

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Таврійський державний агротехнологічний університет**  
**імені Дмитра Моторного**  
**Факультет енергетики і комп'ютерних технологій**

«На правах рукопису»  
УДК 621.3

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Зав. каф. “Електротехніка і електромеханіка  
імені професора В.В. Овчарова”  
доц. \_\_\_\_\_ **Сергій КВІТКА**  
“14” лютого 2025 р.

**Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи здобувача ступеня вищої освіти “Магістр”  
(ступінь вищої освіти)

на тему: “Удосконалення системи захисту асинхронного двигуна приводу вовчка  
технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу”

**21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ**

Виконав: здобувач вищої освіти М2 курсу, групи 21МБЕЕ  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
за ОПП “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”  
(шифр і назва спеціальності та ОПП)

\_\_\_\_\_ **Андрій ГРУЗДЄВ**

(підпис)

Керівник: доц. \_\_\_\_\_ **Олександр ВОВК**

(підпис)

Консультант: доц. \_\_\_\_\_ **Михайло ЗОРЯ**

(підпис)

Консультант: доц. \_\_\_\_\_ **Світлана ПЛОТНІЧЕНКО**

(підпис)

Нормоконтроль: доц. \_\_\_\_\_ **Сергій КВІТКА**

(підпис)

Рецензент: проф. \_\_\_\_\_ **Ольга ЛИСЕНКО**

(підпис)

Запоріжжя - 2025 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО**

Факультет: Енергетики і комп'ютерних технологій  
Кафедра: Електротехніка і електромеханіка імені професора В.В. Овчарова  
Ступінь вищої освіти: Магістр  
Спеціальність: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
"Електротехніка і електромеханіка  
імені професора В.В. Овчарова"  
к.т.н., доц. \_\_\_\_\_  
" 05 " жовтня 2024 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

Груздєву Андрію Олексійовичу

<b>1. Тема роботи: Удосконалення системи захисту асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу</b>
<b>керівник роботи:</b> Вовк О.Ю., к.т.н., доцент. затверджені наказом ректора університету від 23 вересня 2024 року № 441 -С.
<b>2. Строк подання здобувачем роботи:</b> 12 лютого 2025 року.
<b>3. Вихідні дані до роботи:</b> статистичні дані, технічне завдання на кваліфікаційну роботу, матеріали виробничих та переддипломних практик, нормативні документи, науково-технічна література, електронні ресурси та ін.
<b>4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):</b> Вступ.
1. Аналіз стану питання і постановка задач дослідження.
2. Дослідження експлуатаційного режиму роботи асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу в умовах перевантаження.
3. Розробка пристрою захисту асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу.

Висновки.
Список використаних джерел.
Додатки.

### 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників):

1. Технологічна лінія виробництва м'ясного фаршу. Схема скомбінована функційна.
2. Технологічна лінія виробництва м'ясного фаршу. Система керування. Схема електрична принципова.
3. Блок-схема розвитку процесів пошкодження ізоляції асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу в умовах перевантаження. Плакат навчально-технічний.
4. Математична модель теплового зношення ізоляції асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу в умовах перевантаження. Плакат навчально-технічний.
5. Закономірності теплових процесів в асинхронному двигуні приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу в умовах перевантаження. Розрахунок.
6. Асинхронний двигун приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу. Система керування і захисту. Схема електрична принципова.
7. Пристрій захисту асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу. Схема електрична структурна.
8. Пристрій захисту асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу. Схема електрична принципова.

### 6. Консультанти розділів (підрозділ) роботи

Розділ (підрозділ)	П.І.Б, посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
3 (п.3.4)	Зоря М.В., к.т.н., доцент		
3 (п.3.5)	Плотніченко С.Р., к.е.н., доцент		

7. Дата видачі завдання: 02 жовтня 2024 року.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Аналіз стану питання і постановка задач дослідження.	30.10.2024 р.	виконано
2. Дослідження експлуатаційного режиму роботи асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу в умовах перевантаження.	10.12.2024 р.	виконано

3. Розробка пристрою захисту асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу.	21.01.2025 р.	виконано
4. Техніка безпека при експлуатації пристрою захисту.	29.01.2025 р.	виконано
5. Техніко-економічні показники впровадження пристрою захисту.	11.02.2025 р.	виконано
6. Підпис керівником роботи.	12.02.2025 р.	виконано
7. Підпис завідувачем кафедри.	14.02.2025 р.	виконано

Здобувач \_\_\_\_\_ А. О. Груздев

Керівник роботи, к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ О. Ю. Вовк



№ рядка	Формат	Познака	Найменування	Кільк. аркушів	№ примірн.	Примітка
26			приводу вовчка технологічної			
27			лінії виробництва м'ясного			
28			фаршу в умовах			
29			перевантаження. Плакат			
30			навчально-технічний.			
31	A1	21ЕМД.11260458.02.25.230000.РР	Закономірності теплових	1	—	
32			процесів в асинхронному			
33			двигуні приводу вовчка			
34			технологічної лінії			
35			виробництва м'ясного фаршу			
36			в умовах перевантаження.			
37			Розрахунок.			
38	A2	21ЕМД.11260458.02.25.310000.Э3	Асинхронний двигун приводу	1	—	
39			вовчка технологічної лінії			
40			виробництва м'ясного фаршу.			
41			Система керування і захисту.			
42			Схема електрична принципова			
43	A2	21ЕМД.11260458.02.25.320000.Э1	Пристрій захисту	1	—	
44			асинхронного двигуна			
45			приводу вовчка технологічної			
46			лінії виробництва м'ясного			
47			фаршу. Схема електрична			
48			структурна.			
49	A1	21ЕМД.11260458.02.25.330000.Э3	Пристрій захисту	1	—	
50			асинхронного двигуна			
51			приводу вовчка технологічної			
52			лінії виробництва м'ясного			
53			фаршу. Схема електрична			
54			принципова.			
						Арк.
						21ЕМД.11260458.02.25.000000ТП
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		2

## РЕФЕРАТ

Груздєв А.О. Удосконалення системи захисту асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу : кваліфікаційна робота. Мелітополь : ТДАТУ, 2025. 99 с.

*Обсяг* кваліфікаційної роботи – 99 аркушів, кількість рисунків – 9, кількість таблиць – 20.

В роботі проведено аналіз технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу підприємства «Агропродукт», визначено недоліки системи керування і захисту асинхронними двигунами та обрано шлях розв'язання проблеми.

Обґрунтовано параметри експлуатаційного режиму роботи електродвигуна та еквівалентну теплову схему заміщення асинхронного двигуна приводу вовчка. Досліджено втрати активної потужності та усталене перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції коефіцієнта завантаження. Досліджено поточне перевищення температури обмотки статора та швидкість теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції часу. Висунуто вимоги до пристрою захисту та розроблено відповідний пристрій.

В роботі також вирішені питання техніки безпеки при експлуатації пристрою захисту. Доцільність прийнятих рішень підтверджено розрахунком економічної ефективності впровадження пристрою захисту.

*Ключові слова:* АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ВОВЧОК, ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ, СИСТЕМА ЗАХИСТУ, ШВИДКІСТЬ ТЕПЛОВОГО ЗНОШЕННЯ ІЗОЛЯЦІЇ, МІКРОКОНТРОЛЕРНИЙ ПРИСТРІЙ ЗАХИСТУ.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арж
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		7

## ABSTRACT

Hruzdev A.O. Improvement of the protection system for the asynchronous motor of the meat grinder drive in the technological line for minced meat production: qualification work. Melitopol: TDATU, 2025. 99 pages.

*The volume* of the qualification thesis is 99 pages, with 9 figures and 20 tables.

The work analyzes the technological line of minced meat production at the "Agroprodukt" enterprise, identifies deficiencies in the control and protection system of asynchronous motors, and selects a way to solve the problem.

The parameters of the operational mode of the electric motor and the equivalent thermal substitution scheme of the asynchronous motor of the meat grinder drive are substantiated. The loss of active power and the steady-state temperature rise of the stator winding of the asynchronous motor of the meat grinder drive as a function of the load factor are investigated. The current temperature rise of the stator winding and the thermal degradation rate of the stator winding insulation of the asynchronous motor of the meat grinder drive as a function of time are studied. The requirements for the protection device are proposed, and the corresponding device is developed.

The work also addresses safety issues during the operation of the protection device. The feasibility of the accepted decisions is confirmed by calculating the economic efficiency of the implementation of the protection device.

*Keywords:* ASYNCHRONOUS MOTOR, MEAT GRINDER, OVERLOAD, PROTECTION SYSTEM, THERMAL DEGRADATION RATE OF INSULATION, MICROCONTROLLER PROTECTION DEVICE.

					21EMД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркыш	№ докум	Підпис	Дата		8

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	16
1.1 Описання приватного підприємства «Агропродукт» .....	16
1.2 Аналіз технології виробництва м'ясного фаршу .....	17
1.3 Аналіз електричної частини технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу .....	19
1.4 Аналіз системи керування і захисту електросилового обладнання технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу .....	21
1.4.1 Аналіз параметрів контролю і керування технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу .....	21
1.4.2 Аналіз параметрів захисту силового електрообладнання технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу .....	26
1.4.3 Аналіз принципової електричної схеми системи керування і захисту електросилового обладнання технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу .....	27
1.5 Обґрунтування теми кваліфікаційної роботи, постановка мети і задач дослідження .....	34
2 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИВОДУ ВОВЧКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА М'ЯСНОГО ФАРШУ В УМОВАХ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ .....	36
2.1 Програма і методика дослідження .....	36
2.2 Обґрунтування параметрів експлуатаційного режиму роботи асинхронного двигуна приводу вовчка в умовах перевантаження .....	37
2.3 Обґрунтування еквівалентної теплової схеми заміщення асинхронного двигуна приводу вовчка .....	40
2.4 Дослідження втрат активної потужності асинхронного двигуна приводу вовчка у функції коефіцієнта завантаження .....	47

2.5 Дослідження усталеного перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції коефіцієнта завантаження .....	54
2.6 Дослідження поточного перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції часу .....	59
2.7 Дослідження швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції коефіцієнта завантаження .....	62
2.8 Висновки по розділу 2 .....	66
<b>3 РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИВОДУ ВОВЧКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА М'ЯСНОГО ФАРШУ .....</b>	<b>68</b>
3.1 Вимоги до пристрою захисту .....	68
3.2 Розробка принципової електричної схеми системи захисту вовчка і структурної електричної схеми пристрою захисту .....	70
3.3 Розробка принципової електричної схеми пристрою захисту .....	72
3.4 Техніка безпека при експлуатації пристрою захисту .....	76
3.5 Техніко-економічні показники впровадження пристрою захисту ...	79
3.6 Висновки по розділу 3 .....	85
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>86</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>88</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>92</b>

