів середньої потужності та структури їхніх відмов дозволяє визначити конкретні напрями, за якими слід розвивати діагностичні методи і системи з метою підвищення їхньої практичної ефективності.

Першим і найважливішим напрямом є розвиток методів комплексної багатопараметрової діагностики. Практика показує, що жоден окремо взятий метод не забезпечує достатньої повноти та достовірності інформації про технічний стан двигуна. Другим важливим напрямом є впровадження методів безперервного моніторингу замість традиційного періодичного контролю. Третім перспективним напрямом є застосування методів цифрової обробки сигналів для підвищення чутливості діагностики.

Можна виділити ще такі напрями підвищення, як :

- автоматизація процесів діагностики та впровадження систем підтримки прийняття рішень;
- розробка та впровадження методів прогнозування залишкового ресурсу;
- розвиток нормативної та методичної бази діагностики.

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
						11
Зміна	Лист	номер	Підпис			

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Обслуговування електродвигунів на ремонтній станції та технічне обслуговування електрообладнання

Організація якісного технічного обслуговування електродвигунів середньої потужності є одним із ключових факторів, що визначають надійність роботи всього виробничого підприємства. Ремонтна станція електрообладнання — це спеціалізований підрозділ, призначений для виконання всього комплексу робіт із технічного обслуговування, діагностики, поточного та капітального ремонту електричних машин.

Система технічного обслуговування електродвигунів на ремонтній станції будується на основі нормативних документів, насамперед Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕ) та галузевих регламентів. Відповідно до цих документів, система технічного обслуговування включає 4 основних рівні: міжремонтне обслуговування (МО), яке виконується щоденно черговим електриком; технічне обслуговування (ТО-1), що проводиться 1 раз на місяць; технічне обслуговування (ТО-2), що проводиться 1 раз на 6 місяців; та капітальний ремонт (КР), що здійснюється 1 раз на 3–5 років залежно від умов експлуатації та результатів діагностики.

Міжремонтне обслуговування є найпростішим і найбільш частим видом обслуговування. Воно включає зовнішній огляд двигуна, перевірку наявності мастила в підшипниках, контроль температури корпусу та підшипникових щитів на дотик або за допомогою безконтактного термометра, а також перевірку рівня шуму та вібрації.

Технічне обслуговування ТО-1 передбачає більш детальну перевірку стану двигуна. Крім заходів, що виконуються при МО, до ТО-1 входять: вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу та між фазами, перевірка надійності заземлення, контроль стану клемної коробки та кабельних

вводі

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
Зміна	Лист	номер	Підпис			12

Технічне обслуговування ТО-2 є значно більш трудомістким і включає повну програму інструментальної діагностики. При ТО-2 виконуються: вібраційні вимірювання на підшипникових щитах у 3 площинах, тепловізійне знімання в режимі навантаження, аналіз форми кривої споживаного струму, перевірка стану повітряного фільтра та вентиляційних каналів, мащення підшипників (якщо конструкція передбачає можливість додавання мастила без розбирання).

Капітальний ремонт електродвигуна на ремонтній станції є найбільш повним видом відновлення і включає повне розбирання машини, очищення та миття всіх деталей, дефектацію, заміну або відновлення зношених деталей, перемотування або ремонт обмотки статора (за потреби), заміну підшипників, балансування ротора, складання та випробування. Нормативна тривалість капітального ремонту двигуна потужністю до 15 кВт становить від 8 до 24 людино-годин залежно від стану машини та необхідного обсягу робіт. Порядок виконання робіт при капітальному ремонті визначається технологічними картами, що розробляються для кожного типу двигунів.

Особливе місце в системі технічного обслуговування займає організація обліку та планування. На кожен електродвигун, що перебуває в експлуатації на підприємстві, ведеться технічний паспорт, в якому фіксуються всі виконані роботи з обслуговування та ремонту, результати вимірювань (опір ізоляції, рівень вібрації, споживана потужність), дати та обсяги мащення підшипників, а також виявлені відхилення від норми.

Таблиця 2.1.

**Нормативні міжремонтні інтервали для електродвигунів
потужністю до 15 кВт**

	Вид технічного обслуговування	Позначення	Міжремонтний інтервал	Трудомісткість, люд.-год
	Міжремонтне обслуговування	МО	Щоденно	0,1 – 0,2
	Технічне обслуговування 1	ТО-1	1 раз на місяць	0,5 – 1,0
	Технічне обслуговування 2	ТО-2	1 раз на 6 місяців	2,0 – 4,0
	Поточний ремонт	ПР	1 раз на 1–2 роки	4,0 – 8,0
	Капітальний ремонт	КР	1 раз на 3–5 років	8,0 – 24,0

2.2 Вибір технологічного обладнання для діагностування

Ефективність технічної діагностики електродвигунів середньої потужності безпосередньо залежить від правильного вибору технологічного обладнання. Діагностичне обладнання є основним технічним засобом, за допомогою якого здійснюється збирання інформації про стан машини, а тому його технічні характеристики, функціональні можливості та надійність визначають якість діагностичного процесу в цілому. При виборі обладнання необхідно враховувати не лише технічні вимоги, але й економічні аспекти: ціну придбання, вартість обслуговування та калібрування, строк окупності.

Основне технічне обладнання для діагностики електродвигунів до 15 кВт:

- цифровий мегаомметр (для контролю стану ізоляції);
- вібраційний аналізатор (для виявлення механічних несправностей);
- тепловізор (для швидкого та наочного виявлення теплових аномалій у двигуні та його ланцюгах живлення);
- стенд (для перевірки та діагностики електричних машин);
- мережевий аналізатор (для вимірювання та аналізу

електричних параметрів двигунів під навантаженням);

В таблиці 2.2 наведені всі рекомендовані обладнання, їхні моделі та орієнтована вартість.

Таблиця 2.2.

Нормативні показники технічного стану електродвигунів після капітального ремонту

	Параметр	Одиниця виміру	Нормативне значення	Метод контролю
	Опір ізоляції обмоток (U = 500 В)	МОм	Не менше 20	Мегаомметр М4100
	Коефіцієнт абсорбції ка	—	Не менше 1,3	Мегаомметр М4100
	Температура підшипників після 30 хв МХХ	°С	Не більше 70	Термометр / тепловізор
	Рівень вібрації (підшипниковий щит)	мм/с	Не більше 2,3	Віброметр
	Споживаний струм холостого ходу	% від I _п	25 – 50	Амперметр
	Залишковий дисбаланс ротора (клас G6.3)	г*мм	Не більше норми ISO 1940-1	Балансувальний стенд
	Опір обмоток постійному струму	Ом	Відхилення не більше ±2 % між фазами	Міст постійного струму

РОЗДІЛ 3

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок електропривода робочої машини

Вибір енергетичного обладнання для ремонтної станції електродвигунів є відповідальним інженерним завданням, що вимагає ретельного розрахунку електричних навантажень, визначення встановленої потужності та вибору силового трансформатора, розподільчих пристроїв і кабельних ліній. Правильно виконаний вибір енергетичного обладнання забезпечує надійне і безпечне електропостачання всіх споживачів станції, мінімізує втрати електроенергії та забезпечує можливість подальшого розширення виробничих потужностей.

Підбираємо електрообладнання до вентилятора ВЦ-4-75-4.

Технічна характеристика вентилятора ВЦ-4-75-4	
Продуктивність	2340 м ³ /год
Тиск	309 Па
n _н	1410 об/хв
ККД	0,791
Маса	74,3 кг

Визначаємо потужність вентиляторної установки за формулою:

$$P_B = \frac{p_B \cdot L_B}{\eta_B} \text{ кВт}, \quad (3.1)$$

де : p_B – тиск;

L_B – продуктивність;

η_B – ККД передачі.

$$P_B = \frac{0,309 \cdot 2340}{0,791} = 0,25 \text{ кВт}$$

Визначаємо потужність двигуна вентиляторної установки за формулою:

$$P_{\text{н.дв}} = \frac{K_3 \cdot P_{\text{в}}}{1}, \text{кВт} \quad (3.2)$$

де: K_3 – 1,3 (коефіцієнт запасу);

$P_{\text{в}}$ – потужність вентиляторної установки, кВт.

$$P_{\text{н.дв}} = \frac{1,3 \cdot 0,25}{1} = 0,33 \text{ кВт}$$

Номінальну потужність електродвигуна вибирають виходячи з таких умов:

$$P_{\text{н.дв}} \geq P_{\text{в}} \quad (3.3)$$

Виходячи з вищевказаних параметрів, вимог ДСТУ, напруги мережі, характеристик вентилятора вибираємо електродвигун AIR63B4U2.

Таблиця 3.1

Характеристика двигуна AIR63B4U2

Технічна характеристика двигуна AIR63B4U2:	Одиниці
Номінальна потужність, кВт	0,37
Номінальні оберти, об/хв	1320
Номінальний струм, А	1,18
ККД %	68
cos φ	0,70
Кратність пускового моменту	2,1
Кратність мінімального моменту	1,8
Кратність максимального моменту	2,2
Кратність пускового струму	5
Момент інерції, $\cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	1,2

Механічну характеристику двигуна будують за п'ятьма характерними точками:

$$1) S=0 \quad M=0 \quad \text{Н} \cdot \text{м}$$

$$2) \quad S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1500 - 1320}{1500} = 0,12 \quad M_H = 9 \cdot \frac{P}{n_H} = 0 \quad \frac{0}{1} \cdot 9 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{7}{0} \cdot 0$$

(3.4)

$$3) S_K = \frac{S_H + \sqrt{S_H \frac{\mu_K - 1}{\mu_1 - 1}}}{1 + \sqrt{S_H \frac{\mu_K - 1}{\mu_1 - 1}}} = \frac{0,12 + \sqrt{0,12 \cdot \frac{2,2 - 1}{1,05 - 1}}}{1 + \sqrt{0,12 \cdot \frac{2,2 - 1}{1,05 - 1}}} = 0,68 \quad \mu_1 = \frac{\mu}{\mu_{II}} = \frac{2,2}{2,1} = 1,05$$

(3.5)

$$= \mu \cdot \quad = 2,2 \cdot 2,67 = 5,874 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$4) \quad S_{min} \quad \quad \quad min = \mu_{min} \cdot \quad = 1,8 \cdot 2,67 = 4,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

(3.6)

$$5) S_{II} = 1 \quad \quad \quad \text{пуск} = \mu_{пуск} \cdot \quad = 2,1 \cdot 2,67 = 5,61 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

(3.7)

Побудова механічної характеристики електродвигуна з урахуванням допустимих відхилень моментів:

$$1) \quad S = 0 \quad \quad \quad M = 0 \quad \text{Н} \cdot \text{м}$$

(3.8)

$$2) \quad S_H = 0,12 \quad \quad \quad \dot{S}_H = \dot{S}_H = 2,67 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$3) \quad S_K = 0,68 \quad \quad \quad M_K = 0,9 \quad \dot{S}_K = 0,9 \cdot 5,874 = 5,28 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$4) \quad S_{min} \quad \quad \quad M'_{min} = 0,8 \dot{I}_{min} = 0,8 \cdot 4,8 = 3,84 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$5) \quad S_{пуск} = 1 \quad \quad \quad M_{пуск} = 0,85 \cdot \quad \dot{S}_{пуск} = 0,85 \cdot 5,61 = 4,76 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Побудова механічної характеристики електродвигуна з урахуванням допустимих відхилень напруги:

$$1) \quad S = 0 \quad \quad \quad M'' = 0$$

(3.9)

$$2) \quad S_H = 0,07 \quad \quad \quad M''_H = 0,95^2 \quad \dot{S}_H = 0,95^2 \cdot 2,67 = 2,41 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$3) \quad S_K = 0,68 \quad \quad \quad M''_K = 0,95^2 \quad \dot{S}_K = 0,95^2 \cdot 5,28 = 4,76 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$4) \quad S_{min} = 0,8 \quad \quad \quad M''_{min} = 0,95^2 \dot{I}_{min} = 0,95^2 \cdot 3,84 = 3,46 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$5) S_{\text{пуск}} = 1$$

$$M''_{\text{пуск}} = 0,95^2 \quad M_{\text{пуск}} = 0,95^2 \cdot 4,76 = 4,29$$

Н·м

За розрахункову приймаємо механічну характеристику двигуна з урахуванням допустимих відхилень моменту при допустимих відхиленнях напруги .