## ВСТУП

*Актуальність теми.* На сьогодні у переробній галузі виробництва для приводу робочих машин використовують, головним чином, трифазні асинхронні двигуни. Це обумовлено їх порівняно незначною вартістю, значною конструкційною надійністю, високими енергетичними показниками, простотою монтажу і іншими позитивними якостями [1]. Не зважаючи на те, що під час їх виробництва при випробуваннях на надійність відмовляє на більше 2-3% електродвигунів, на практиці кількість відмов збільшується і може сягати до 25 % від усього парку електродвигунів на рік [2]. Такий факт викликаний експлуатаційними умовами, які не було враховано при виробництві асинхронних двигунів: суттєве зниження якості електроенергії (провали напруги, несиметрії напруги тощо), перевантаження з боку робочих машин, вологість і агресивність навколишнього середовища, суттєві коливання температури навколишнього середовища, недосконалість систем захисту від аварійних режимів роботи, несвоєчасне проведення профілактичних заходів тощо [3]. У роботі розглядаються експлуатаційні впливи і система захисту асинхронного двигуна, встановленого на вовчка у технологічній лінії виробництва м'ясного фаршу. Цей електродвигун періодично знаходиться під впливом технологічних перевантажень з боку вовчка через переробку м'яса нижчого гатунку, що обумовлює його перегрівання і прискорення теплового зношення його ізоляції. Для захисту цього асинхронного двигуна від перевантажень на існуючому підприємстві використовують теплове реле. Такий захист є недосконалим, тому що теплове реле не враховує початковий стан електродвигуна і його теплова модель не відповідає тепловій моделі електродвигуна [4]. Це обумовлює несвоєчасний вихід з ладу асинхронного двигуна приводу вовчка, на існуючому підприємстві це спостерігається у середньому кожні два роки. Тому робота присвячена удосконаленню системи захисту асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						11
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

*Мета і задачі дослідження.* Метою кваліфікаційної роботи є підвищення експлуатаційної надійності асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі дослідження:

- дослідити експлуатаційний режим роботи асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу в умовах перевантаження;
- розробити пристрій захисту асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу.

*Об'єкт дослідження* – процес теплового зношення ізоляції асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу.

*Предмет дослідження* – закономірності впливу коефіцієнту завантаження асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу на швидкість теплового зношення ізоляції електродвигуна.

*Методи дослідження.* Експлуатаційний режим роботи асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу в умовах перевантаження досліджувався шляхом математичного моделювання і чисельного аналізу процесу теплового зношення ізоляції електродвигуна з урахуванням змін навантаження і температури навколишнього середовища. Пристрій захисту асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу розроблявся шляхом синтезу існуючих схемних рішень окремих компонентів з урахуванням висунутих до нього вимог.

*Наукова новизна одержаних результатів.*

- дістала подальшого розвитку еквівалентна теплова схема заміщення асинхронного двигуна, у якій на відміну від існуючої коефіцієнти впливу втрат потужності на нагрівання визначаються за паспортними даними електродвигуна;
- уперше отримано чисельні залежності швидкості теплового зношення ізоляції асинхронного двигуна приводу вовчка марки К6-ФВП-120, які враховують

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						12
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

певні значення конструктивних параметрів електродвигуна і параметри режиму роботи робочої машини заданої продуктивності;

- дістала подальшого розвитку система захисту асинхронного двигуна приводу вовчка, яка на відміну від існуючої враховує початковий стан електродвигуна і точніше відповідає його тепловій моделі.

*Практичне значення одержаних результатів* полягає у наступному:

- обґрунтовано параметр захисту асинхронного двигуна приводу вовчка – швидкість теплового зношення його ізоляції, яка на відміну від температури обмотки електродвигуна дозволяє більш точно оцінювати вплив перевантажень;
- отримано алгоритм розрахунку швидкості теплового зношення ізоляції електродвигуна приводу вовчка, який враховує певні значення конструктивних параметрів електродвигуна і параметри режиму роботи робочої машини заданої продуктивності;
- розроблено пристрій захисту асинхронного двигуна приводу вовчка, який враховує завантаження робочої машини, температуру навколишнього середовища і попередній тепловий стан електродвигуна і відключає електродвигун у разі досягнення неприпустимого значення швидкості теплового зношення ізоляції;
- техніко-економічні розрахунки впровадження пристрою захисту показали річний економічний ефект у розмірі 3750 грн. на один електродвигун, термін окупності додаткових капітальних вкладень склав 0,85 року.

*Апробація результатів дослідження.*

За результатами досліджень були зроблені чотири доповіді на двох конференціях:

1. Вовк О.Ю., Груздев А.О. Підходи до експлуатаційних розрахунків перевищення температури обмотки асинхронних двигунів в усталених режимах роботи. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): XI Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція, м. Київ, 6-7 листопада, 2024 р. /

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		13

Національний університет біоресурсів і природокористування України.  
Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження.

2. Груздев А.О. Параметри надійного спрацьовування пристроїв захисту асинхронного двигуна приводу вовчка при технологічних перевантаженнях. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: V Міжнародна науково-практична конференція молодих учених (Запоріжжя, 03-28 лютого 2025 р.) / Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного.
3. Груздев А.О. Математична модель швидкості витрати ресурсу ізоляції асинхронного двигуна приводу вовчка. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: V Міжнародна науково-практична конференція молодих учених (Запоріжжя, 03-28 лютого 2025 р.) / Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного.
4. Груздев А.О. Пристрій захисту асинхронного двигуна приводу вовчка від технологічних перевантажень. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: V Міжнародна науково-практична конференція молодих учених (Запоріжжя, 03-28 лютого 2025 р.) / Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного.

*Публікації.*

За результатами досліджень були зроблені чотири публікації у матеріалах двох конференцій:

1. Вовк О.Ю., Груздев А.О. Підходи до експлуатаційних розрахунків перевищення температури обмотки асинхронних двигунів в усталених режимах роботи. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): матеріали XI Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції, м. Київ, 6-7 листопада, 2024 р. / Національний університет біоресурсів і природокористування України. Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження. Київ: НУБіП, 2024. С.199-200.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						14
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

2. Груздев А.О. Параметри надійного спрацьовування пристроїв захисту асинхронного двигуна приводу вовчка при технологічних перевантаженнях. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали V Міжнародної науково-практична конференція молодих учених (Запоріжжя, 03-28 лютого 2025 р.) / Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. У друці.
3. Груздев А.О. Математична модель швидкості витрати ресурсу ізоляції асинхронного двигуна приводу вовчка. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали V Міжнародної науково-практична конференція молодих учених (Запоріжжя, 03-28 лютого 2025 р.) / Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. У друці.
4. Груздев А.О. Пристрій захисту асинхронного двигуна приводу вовчка від технологічних перевантажень. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали V Міжнародної науково-практична конференція молодих учених (Запоріжжя, 03-28 лютого 2025 р.) / Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. У друці.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						15
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

# 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Описання приватного підприємства «Агропродукт»

Приватне підприємство «Агропродукт» засноване у 1999 році. Зареєстроване за юридичною адресою: 32223, Хмельницька обл., Хмельницький р-н, смт. Вовковинці, вул. Гагаріна, 8.

ПП «Агропродукт» займається виробництвом м'яса та м'ясних продуктів, також оптовою та роздрібною торгівлею м'ясом та м'ясними продуктами.

Територія підприємства займає площу 1500 м<sup>2</sup>. На території підприємства розташовано виробниче приміщення, яке складається з цеху прийомки та первинної обробки м'яса, цеху виробництва фаршу, цеху виробництва вареної ковбаси, цеху виробництва пельменів і котлет, цеху фасування, складського відділення. Також є адміністративна будівля, гараж, котельня.

Електроживлення підприємства здійснюється від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ потужністю 400 кВА, яка розташована на відстані 550 м від підприємства. Водопостачання та водовідведення здійснюється від комунальної мережі.

На ПП «Агропродукт» працює 65 постійних працівників. Щороку на підприємстві виробляють 3 3200 тон продукції. Річне споживання електроенергії становить приблизно 170 МВт·год.

Сировина на підприємства надходить від місцевих фермерських господарств та постачальників м'ясної продукції з Хмельницької області. Вона має різну якість залежно від умов вирощування тварин та сезонності. Готова продукція реалізується через власну мережу магазинів, а також оптовими партіями постачається до торговельних мереж по всій Україні.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		16

## 1.2 Аналіз технології виробництва м'ясного фаршу

М'ясні туші, які надходять на підприємство, обробляють у цеху попередньої обробки. У цьому цеху відбувається розділення туш та відокремлення м'яса, жил, кісток та нутрощів. Далі м'ясо з туш надходить на переробку до цеху виробництва фаршу. Його доставляють туди вручну на візку 1 і за допомогою вантажопідійомника 2 за спорожнілої фаршмішалки, завантажують у вовчок 3 для попереднього подрібнення. Сировина, що надходить у завантажувальний бункер вовчка 3, захоплюється спіралеподібними шнеками, які обертаються на зустріч один одному, і крізь горловину робочого циліндра подається до обертового робочого шнека, що переміщує м'ясо для подрібнення в робочу камеру, де встановлено комплект різального механізму. До складу різального механізму входять: приймальна решітка з великими кvasолеподібними отворами, двосторонній хрестоподібний ніж, проміжна різальна решітка з отворами діаметром від 16 до 25 мм, другий двосторонній ніж та вихідна решітка з отворами діаметром від 5 до 6 мм. Далі попередньо подрібнене м'ясо самопливом потрапляє з робочого циліндру вовчка до фаршенасоса 4, у якому воно з приймальної ємності під дією сили тяжіння пересувається до перекачувального механізму, який складається з ротору і статору. Принцип перекачування полягає у переміщенні попередньо подрібненого м'яса шляхом періодичного витискання його постійного обсягу, що знаходиться в герметичних камерах між ротором і статором, до фаршопроводу, яким воно доставляється до подрібнювача 5, де поступово відбувається остаточне подрібнення м'яса. Механізм подрібнювача подрібнює м'ясо у три етапи за допомогою обертальних ножів та дисків з різцями. Попередньо подрібнене у вовчку м'ясо потрапляє в приймальний циліндр подрібнювача, звідки під дією відцентрової сили рухається до зон подрібнення. У першій зоні двосторонні ножі подрібнюють м'ясо на маленькі шматки. Потім подрібнене м'ясо переміщається до наступних зон, де спеціальні диски з гострими

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк. 17
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

лезами подрібнюють його ще більше. Ці диски розташовані дуже близько один до одного, утворюючи вузький зазор, через який проходить м'ясо, остаточно подрібнюючись. За допомогою розвантажувального диску остаточно подрібнене м'ясо виштовхується через спеціальний отвір і потрапляє у приймальну ємність фаршенасоса 6, який перекачує його фаршепроводом до фаршемішалки 7, куди також додаються спеції у певній пропорції. Перемішування фаршу у змішувальному кориті фаршемішалки 7 відбувається протягом 5 хвилин за допомогою змішувальних шнеків. Вони являють собою гвинтові лопаті, які обертаються з певною швидкістю, захоплюючи продукт і перемішуючи його в різних напрямках для досягнення однорідної консистенції фаршу та рівномірного розподілу в ньому спецій. Після перемішування готовий фарш крізь вивантажувальні люки фаршемішалки 7 вивантажують до візка для фаршу 8 і вручну транспортують на наступні операції у інші цехи (фасування або приготування ковбас тощо) [5, 6].