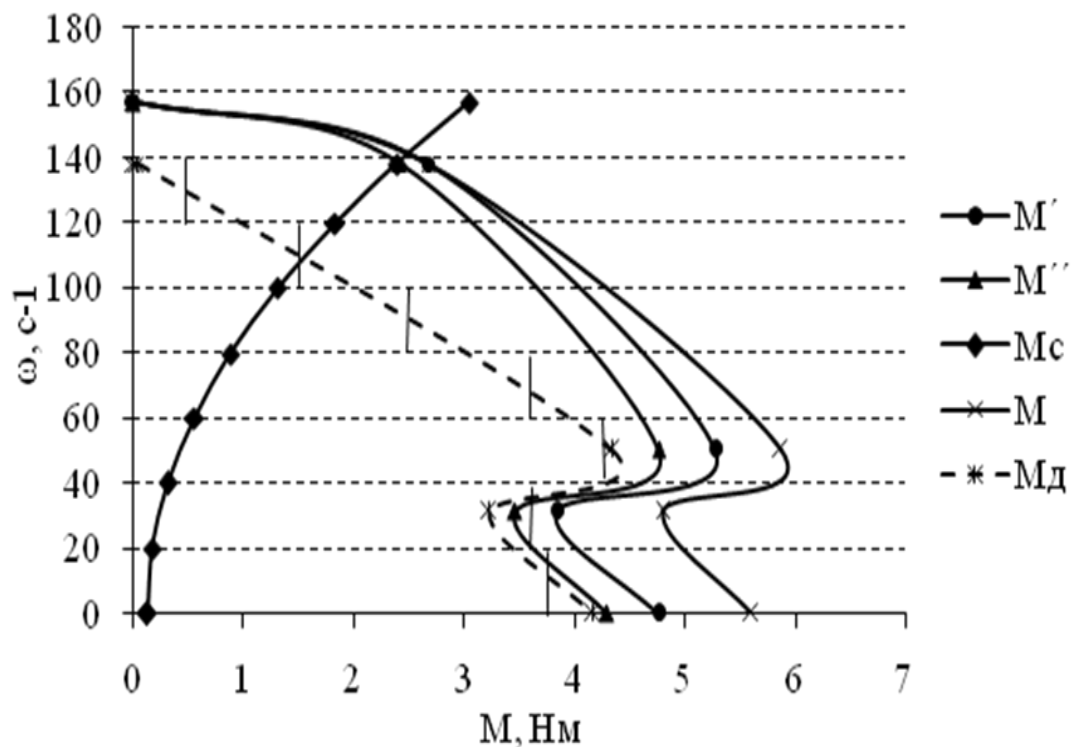


Рис. 3.1. Криві перехідних процесів: МХ робочої машини, електродвигуна, динамічна характеристика

Час пуску електродвигуна визначається графоаналітичним методом. Для цього будуємо механічну характеристику електродвигуна і робочої машини. Для побудови механічної характеристики електродвигуна за ковшанням розраховуємо кутову швидкість.

$$1) S = 0 \quad ; \quad \omega_0 = 157 \text{ c}^{-1} ; \quad M_0 = 0 \quad \text{Н} \cdot \text{м} \quad (3.10)$$

$$2) S_H = 0,12 \quad \omega = 138,2 \text{ c}^{-1} ; \quad \dot{I}_i'' = 2,41 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$3) S_K = 0,68 \quad \omega_K = 50,24 \text{ c}^{-1} ; \quad = 4,76 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$4) S_{\min} = 0.8 \quad \omega_{\min} = 31,4 \text{ с}^{-1}; \quad M_{\min}'' = 3,46 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$5) S_{\text{пуск}} = 1 \quad \omega_{\text{пуск}} = 0 \text{ с}^{-1}; \quad M_{\text{пуск}} = 4,29 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Інтервал швидкостей ділимо на ділянки $\Delta\omega_i$ для кожної з яких визначаємо середнє значення динамічного моменту M_i розраховується приріст часу.

$$J_{\text{зв}} = J_{\text{рот}} + J_{\text{рм.зв}} = 0,0012 + 0,0035 = 0,0047 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.11)$$

$$\Delta t_i = J_{\text{зв}} \frac{\Delta\omega_i}{M_i} \quad \text{,с} \quad (3.12)$$

$\Delta\omega$, рад/с	20	20	20	20	20	20	19
$M_{\text{дин.ср.}}$, Н·м	3,79	4,03	3,83	3,00	2,00	1,00	0,25
Δt , с	0,025	0,023	0,025	0,031	0,047	0,094	0,357
$\Delta t_{\text{пуску}}$, с	0,602						

Час пуску

$$t_{\text{пуск}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i = 0,602 \text{ с} \quad (3.13)$$

Для побудови кривої перехідного процесу $\omega=f(t)$ на осі абсцис послідовно відкладаємо прирости часу Δt_i і визначаємо відповідно кутову швидкість.

Маючи залежність $\omega=f(t)$, $\omega=f(M_{\text{д}})$ будуємо залежність $M_{\text{д}}=f(t)$.

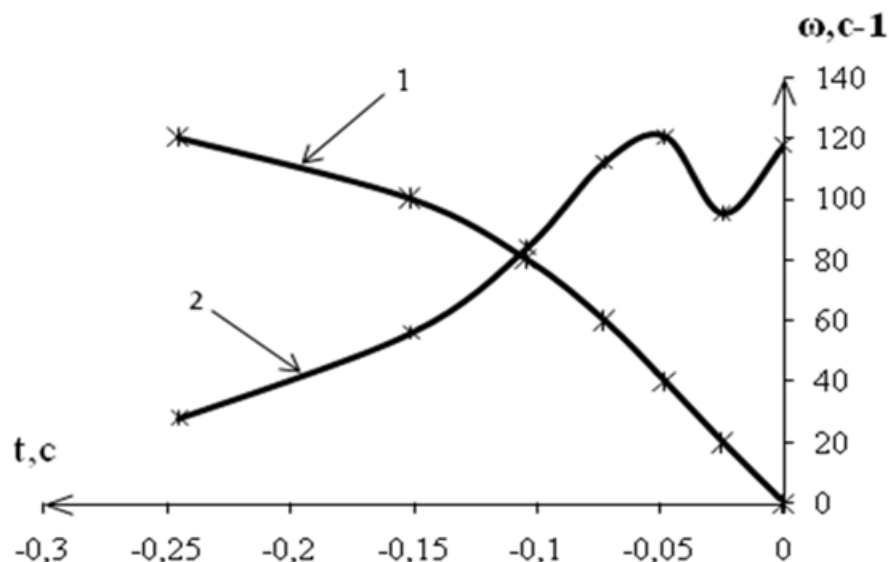


Рис.3.2. Характеристики зміни моменту електродвигуна за час розгону:

1 - час розгону електродвигуна $\omega = f(t)$;

2 - характеристики зміни моменту електродвигуна за час розгону $M_{дв} = f(t)$.

Перевірку вибраного електродвигуна за тепловим режимом під час пуску виконуємо за умовою:

$$\tau_{\text{доп}} \geq \tau_{\text{пуск}}, \quad (3.14)$$

де: $\tau_{\text{доп}}$ – допустиме перевищення температури двигуна;

$\tau_{\text{пуск}}$ – перевищення температури двигуна під час пуску.

Для двигунів серії AIR $\tau_{\text{доп}} = 80^\circ\text{C}$

$$\tau_{\text{пуск}} = V_t \tau_{\text{пуск}} = 8,0 \cdot 0,602 = 4,816^\circ\text{C} \quad (3.15)$$

$$80^\circ\text{C} > 4,816^\circ\text{C}$$

Умова перевірки виконується.

3.2 Вибір апаратів керування і захисту, низьковольтних комплектних пристроїв керування.

Вибір апаратів керування і захисту, низьковольтних комплектних пристроїв керування є невід'ємною складовою проектування електричної частини ремонтної станції. Захисні пристрої забезпечують безпеку персоналу та обладнання при виникненні аварійних режимів — коротких замикань та перевантажень, — а контрольні пристрої дозволяють здійснювати оперативний моніторинг стану електромережі та підключеного обладнання.

Для кожного станції технічного обслуговування електроспоживача ремонтної станції необхідно вибрати автоматичний вимикач, що захищає відповідне відгалуження мережі.

Автоматичний вимикач вибираємо за умовами:

$$U_{\text{вим}} \geq U_{\text{мер}} \quad 380\text{В} = 380\text{В}$$

$$I_{\text{вим}} \geq I_{\text{н.дв}} \quad 25 \text{ А} > 1,18 \text{ А}$$

$$I_{\text{т.р.}} \geq I_{\text{н.дв}} \quad 5 \text{ А} > 1,18 \text{ А}$$

$$I_{\text{від.ел.мрозм}} \geq (1,45 \dots 1,65) I_{\text{пуск}} \quad 70\text{А} > 9,74\text{А}$$

Вибираємо автоматичний вимикач ВА51Г25-340010 Р30 УХЛ3.

Вимикач автоматичний триполюсний з номінальним струмом 25 А, тепловим розчіплювачем на 5 А з комбінованим розчіплювачем, без допоміжних контактів, з ручним приводом, з регулюванням струму теплового розчіплювача.

Умови перевірки виконуються.

Електромагнітний пускач вибираємо за умовами:

$$U_{\text{н}} \geq U_{\text{мер}} \quad 380\text{В} = 380\text{В}$$

$$I_{\text{н}} \geq I_{\text{н.дв.}} \quad 10\text{А} > 1,18\text{А}$$

$$I_{\text{н.т.р.}} \geq I_{\text{н.дв.}} \quad 6\text{А} > 1,18\text{А}$$

Вибираємо електромагнітний пускач ПМЛ 1200 – О4Б.

Електромагнітний пускач на 10 А триполюсний, реверсивний без теплових реле, ступінь захисту IP00.

Вибираємо реле РТЛ – 1010 – 04 ($I_{\text{уст}} = 3,8 - 6 \text{ А}$)

Цехова електроустановка ремонтної станції включає головний розподільчий щит (ГРЩ), розподільчі шафи для силових споживачів та систему кабельних ліній. Правильне проектування цехової електроустановки забезпечує надійне електропостачання всіх споживачів, зручність обслуговування та можливість оперативного виявлення та усунення несправностей.

Розрахунок і підбір проводки від щитка до електродвигуна проводиться відповідно до умов нагріву провідників, а також за умови відповідності струму відключення електромагнітного розчіплювача допустимому струму проводу.

Перевірка виконується за умовами:

$$I_{трдоп} \geq I_{робелдв}$$

$$\frac{I_{відс.ел.маг.розч.}}{I_{трдоппров.}} \leq 4,5$$

$$\frac{I_{тепл.розч.}}{I_{тр.доп.пр.}} \leq 1$$

Враховуючи, що використовується автоматичний вимикач з комбінованим розчіплювачем, його розрахунок ведеться по відношенню до номінального струму теплового розчіплювача.

Відповідно до нормативних документів на двигун марки AIR63B4U2, номінальний струм двигуна:

$$I_n = 1,18 \text{ A}$$

Підбираємо кабель типу КРПТ перерізом $1,5 \text{ мм}^2$, для якого допустимий струм:

$$I_{тр.доп} = 19 \text{ A}$$

Тоді :

$$19 \geq 1,18$$

Умова виконується.

Для даного електродвигуна вибираємо автоматичний вимикач серії ВА51Г25-340010Р30УХЛЗ з номінальним струмом:

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
						23
Зміна	Лист	номер	Підпис			

$$I_p = 25 \text{ A}$$

Номінальний струм теплового розчіплювача:

$$I_{\text{німр}} = 5 \text{ A}$$

Перевірка:

$$\frac{5}{19} = 0,26 \leq 1$$

Умова виконується.

Для автоматичних вимикачів серії ВА51Г25 струм електромагнітного розчіплювача приймається:

$$I_{\text{відс}} = 14 \cdot I_{\text{німр}}$$

Тоді:

$$I_{\text{відс}} = 14 \cdot 5 = 70 \text{ A}$$

Перевірка:

$$\frac{70}{19} = 3,68 \leq 4,5$$

Умова виконується.

З отриманих даних для даного електроприводу вибираємо автоматичний вимикач серії ВА51Г25-340010Р30УХЛЗ та розподільний пристрій серії ПР11-1038.

Таблиця 3.2

Перелік захисних пристроїв електрообладнання ремонтної станції

№	Найменування споживача	P _н , кВт	I _н , А	Автоматичний вимикач	I _н _СВ, А	Теплове реле	I _{set} , А
1	Токарний верстат	7,5	15,3	ABB S203 C16	16	ABB TA25DU16	15,3
2	Фрезерний верстат	5,5	11,2	ABB S203 C13	13	ABB TA25DU11	11,2
3	Заточний верстат	2,2	4,8	ABB S203 C6	6	ABB TA25DU6.5	4,8
4	Свердильний верстат	1,5	3,6	ABB S203 C6	6	ABB TA25DU4	3,6
5	Намотувальний верстат	1,1	2,8	ABB S203 C4	4	ABB TA25DU3.1	2,8
6	Мийна машина	3,0	6,5	ABB S203 C10	10	ABB TA25DU8.5	6,5
7	Балансувальний стенд	2,2	4,8	ABB S203 C6	6	ABB TA25DU6.5	4,8
8	Випробувальний	15,0	29,1	ABB S203 C32	32	ABB	29,1

	стенд					TA25DU32	
9	Компресор	4,0	8,5	ABB S203 C10	10	ABB TA25DU11	8,5
10	Вентиляція	3,0	6,5	ABB S203 C10	10	ABB TA25DU8.5	6,5
11	Освітлення	2,4	—	ABB S203 C10	10	—	—
12	Головний ввід ГРЩ	18,96	35,1	ABB S203 C40	40	—	—

3.3 Розрахунок електричного освітлення та освітлювальної мережі .

Правильно розраховане і виконане штучне освітлення ремонтної станції є важливою умовою безпечної та ефективної роботи персоналу. Недостатній рівень освітленості призводить до підвищеної втомлюваності, зниження продуктивності праці та збільшення ризику помилок при виконанні точних вимірювань і ремонтних робіт. Нормативні вимоги до освітленості виробничих приміщень визначаються стандартом ДБН В.2.5-28 «Природне і штучне освітлення».

Для ремонтної станції електродвигунів, де виконуються роботи середньої точності (дефектація деталей, складання, регулювання), нормована освітленість на робочих поверхнях становить 300 лк. Для зони діагностичних вимірювань, де виконуються більш точні роботи (з вимірювальними приладами), норма підвищується до 500 лк.

Площа ремонтної станції приймається: довжина $A = 18$ м, ширина $B = 12$ м, висота $H = 4,5$ м. Висота підвісу світильників над робочою поверхнею визначається за формулою :

$$h_p = H - h_{\text{роб}} - h_{\text{свс}}, \quad (3.16)$$

де: $H = 4,5$ м — висота від підлоги до стелі;

$h_{\text{роб}} = 0,8$ м — висота робочої поверхні від підлоги;

$h_{\text{свс}} = 0,3$ м — висота підвісу світильника від стелі.

$$h_p = 4,5 - 0,8 - 0,3 = 3,4 \text{ м}$$

Нормативна відбивна здатність:

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
						25
Зміна	Лист	номер	Підпис			

$$\rho_{\text{стін}} = 0,3$$

$$\rho_{\text{стелі}} = 0,5$$

$$\rho_{\text{підлоги}} = 0,1$$

Індекс приміщення, що характеризує його форму і впливає на коефіцієнт використання розраховується за формулою:

$$i = \frac{A \cdot B}{h_p \cdot (A + B)}, \quad (3.17)$$

де : В – ширина приміщення,м;

А – довжина приміщення,м ;

$$i = \frac{18 \cdot 12}{3,4 \cdot (18 + 12)} = 2,12$$

З таблиць вибирається коефіцієнт використання світлового потоку для промислових світлодіодних світильників: $\eta = 0,65$

Необхідний загальний світловий потік:

$$\Phi = \frac{E \cdot Kz \cdot S}{N \cdot \eta}, \quad (3.18)$$

де : η – коефіцієнт використання світового струму;

S – площа приміщення, м2;

N- кількість рядів світильників;

E - стандартне освітлення, лк;

$kz = 1,5$ - норма запасів.

Спочатку визначимо необхідний світловий потік без визначення кількості світильників:

$$\Phi = \frac{E \cdot Kz \cdot S}{\eta}, \quad (3.19)$$

Тоді

$$\Phi = \frac{300 \cdot 1,5 \cdot 216}{0,65} = 149538 \text{ лм}$$

Обираємо промислові світлодіодні світильники типу «Армстронг LED» потужністю $P = 40$ Вт зі світловим потоком $F_0 = 4400$ лм (питома ефективність 110 лм/Вт). Необхідна кількість світильників:

$$N = \frac{\Phi}{\Phi_0}, \quad (3.20)$$

Тоді

$$N = \frac{149538}{4400} = 33,98 \approx 34 \text{ шт}$$

Фактична освітленість при 34 світильниках:

$$E_{cp} = \frac{N \cdot \Phi_0 \cdot \eta}{K_3 \cdot S} \quad (3.21)$$

Тоді

$$E_{cp} = \frac{34 \cdot 4400 \cdot 0,65}{1,5 \cdot 216} = 300,1 \text{ лк}$$

Фактична освітленість $E_0 = 300,1$ лк відповідає нормативному значенню $E_{\min} = 300$ лк. Розміщення світильників виконується рівномірною сіткою. Відстань між рядами світильників:

$$L = \sqrt{\frac{S}{n}} \cdot a_{form}, \quad (3.22)$$

Приймаємо 4 ряди по 8–9 світильників або 2 ряди по 17 світильників. При 2 рядах відстань між рядами:

$$L_r = \frac{B}{n_r + 1} = \frac{12}{2 + 1} = 4 \text{ м.}$$

Відстань між світильниками у ряду:

$$L_c = \frac{A}{n_c + 1} = \frac{18}{18} = 1 \text{ м.}$$

Перевірка відстані до стін:

$$L_w = \frac{L_r}{2} = 2 \text{ м.}$$

Таблиця 3.3.

Відомість освітлювального обладнання ремонтної станції

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
Зміна	Лист	номер	Підпис			27

№	Зона приміщення	E _п , лк	Тип світильника	P _{lum} , Вт	F _{lum} , лм	Кількість, шт	P _{заг} , Вт
1	Загальне виробниче освітлення	300	LED Armstrong 40 Вт	40	4 400	34	1 360
2	Зона діагностики (місцеве)	500	LED Spot 20 Вт	20	2 200	4	80
3	Зона складання (місцеве)	500	LED Spot 20 Вт	20	2 200	4	80
4	Аварійне освітлення	—	LED аварійний 8 Вт	8	600	6	48
5	Зовнішнє освітлення входу	—	LED вуличний 30 Вт	30	3 600	2	60
—	Разом	—	—	—	—	50	1 628

Вибір освітлювальної мережі виконується після визначення загальної встановленої потужності освітлення та схеми розподілу споживачів по групах. Освітлювальна мережа ремонтної станції складається з освітлювального щита (ОЩ), від якого живляться групові лінії до світильників. Групові лінії формуються таким чином, щоб потужність кожної групи не перевищувала 2,5–3,0 кВт, а кількість світильників на одній груповій лінії не перевищувала 20 штук.

На основі наведеного вище розрахунку та таблиці 3.3 формуються наступні групи освітлення.

Група 1: загальне освітлення, частина 1 — 17 світильників LED 40 Вт, загальна потужність $P_1 = 17 \cdot 40 = 680$ Вт.

Група 2: загальне освітлення, частина 2 — 17 світильників LED 40 Вт, загальна потужність $P_2 = 17 \cdot 40 = 680$ Вт.

Група 3: місцеве освітлення та аварійне — 8 світильників LED Spot 20 Вт + 6 аварійних 8 Вт, $P_3 = 8 \cdot 20 + 6 \cdot 8 = 160 + 48 = 208$ Вт.

Група 4: зовнішнє освітлення та розетки — 2 світильника 30 Вт + резерв розеток 500 Вт, $P_4 = 60 + 500 = 560$ Вт.

Струм у кожній груповій лінії визначається за формулою для однофазного кола (освітлення підключається однофазно):

$$I_g = \frac{P_g}{U \cdot \cos(\varphi_{light})} \quad (3.22)$$

де: P_g – потужність групи;

U – напруга в мережі (220 В);

$\cos(\varphi_{light}) = 1$, для світлодіодних світильників.

Звідси:

Група 1: $I_{g1}=3,25$ А

Група 2 : $I_{g2}=3,25$ А

Група 3 : $I_{g3}=1,0$ А

Група 4: $I_{g4}=2,68$ А

Вибір перерізу жил проводки групових ліній освітлення виконується за умовою допустимого нагріву та допустимих втрат напруги. Для групових ліній освітлення допустимі втрати напруги не повинні перевищувати 2,5 % від номінальної напруги, тобто

$$\Delta U = 2 \cdot I_g \cdot R \cdot L_g \quad (3.23)$$

де L_g – довжина групової лінії;

R — питомий опір проводу (Ом/м).

Для найдовшої групової лінії: $L_g = 30$ м; $I_g = 3,25$ А; $R = \frac{0,0175}{1,5} = 0,01167$ Ом/м (при проводі ВВГнг 3х1,5 мм²)

$$\Delta U_1 = 2 \cdot 3,25 \cdot 0,01167 \cdot 30 = 2,275\text{В}$$

Відносні втрати:

$$\Delta U_{\text{відн}} = \frac{2,275}{220 \cdot 100\%} = 1,03\%$$

що менше 2,5 % — умова виконана. Мінімально допустимий переріз проводки освітлення за нормативами ПУЕ-2017 для груп освітлення становить 1,5 мм², що відповідає обраному перерізу.

Таблиця 3.4

Відомість електропроводки освітлювальної мережі

№	Група	P_гр, Вт	I_гр, А	Марка проводу	Переріз, мм ²	I_dop, А	L_гр, м	dU, В	dU, %
1	Загальне освітлення, гр. 1	680	3,25	ВВГнг	3х1,5	19	30	2,28	1,03
2	Загальне освітлення, гр. 2	680	3,25	ВВГнг	3х1,5	19	28	2,13	0,97
3	Місцеве + аварійне	208	1,00	ВВГнг	3х1,5	19	15	0,35	0,16
4	Зовнішнє + розетки	560	2,68	ВВГнг	3х2,5	27	20	0,75	0,34
—	Ввід ОЩ (від ГРЩ)	1 628	7,18	ВВГнг	3х2,5	27	10	0,42	0,19

Для захисту кожної групової лінії освітлення в ОЩ встановлюються однополюсні автоматичні вимикачі. Струм автоматичного вимикача вибирається з умови:

$$I_{\text{вим}} \geq I_g$$

але не менше 10 А (мінімальний стандартний номінал для освітлення).

Для всіх 4 груп обираються автоматичні вимикачі ABB S201 C10 з $I_{\text{вим}} = 10$ А.

Загальний ввідний автомат ОЩ: при $I_{\text{вим}} = 7,18$ А обирається ABB S201 C10 з $I_{\text{вим}} = 10$ А.

3.4 Розрахунок вентиляції та вибір електротехнічного обладнання вентиляційних установок

Вентиляція ремонтної станції є важливим елементом забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці та підтримання вимог пожежної безпеки. У приміщенні ремонтної станції виникають специфічні шкідливості: пари мийних рідин від мийної машини, озон від зварювальних робіт (при перемотуванні обмоток), аерозолі мастильних матеріалів, пил від заточного верстата та тепловиділення від обладнання.

Розрахунок вентиляції виконується виходячи з необхідного повітрообміну для розбавлення шкідливостей до допустимих концентрацій та забезпечення комфортних теплових умов.

Тепловиділення від електрообладнання в приміщенні визначається виходячи з того, що вся споживана електрична потужність, крім тієї, що іде на корисну роботу (виноситься з продукцією), перетворюється на тепло у приміщенні.

Для ремонтної станції коефіцієнт теплового виділення $K_x = 0,25$ (25 % від споживаної потужності перетворюється на тепло в приміщенні). Тепловиділення від обладнання:

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
						30
Зміна	Лист	номер	Підпис			

$$Q_{eq} = K_x \cdot P_c \cdot 1000 \cdot 3600, \quad (3.24)$$

де : P_c - потужність обладнання, кВт.