Технічні характеристики технологічного обладнання, яке задіяне при виробництві м'ясного фаршу, наведено у таблиці 1.1 [7, 8].

Таблиця 1.1 – Паспортні дані технологічного обладнання лінії

Найменування робочої машини	Кількість	Тип	Продуктивність	Встановлена потужність, кВт
Візок для м'яса та фаршу	2	ТК-2М	200 л	–
Вантажопідійомник	1	К7-ФПЗ-В.4	500 кг	1,5
Вовчок	1	К6-ФВП-120	2500 кг/год	12,5
Подрібнювач м'яса	1	А1-ФКЕ/3	4500 кг/год	55,0
Фаршенасос	2	А1-ФН-3К	3500 кг/год	4,0
Фаршемішалка	1	Л5-ФМБ	2500 кг/год	5,5

Схему скомбіновану функційну цеху з виробництва м'ясного фаршу наведено на аркуші 21ЕМД.11260458.02.25.110000.С2 графічної частини роботи.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						18
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Головним недоліком технології виробництва фаршу є те, що сировина з цеху первинної переробки надходить не завжди задовільної якості і може містити невеликі кісточки і жили, які не можливо відокремити при перевантаженні м'яса з візка у вовчок. Це призводить до раптових перевантажень механізмів вовчка та збільшенню моменту опору шнеку.

### 1.3 Аналіз електричної частини технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу

Для приводу робочих машин, вказаних у таблиці 1.1 застосовуються трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором серії АИ, основні характеристики яких згідно [9, 10] вказані у таблиці 1.2. Для живлення цих електродвигунів застосовуються проводи марки АПВ, марки яких згідно [11] вказані у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Електродвигуни приводу робочих машин та живлячі проводи

Найменування робочої машини	Тип приводного асинхронного двигуна	Кількість	Номінальна потужність двигуна, кВт	Марка проводу живлення
Вантажопідійомник К7-ФПЗ-В.4	АИР80В4У3	1	1,5	АПВ4(1×2,5)
Вовчок К6-ФВП-120	АИР132М2У3	1	11	АПВ4(1×5)
Подрібнювач м'яса А1-ФКЕ/3	АИР225М2У3	1	55	АПВ4(1×50)
Фаршенасос А1-ФН-3К	АИР100S2У3	2	4	АПВ4(1×2,5)
Фаршемішалка Л5-ФМБ	АИР112М4У3	1	5,5	АПВ4(1×2,5)

Позитивними якостями електродвигунів, вказаних у таблиці 1.2, є наступні [9, 10, 12]: проста і надійна конструкція; мала вартість; високий коефіцієнт корисної дії; простота підключення; відсутність колекторно-щіткового вузла.

Негативні якості електродвигунів, вказаних у таблиці 1.2, є такі [9, 10, 12]: малий коефіцієнт потужності при малих навантаженнях; складність регулювання швидкості; високий пусковий струм; низький пусковий і мінімальний момент по відношенню до номінального; чутливість до перепадів напруги; часткова термічна стійкість ізоляції обмотки статора до перевантажень; механічна нестійкість підшипникового вузла до значних вібрацій і поштовхів.

Для комутації трифазних асинхронних двигунів приводу робочих машин застосовуються магнітні пускачі серії ПММ, для захисту від коротких замикань застосовуються автоматичні вимикачі серії АВ2000, від перевантажень – теплові реле серії РТ2М. Марки вказаних апаратів згідно [7, 8, 9, 10, 11, 12] наведені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Пуско-захисна апаратура електродвигунів приводу робочих машин

Тип приводного асинхронного двигуна	Марка магнітного пускача	Марка автоматичного вимикача	Марка теплового реле
АИР80В4У3	ПММ-1/6 20 У3	АВ2000/3-С4 230/400-У3	РТ2М-25 (2,5-4) в 20 У3
АИР132М2У3	ПММ-2/25 20 У3	АВ2000/3-С32 230/400-У3	РТ2М-25 (17-25) в 20 У3
АИР225М2У3	ПММ-5/125 20 У3	АВ3003/3Н-00 У3 125А	РТ2М-200 (80-125) в 20 У3
АИР100S2У3	ПММ-1/9 20 У3	АВ2000/3-С10 230/400-У3	РТ2М-25 (7-10) в 20 У3
АИР112М4У3	ПММ-1/16 20 У3	АВ2000/3-С16 230/400-У3	РТ2М-25 (9-13) в 20 У3

Позитивними якостями автоматичних вимикачів, вказаних у таблиці 1.3, є наступні: багаторазовість спрацювання; захист від коротких замикань; захист від неповнофазного режиму роботи; селективність спрацювання; мала ймовірність помилкового спрацювання; компактність і модульність [13, 14].

Негативні якості автоматичних вимикачів, вказаних у таблиці 1.3, є такі: час спрацювання; не захищає людей від ураження струмом; не захищає від витоку струму; обмежений ресурс комутації [9, 10].

Позитивними якостями теплових реле, вказаних у таблиці 1.3, є наступні: простота експлуатації; регульовані діапазони струму; захист від тривалих перевантажень; відновлення після спрацювання; можливість комбінації з контакторами [15].

Негативні якості теплових реле, вказаних у таблиці 1.3, є такі: повільний час спрацювання; низька точність через фактори навколишнього середовища [15].

#### 1.4 Аналіз системи керування і захисту електросилового обладнання технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу

##### 1.4.1 Аналіз параметрів контролю і керування технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу

Для контролю і керування вовчком застосовано нижній рівень остаточно подрібненого м'яса у бункері фаршемішалки. Якщо м'ясо відсутнє на цьому рівні, то вмикається звукова сигналізація обслуговуючому персоналу про необхідність завантаження м'яса з туш до бункера вовчка. Сигналізація завантаження вовчка працює протягом 20 с, що є достатнім для її сприйняття обслуговуючим персоналом. Для контролю наявності м'яса на нижньому рівні бункера фаршемішалки застосовано первинний вимірювальний перетворювач рівня, контакт якого увімкнено у коло сигналізації завантаження вовчка. Для контролю часу роботи сигналізації застосовано реле часу, контакт якого увімкнено у коло сигналізації завантаження вовчка.

Для контролю і керування вовчком застосовано нижній рівень м'яса з туш у бункері вовчка. Якщо м'ясо опиняється на цьому рівні, то електродвигун приводу шнеку вовчка вмикається і починається подрібнення м'яса. Якщо м'ясо відсутнє на нижньому рівні завантажувального бункера вовчка, то приводний електродвигун вимикається з витримкою часу 20 с, достатньою для виходу усього подрібненого м'яса з робочого циліндру вовчка. Для контролю наявності м'яса на нижньому рівні завантажувального бункера вовчка застосовано первинний

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		21

вимірювальний перетворювач рівня, контакт якого увімкнено у коло керування асинхронним двигуном приводу шнеку вовчка. Для контролю часу відсутності м'яса на нижньому рівні завантажувального бункера вовчка застосовано реле часу, контакт якого увімкнено у коло керування асинхронним двигуном приводу шнеку вовчка.

Параметри контролю і керування вовчком та керуючі впливи на його приводний електродвигун зведені до таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Параметри контролю і керування вовчком

Найменування параметру	Значення параметру	Керуючий вплив
нижній рівень фаршу у бункері фаршемішалки	менше за 5 см	вмикання сигналізації протягом 20 с про необхідність завантаження вовчка
нижній рівень м'яса з туш у завантажувальному бункері вовчка	5 см	вмикання електродвигуна приводу шнека вовчка
	менше за 5 см	вимикання через 20 с електродвигуна приводу шнека вовчка

Для контролю і керування фаршенасосом 4 застосовано нижній рівень попередньо подрібненого м'яса у приймальній ємності фаршенасоса 4. Якщо м'ясо опиняється на цьому рівні, то електродвигун приводу фаршенасоса 4 вмикається і починається переміщення м'яса фаршопроводом до подрібнювача. Якщо м'ясо відсутнє на цьому рівні, то електродвигун приводу фаршенасоса 4 має вимкнутись з витримкою часу 20 с, достатньою для повного виходу м'яса з камери фаршенасоса. Для контролю наявності м'яса на нижньому рівні приймальної ємності фаршенасоса 4 застосовано первинний вимірювальний перетворювач рівня, контакт якого увімкнено у коло керування асинхронним двигуном приводу ротору цього фаршенасоса. Для контролю часу відсутності м'яса на нижньому рівні приймальної ємності фаршенасоса застосовано реле часу, контакт якого увімкнено у коло керування асинхронним двигуном приводу ротору цього фаршенасоса.