У зручніших одиницях (Вт):

$$Q_{eq} = K_x \cdot P_c \cdot 1000$$

$$Q_{eq} = 0,25 \cdot 18,96 \cdot 1000 = 4740 = 4,74 \text{ кВт}$$

Тепловиділення від освітлення (50 % від встановленої потужності перетворюється на конвективне тепло):

$$Q_l = 0,5 \cdot P_l. \quad (3.25)$$

$$Q_l = 0,5 \cdot 1628 = 814 \text{ Вт}$$

Тепловиділення від людей (кількість працівників $n_p = 6$ осіб, тепловиділення від однієї людини при середній фізичній роботі $q_p = 290$ Вт):

$$Q_p = n_p \cdot q_p. \quad (3.26)$$

$$Q_p = 6 \cdot 290 = 1740 \text{ Вт}$$

Загальне тепловиділення у приміщенні:

$$Q_t = Q_{eq} + Q_l + Q_p. \quad (3.27)$$

$$Q_t = Q_{eq} + Q_l + Q_p$$

$$Q_t = 4,74 + 1,74 + 0,814 = 7,294 \text{ кВт}$$

Необхідна витрата повітря для видалення надлишкового тепла:

$$L_h = \frac{Q_t}{c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot \Delta T}, \quad (3.28)$$

де : $c_{air} = 1005$ Дж/(кг*°C) — теплоємність повітря;

$\rho_{air} = 1,2$ кг/м³ — щільність повітря;

ΔT різниця температур видаленого та припливного повітря (°C).

Приймаємо $\Delta T = 6$ °C (нагрів повітря від припливу до витяжки).

$$L_h = \frac{7294}{1005 \cdot 1,2 \cdot 6} = 7294/7236 = 1,008 \text{ м}^3/\text{с} = 3629 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Перевірка за кратністю повітрообміну. Кратність повітрообміну:

$$n_{air} = \frac{L_h}{V} = \frac{3629}{972} = 3,73 \text{ год}^{-1}$$

Нормативна кратність повітрообміну для ремонтних цехів становить від 3 до 6 год⁻¹, що відповідає отриманому значенню.

Витрата повітря за санітарними нормами (не менше 30 м³/год на одну людину):

$$L_s = n_p \cdot L_p \quad (3.29)$$

$$L_s = 6 \cdot 30 = 180 \text{ м}^3/\text{год}$$

Розрахункова витрата за тепловиділеннями $L_h = 3629$ м³/год значно перевищує санітарну норму $L_s = 180$ м³/год, тому для розрахунку вентилятора приймається $L_{vent} = L_h = 3629$ м³/год ≈ 3700 м³/год (округлення у більший бік).

Для вибору вентиляційного агрегату необхідно також визначити аеродинамічний опір вентиляційної системи. Для типової вентиляційної мережі довжиною 30 м з повітроводами діаметром 315 мм сумарний опір мережі становить $\Delta P_{vent} = 180\text{--}250$ Па. Приймаємо $\Delta P_{vent} = 220$ Па.

На основі розрахованих параметрів $L_{vent} = 3700$ м³/год та $\Delta P_{vent} = 220$ Па вибирається вентиляційний агрегат. Обирається осьовий вентиляційний агрегат ВО-7,5 у складі припливної установки або центробіжний вентилятор ВЦУН-500 ($L = 3500\text{--}5000$ м³/год, $\Delta P_{max} = 300$ Па, $P_{el} = 3,0$ кВт). Це відповідає прийнятому раніше значенню потужності вентиляції $P_{vent} = 3,0$ кВт.

Таблиця 3.5

Зведені параметри системи вентиляції ремонтної станції

№	Параметр	Позначення	Одиниця виміру	Значення
1	Площа приміщення	S	м ²	216
2	Об'єм приміщення	V	м ³	972
3	Тепловиділення від обладнання	Q _{eq}	Вт	4 740
4	Тепловиділення від освітлення	Q _l	Вт	814
5	Тепловиділення від людей	Q _p	Вт	1 740
6	Загальне тепловиділення	Q _{total}	Вт	7 294
7	Розрахункова витрата повітря	L _v	м ³ /год	3 700
8	Кратність повітрообміну	n	год ⁻¹	3,73
9	Аеродинамічний опір мережі	dP	Па	220
10	Потужність вентилятора	P	кВт	3,0
11	Тип вентиляційного агрегату	—	—	ВЦУН-500
12	Кількість агрегатів	—	шт	2 (прилив + витяжка)

Система вентиляції ремонтної станції виконується як приточно-витяжна з механічним спонуканням. Приливний агрегат подає свіже зовнішнє повітря (у холодну пору року — підігріте калорифером до температури +18 °С), витяжний — видаляє забруднене повітря. Продуктивність витяжного вентилятора приймається на 10 % більшою, ніж приливного, для забезпечення підпору у суміжних приміщеннях: $L_{ex} = 1,10 * 3700 = 4070 \text{ м}^3/\text{год}$. Повітрообмін організовується за схемою «зверху-вниз» для більш ефективного видалення теплих повітряних мас.

РОЗДІЛ 4

СПЕЦІАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

4.1 Аналіз сучасних методів діагностики електродвигунів середньої потужності

Сучасна технічна діагностика електродвигунів середньої потужності являє собою розвинену галузь прикладних знань, що поєднує методи фізичного вимірювання, цифрової обробки сигналів та інтелектуального аналізу даних. Протягом останнього десятиліття ця галузь зазнала суттєвої трансформації під впливом розвитку мікроелектроніки, бездротових

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
						33
Зміна	Лист	номер	Підпис			

технологій передачі даних та алгоритмів машинного навчання. Результатом стало значне розширення арсеналу доступних діагностичних методів та підвищення їхньої практичної ефективності.

Аналіз підпису струму двигуна (Motor Current Signature Analysis — MCSA) є одним із найбільш поширених неінвазивних методів діагностики. Його привабливість полягає у тому, що для здійснення вимірювань не потрібно зупиняти або розбирати двигун — достатньо підключити датчик струму до кабелю живлення. Будь-яка механічна або електрична несправність модулює струм статора на специфічних частотах, які виявляються при спектральному аналізі.

Амплітуда цих складових у спектрі струму при наявності 1 обірваного стержня з 28 знижується на 40–50 дБ відносно основної гармоніки, при 2 зламаних стержнях — на 35–45 дБ. Виявлення таких малих амплітуд вимагає аналізатора з динамічним діапазоном не менше 60 дБ та частотним розрізненням не гірше 0,1 Гц.

Метод аналізу вібраційних сигналів у часо-частотній області набуває дедалі більшого поширення завдяки здатності аналізувати нестационарні процеси, що є типовими для реальних умов роботи двигунів зі змінним навантаженням. Класичне перетворення Фур'є (FFT) дає точну частотну інформацію лише для стаціонарних сигналів, тоді як вейвлет-перетворення дозволяє одночасно аналізувати сигнал у часовій та частотній областях.

Застосування вейвлет-аналізу для діагностики підшипників дозволяє виявляти дефекти на стадії, коли їхні прояви у класичному спектрі FFT ще невиразні, підвищуючи чутливість методу на 15–25 % порівняно з FFT.

Тепловізійна діагностика набула значного поширення завдяки розвитку доступних тепловізорів на некохольованих матрицях. Метод базується на реєстрації теплового поля двигуна під навантаженням та порівнянні з еталонним розподілом температури.

Для надійного виявлення ранніх стадій потрібен тепловізор із NETD $\leq 0,08$ °C. Сучасні дослідження (Atif, Javed, 2024) свідчать, що поєднання

тепловізійної діагностики з алгоритмами глибокого навчання (CNN) дозволяє досягти точності класифікації стану підшипників 98,29 % при використанні методу SVM та 100 % при CNN на навчальних вибірках достатнього обсягу.

Метод часткових розрядів (Partial Discharge — PD) є спеціалізованим інструментом для оцінки стану ізоляції обмоток статора. Часткові розряди виникають у мікропорожнинах і тріщинах ізоляції при підвищенні напруженості електричного поля і є провісниками майбутнього пробою. Рівень часткових розрядів вимірюється у пікокулонах (пКл). Граничне значення для двигунів до 15 кВт становить 100–500 пКл залежно від класу ізоляції та терміну експлуатації. Перевищення цього значення сигналізує про необхідність позапланового огляду ізоляції.

Таблиця 4.1.

Порівняльна характеристика методів діагностики електродвигунів

№	Метод діагностики	Виявлювані несправності	Діагностика під навантаженням	Відносна вартість
1	Вібраційний аналіз	Дефекти підшипників, дисбаланс, розцентрування	Так	Середня
2	MCSA (аналіз струму)	Обрив стержнів ротора, ексцентриситет, міжвиткові замикання	Так	Середня
3	Тепловізійна діагностика	Перегрів обмоток, дефекти охолодження, нерівномірне навантаження	Так	Висока
4	Контроль ізоляції	Зволоження, старіння, часткові розряди	Ні	Низька
5	Акустична емісія	Ранні дефекти підшипників, мікротріщини	Так	Висока
6	Аналіз мастила	Зношення підшипників, забруднення	Ні	Низька

4.2 Технічне обслуговування та діагностика електродвигунів змінного струму потужністю до 15 кВт

Розуміння механізмів і закономірностей виникнення відмов є фундаментальною основою для побудови ефективної системи діагностики. Без знання того, які несправності найбільш поширені, яка їхня природа та на яких стадіях вони можуть бути виявлені, неможливо правильно спланувати ні систему моніторингу, ні програму технічного обслуговування.

Статистика відмов асинхронних електродвигунів, накопичена провідними виробниками та дослідницькими організаціями, досить добре узгоджена між собою. Згідно з узагальненими даними IEEE Industry Applications Society та результатами досліджень Hamani, Kubatko, Kirschner (2025), розподіл відмов асинхронних двигунів за конструктивними вузлами є таким: пошкодження підшипникових вузлів становлять від 40 % до 50 % усіх відмов, пошкодження статорних обмоток — від 28 % до 38 %, дефекти ротора — від 8 % до 10 %, інші причини (вал, корпус, система охолодження) — від 12 % до 22 %.

Для електродвигунів середньої потужності (до 15 кВт) ця статистика має свою специфіку, зумовлену, насамперед, умовами їхньої типової експлуатації. Такі двигуни зазвичай працюють у режимах із частими пусками та зупинками, у широкому діапазоні температур навколишнього середовища, нерідко в умовах підвищеної запиленості та вологості. У таблиці 1.2 наведено структуру відмов електродвигунів потужністю до 15 кВт за результатами узагальнення галузевих даних.

Таблиця 4.2.

Структура відмов асинхронних електродвигунів потужністю до 15 кВт

№	Вузол або елемент	Частка відмов, %	Середній час до відмови (MTTF), год	Характер відмови
1	Підшипниковий вузол	42	18 000 – 25 000	Поступовий розвиток
2	Ізоляція обмотки статора	30	20 000 – 30 000	Поступовий / раптовий

3	Обмотка ротора (стержні)	9	25 000 – 40 000	Поступовий розвиток
4	Вал та муфти з'єднання	7	15 000 – 20 000	Раптовий
5	Система охолодження	6	10 000 – 15 000	Поступовий розвиток
6	Інші елементи конструкції	6	12 000 – 18 000	Різний

Технічне обслуговування асинхронних електродвигунів змінного струму потужністю до 15 кВт в умовах промислового підприємства являє собою комплекс заходів, що охоплює планові огляди, інструментальні вимірювання та відновлювальні операції. Ефективність системи технічного обслуговування визначається не лише правильністю виконання окремих операцій, але й раціональною організацією всього процесу в цілому — від ведення технічних паспортів до планування ресурсів ремонтного персоналу.

Ключовим елементом системи обслуговування є інструментальна діагностика при виконанні ТО-2 (1 раз на 6 місяців). Програма вимірювань при ТО-2 включає: вимірювання опору ізоляції та розрахунок коефіцієнта абсорбції, вібраційні вимірювання на підшипникових щитах у трьох взаємно перпендикулярних напрямках (горизонтальному, вертикальному та осьовому), тепловізійне знімання двигуна в режимі навантаження, вимірювання споживаного струму по фазах та розрахунок несиметрії. Розрахунок несиметрії струмів:

$$I_{unb} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{avg}}, \quad (4.1)$$

де: I_{max} та I_{min} — максимальний та мінімальний фазні струми (А);

I_{avg} — середнє значення трьох фазних струмів (А).

Допустиме значення несиметрії струмів для асинхронних двигунів — не більше 10 %. При перевищенні цього значення необхідно перевірити симетрію напруг живлення та стан обмоток.