Параметри контролю і керування фаршенасосом 4 та керуючі впливи на його приводний електродвигун зведені до таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Параметри контролю і керування фаршенасосом 4

Найменування параметру	Значення параметру	Керуючий вплив
нижній рівень попередньо подрібненого м'яса у приймальній ємності фаршенасоса 4	4 см	вмикання електродвигуна приводу ротору фаршенасоса 4
	менше за 4 см	вимикання через 20 с електродвигуна приводу ротору фаршенасоса 4

Для контролю і керування подрібнювачем застосовано нижній рівень попередньо подрібненого м'яса у приймальній ємності фаршенасоса 4. Якщо м'ясо опиняється на цьому рівні, то електродвигун приводу подрібнювального механізму вмикається і починається остаточне подрібнення м'яса. Одночасно з цим відчиняється електромагнітний клапан подачі холодної води у охолоджувальну сорочку подрібнювача. Якщо м'ясо відсутнє на нижньому рівні приймальної ємності фаршенасоса 4, то приводний електродвигун подрібнювача вимикається з витримкою часу 30 с, достатньою для виходу усього остаточного подрібненого м'яса з подрібнювального механізму. Одночасно з цим зачиняється електромагнітний клапан подачі холодної води у охолоджувальну сорочку подрібнювача. Для контролю наявності м'яса на нижньому рівні приймальної ємності фаршенасоса 4 застосовано первинний вимірювальний перетворювач рівня, контакт якого увімкнено у коло керування асинхронним двигуном приводу подрібнювального механізму подрібнювача та у коло керування електромагнітним клапаном подачі холодної води у охолоджувальну сорочку подрібнювача. Для контролю часу відсутності м'яса на нижньому рівні приймальної ємності фаршенасоса 4 застосовано реле часу, контакт якого увімкнено у коло керування асинхронним двигуном приводу подрібнювального механізму подрібнювача.

Параметри контролю і керування подрібнювачем та керуючі впливи на його приводний електродвигун зведені до таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Параметри контролю і керування подрібнювачем

Найменування параметру	Значення параметру	Керуючий вплив
нижній рівень попередньо подрібненого м'яса у приймальній ємності фаршенасоса 4	5 см	вмикання електродвигуна приводу подрібнювального механізму подрібнювача; відкриття електромагнітного клапану подачі холодної води у охолоджувальну сорочку подрібнювача
	менше за 5 см	вимикання через 30 с електродвигуна приводу подрібнювального механізму подрібнювача; закриття через 30 с електромагнітного клапану подачі холодної води у охолоджувальну сорочку подрібнювача

Для контролю і керування фаршенасосом 6 застосовано нижній рівень остаточно подрібненого м'яса у приймальній ємності фаршенасоса 6. Якщо м'ясо опиняється на цьому рівні, то електродвигун приводу фаршенасоса вмикається і починається переміщення м'яса фаршопроводом до фаршемішалки. Якщо м'ясо відсутнє на цьому рівні, то електродвигун приводу фаршенасоса 6 має вимкнутись з витримкою часу 20 с, достатньою для повного виходу м'яса з камери фаршенасоса. Для контролю наявності м'яса на нижньому рівні приймальної ємності фаршенасоса 6 застосовано первинний вимірювальний перетворювач рівня, контакт якого увімкнено у коло керування асинхронним двигуном приводу ротору цього фаршенасоса. Для контролю часу відсутності м'яса на нижньому рівні приймальної ємності фаршенасоса 6 застосовано реле часу, контакт якого увімкнено у коло керування асинхронним двигуном приводу ротору цього фаршенасоса.

Параметри контролю і керування фаршенасосом 6 та керуючі впливи на його приводний електродвигун зведені до таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Параметри контролю і керування фаршенасосом 6

Найменування параметру	Значення параметру	Керуючий вплив
нижній рівень остаточно подрібненого м'яса у приймальній ємності фаршенасоса 6	4 см	вимикання електродвигуна приводу ротору фаршенасоса 6
	менше за 4 см	вимикання через 20 с електродвигуна приводу ротору фаршенасоса 6

Для контролю і керування фаршемішалкою 7 застосовано верхній рівень остаточно подрібненого м'яса у змішувальному кориті фаршемішалки 7. Якщо м'ясо опиняється на цьому рівні, то електродвигун приводу змішувальних шнеків вмикається з витримкою часу 20 с, достатньою для додавання спецій та повного перекачування фаршу фаршенасосом, і починається перемішування остаточно подрібненого м'яса. Одночасно з цим вмикається сигналізація обслуговуючому персоналу про необхідність додавання спецій у змішувальне корито, яка працює протягом 20 с. Відбувається додавання спецій у змішувальне корито фаршемішалки 7. Перемішування остаточно подрібненого м'яса зі спеціями триває протягом 5 хвилин. По завершенні часу перемішування вмикається сигналізація про необхідність вивантаження готового фаршу, яка працює протягом 20 с. За її сигналом обслуговуючий персонал розміщує візок під вивантажувальними люками і відкриває їх, внаслідок чого готовий фарш самопливом потрапляє до візка. Коли фарш опускається у змішувальне корито фаршемішалки нижче за нижній рівень, то приводний електродвигун вмикається з витримкою часу 20 с, достатньою для виходу усього фаршу з фаршемішалки. Для контролю наявності фаршу на верхньому та нижньому рівнях у фаршемішалці 7 застосовано первинні вимірювальні перетворювачі рівнів, контакти яких увімкнено у коло керування асинхронним двигуном приводу ротору цієї фаршемішалки. Для контролю часу роботи фаршемішалки 7 застосовано реле часу, контакти яких увімкнено у коло керування асинхронним двигуном приводу ротору цієї фаршемішалки.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		25

Параметри контролю і керування фаршемішалкою та керуючі впливи на її приводний електродвигун зведені до таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Параметри контролю і керування фаршемішалки

Найменування параметру	Значення параметру	Керуючий вплив
верхній рівень фаршу у змішувальному кориті фаршемішалки	30 см	вмикання через 20 с електродвигуна приводу змішувальних шнеків; вмикання сигналізації протягом 20 с про необхідність завантаження спецій до змішувального корита
нижній рівень фаршу у змішувальному кориті фаршемішалки	менше за 5 см	вимикання через 20 с електродвигуна приводу змішувальних шнеків
час перемішування фаршу	5 хв	вмикання сигналізації протягом 20 с про необхідність вивантаження фаршу зі змішувального корита фаршемішалки

#### 1.4.2 Аналіз параметрів захисту силового електрообладнання технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу

Як показано у п.1.3 силовим електрообладнанням технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу є трифазні асинхронні двигуни. Головними експлуатаційними впливами на них під час експлуатації є теплові дії електричних струмів, які протікають в елементах їх конструкції і призводять до теплового зношення ізоляції. У асинхронних двигунах технологічної лінії, яка розглядається у роботі, дію цих впливів відслідковують за допомогою пристроїв захисту – автоматичних вимикачів і теплових реле. Автоматичні вимикачі за допомогою електромагнітних розчіплювачів захищають асинхронні двигуни приводів робочих машин від пошкоджень внаслідок коротких замикань. Головними елементами електромагнітного розчіплювача є обмотка, у якій проходить струм електродвигуна і всередині якої розташоване рухоме феромагнітне осердя. При протіканні під час короткого замикання у обмотці електромагнітного розчіплювача струму значної сили (надструму) у ній утворюється таке магнітне поле, сили з боку якого долають силу пружності зворотної пружини, що утримує осердя розчіплювача, і переміщує його всередину обмотки, механічно розриваючи

електричне коло. За короткого замикання нагрівання електродвигуна суттєво відрізняється від нагрівання за номінального режиму роботи або перевантаження, тому у цьому випадку надструм є визначальним фактором нагрівання асинхронного двигуна [17-20]. Звідси випливає, що надструм є достатньо інформативним параметром для пристроїв захисту про його тепловий стан. До незначного недоліку надструму, як параметру захисту, слід віднести те, що він не враховує початковий тепловий стан асинхронного двигуна.

Від перевантажень асинхронні двигуни приводів робочих машин захищають теплові реле. Головними елементами захисного елемента теплового реле є біметалічна пластина з розташованою на ній обмоткою, по якій проходить струм електродвигуна. При перевантаженні двигуна струм проходить крізь обмотку біметалевої пластини захисного елемента і нагріває її так, що біметалічна пластина вигинається і натискає на важіль, механічно розриваючи електричне коло. Але при перевантаженні асинхронного двигуна його нагрівання залежить не тільки від сили струму, який він споживає, а й від втрат активної потужності в інших елементах його конструкції, від його еквівалентної постійної часу нагрівання (яка не співпадає з постійною часу нагрівання захисного елемента теплового реле), класу його ізоляції, умов охолодження електродвигуна, температури навколишнього середовища і інших факторів [17-20]. Тому сила струму асинхронного електродвигуна є не достатньо інформативним параметром для пристроїв захисту про його тепловий стан при перевантаженні.

#### 1.4.3 Аналіз принципової електричної схеми системи керування і захисту електросилового обладнання технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу

Розробка принципової електричної схеми для керування електрообладнанням ділянки виробництва фаршу включала відображення технічних засобів керування за допомогою умовних графічних та літерних позначень, враховуючи їхні зв'язки та принципи керування, визначені у функційній схемі автоматизації. Схема керування ділянкою виробництва фаршу

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк. 27
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

цеху відображена на аркуші 21ЕМД.11260458.02.25.120000.ЭЗ графічної частини роботи.

Схема складається з двох частин: силового кола для живлення електрообладнання та кола керування для живлення елементів управління. Вона підключається до трифазного джерела живлення «ЗPEN, ~50 Гц, 220/380 В», де силове коло отримує трифазне живлення, а коло керування – однофазне.

Схема підтримує роботу в ручному та автоматизованому режимах, які вибираються пакетними перемикачами SA1 та SA2 («P» – ручний, «A» – автоматизований).

Робота схеми при ручному керування здійснюється так. Спочатку за допомогою пакетних перемикачів SA1, SA2 встановлюється режим роботи («P» - ручний режим), потім включаються автоматичні вимикачі QF1-QF7 та SF1. Далі включається кнопка SB2.1, що замикає коло сигналізації завантаження вовчка. HA1 та HL3 отримують живлення і вмикаються, надаючи звуковий і світловий сигнали персоналу цеху про необхідність завантаження вовчка. Тривалість сигналу визначається тривалістю включення кнопки SB2.1.

Потім вручну можна здійснювати запуск та зупинку відповідних електродвигунів шляхом включення відповідних кнопок SB2 – SB6. Наприклад, при включенні кнопки SB2.3 відбудеться замикання кола котушки магнітного пускача КМЗ, котушка отримає живлення, пускач ввімкнеться і замкне контакти КМЗ.1, що забезпечить роботу вовчка 3 при відпусканні кнопки SB2.3, та силові контакти КМЗ у силовому колі електродвигуна М2 приводу вовчка 3. Електродвигун отримає живлення і запусниться, а вовчок 3 почне працювати і подрібнювати завантажене м'ясо.