Технічне обслуговування підшипникових вузлів є найбільш відповідальним заходом при обслуговуванні двигунів середньої потужності. Підшипники кочення, що застосовуються у двигунах серії АИР та аналогах

до 15 кВт, як правило, відносяться до типів 6-го та 7-го серій за ДСТУ. Мінімальне мастило підшипника при роботі на підшипникові кочення є критичним параметром — при недостатньому мащенні коефіцієнт тертя різко зростає.

Суттєво, що при переході від змащеного до сухого підшипника тепловиділення зростає у 30–100 разів, що пояснює катастрофічно швидке руйнування підшипника при відсутності мастила.

Важливою складовою діагностики при ТО-2 є перевірка центрування двигуна відносно приводного механізму. Розцентрування є частою причиною підвищеної вібрації та передчасного виходу підшипників з ладу. Паралельне та кутове розцентрування вимірюються за допомогою індикаторних головок або лазерних систем центрування. Допустиме паралельне розцентрування для двигунів до 15 кВт при швидкості обертання 1500 об/хв не повинно перевищувати 0,05 мм, кутове — 0,05 мм/100 мм (0,05 %). Лазерні системи центрування (наприклад OPTALIGN SMART) дозволяють досягати точності центрування 0,01 мм у паралельній та 0,01 мм/100 мм в кутовій площині, що є достатнім для будь-яких двигунів середньої потужності.

4.3 Обладнання для перевірки та діагностики обмоток і статорів електричних машин

Перевірка та діагностика обмоток і статорів електричних машин є ключовою операцією як при прийманні двигунів після ремонту, так і при плановому технічному обслуговуванні. Стан обмотки статора визначає надійність та термін служби електродвигуна, оскільки пошкодження обмотки зазвичай призводить до повної відмови машини і вимагає дорогого капітального ремонту з перемотуванням. Тому раннє виявлення дефектів ізоляції є пріоритетним завданням системи технічного обслуговування.

Стенд ПУНС-5 є провідним вітчизняним засобом для комплексної перевірки обмоток електричних машин і широко застосовується на ремонтних станціях підприємств. Стенд реалізує метод імпульсного (surge) тестування — одну з найбільш чутливих методик виявлення міжвиткових замикань в обмотках. Принцип методу полягає у подачі в обмотку короткочасного імпульсу напруги (тривалістю 1–5 мкс) з амплітудою, що в 1,5–3 рази перевищує номінальну напругу. Під дією імпульсу в обмотці збуджуються загасаючі коливання, форма яких реєструється осцилографом. При справній ізоляції осцилограми всіх 3 фаз ідентичні. При наявності міжвиткового замикання у будь-якій фазі її осцилограма відрізняється від двох інших, що є однозначною ознакою дефекту.



Рис 4.1. – Прилад ПУНС-5 для виявлення міжвиткових замикань та перевірки обмоток якорів і статорів електродвигунів.

Математична умова виявлення дефекту при surge-тестуванні базується на порівнянні площ осцилограм двох фаз:

$$\Delta A = \frac{|A_1 - A_2|}{A_{avg}}, \quad (4.2)$$

де: A_1 та A_2 — площі осцилограм двох фаз (Вмкс);

A_{avg} — середня площа осцилограм (Вмкс).

При $\Delta A < 3 \%$ обмотка вважається справною, при $\Delta A = 3-5 \%$ — підозра на дефект (потрібне повторне вимірювання), при $\Delta A > 5 \%$ — наявність дефекту підтверджена. Чутливість методу дозволяє виявляти замикання 1–2 витків зі 100, тобто чутливість складає 1–2 %.

Крім surge-тестування, стенд ПУНС-5 реалізує комплекс інших випробувань обмоток. Вимірювання опору обмоток постійному струму виконується для всіх 3 фаз з точністю не гірше 0,1 % за допомогою вбудованого моста постійного струму. Допустиме відхилення опорів різних фаз між собою:

$$\Delta R = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{avg}} \cdot 100\%, \quad (4.3)$$

де: R_{max} та R_{min} — максимальний та мінімальний опори фаз (Ом);

R_{avg} — середнє значення (Ом).

При $\Delta R \leq 2 \%$ обмотка вважається симетричною. При $\Delta R > 2 \%$ необхідна додаткова перевірка на наявність обривів або замикань між витками. Також стенд ПУНС-5 дозволяє виявляти замикання обмотки на корпус шляхом вимірювання опору між обмоткою та корпусом стенда при напрузі 500 В. Граничне значення опору на корпус для нової обмотки: $R_{avg} \geq 100$ МОм; для обмотки після тривалої експлуатації: $R_{avg} \geq 1$ МОм.

Для більш глибокої діагностики стану ізоляції обмоток використовуються методи часткових розрядів (PD) та діелектричної спектроскопії. Метод діелектричної спектроскопії полягає у вимірюванні $\text{tg}(\delta)$ — тангенса кута діелектричних втрат у широкому діапазоні частот (0,01 Гц – 1000 Гц). Зміна $\text{tg}(\delta)$ з частотою є характеристикою молекулярної структури ізоляційного матеріалу та дозволяє виявляти її деградацію на ранній стадії. Для якісної ізоляції $\text{tg}(\delta) < 0,01$ при частоті 50 Гц. Зростання $\text{tg}(\delta)$ понад 0,05 свідчить про суттєве старіння або зволоження ізоляції.

4.4 Автоматизована система моніторингу та діагностики парку електродвигунів промислового підприємства

Автоматизована система моніторингу та діагностики (АСМД) парку електродвигунів являє собою інтегровану технічну систему, що забезпечує безперервний збір, передачу, зберігання та аналіз діагностичних даних від усіх електродвигунів підприємства в режимі реального часу. Перехід від традиційного ручного, переносного інструментального контролю до автоматизованого безперервного моніторингу є якісним стрибком, що суттєво підвищує ефективність управління технічним станом обладнання.

Архітектура АСМД будується за ієрархічним принципом і включає 3 рівні.

Перший (польовий) рівень — датчики, встановлені безпосередньо на двигунах: датчики вібрації (п'єзоелектричні акселерометри), датчики температури підшипників (термоопори PT100), датчики температури обмоток (термістори NTC або PT100), трансформатори струму для вимірювання фазних струмів.

Другий (контролерний) рівень — промислові контролери збору даних або спеціалізовані модулі віддаленого вводу/виводу, що здійснюють первинну обробку сигналів, аналого-цифрове перетворення та передачу даних на верхній рівень.

Третій (серверний) рівень — сервер обробки та зберігання даних з програмним забезпеченням для аналізу, візуалізації та генерування діагностичних звітів.

Мінімальна частота дискретизації для збору вібраційних даних визначається теоремою Найквіста:

$$f_s \geq 2 \cdot f_{max}, \quad (4.4)$$

де f_{max} — максимальна частота, що підлягає аналізу (Гц). Для виявлення дефектів підшипників двигунів з $n = 1500$ об/хв максимальна

характеристична частота дефекту може сягати $f_{max} = 1000$ Гц (з урахуванням гармонік).

Тому

$$f_s \geq 2 \cdot 1000 = 2000 \text{ Гц}$$

На практиці застосовується $f_s = 5000\text{--}20\,000$ Гц з урахуванням запасу та антиаліасингового фільтра. При $f_s = 10\,000$ Гц та 24-бітному АЦП обсяг вібраційних даних від 1 датчика за добу:

$$V_{data} = f_s \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 3 \text{ байти} = 2592 \text{ Мб/добу}$$

Для 50 двигунів це становить $50 \cdot 2592 = 129\,600$ МБ/добу ≈ 126 ГБ/добу, що вимагає стиснення даних або вибіркового запису повних вібраційних записів (лише при перевищенні порогів).

Алгоритм автоматичної діагностики в АСМД базується на порівнянні поточних значень діагностичних параметрів з адаптивними порогоми. Для кожного двигуна у базі даних зберігаються базові (еталонні) значення параметрів, виміряні у задовільному стані.

Прогнозування залишкового ресурсу в АСМД реалізується на основі моделі лінійної або поліноміальної деградації параметра стану.

Ця інформація дозволяє заздалегідь запланувати заміну підшипника, не допускаючи аварійної відмови.

Таблиця 4.3.

Склад автоматизованої системи моніторингу та діагностики парку електродвигунів

№	Компонент системи	Рівень АСМД	Функція	Кількість (на 1 двигун)
1	П'єзоелектричний акселерометр	Польовий	Вібраційний моніторинг підшипників	2 шт (DE та NDE)
2	Термопір РТ100	Польовий	Вимірювання температури підшипників	2 шт
3	Термістор NTC	Польовий	Вимірювання температури обмотки	1 шт
4	Трансформатор струму	Польовий	Вимірювання фазних струмів (MCSA)	3 шт
5	Модуль збору даних	Контролерний	АЦП, первинна обробка,	1 шт на 4–8

			передача	двигунів
6	Промислова мережа	Контролерний	Передача даних (Ethernet / Profibus)	—
7	Сервер АСМД	Серверний	Зберігання БД, аналіз, тренди, звіти	1 шт на підприємство
8	АРМ оператора	Серверний	Візуалізація, сигналізація, управління	1–2 шт

Впровадження АСМД на промисловому підприємстві дозволяє суттєво підвищити ефективність управління парком електродвигунів. За даними міжнародних досліджень (Niu, Dong, Chen, 2023), безперервний автоматизований моніторинг порівняно з ручним переносним контролем дозволяє скоротити кількість аварійних відмов на 55–65 %, зменшити витрати на ремонт на 25–40 % та підвищити коефіцієнт готовності обладнання з 0,92–0,95 до 0,97–0,99. Орієнтовний термін окупності системи при парку з 50 двигунів середньої потужності становить 8–14 місяців, що робить її економічно привабливим рішенням навіть для підприємств середнього масштабу.

РОЗДІЛ 5

ЗАХОДИ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Заходи для енергозбереження на підприємстві

Енергозбереження є одним із найважливіших напрямків підвищення ефективності роботи сучасних промислових підприємств. Раціональне використання електричної енергії дозволяє знизити виробничі витрати, підвищити надійність роботи обладнання та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище.

Одним із основних заходів енергозбереження є впровадження системи регулярного діагностування електродвигунів. Своєчасне виявлення несправностей дозволяє запобігти роботі обладнання в нештатних режимах,

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
Зміна	Лист	номер	Підпис			44

які супроводжуються підвищеним споживанням електроенергії та прискореним зношуванням вузлів двигуна. Контроль температури обмоток, рівня вібрації, струмів навантаження та стану підшипників забезпечує підтримання оптимальних режимів роботи електричних машин.

Важливим напрямком енергозбереження є використання сучасних електродвигунів з підвищеним коефіцієнтом корисної дії. Заміна застарілого обладнання на двигуни високого класу енергоефективності дозволяє суттєво скоротити втрати електричної енергії та знизити експлуатаційні витрати підприємства.

Ефективним заходом є застосування частотних перетворювачів для регулювання швидкості обертання електродвигунів. Частотне регулювання забезпечує роботу механізмів відповідно до фактичної потреби технологічного процесу, що дозволяє уникнути перевитрат електроенергії та зменшити механічні навантаження на обладнання.

Для зменшення втрат електроенергії доцільно здійснювати компенсацію реактивної потужності за допомогою конденсаторних установок. Це сприяє підвищенню коефіцієнта потужності електричної мережі, зниженню струмів у лініях електропередачі та зменшенню втрат у трансформаторах і кабельних мережах.

Додатковими заходами енергозбереження є використання енергоощадного освітлення, впровадження автоматизованих систем обліку електроенергії, проведення енергетичних аудитів та навчання персоналу принципам раціонального використання енергетичних ресурсів.

Таким чином, комплексне впровадження заходів з енергозбереження дозволяє підвищити ефективність роботи підприємства, знизити витрати на електроенергію та забезпечити надійну експлуатацію електротехнічного обладнання.

5.2. Комплекс організаційно-технічних заходів щодо усунення небезпечних та шкідливих виробничих факторів.

Виробниче середовище, в якому здійснюється діагностування та ремонт електродвигунів середньої потужності, характеризується наявністю цілого комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ). Відповідно до ДСТУ ГОСТ 12.0.003:2010 «Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація», усі НШВФ поділяються на чотири групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні. У приміщеннях для обслуговування та ремонту електродвигунів найбільш суттєвими є фізичні фактори: небезпека ураження електричним струмом, підвищений рівень шуму та вібрації, недостатня освітленість робочих зон, підвищена або знижена температура поверхонь обладнання, а також наявність частин механізмів, що обертаються.