При включенні кнопки SB2.2 відбудеться розмикання кола котушки магнітного пускача КМЗ, котушка втратить живлення, пускач вимкнеться і розімкне контакти у силовому колі електродвигуна М2 приводу вовчка 3. Електродвигун втратить живлення і зупиниться, а вовчок припинить працювати і подрібнювати завантажене м'ясо.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк. 28
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

При перевантаженні електродвигуна М2 у процесі роботи відбудеться спрацювання теплового реле КК2 і розмикання його контакту у колі котушки КМ3. Котушка втратить живлення, пускач вимкнеться і розімкне контакти у силовому колі електродвигуна М2 приводу вовчка 3. Електродвигун втратить живлення і зупиниться, а вовчок припинить працювати.

Для світлової сигналізації персоналу про роботу електродвигуна М2 (і вовчка 3) застосовано світлову сигнальну арматуру НЛ4, приєднану паралельно котушці КМ3. При отриманні живлення котушкою КМ3 вказана лампа горить і навпаки.

Керування електродвигунами приводу інших робочих машин у ручному режимі виконується аналогічно.

Електромагнітний клапан УА1 подачі холодної води у охолоджувальну сорочку подрібнювача 5 відкривається відразу після подачі живлення на котушку КМ5 керування приводом подрібнювача 5.

Схема в автоматизованому режимі працює так. Пакетні перемикачі SA1, SA2 встановлюють у положення «А», у силовому колі вмикають автоматичні вимикачі QF1-QF9, а також автоматичний вимикач SF1 у колі керування. Відразу, через нормально замкнений контакт датчика нижнього рівня фаршу у фаршемішалці, отримують живлення котушки реле часу КТ1 та КТ11 і котушка проміжного реле КЛ1. Запускається сигналізація, надаючи звуковий і світловий сигнал персоналу цеху про необхідність завантаження у вовчок м'яса з туш. Тривалість сигналу (20 с.) визначається тривалістю роз'єднання контакту КТ1.1 у її колі (згідно уставки реле часу КТ1).

Далі система керування за допомогою датчика нижнього рівня, встановлених у бункері вовчка 3, визначає наявність м'яса з туш у цьому бункері. При його наявності контакт датчика SL2 замикається і котушки КЛ2 та КЛ3 отримують живлення. Контакт КЛ2.1 замикається, подаючи живлення на котушку магнітного пускача КМ3, який замикає контакт КМ3.1, що забезпечує роботу вовчка 3 при відсутності м'яса на нижньому рівні бункера вовчка 3, та силовий контакт КМ3, запускаючи двигун М2. КЛ3.1 розмикається, перериваючи

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк. 29
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

живлення котушки реле часу КТ2, що контактом КТ2.1 забезпечує вимикання двигуна М2 при спустошенні бункера вовчка 3 з витримкою часу 20 с.

При надходженні попередньо подрібненого м'яса з вовчка у бункер фаршенасоса 4 відбувається спрацювання датчика нижнього рівня, який встановлений у ньому. Контакт SL3 цього датчика, встановлений у колі котушок проміжних реле КЛ4, КЛ5, КЛ6 та реле часу КТ5, замикається. Ці котушки отримують живлення. Контакт КЛ4.1 замикається, подаючи живлення на котушку магнітного пускача КМ4, який замикає контакт КМ4.1, що забезпечує роботу фаршенасоса 4 при відсутності м'яса на нижньому рівні бункера фаршенасоса 4, та силовий контакт КМ4, запускаючи двигун М3. Контакт КЛ5.1 замикається, подаючи живлення на котушку магнітного пускача КМ5, який замикає контакт КМ5.1, що забезпечує роботу подрібнювача при відсутності м'яса на нижньому рівні бункера фаршенасоса 4, та силовий контакт КМ5, запускаючи двигун М4. Одночасно з цим отримує живлення котушка електромагнітного клапана. Реле часу КТ 5 забезпечує перемикання з'єднання обмоток двигуна М4 подрібнювача 5 з зірки на трикутник з витримкою часу 5 с. КЛ6.1 розмикається, прериваючи живлення котушок реле часу КТ3 та КТ4, що контактами КТ3.1 та КТ4.1 забезпечують вимикання двигунів М3 та М4 при спустошенні бункера фаршенасоса 4 з витримкою часу 20 с та 30 с відповідно.

При надходженні остаточно подрібненого м'яса з подрібнювача 5 до бункера фаршенасоса 6 відбувається спрацювання датчика нижнього рівня, який встановлений у ньому. Контакт SL4 цього датчика, встановлений у колі котушок проміжних реле КЛ7 та КЛ8, замикається. Ці котушки отримують живлення. Контакт КЛ7.1 замикається, подаючи живлення на котушку магнітного пускача КМ8, який замикає контакт КМ8.1, що забезпечує роботу фаршенасоса 6 при відсутності м'яса на нижньому рівні бункера фаршенасоса 6, та силовий контакт КМ8, запускаючи двигун М4. КЛ6.1 розмикається, перериваючи живлення котушки реле часу КТ6, що контактами КТ6.1 забезпечують вимикання двигуна М5 при спустошенні бункера фаршенасоса 6 з витримкою часу 20 с.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк. 30
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

При заповненні змішувального корита фаршемішалки 7 однією порцією подрібненого м'яса відбувається спрацювання датчика верхнього рівня, який встановлено у ньому. Контакт SL4 цього датчика, встановлений у колі котушок реле часу КТ7 та КТ8, замикається. Ці котушки отримують живлення. Одночасно з цим відбувається замикання контакту КТ8.1, який включено у колі котушок сигналізації про додавання спецій, що розімкнеться з витримкою часу 20 с. Контакт КТ7.1 замкнеться з витримкою часу 20 секунд, подаючи живлення на котушку магнітного пускача КМ9. Контакт КМ9.1 замикається, що забезпечує роботу фаршемішалки 7 при відсутності фаршу на верхньому рівні фаршемішалки 7, та силовий контакт КМ9, запускаючи двигун М6. Одночасно з цим отримує живлення котушка КТ9, яка, з витримкою часу у 5 хв., замикає контакт КТ9.1, запускаючи сигналізацію про вивантаження та подаючи живлення на котушку КТ10, що вимкне сигналізацію з витримкою часу 20 с.

При вивантаженні фаршемішалки 7, яка проводиться вручну, замикається контакт SL1 датчика нижнього рівня фаршемішалки 7, що подає живлення на котушку реле часу КТ11. Контакт КТ11.1 розімкнеться з витримкою часу 20 с, перериваючи живлення магнітного пускача КМ 9, що призведе до вимкнення двигуна М6.

Керування вантажопідйомником 2 відбувається виключно в ручному режимі: при натисканні кнопки SB1.2 отримує живлення котушка КМ1. Замикається контакт КМ1.2, що забезпечую роботу підйомника при відпусканні кнопки SB1.2, розмикається контакт КМ1.2, що блокує подачу живлення на котушку КМ2 та замикається силовий контакт КМ1, який вмикає двигун М1. При досягненні кінцевого положення вантажопідйомника відбувається спрацювання кінцевого перемикача SQ1, що розриває коло котушки КМ1. Після вивантаження візка 1, оператор натискає кнопку SB1.3, що вмикає двигун з реверсом, повертаючи підйомник у початкове положення, де спрацьовує кінцевий перемикач SQ2, який розриває коло котушки КМ2.

Світлова сигналізація про роботу технологічного обладнання та захист силового електрообладнання відбувається так само, як і при ручному керуванні.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		31

З описаного матеріалу випливає, що недоліками системи керування технологічної лінії виробництва фаршу є відсутність контролю якості м'яса, яке надходить у вовчок, і відсутність можливості видалення твердих фракцій (жил, дрібних кісточок тощо) з цього м'яса. Таке м'ясо з наявними твердими фракціями призводить до перевантаження електродвигуна вовчка. Згідно описаній системі захисту силового електрообладнання вказаної технологічної лінії у такій ситуації асинхронний двигун вовчка має бути відключений тепловим реле. Але недоліком цієї системи захисту є те, що теплове реле не завжди його відключає. Це обумовлене тим, що теплове реле не враховує початковий тепловий стан електродвигуна, фізична тепла модель теплового реле (біметалічна пластина з обмоткою зі струмом) не відповідає тепловій моделі електродвигуна, температурна компенсація реле має великий розкид спрацьовування [21]. Внаслідок вказаних недоліків асинхронний двигун приводу вовчка періодично (у середньому кожні два роки) виходить з ладу. Через це приватне підприємство «Агропродукт» щорічно втрачає приблизно 250000 грн. на відновлення асинхронного двигуна (його демонтаж, ремонт, випробування, монтаж, налагодження) і на переривання технологічного процесу.

Таблиця 1.9 – Перелік матеріалів і обладнання для принципової електричної схеми керування електросиловим обладнанням технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу

Поз. позн.	Найменування	Кіл.	Примітки
Електродвигуни асинхронні			
M1	АИР80В4У3, ТУ У 31.1-37502259-001: 2011	1	$P_n = 1,5$ кВт
M2	АИР132М2У3, ТУ У 31.1-37502259-001: 2011	1	$P_n = 11$ кВт
M3, M5	АИР100S2У3, ТУ У 31.1-37502259-001: 2011	2	$P_n = 4$ кВт
M4	АИР225М2У3, ТУ У 31.1-37502259-001: 2011	1	$P_n = 55$ кВт
M6	АИР112М4У3, ТУ У 31.1-37502259-001: 2011	1	$P_n = 5,5$ кВт

Продовження таблиці 1.9

Вимикачі автоматичні			
QF1	AB3003/3H-00 У3 160А, ТУ У 31.2-25019584-001: 2006	1	$I_{нрт} = 160 \text{ А}$
QF2	AB2000/3-С4 230/400-У3, ТУ У 31.2-25019584-001: 2006	1	$I_{нрт} = 4 \text{ А}$
QF3	AB2000/3-С32 230/400-У3, ТУ У 31.2-25019584-001: 2006	1	$I_{нрт} = 32 \text{ А}$
QF4	AB2000/3-С10 230/400-У3, ТУ У 31.2-25019584-001: 2006	1	$I_{нрт} = 10 \text{ А}$
QF6	AB2000/3-С10 230/400-У3, ТУ У 31.2-25019584-001: 2006	1	$I_{нрт} = 10 \text{ А}$
QF5	AB3003/3H-00 У3 125А, ТУ У 31.2-25019584-001: 2006	1	$I_{нрт} = 125 \text{ А}$
QF7	AB2000/3-С16 230/400-У3, ТУ У 31.2-25019584-001: 2006	1	$I_{нрт} = 16 \text{ А}$
SF1	AB2000/1-С10 230/400-У3, ТУ У 31.2-25019584-001: 2006	1	$I_{нрт} = 10 \text{ А}$
Пускачі магнітні			
KM1	ПММ-1/6 20 У3, ТУ У 31.2-25019584.008-2004	1	$U_{ном.МП} = 220 \text{ В}$
KM2	ПММ-1/6 20 У3, ТУ У 31.2-25019584.008-2004	1	$U_{ном.МП} = 220 \text{ В}$
KM3	ПММ-2/25 20 У3, ТУ У 31.2-25019584.008-2004	1	$U_{ном.МП} = 220 \text{ В}$
KM4	ПММ-1/9 20 У3, ТУ У 31.2-25019584.008-2004	1	$U_{ном.МП} = 220 \text{ В}$
KM8	ПММ-1/9 20 У3, ТУ У 31.2-25019584.008-2004	1	$U_{ном.МП} = 220 \text{ В}$
KM5	ПММ-5/125 20 У3, ТУ У 31.2-25019584.008-2004	1	$U_{ном.МП} = 220 \text{ В}$
KM6	ПММ-5/125 20 У3, ТУ У 31.2-25019584.008-2004	1	$U_{ном.МП} = 220 \text{ В}$
KM7	ПММ-5/125 20 У3, ТУ У 31.2-25019584.008-2004	1	$U_{ном.МП} = 220 \text{ В}$
KM9	ПММ-1/16 20 У3, ТУ У 31.2-25019584.008-2004	1	$U_{ном.МП} = 220 \text{ В}$
Реле теплові струмові			
KK1	РТ2М-25 (2,5-4) в 20 У3, ТУ У 31.2-25019584-011: 2005	1	$I_{нрт} = 25 \text{ А}$
KK2	РТ2М-25 (17-25) в 20 У3, ТУ У 31.2-25019584-011: 2005	1	$I_{нрт} = 25 \text{ А}$
KK3, KK5	РТ2М-25 (7-10) в 20 У3, ТУ У 31.2-25019584-011: 2005	2	$I_{нрт} = 25 \text{ А}$
KK4	РТ2М-200 (80-125) в 20 У3, ТУ У 31.2-25019584-011: 2005	1	$I_{нрт} = 200 \text{ А}$
KK6	РТ2М-25 (9-13) в 20 У3, ТУ У 31.2-25019584-011: 2005	1	$I_{нрт} = 25 \text{ А}$
Давачі рівня			
SL1-SL5	PCY100-230.1.2, ТУ 27.12.24-007-17114305-2019	5	$U_{ном} = 230 \text{ В}$
Клапани електромагнітні			
YA1	2W250-25, ДСТУ EN 55014-2:2015	1	$U_{ном} = 230 \text{ В}$

Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата
----	-------	---------	--------	------

21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ

Арк.

33

Продовження таблиці 1.9

Реле часу			
КТ1- КТ7	РМ Т 14 4 УЗ, ТУ 3425-001-17114305-2014	7	U <sub>НОМ</sub> = 230 В
КТ9- КТ11	РМ Т 14 4 УЗ, ТУ 3425-001-17114305-2014	3	U <sub>НОМ</sub> = 230 В
КТ8	РМ Т 14 3 УЗ, ТУ 3425-001-17114305-2014	1	U <sub>НОМ</sub> = 230 В
Реле проміжні			
KL1- KL8	ПЭ46-10-33УЗ, ТУ УЗ.11-14309600-060-96	8	U <sub>НОМ</sub> = 230 В
Кінцеві вимикачі			
SQ1	МЕ-8108, ДСТУ 7390:2013	1	U <sub>НОМ</sub> = 230 В
SQ2	МЕ-8108, ДСТУ 7390:2013	1	U <sub>НОМ</sub> = 230 В
Перемикач пакетний			
SA1, SA2	ПКП Е9 32А/10.833, ДСТУ ІЕС 60947-3	2	U <sub>НОМ</sub> = 230 В
Пост кноповий			
SB1	ПКЕ-222/3, ТУ 16.542.015-96	1	U <sub>НОМ</sub> = 690 В
SB2	ПКЕ-222/3, ТУ 16.542.015-96	1	U <sub>НОМ</sub> = 690 В
SB3	ПКЕ-222/2, ТУ 16.542.015-96	1	U <sub>НОМ</sub> = 690 В
SB4	ПКЕ-222/2, ТУ 16.542.015-96	1	U <sub>НОМ</sub> = 690 В
SB5	ПКЕ-222/2, ТУ 16.542.015-96	1	U <sub>НОМ</sub> = 690 В
SB6	ПКЕ-222/3, ТУ 16.542.015-96	1	U <sub>НОМ</sub> = 690 В
Арматура світлосигнальна			
HL1-HL9	AD22-22DS, ТУ 2001 АГИЕ.303652.001ТУ	9	U <sub>НОМ</sub> = 230 В
Сигналізація звукова			
HA1	EBL-1002, ТУ У 15.4-28359378-002:2007	1	U <sub>НОМ</sub> = 230 В
HA2	EBL-1002, ТУ У 15.4-28359378-002:2007	1	U <sub>НОМ</sub> = 230 В

1.5 Обґрунтування теми кваліфікаційної роботи, постановка мети і задач дослідження

Як показано у п.1.4 система керування і захисту електросилового обладнання технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу має певні недоліки,

які призводять до виникнення проблеми експлуатаційної надійності асинхронного двигуна дробарки вовчка. Розв'язати цю проблему на приватному підприємстві «Агропродукт» можна двома шляхами: удосконаленням системи керування технологічним процесом або удосконаленням системи захисту асинхронного двигуна приводу вовчка. Для удосконалення системи керування потрібно встановити у технологічну лінію додаткову робочу машину – дробарки м'яса. Потужність такої дробарки має бути 55 кВт, а її вартість складає близько 350000 грн. [22]. Такий підхід до розв'язання зазначеної проблеми є надто вартісним для цього підприємства через значні витрати коштів на придбання, встановлення, налагодження і експлуатацію вказаної робочої машини. Удосконалення системи захисту потребує розробки такого пристрою захисту, який би своєчасно відключав асинхронний двигун приводу вовчка при виникненні його перевантаження, не дозволяючи йому передчасно виходити з ладу. Витрати на реалізацію такого підходу набагато менші за попередній підхід, тому темою кваліфікаційної роботи обрано «Удосконалення системи захисту асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу».

Метою роботи є підвищення експлуатаційної надійності асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу. Для досягнення цієї мети потрібно розв'язати такі задачі:

1. Дослідити експлуатаційний режим роботи асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу в умовах перевантаження.
2. Розробити пристрій захисту асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу.

При розв'язанні вказаних задач об'єктом дослідження є процес теплового зношення ізоляції асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу, предметом дослідження є закономірності впливу коефіцієнту завантаження асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу на швидкість теплового зношення ізоляції електродвигуна.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		35

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИВОДУ ВОВЧКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА М'ЯСНОГО ФАРШУ В УМОВАХ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ

### 2.1 Програма і методика дослідження

Для розв'язання цієї задачі дослідження необхідно виконати наступну програму:

1. Обґрунтувати параметри експлуатаційного режиму роботи асинхронного двигуна приводу вовчка в умовах перевантаження.
2. Обґрунтувати еквівалентну теплову схему заміщення асинхронного двигуна приводу вовчка.
3. Дослідити втрати активної потужності асинхронного двигуна приводу вовчка у функції коефіцієнта завантаження.
4. Дослідити усталене перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції коефіцієнта завантаження.
5. Дослідити поточне перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції часу.
5. Дослідити швидкість теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції часу.

Обґрунтування параметрів експлуатаційного режиму роботи асинхронного двигуна приводу вовчка в умовах перевантаження виконуємо на підставі аналізу експлуатаційних впливів на вказаний асинхронний двигун при перемелюванні ним м'яса нижчих сортів (за наявності у м'ясі з туш твердих фракцій: жил, кісточок тощо) шляхом складання блок-схеми розвитку ушкоджень електродвигуна.

Обґрунтування еквівалентної теплової схеми заміщення асинхронного двигуна приводу вовчка виконуємо на підставі аналізу існуючих його теплових схем з точки зору експлуатаційних розрахунків теплових процесів у електродвигуні.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						36
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Дослідження втрат активної потужності асинхронного двигуна приводу вовчка у функції коефіцієнта завантаження виконуємо на базі його Г-подібної схеми заміщення шляхом складання рівняння енергетичного балансу.

Дослідження усталеного перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції коефіцієнта завантаження здійснюємо за допомогою еквівалентної теплової схеми заміщення електродвигуна шляхом визначення ступеню впливу втрат активної потужності у тілах схеми на нагрівання обмотки статора в усталеному режимі роботи.

Дослідження поточного перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції часу виконуємо через розв'язання рівнянь нагрівання і охолодження електродвигуна з урахуванням умов технологічного процесу і періодичності робочих періодів протягом робочої зміни.

Дослідження швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції часу здійснюємо через розв'язання експоненціальної залежності швидкості теплового зношення ізоляції від поточного перевищення її температури.

Більш детально методики досліджень наведені у відповідних пунктах другого розділу.

## 2.2 Обґрунтування параметрів експлуатаційного режиму роботи асинхронного двигуна приводу вовчка в умовах перевантаження

Згідно технологічного процесу при перемелюванні однієї порції м'яса електродвигун працює протягом 8 хвилин, після чого зупиняється. Робота електродвигуна починається з практично холодного стану, тобто перевищення температури його обмотки статора дорівнює нулю. Графік залежності коефіцієнта завантаження асинхронного двигуна приводу вовчка у часі за цей період для м'яса нижчого сорту наведений у талбл.2.1.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						37
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Залежність  $k_3 = f(t)$  при перемелюванні однієї порції м'яса

Номер ділянки	1	2	3	4	5
$k_3$	1,4	1,0	1,6	1,3	2,0
$t, c$	100	110	40	210	20

Після такої роботи електродвигун відключається на 7 хвилин до моменту надходження нової порції м'яса. За 1 годину відбувається 4 таких цикли (робота плюс пауза). За робочу зміну (8 годин) відповідно відбувається 32 таких цикли. Після 17 циклу (4 години 15 хвилин) відбувається обідня перерва, яка триває 1 годину. Після останнього періоду роботи електродвигун відключається та охолоджується до наступного робочого дня, тобто до практично холодного стану.