Небезпека ураження електричним струмом є визначальним фактором ризику при роботі з електродвигунами. Відповідно до ПУЕ та НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів», усі роботи на електричних машинах поділяються на роботи зі зняттям напруги (без напруги) та роботи під напругою. Для діагностичних і ремонтних робіт на двигунах до 15 кВт усі операції виконуються виключно зі зняттям напруги з повним дотриманням організаційних і технічних заходів безпеки. Технічні заходи включають: відключення двигуна від усіх джерел живлення видимим розривом кола; вивішування плакатів «Не вмикати — працюють люди!»; перевірку відсутності напруги показчиком напруги на всіх фазах; накладання переносних заземлень і встановлення захисних огорож.

Гранично допустимий рівень напруги дотику для змінного струму частотою 50 Гц відповідно до ГОСТ 12.1.038-82 становить 2 В при тривалості дії понад 1 с та 36 В при тривалості до 0,01 с. Струм через тіло людини, що є небезпечним для життя, становить 50 мА при тривалості понад 1 с. Ці значення визначають необхідність застосування інструменту з

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
Зміна	Лист	номер	Підпис			46

ізолюваними рукоятками, гумових діелектричних рукавичок (клас 00 — до 500 В, клас 0 — до 1000 В) та килимів при будь-яких операціях в електроустановках.

Шум і вібрація є невід'ємними супутниками роботи електромеханічного обладнання. При роботі електродвигунів потужністю до 15 кВт рівень звукового тиску може сягати 70–85 дБА, що перевищує гранично допустимий рівень для робочих місць відповідно до ДСН 3.3.6.037-99, який становить 80 дБА для постійних робочих місць у виробничих приміщеннях. Заходи щодо зниження шуму поділяються на конструктивні (балансування роторів, застосування вібропоглинальних підкладок під двигуни), акустичні (звукоізоляційні кожухи, облицювання стін звукопоглинальними матеріалами) та організаційні (скорочення часу перебування персоналу в зоні підвищеного шуму, застосування засобів індивідуального захисту — навушників типу ЗМ Peltor з рівнем послаблення не менше 25 дБ).

Рівень локальної вібрації на робочому місці оператора діагностичного обладнання не повинен перевищувати значень, встановлених ДСН 3.3.6.039-99. Для вібрації, що передається через руки, гранично допустимий рівень віброприскорення в частотному діапазоні 8–16 Гц становить 2,0 м/с². Організаційними заходами захисту є регламентовані перерви тривалістю 10–15 хв. через кожні 45–60 хв. роботи з вібруючим інструментом.

Освітленість робочих зон є важливим гігієнічним фактором. Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення», для ремонтних ділянок з виконанням робіт IV розряду точності (розмір об'єкта розрізнення 0,5–1,0 мм, що відповідає роботі з підшипниками та обмотками) нормована освітленість становить 300 лк при загальному освітленні та 750 лк при комбінованому. Для дотримання цієї норми на ремонтній ділянці площею 60 м² необхідна кількість світильників із лампами LED потужністю 40 Вт (світловий потік 4000 лм) розраховується за методом коефіцієнта використання світлового потоку.

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
						47
Зміна	Лист	номер	Підпис			

Хімічний фактор ризику представлений парами мастил, розчинників (уайт-спірит, ацетон) та продуктами теплового розкладу ізоляційних матеріалів. Гранично допустима концентрація парів уайт-спіриту у повітрі робочої зони відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 становить 300 мг/м³. Для підтримання якості повітря в межах норми передбачається місцева витяжна вентиляція над місцями промивання деталей та загальнообмінна вентиляція з кратністю повітрообміну не менше 4 год⁻¹.

Психофізіологічні фактори включають статичне навантаження на м'язи спини та рук при монтажно-демонтажних операціях, а також нервово-емоційне навантаження при інтерпретації діагностичних даних. Для зменшення фізичного навантаження передбачається застосування підйомно-транспортних засобів (електричні тельфери вантажопідйомністю 0,5–1,0 т, пересувні візки) для переміщення двигунів масою понад 15 кг. Усі роботи на підприємстві виконуються відповідно до інструкцій з охорони праці, що розробляються на підставі типових галузевих інструкцій і затверджуються роботодавцем.

5.3. Розрахунок захисного заземлення у виробничому приміщенні

Захисне заземлення є основним засобом захисту персоналу від ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції електрообладнання та появи напруги на його корпусі. Відповідно до вимог ПУЕ (розділ 1.7) та ДСТУ ІЕС 60364-4-41:2011, для електроустановок напругою до 1 кВ із глухозаземленою нейтраллю (система TN) нормований опір захисного заземлювального пристрою не повинен перевищувати 4 Ом, а для установок потужністю до 100 кВА — 10 Ом.

Вихідні дані для розрахунку:

виробниче приміщення ремонтної дільниці електродвигунів; живлення від трансформатора потужністю 400 кВА із глухозаземленою нейтраллю;
напруга мережі 380/220 В; нормований опір заземлення $R_n = 4$ Ом;

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
						48
Зміна	Лист	номер	Підпис			

ґрунт — суглинок;

питомий опір ґрунту $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;

як вертикальні електроди застосовуються сталеві куточки $50\times 50\times 5 \text{ мм}$
завдовжки $L = 2,5 \text{ м}$;

горизонтальний з'єднувальний провідник — сталева смуга $40\times 4 \text{ мм}$;

глибина закладання верхнього кінця вертикального електрода від поверхні ґрунту $t_0 = 0,7 \text{ м}$.

Розрахункова глибина закладання середини вертикального електрода:

$$t = t_0 + \frac{L}{2} = 0,7 + \frac{2,5}{2} = 1,95 \text{ м}$$

Опір розтіканню одного вертикального електрода-куточка розраховується за формулою:

$$R_v = \frac{\rho_{\text{розр}}}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln \left(\frac{2L}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4t + L}{4t - L} \right) \right), \quad (5.1)$$

де $\rho_{\text{розр}}$ — розрахунковий питомий опір ґрунту з урахуванням кліматичного коефіцієнта сезонності, $\text{Ом}\cdot\text{м}$;

d — еквівалентний діаметр куточка, м.

Для куточка $50\times 50\times 5 \text{ мм}$ еквівалентний діаметр: $d = 0,95 \cdot b = 0,95 \cdot 0,05 = 0,0475 \text{ м}$.

Кліматичний коефіцієнт сезонності для вертикальних електродів у кліматичній зоні II (центральна Україна) $\psi_v = 1,5$:

$$\rho_{\text{розр}} = \rho \cdot \psi_v = 100 \cdot 1,5 = 150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Підставляємо у формулу:

$$R_v = \frac{150}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot 2,5}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 1,95 + 2,5}{4 \cdot 1,95 - 2,5} \right) \right)$$

$$R_v = 9,55 \cdot (4,657 + 0,5 \cdot 0,665)$$

$$R_v = 9,55 \cdot 4,990 = 47,65 \text{ Ом}$$

Попередня кількість вертикальних електродів без урахування їх взаємного екранування:

$$n = \frac{R_v}{R_n} = \frac{47,65}{4} \approx 12 \text{ шт.}$$

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
						49
Зміна	Лист	номер	Підпис			

Приймаємо попередньо $n = 12$ електродів, розміщених рівномірно по контуру прямокутника по периметру будівлі з кроком $a = 5$ м (співвідношення $a/L = 5/2,5 = 2,0$). Для $n = 12$ електродів при $a/L = 2,0$ коефіцієнт використання вертикальних електродів при контурному розміщенні $\eta_v = 0,62$ (за таблицями ПУЕ).

Уточнена кількість вертикальних електродів з урахуванням екранування:

$$n = \frac{R_v}{R_n \cdot \eta_v} = \frac{47,65}{4 \cdot 0,62} = 19,2 \approx 20 \text{ шт.}$$

Приймаємо $n = 20$ вертикальних електродів.

Опір розтіканню горизонтального з'єднувального провідника (смуга 40×4 мм, завдовжки $l_r =$ периметр контуру). При розміщенні 20 електродів із кроком 5 м периметр контуру: $l_r = 20 \cdot 5 = 100$ м.

Кліматичний коефіцієнт для горизонтальних електродів $\psi_T = 3,0$:

$$\rho_{\text{розр.г}} = 100 \cdot 3,0 = 300 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Ширина смуги $b = 0,04$ м, глибина закладання $t_r = 0,7$ м:

$$R_r = \left(\frac{\rho_{\text{розр.г}}}{\pi \cdot l_r} \right) \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot l_r^2}{b \cdot t_r} \right) \quad (5.2)$$

$$R_r = \left(\frac{300}{3,14 \cdot 100} \right) \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot 100^2}{0,04 \cdot 0,7} \right)$$

$$R_r = \frac{300}{314} \cdot \ln (713285714)$$

$$R_r = 19,47 \text{ Ом}$$

Коефіцієнт використання горизонтального електрода при $n = 20$ і $a/L = 2,0$: $\eta_r = 0,31$.

Результуючий опір заземлювального пристрою:

$$R_z = \frac{R_v \cdot R_r}{\frac{R_v}{\eta_v} \cdot n^{-1} \cdot n + \frac{R_r}{\eta_r}} \quad (5.3)$$

$$R_z = \frac{R_v \cdot R_r}{\frac{R_v}{\eta_v} \cdot n^{-1} \cdot n + \frac{R_r}{\eta_r}}$$

Спрощена формула результуючого опору:

$$R_z = \frac{R_v \cdot R_r}{n \cdot \eta_v \cdot R_r + \eta_r \cdot R_v}$$

$$R_z = \frac{47,65 \cdot 19,47}{20 \cdot 0,62 \cdot 19,47 + 0,31 \cdot 47,65}$$

$$R_z = \frac{927,6}{256,2} = 3,62 \text{ Ом}$$

Отриманий розрахунковий опір $R_z = 3,62 \text{ Ом} < R_n = 4,0 \text{ Ом}$, що відповідає вимогам ПУЕ. Таким чином, проєктований заземлювальний пристрій складається з 20 вертикальних електродів-куточків $50 \times 50 \times 5 \text{ мм}$ завдовжки 2,5 м та горизонтального з'єднувального провідника зі сталевієї смуги $40 \times 4 \text{ мм}$ завдовжки 100 м, закладених на глибині 0,7 м.

5.4 Комплекс заходів щодо захисту від блискавки

Захист виробничих будівель і споруд від прямих ударів блискавки та її вторинних проявів є обов'язковою вимогою нормативно-технічної документації. В Україні блискавкозахист промислових об'єктів регламентується ДСТУ EN 62305-1:2012 «Захист від блискавки. Загальні принципи» та ДСТУ EN 62305-3:2012 «Захист від блискавки. Фізичні ушкодження споруд і небезпека для людини», а також РД 34.21.122-87 «Інструкція з влаштування блискавкозахисту будівель і споруд».

Визначення необхідності блискавкозахисту та його категорії здійснюється на підставі оцінки ризику відповідно до ДСТУ EN 62305-2. Ремонтна дільниця електродвигунів є виробничим приміщенням з нормальним середовищем (несхильним до вибухів), тому відноситься до III категорії блискавкозахисту. Розрахункова очікувана кількість уражень блискавкою будівлі за рік:

$$N = (S + 6H) \cdot (L + 6H) \cdot n \cdot 10^{-6} \quad (5.4)$$

де : S — довжина будівлі, м;

L — ширина будівлі, м;

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
Зміна	Лист	номер	Підпис			51

H — висота будівлі, м;

n — питома щільність ударів блискавки в землю, уд./($\text{км}^2 \cdot \text{рік}$).

Для центральної України питома щільність ударів блискавки $n = 4$ уд./($\text{км}^2 \cdot \text{рік}$). Для будівлі розмірами $S = 24$ м, $L = 12$ м, $H = 6$ м:

$$N = (24 + 6 \cdot 6) \cdot (12 + 6 \cdot 6) \cdot 4 \cdot 10^{-6}$$

$$N = (24 + 36) \cdot (12 + 36) \cdot 4 \cdot 10^{-6}$$

$$N = 60 \cdot 48 \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 11520 \cdot 10^{-6} = 0,01152 \text{ уд./рік}$$

Оскільки $N = 0,01152 > 0,006$ уд./рік (нормативний поріг для III категорії при нормальному середовищі), влаштування блискавкозахисту є обов'язковим.

Для об'єктів III категорії блискавкозахисту застосовується система зовнішнього блискавкозахисту, що складається з трьох основних елементів: блискавкоприймача, струмовідводів та заземлювача. Як блискавкоприймач для будівлі з плоским дахом або похилим дахом із кутом нахилу до 30° відповідно до ДСТУ EN 62305-3 застосовується сітчастий блискавкоприймач (сітка) із дроту діаметром не менше 8 мм (для сталі з оцинкуванням) з розміром вічок сітки не більше 15×15 м для III категорії блискавкозахисту. Для розглянутої будівлі площею $24 \times 12 = 288 \text{ м}^2$ сітка укладається по всій поверхні даху.

Струмовідводи виконуються із сталевого круглого дроту діаметром не менше 8 мм або смуги 25×3 мм, прокладаються по зовнішніх стінах будівлі вертикально від блискавкоприймача до заземлювача. Кількість струмовідводів для III категорії: не менше 2, розміщуються рівномірно по периметру будівлі з відстанню між ними не більше 25 м. Для периметру будівлі $(24 + 12) \cdot 2 = 72$ м достатньо 3 струмовідводи.

Заземлювач блискавкозахисту для III категорії може бути суміщений із захисним заземленням електроустановок (система TN), що є раціональним технічним рішенням і відповідає вимогам п. 1.7.55 ПУЕ. Опір заземлювача блискавкозахисту для III категорії не нормується, проте при суміщенні із захисним заземленням його опір повинен задовольняти вимогам ПУЕ ($R_z \leq 4$

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
						52
Зміна	Лист	номер	Підпис			

Ом), що вже забезпечено розрахованим у підрозділі 6.2 заземлюючим пристроєм із $R_z = 3,62$ Ом.

Внутрішній блискавкозахист (захист від вторинних проявів блискавки) передбачає встановлення пристроїв захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП, або SPD — Surge Protective Device) на вводах живлення електрообладнання. Відповідно до ДСТУ EN 62305-4, для III рівня блискавкозахисту на головному розподільному щиті встановлюються ПЗІП класу I+II (тип 1+2) із номінальним імпульсним струмом $I_{imp} \geq 12,5$ кА (форма 10/350 мкс) та рівнем захисту $U_p \leq 2,5$ кВ; на розподільних щитах другого рівня — ПЗІП класу II (тип 2) із максимальним розрядним струмом $I_n \geq 5$ кА (форма 8/20 мкс) та $U_p \leq 1,5$ кВ. Монтаж ПЗІП здійснюється в безпосередній близькості від захищуваного обладнання з мінімально можливою довжиною з'єднувальних провідників (не більше 0,5 м на сторону).

Зони захисту блискавковідводів визначаються методом «захисного кута» або «котячої кулі» відповідно до ДСТУ EN 62305-3. Для III рівня блискавкозахисту радіус «катючої кулі» $R = 45$ м, захисний кут для стержневого блискавковідводу висотою $h = 10$ м становить $\alpha = 55^\circ$. Зона захисту на рівні землі для одиночного стержневого блискавковідводу:

$$r_x = (h - h_x) \cdot \operatorname{tg}(\alpha) = (10 - 0) \cdot \operatorname{tg}(55^\circ) = 10 \cdot 1,428 = 14,28 \text{ м}$$

де $h_x = 0$ — висота захищуваного об'єкта на рівні землі. Для захисту всієї будівлі використовується сітчаста система блискавкоприймачів як технічно доцільніше рішення для будівель із великою площею покрівлі.

5.5 Комплекс заходів щодо запобігання виникненню пожежі на виробництві

Пожежна безпека ремонтної ділянки електродвигунів забезпечується комплексом організаційних, технічних та режимних заходів, що розробляються і впроваджуються відповідно до вимог Закону України «Про пожежну безпеку», НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
						53
Зміна	Лист	номер	Підпис			

Україні», ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва», а також галузевих нормативних документів.

Визначення категорії приміщення за вибухопожежною і пожежною небезпекою є першим кроком у системі пожежної безпеки. Відповідно до НАПБ Б.03.002-2007, ремонтна дільниця електродвигунів, де зберігаються та використовуються мастила, розчинники та ізоляційні матеріали, відноситься до категорії В (пожежонебезпечна) — горючі та важкогорючі тверді речовини і матеріали. Ступінь вогнестійкості будівлі — II, що вимагає застосування конструктивних елементів із межею вогнестійкості несучих стін не менше REI 90 (90 хв.), перекриттів — REI 45.

Основними джерелами займання в приміщенні діагностики та ремонту електродвигунів є: несправності в електропроводці та електрообладнанні (коротке замикання, перевантаження), іскри при роботі зварювального обладнання, відкритий вогонь при паянні та розігріві деталей, самозаймання просочених мастилом обтиральних матеріалів.

Технічні протипожежні заходи включають кілька ключових напрямів. Захист від займань електричного походження забезпечується правильним вибором перерізів кабелів і проводів за допустимим тривалим струмом, встановленням автоматичних вимикачів із відповідними уставками захисту, застосуванням кабелів із пониженим димоутворенням та вогнестійких (типу ВОГНЕСТІЙКИЙ ВВГнг або NYM-J) для стаціонарних проводок. Для зменшення пожежного ризику від дугових замикань рекомендується встановлення автоматичних вимикачів із захистом від дугового пробою (AFDD — Arc Fault Detection Device) відповідно до вимог ДСТУ ІЕС 62606:2017.

Розрахунок потрібної кількості первинних засобів пожежогасіння виконується відповідно до додатку 1 НАПБ А.01.001-2014. Для приміщення категорії В площею 288 м² норма оснащення становить: 1 вогнегасник порошковий ВП-6 (або вуглекислотний ВВК-5) на кожні 200 м² площі. Необхідна кількість вогнегасників:

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
Зміна	Лист	номер	Підпис			54

$$n_{\text{вг}} = \frac{S}{S_{\text{н}}} = \frac{288}{200} = 1,44 \approx 2 \text{ шт.}$$

Приймається 2 пересувні або ручні вогнегасники. Враховуючи наявність електрообладнання під напругою, перевагу слід надати вуглекислотним вогнегасникам ВВК-5 (не пошкоджують обладнання, електрично нейтральні) або порошковим ВП-6 із зазначенням класів пожеж А, В, С, Е на маркуванні. Вогнегасники розміщуються на висоті не більше 1,5 м від рівня підлоги до верху корпусу вогнегасника, у доступних, добре помітних місцях.

Система автоматичної пожежної сигналізації (АПС) для приміщення категорії В площею 288 м² проектується відповідно до ДБН В.2.5-56:2014. Для виявлення початкової стадії пожежі в приміщенні ремонтної дільниці застосовуються димові оптичні пожежні сповіщувачі типу ІП 212 (точкові). Кількість сповіщувачів визначається виходячи з площі контролю одним сповіщувачем: при висоті стелі до 3,5 м площа захисту одного сповіщувача становить 85 м², відстань між сповіщувачами не більше 9,0 м, відстань від сповіщувача до стіни не більше 4,5 м.

$$n_{\text{сп}} = \frac{S}{S_{\text{сп}}} = \frac{288}{85} = 3,39 \approx 4 \text{ сповіщувачі}$$

Приймається 4 димових сповіщувачі, розміщених рівномірно по стелі з кроком не більше 9 м. Сповіщувачі підключаються до приймально-контрольного приладу (ПКП) з виводом сигналу тривоги на центральний пульта охорони та автоматичним увімкненням системи оповіщення.

Організаційні протипожежні заходи передбачають: призначення відповідального за пожежну безпеку дільниці з числа інженерно-технічних працівників; проведення протипожежного інструктажу з усіма працівниками при прийомі на роботу (вступний інструктаж) та не рідше 1 разу на рік (повторний); розроблення та затвердження плану евакуації людей і майна на випадок пожежі; встановлення чітких правил щодо заборони куріння поза спеціально відведеними місцями, збереження промаслених обтиральних

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
						55
Зміна	Лист	номер	Підпис			

матеріалів у металевих ящиках із щільними кришками та щоденного їх прибирання. Евакуаційні виходи позначаються фотолюмінесцентними знаками відповідно до ДСТУ ISO 16069:2017, ширина евакуаційного виходу повинна бути не менше 0,9 м, висота дверного прорізу — не менше 2,0 м. Для приміщення площею 288 м² з кількістю працюючих до 15 осіб достатньо 2 евакуаційних виходи, розташованих у протилежних кінцях будівлі.

РОЗДІЛ 6

ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРИЙНЯТИХ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ ТА ЗАХОДИ ЩОДО РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
						56
Зміна	Лист	номер	Підпис			

Раціональне використання електричної енергії в системах електроприводу підприємства є одним із найбільш вагомих напрямів зниження виробничих витрат. Оскільки електродвигуни споживають від 60 % до 70 % усієї електроенергії промислового підприємства, навіть незначне підвищення ефективності їх роботи дає суттєвий економічний та екологічний ефект. Для електродвигунів середньої потужності (до 15 кВт), які є найбільш масовою категорією в промисловому парку, заходи з енергозбереження набувають особливої актуальності.

Першою і найбільш поширеною причиною надмірного споживання електроенергії є режим роботи двигуна з неповним навантаженням. Асинхронний двигун проектується для роботи в діапазоні навантажень 75–100 % від номінального; у цьому діапазоні його ККД і коефіцієнт потужності є найвищими. При зниженні навантаження до 50 % і нижче ці показники стрімко погіршуються. Коефіцієнт потужності при холостому ході для двигунів до 15 кВт становить лише 0,2–0,3, тоді як при номінальному навантаженні він досягає 0,85–0,92. Питомі втрати електроенергії в двигуні визначаються через коефіцієнт завантаження:

$$K_z = \frac{R_f}{R_n} \quad (6.1)$$

де : K_z — коефіцієнт завантаження;

R_f — фактична потужність на валу, кВт;

R_n — номінальна потужність двигуна, кВт.

Для прикладу, якщо двигун номінальною потужністю 11 кВт фактично навантажений на 5,5 кВт:

$$K_z = \frac{5,5}{11} = 0,50$$

Такий режим роботи є неефективним, і в цьому випадку доцільно або замінити двигун на менш потужний (7,5 кВт), або застосувати регулювання частоти обертання за допомогою перетворювача частоти.

Другим за значущістю заходом є впровадження частотно-регульованого електропривода (ЧРЕП) для двигунів, що приводять у рух насоси, вентилятори та компресори. Для цих механізмів споживана потужність пов'язана з частотою обертання законом подібності:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (6.2)$$

де P_1, P_2 — споживана потужність при частотах обертання n_1 та n_2 відповідно.

Якщо знизити частоту обертання вентилятора з 1500 до 1200 об/хв (тобто до 80 % від номінальної), відносна споживана потужність становитиме:

$$\frac{P_2}{P_1} = (1200 / 1500)^3 = (0,80)^3 = 0,512$$

Тобто при зниженні частоти обертання на 20 % споживана потужність зменшується майже вдвічі — до 51,2 % від початкової. Для вентиляторного двигуна потужністю 11 кВт економія потужності складе: $11 \cdot (1 - 0,512) = 11 \cdot 0,488 = 5,37$ кВт. За умови роботи 4000 год./рік економія електроенергії становитиме: $5,37 \cdot 4000 = 21\,480$ кВт·год./рік. При тарифі на електроенергію 4,32 грн/кВт·год. (середній тариф для промислових споживачів) річний економічний ефект складе: $21\,480 \cdot 4,32 = 92\,793,6$ грн/рік $\approx 92\,800$ грн/рік.

Третім напрямом є компенсація реактивної потужності. Значна реактивна складова споживаного струму призводить до збільшення навантаження на живильні кабелі та трансформатори, зростання втрат у мережі та нарахування штрафних платежів за низький $\cos \varphi$. Необхідна потужність конденсаторної батареї для компенсації розраховується за формулою:

$$Q_k = R_f \cdot (tg(\varphi)_1 - tg(\varphi)_2), \quad (6.3)$$

де : Q_k — необхідна реактивна потужність конденсаторної батареї, квар;
 R_f — активна споживана потужність, кВт;

$tg(\varphi)_1$ — відповідає початковому $\cos \varphi_1$ (до компенсації); $tg(\varphi)_2$ — відповідає цільовому $\cos(\varphi)_2$ (після компенсації).