При перевантаженнях, вказаних у табл.2.1, теплове реле згідно [21] не спрацьовує і асинхронний двигун не відключається, продовжуючи перемелювати м'ясо. Внаслідок цього він піддається додатковому тепловому впливу у порівнянні з номінальним через збільшення понад номінальне значення сили струму, який він споживає.

Розглянемо детально механізм дії вказаних експлуатаційних впливів. При надходженні м'яса з туш у завантажувальний бункер вовчка його асинхронний двигун відразу вмикається і починає працювати, приводячи у рух механічну частину вовчка. Ця частина включає вал, редуктор, шнеки та різальний механізм.

Вал, обертаючись, передає рух через редуктор. Редуктор знижує швидкість обертання, збільшуючи момент, що забезпечує необхідну потужність для подрібнення м'яса. Шнек захоплює м'ясо з бункера та подає його до ножів, де відбувається подрібнення сировини.

Процес подрібнення створює значні навантаження на механічні компоненти, особливо якщо в м'ясі є кісточки або інші тверді частинки. Ці тверді включення викликають миттєві перевантаження шнека та ножів, збільшуючи опір руху.

В нормальних умовах асинхронний двигун працює стабільно, споживаючи номінальний струм. Однак, при попаданні твердих частинок в зону подрібнення, момент опору механізмів зростає, збільшуючи завантаження електродвигуна. Це викликає зниження частоти обертання валу асинхронного двигуна і підвищення його ковзання. Останнє обумовлює підвищення струму, який протікає через обмотки електродвигуна.

Збільшення струму призводить до підвищення втрат потужності у обмотках електродвигуна і збільшення кількості теплоти, яке виділяється у ньому. Це обумовлює зростання нагріву електродвигуна, тобто збільшення температури його обмоток. Кількість теплоти, що виділяється в обмотках, залежить як від значення втрат активної потужності в елементах його конструкції, так і від часу, протягом якого триває перевантаження. Якщо воно триває понад допустимий час, теплове реле має відключити двигун. Проте, іноді теплове реле не спрацьовує вчасно, особливо якщо двигун вже був попередньо нагрітий. Також на нагрівання електродвигуна впливає температура навколишнього середовища, збільшуючи або зменшуючи його тепловіддачу. Чим більша температура навколишнього середовища, тим менша кількість теплоти може потрапити туди від електродвигуна і навпаки.

Накопичення тепла у елементах конструкції асинхронного двигуна призводить до перегріву обмотки статора і збільшенню швидкості її теплового зношення, обумовлюючи погіршення властивостей ізоляції та підвищення ризику короткого замикання між витками обмотки.

Якщо перегрівання електродвигуна триває занадто довго, то ізоляція обмотки статора втрачає свої властивості, через що відбувається її пошкодження і вихід з ладу асинхронного двигуна [7, 8, 22].

Таким чином, блок-схема розвитку пошкодження асинхронного двигуна при перевантаженні має вигляд, наведений на аркуші 21ЕМД.11260458.02.25.210000.УП графічної частини роботи.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						39
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

На підставі цієї блок-схеми обираємо коефіцієнт завантаження асинхронного двигуна приводу вовчка і температуру навколишнього середовища як параметри експлуатаційного режиму для визначення закономірності їх впливу на швидкість теплового зношення ізоляції електродвигуна.

### 2.3 Обґрунтування еквівалентної теплової схеми заміщення асинхронного двигуна приводу вовчка

Як показано вище, при перевантаженні асинхронний двигун приводу вовчка перегрівається, внаслідок чого відбувається зростання швидкості теплового зношення його ізоляції, що обумовлює вихід з ладу електродвигуна. У процесі нагрівання асинхронного двигуна збільшується його температура, що призводить до зростання температури його обмотки статора. Більш точним параметром нагріву обмотки статора електродвигуна є перевищення її температури над температурою навколишнього середовища. Перевищення температури обмотки статора у певний момент часу визначається її ustalеним значенням і часом перевантаження. Для визначення ustalеного перевищення температури обмотки статора асинхронних двигунів застосовують їх еквівалентні теплові схеми заміщення, які відображають виділення у ньому теплоти, її перерозподіл всередині нього та відведення її у навколишнє середовище. Такі схеми можна розподілити на одноелементні, які містять у своєму складі одне джерело теплоти; двоелементні, які містять у своєму складі два джерела теплоти; триелементні, які містять у своєму складі три джерела теплоти; багатоелементні, які містять у своєму складі більше за три джерела теплоти. Усі елементи, які входять до складу відповідної теплової схеми, вважаються однорідними за складом, розподілом у них теплоти тощо. Вважається, що зі збільшенням кількості тіл у складі теплової схеми точність розрахунків, які виконують з її допомогою, збільшується. Проте на точність розрахунків також впливає достовірність

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						40
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

визначення параметрів, що характеризують тіла відповідної схеми: теплоємності, теплові провідності і втрати потужності, які впливають на встановлення усталеного перевищення температури обмотки статора електродвигуна над температурою навколишнього середовища [23]. Розглянемо означені вище еквівалентні теплові схеми заміщення асинхронного двигуна з точки зору можливості їх застосування, а також у розрізі зручності і достовірності визначення з їх допомогою усталеного перевищення температури обмотки статора електродвигуна над температурою навколишнього середовища.

Найбільш розповсюдженою є одноелементна еквівалентна теплова схема, яка наведена на рис. 2.1 [23]. У цій схемі передбачається, що весь електродвигун є єдиним тілом, у якому відбувається виділення теплоти. Ця теплота від нього віддається у навколишнє середовище, яке має нескінченну теплоємність ( $C_{\text{сер}} = \infty$ ) і постійну температуру ( $\vartheta_{\text{сер}} = \text{const}$ ).

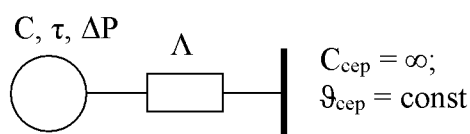


Рисунок 2.1 – Одноелементна еквівалентна теплова схема заміщення асинхронного двигуна

На схемі (рис.2.1) позначено:

$C$  – теплоємність електродвигуна, Дж/°С;

$\tau$  – перевищення температури обмотки статора електродвигуна над температурою навколишнього середовища, °С;

$\Delta P$  – втрати активної потужності у електродвигуні, Вт;

$\Lambda$  – теплопровідність між двигуном і навколишнім середовищем, Вт/°С;

$C_{\text{сер}}$  – теплоємність навколишнього середовища, Дж/°С;

$\vartheta_{\text{сер}}$  – температура навколишнього середовища, °С.

Диференційне рівняння, що описує одноелементну теплову модель, зображену на рис. 2.1, таке:

$$\Delta P dt = C d\tau + \Lambda \tau dt. \quad (2.1)$$

Вказане рівняння (2.1) свідчить про те, що для визначення усталеного перевищення температури обмотки статора електродвигуна над температурою навколишнього середовища достатньо знати паспортні дані електродвигуна (номінальні втрати потужності, еквівалентну теплоємність, номінальне перевищення температури обмотки статора), за значеннями яких можна визначити теплопровідність, а потім й усталене перевищення температури обмотки статора у функції коефіцієнта навантаження. Проте ця схема має обмежену точність через те, що зовсім не враховує нерівномірність розподілу тепла у електродвигуні.

Наступною еквівалентною тепловою схемою заміщення асинхронного двигуна, яку застосовують для аналізу його теплових процесів, є двоелементна, яка показана на рис. 2.2 [24]. У цій схемі електродвигун у тепловому відношенні розглянуто як два тіла: 1) обмотки статора і ротора; 2) сталь (вся інша частина електродвигуна). Тепло, що виділяється у обмотках, при проходженні через них струму, передається у сталь і навколишнє середовище. Тепло, що виділяється у сталі відається у навколишнє середовище.

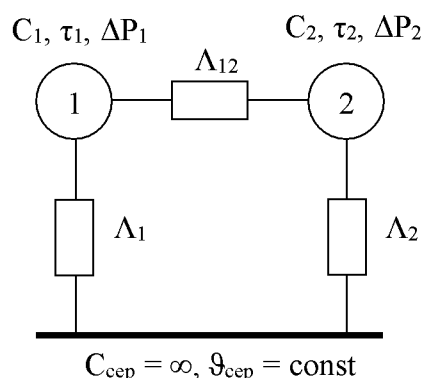


Рисунок 2.2 – Двоелементна еквівалентна теплова схема заміщення асинхронного двигуна

На схемі (рис. 2.2) позначено:

$C_1, C_2$  – теплоємності відповідних тіл електродвигуна, Дж/°С;

$\tau_1, \tau_2$  – перевищення температур відповідних тіл електродвигуна над температурою навколишнього середовища, °С;

$\Delta P_1, \Delta P_2$  – втрати активної потужності у відповідних тілах електродвигуна (або відповідно змінні і постійні втрати потужності у електродвигуні), Вт;

$\Lambda_{12}$  – теплопровідність між відповідними тілами електродвигуна, Вт/°С;

$\Lambda_1, \Lambda_2$  – теплопровідності між тілами і навколишнім середовищем, Вт/°С;

$C_{\text{сер}}$  – теплоємність навколишнього середовища, Дж/°С;

$\vartheta_{\text{сер}}$  – температура навколишнього середовища, °С.

Система рівнянь теплового балансу для схеми, зображеної на рисунку 2.2, виглядає так:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_1 dt &= C_1 d\tau_1 + \Lambda_1 \tau_1 dt + \Lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2) dt; \\ \Delta P_2 dt + \Lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2) dt &= C_2 d\tau_2 + \Lambda_2 \tau_2 dt. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Вказані рівняння (2.2) дозволили автору [24] отримати вираз усталеного перевищення температури обмотки статора у функції коефіцієнта навантаження і паспортних даних електродвигуна: номінального перевищення температури обмотки статора, коефіцієнта втрат потужності і температурного коефіцієнту опору матеріалу провідників обмотки статора. Такий підхід до розрахунку шуканого параметру теплового процесу доволі простий, але лише частково враховує розподіл теплоти в електродвигуні, що обумовлює певну неточність розрахунку, хоча й меншу у порівнянні з одноелементною тепловою схемою.

Більш детальною є еквівалентна теплова схема заміщення асинхронного двигуна, яка має три тіла (рис.2.3): 1) обмотки статора; 2) обмотки ротора; 3) сталь (до якої відноситься уся інша частина електродвигуна, яка не є обмотками) [25].