Нехай група двигунів споживає активну потужність $P_{\phi} = 80$ кВт при $\cos \varphi_1 = 0,72$ ($tg(\varphi)_1 = 0,964$), і потрібно підвищити до $\cos(\varphi)$ 0,92 ($tg(\varphi)_2 = 0,426$):

$$Q_k = 80 \cdot (0,964 - 0,426) = 80 \cdot 0,538 = 43,0 \text{ квар}$$

Для компенсації обирається стандартна конденсаторна батарея потужністю 45 квар. Зниження реактивної складової струму зменшить втрати потужності в підвідному кабелі, а також усуне можливі штрафні надбавки до тарифу.

Четвертим важливим заходом є систематичний контроль якості напруги живлення. Відхилення напруги від номінального значення безпосередньо впливає на ефективність і ресурс електродвигунів. При підвищенні напруги на 10 % зростають втрати в сталі статора та загальне споживання реактивної потужності; при зниженні напруги на 10 % — зменшується максимальний момент двигуна приблизно на 19 %, зростає струм статора і, відповідно, нагрівання обмоток. Допустимі відхилення напруги в точці підключення двигуна відповідно до ДСТУ EN 50160 становлять ± 10 % від номінального значення 380 В, тобто діапазон 342–418 В.

Таблиця 6.1

Заходи з раціонального використання електроенергії в системах електроприводу та їх очікуваний ефект

№	Захід	Область застосування	Очікувана економія, %	Термін окупності, роки
1	Заміна недовантажених двигунів	Двигуни з $K_z < 0,5$	5–10	0,5–1,0
2	Впровадження ЧРЕП для насосів і вентиляторів	Насосні та вентиляційні установки	20–50	1,5–3,0
3	Компенсація реактивної потужності	Групи двигунів з $\cos \varphi < 0,80$	3–7	1,0–2,0
4	Контроль якості напруги	Вся система електропостачання	2–5	0,5–1,5
5	Заміна двигунів на клас IE3/IE4	Двигуни з напрацюванням > 15 років	3–8	3,0–5,0
6	Регламентне технічне обслуговування	Весь парк двигунів	1–3	0,3–0,5

П'ятим напрямом є поступова заміна морально та фізично застарілих двигунів класу ефективності IE1 на сучасні двигуни класу IE3 або IE4 відповідно до стандарту ІЕС 60034-30-1. Різниця в ефективності між класами суттєва: для двигуна потужністю 11 кВт ККД двигуна класу IE1 становить близько 88,8 %, тоді як для класу IE3 — 91,4 %, а для IE4 — 92,6 %. Зростання ККД на 2,6 % (від IE1 до IE3) для одного двигуна, що працює 4000 год./рік при навантаженні 11 кВт, дає річну економію:

$$\Delta W = R_n \cdot \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right) \cdot T \cdot K_z \quad (6.4)$$

$$\Delta W = 11 \cdot \left(\frac{1}{0,888} - \frac{1}{0,914} \right) \cdot 4000 \cdot 0,80 = 11 \cdot (1,126 - 1,094) \cdot 3200 = 11 \cdot 0,032 \cdot 3200 = 1126 \text{ кВт} \cdot \text{год./рік}$$

При тарифі 4,32 грн/кВт·год. річна економія від заміни одного двигуна складе: $1126 \cdot 4,32 = 4864$ грн/рік. Враховуючи, що різниця в ціні між двигунами IE1 та IE3 потужністю 11 кВт становить приблизно 3500–5000 грн, термін окупності заміни складає близько 1–1,5 року, що є економічно привабливим показником.

Загалом комплексне впровадження усіх перелічених заходів дозволяє знизити споживання електроенергії на потреби електропривода підприємства на 15–25 % порівняно з базовим рівнем. З урахуванням того, що електроенергія становить значну частку операційних витрат промислового підприємства, такий ефект дає реальне підвищення конкурентоспроможності виробництва та скорочення вуглецевого сліду, що відповідає сучасним вимогам стандартів енергетичного менеджменту ISO 50001.

ВИСНОВКИ

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
Зміна	Лист	номер	Підпис			60

У дипломній роботі вирішено актуальну задачу підвищення ефективності діагностування електродвигунів середньої потужності (до 15 кВт) в умовах промислового виробництва. Проведений аналіз показав, що традиційна планово-попереджувальна система ремонту не забезпечує своєчасного виявлення дефектів та не враховує фактичний технічний стан обладнання. У зв'язку з цим обґрунтовано доцільність переходу до обслуговування електродвигунів за технічним станом.

Встановлено, що основними причинами відмов електродвигунів є пошкодження ізоляції обмоток, зношення підшипникових вузлів та порушення теплового режиму роботи. Ці несправності можуть бути виявлені на ранніх стадіях розвитку за допомогою сучасних методів неруйнівної діагностики.

У роботі обґрунтовано застосування комплексного підходу до діагностики, який поєднує вібраційний аналіз, тепловізійний контроль, аналіз електричних параметрів та випробування ізоляції. Поєднання зазначених методів забезпечує більш повну та достовірну оцінку технічного стану електродвигунів порівняно з використанням окремих методів контролю.

Технологічна частина роботи підтвердила ефективність використання спеціалізованого обладнання для діагностики електричних машин, зокрема приладу ПУНС-5, що дозволяє виконувати комплексну перевірку обмоток і контролювати стан ізоляції в умовах ремонтної дільниці.

Розроблено концепцію автоматизованої системи моніторингу та діагностики парку електродвигунів, яка забезпечує безперервний контроль температури, вібрації, струму та інших параметрів у режимі реального часу. Запропонована система дозволяє своєчасно виявляти несправності, прогнозувати розвиток дефектів та зменшувати кількість аварійних відмов обладнання.

Виконані електротехнічні розрахунки підтвердили правильність вибору обладнання, електропроводки, освітлення, вентиляції та засобів захисту. Усі

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
Зміна	Лист	номер	Підпис			61

прийняті технічні рішення відповідають вимогам чинних нормативних документів та забезпечують безпечні умови експлуатації.

Таким чином, поставлена мета дипломної роботи досягнута. Запропоновані технічні рішення та організаційні заходи дозволяють підвищити ефективність діагностування електродвигунів, знизити витрати на аварійні ремонти, скоротити простої обладнання та підвищити надійність роботи електромеханічного комплексу підприємства.

					02.02 -КР.2607«С».2025.10.30.001.ПЗ	Лист
Зміна	Лист	номер	Підпис			62

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bahgat B. H., Elhay E. A., Elkholy M. M. Advanced Fault Detection Technique of Three Phase Induction Motor: Comprehensive Review. *Journal of Electrical Engineering & Electronic Technology*. 2025. Vol. 14, No. 1. DOI: 10.4172/2325-9833.1000987. URL: https://www.scitechnol.com/peer-review/advanced-fault-detection-technique-of-three-phase-induction-motor-comprehensive-review-8b9F.php?article_id=27506
2. Bogusz W., Janczak J., Smalcerz A. Induction Motor Fault Detection Based on Motor Current Signature Analysis. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 21. DOI: 10.3390/s22218210. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/21/8210>
3. Haouari F., Messekher S., Bali N. et al. Fault Diagnosis of Induction Motor via Combined Sliding Mode and Disturbance Observers. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*. 2023. Vol. 47. P. 503–511. DOI: 10.1007/s40998-022-00583-5. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40998-022-00583-5>
4. Hamani K., Kubatko M., Kirschner S. Advancements in Induction Motor Fault Diagnosis and Condition Monitoring: A Comprehensive Review. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 19. DOI: 10.3390/s25195942. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12526899/>
5. Mian T., Choudhary A., Fatima S. Vibration and Infrared Thermography Based Multiple Fault Diagnosis of Bearing Using Deep Learning. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2022. Vol. 38, No. 2. P. 275–296. DOI: 10.1080/10589759.2022.2118747. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589759.2022.2118747>
6. Muniraj C., Gunapriya D., Kannan V. K. Intelligent Fault Diagnosis of Ball Bearing Induction Motors for Predictive Maintenance Industrial Applications. *Machines*. 2025. Vol. 13, No. 10. DOI:

10.3390/machines13100902. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/13/10/902>

7. Niu G., Dong X., Chen Y. Motor Fault Diagnostics Based on Current Signatures: A Review. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. Vol. 72. P. 1–19. DOI: 10.1109/TIM.2023.3240047. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10025485>

8. Thermographic Image-Based Diagnosis of Failures in Electrical Motors Using Deep Transfer Learning / J. P. Santos et al. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106844. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197623012903>

9. Закладний О. О. Визначення аварійних режимів електродвигунів засобами сучасних систем діагностування їх стану. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 4. URL: <http://energy.kpi.ua/article/view/259240>

10. Матусевич О. О. Формування сучасних підходів з удосконалення системи технічного обслуговування електрообладнання : дис. ... д-ра техн. наук. Харків, 2021. 185 с. URL: https://radalight.kname.edu.ua/images/Files/Matysevich/MATUSEVICH_DISSER_FINAL-120-162.pdf

11. Моніторинг і діагностика електромеханічних систем : навч. посіб. / авт. кол. Кременчук : КрНУ ім. М. Остроградського, 2021. 198 с. URL: https://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/posibnuk_Monitorung.pdf

12. Діагностика технічного стану електромеханічних систем / Національний гірничий університет. Дніпро : НГУ, 2022. URL: https://elprivod.nmu.org.ua/ua/science/condition_diagnostics.php

13. Діагностика технічного стану двигунів з використанням цифрових двійників : дис. ... д-ра техн. наук / Одес. нац. мор. ун-т. Одеса, 2023. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/5aa34bae-0971-48d6-9f0f-b6db1f00d5cc>

14. Технічна діагностика та неруйнівний контроль. 2021. № 2. Характеристики методів і засобів вібродіагностики / Р. Юзефович та ін. Львів : ФМІ НАН України, 2021. URL: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/2021/02/04>
15. Вібраційна діагностика електроприводів в умовах промислової експлуатації. Київ : УГЕ, 2021. URL: <https://uhe.gov.ua/sites/default/files/2021-12/15.pdf>
16. Богуш І. Л. Організація технічного обслуговування та ремонту електрообладнання : навч. матеріал. Вінниця : ВПУ № 7, 2022. URL: <https://vpu7.com.ua/documents/e-library/spec-tech-eroe/14.pdf>
17. Діагностування технічного стану двигунів. Вінниця : ВНАУ, 2021. URL: <http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/10205.pdf>
18. Ремонтні роботи в електроустановках. Частина 2. *Журнал головного енергетика*. 2022. № 6. URL: <https://jge.techmedia.com.ua/zhurnal-holovnoho-enerhetyka-2022-6/remontni-roboty-v-elektroustanovkakh-chastyna-2>
19. Діагностування тягового електродвигуна / Вінницький національний технічний університет. Вінниця : ВНТУ, 2021. URL: <http://inmad.vntu.edu.ua/portal/static/3CAECAB5-E8A3-4C69-ACA6-6D9B34641578.pdf>
20. Лекція 7: Діагностування та прогнозування технологічного обладнання переробних підприємств / ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/tsst/wp-content/uploads/sites/6/lekcija-7-diahnostuvannja-ta-prohnozuvannja-tehnolohichnoho-obladnannja-pererobnyh-pidpryyemstv.pdf>
21. Atif M., Javed A. AI-Driven Thermography-Based Fault Diagnosis in Single-Phase Induction Motor. *Results in Engineering*. 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102760. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024017456>

22. Comprehensive Fault Diagnosis of Three-Phase Induction Motors Using Synchronized Multi-Sensor Data Collection / T. Gaerke et al. *Scientific Data*. 2025. DOI: 10.1038/s41597-025-05437-3. URL: <https://www.nature.com/articles/s41597-025-05437-3>

23. Han Y., Yuan J., Luo Y. et al. Detection and Evaluation of Load Oscillations in Induction Motors Based on MCSA. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E*. 2023. DOI: 10.1177/09544089231172029. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/09544089231172029>

24. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»: офіційний сайт. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. URL: <https://energy.kpi.ua>

25. Разробка стенду для вимірювання метрологічних характеристик електродвигунів / А. С. Дуднік та ін. *ResearchGate*. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/354171514_Rozrobka_stendu_dla_vimiruvanna_metrologicnih_harakteristik_elektrodivguniv

26. Ремонт електродвигунів: діагностика, профілактика поломок. *Zaholovok.com.ua*. 2023. URL: <https://zaholovok.com.ua/remont-elektrodivhuniv-diahnostyka-profilaktyka-polomok>