Виділення теплоти відбувається у обмотках статора і ротора, при проходженні через них струму, а також у сталі (магнітопроводі і підшипниках). Теплота від обмоток передається у сталь електродвигуна, звідки відбувається теплопередача у навколишнє середовище.

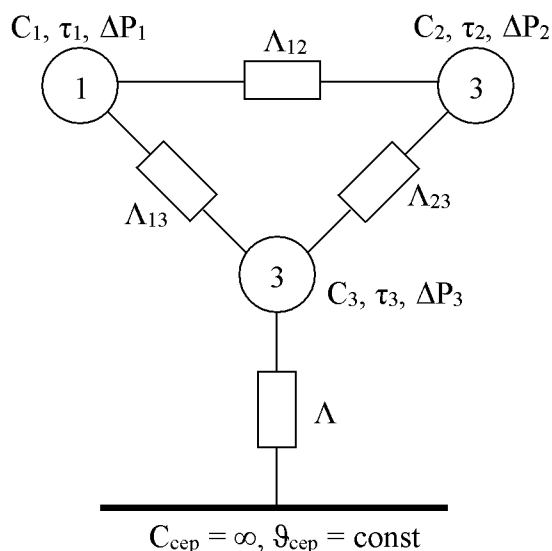


Рисунок 2.3 – Триелементна еквівалентна теплова схема заміщення асинхронного двигуна

На схемі (рис. 2.3) позначено:

$C_1, C_2, C_3$  – теплоємності відповідних тіл електродвигуна, Дж/°С;

$\tau_1, \tau_2, \tau_3$  – перевищення температур відповідних тіл електродвигуна над температурою навколишнього середовища, °С;

$\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$  – втрати активної потужності у відповідних тілах електродвигуна, Вт;

$\Lambda_{12}, \Lambda_{13}, \Lambda_{23}$  – теплопровідності між відповідними тілами електродвигуна, Вт/°С;

$\Lambda$  – теплопровідність між тілами і навколишнім середовищем, Вт/°С;

$C_{сер}$  – теплоємність навколишнього середовища, Дж/°С;

$\vartheta_{сер}$  – температура навколишнього середовища, °С.

Система рівняння теплового балансу для схеми, зображеної на рисунку 2.3 виглядає так:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_1 dt &= C_1 d\tau_1 + \Lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2)dt + \Lambda_{13}(\tau_1 - \tau_3)dt; \\ \Delta P_2 dt &= C_2 d\tau_2 - \Lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2)dt + \Lambda_{23}(\tau_2 - \tau_3)dt; \\ \Delta P_3 dt &= C_3 d\tau_3 + \Lambda_{\tau_3} dt - \Lambda_{13}(\tau_1 - \tau_3)dt - \Lambda_{23}(\tau_2 - \tau_3)dt. \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

За допомогою рівнянь (2.3) автором [25] отримана залежність усталеного перевищення температури обмотки статора у функції втрат потужностей у тілах схеми і коефіцієнтів впливу цих втрат на нагрівання обмотки статора. Такий підхід до розрахунку шуканого параметру теплового процесу більш складний у порівнянні з попередніми і точніше враховує розподіл теплоти в електродвигуні, але для визначення коефіцієнтів впливу втрат потужності на нагрівання обмотки статора потребує проведення дослідів холостого ходу і короткого замикання, що є проблематичними в експлуатаційних умовах.

Найбільш точною для розрахунків є шестиелементна теплова схема заміщення асинхронного двигуна, зображена на рис.2.4 [26]. Дана схема складається з таких тіл: 1) лобова частина обмотки статора; 2) пазова частина обмотки статора; 3) осердя статора; 4) внутрішнє повітря; 5) обмотка ротора; 6) корпус. Виділення теплоти відбувається у обмотках статора і ротора, при проходженні через них струму. З обмоток статора тепло передається до осердя статора, через пазову частину обмотки, та у внутрішнє повітря, через лобову частину обмотки статора. Обмотки ротора нагрівають ті ж частини двигуна, що і обмотки статора. До корпусу асинхронного двигуна тепло передається з осердя статора та внутрішнього повітря. З корпусу тепло віддається в навколишнє середовище.

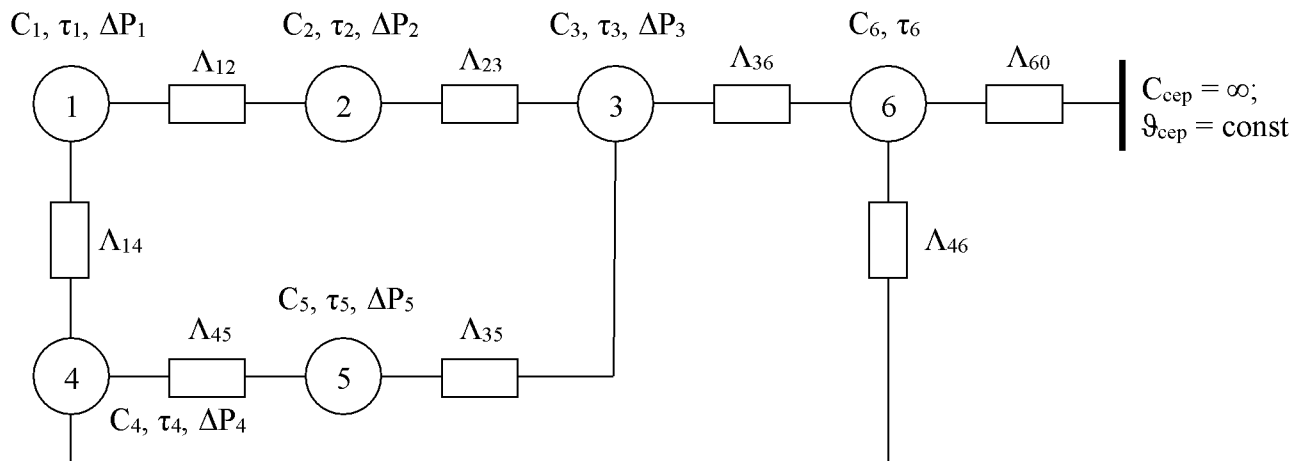


Рисунок 2.4 – Шестиеlementна еквівалентна теплова схема заміщення асинхронного двигуна

На схемі (рис. 2.4) позначено:

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  – теплоємності відповідних тіл електродвигуна, Дж/°С;

$\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6$  – перевищення температур відповідних тіл електродвигуна над температурою навколишнього середовища, °С;

$\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3, \Delta P_4, \Delta P_5, \Delta P_5$  – втрати активної потужності у відповідних тілах електродвигуна, Вт;

$\Lambda_{12}, \Lambda_{14}, \Lambda_{23}, \Lambda_{35}, \Lambda_{36}, \Lambda_{45}, \Lambda_{46}$  – теплопровідності між відповідними тілами електродвигуна, Вт/°С;

$\Lambda$  – теплопровідність між корпусом і навколишнім середовищем, Вт/°С;

$C_{сер}$  – теплоємність навколишнього середовища, Дж/°С;

$\theta_{сер}$  – температура навколишнього середовища, °С.

Втрати потужності, які виділяються у елементах схеми на рис.2.4, визначаються так. Втрати в обмотці статора розподіляються між тілами 1 і 2 пропорційно довжині пазової і лобової частин обмоток статора. Втрати потужності в осерді статора дорівнюють сумі основних втрат у сталі та половини додаткових втрат. Втрати потужності, які відносять до внутрішнього повітря, дорівнюють механічним втратам. Втрати потужності в обмотці ротора дорівнюють сумі електричних втрат в обмотці ротора і половині додаткових втрат.

Система рівняння теплового балансу для схеми, зображеної на рис.2.4, виглядає так:

$$\begin{cases}
 \Delta P_1 dt = C_1 d\tau_1 + (\Lambda_{12} + \Lambda_{14})\tau_1 dt - \Lambda_{12}\tau_2 dt - \Lambda_{14}\tau_4 dt; \\
 \Delta P_2 dt = C_2 d\tau_2 + (\Lambda_{12} + \Lambda_{23})\tau_2 dt - \Lambda_{12}\tau_1 dt - \Lambda_{23}\tau_3 dt; \\
 \Delta P_3 dt = C_3 d\tau_3 + (\Lambda_{23} + \Lambda_{35} + \Lambda_{36})\tau_3 dt - \Lambda_{23}\tau_2 dt - \Lambda_{35}\tau_5 dt - \Lambda_{36}\tau_6 dt; \\
 \Delta P_4 dt = C_4 d\tau_4 + (\Lambda_{14} + \Lambda_{45} + \Lambda_{46})\tau_4 dt - \Lambda_{14}\tau_1 dt - \Lambda_{45}\tau_5 dt - \Lambda_{46}\tau_6 dt; \\
 \Delta P_5 dt = C_5 d\tau_5 + (\Lambda_{45} + \Lambda_{35})\tau_5 dt - \Lambda_{45}\tau_4 dt - \Lambda_{35}\tau_3 dt; \\
 0 = C_6 d\tau_6 + (\Lambda_{36} + \Lambda_{46} + \Lambda_{60})\tau_6 dt - \Lambda_{36}\tau_3 dt - \Lambda_{46}\tau_4 dt.
 \end{cases} \quad (2.4)$$

Система рівнянь (2.4) показує, що для визначення усталеного перевищення температури обмотки статора потрібно розв'язати складну систему рівнянь. Крім того, для її розв'язання потрібно знати відповідні теплові провідності, які визначаються через певні конструктивні розміри електродвигуна. Така процедура є доволі складною і для подальших досліджень у роботі не є доцільною.

Еквівалентні теплові схеми заміщення асинхронного двигуна, до складу яких входить більша за шість кількість тіл, мають недоліки аналогічні попередній схемі. Тому для подальших досліджень у роботі обираємо триелементну теплову схему заміщення асинхронного двигуна, як найбільш доцільну з точки зору експлуатаційних розрахунків теплових процесів у електродвигуні приводу вовчка.

#### 2.4 Дослідження втрат активної потужності асинхронного двигуна приводу вовчка у функції коефіцієнта завантаження

З матеріалу п.2.3 щодо триелементної еквівалентної теплової схеми заміщення асинхронного двигуна випливає, що для визначення усталеного перевищення температури обмотки статора необхідно знати втрати активної потужності у тілах схеми: втрати у обмотці статора, втрати у обмотці ротора і

втрати у сталі (або постійні втрати активної потужності). Для дослідження того, як змінюються вказані втрати потужності в елементах схеми розглянемо Г-подібну схему заміщення асинхронного двигуна, яка наведена на рис.2.5 [24].

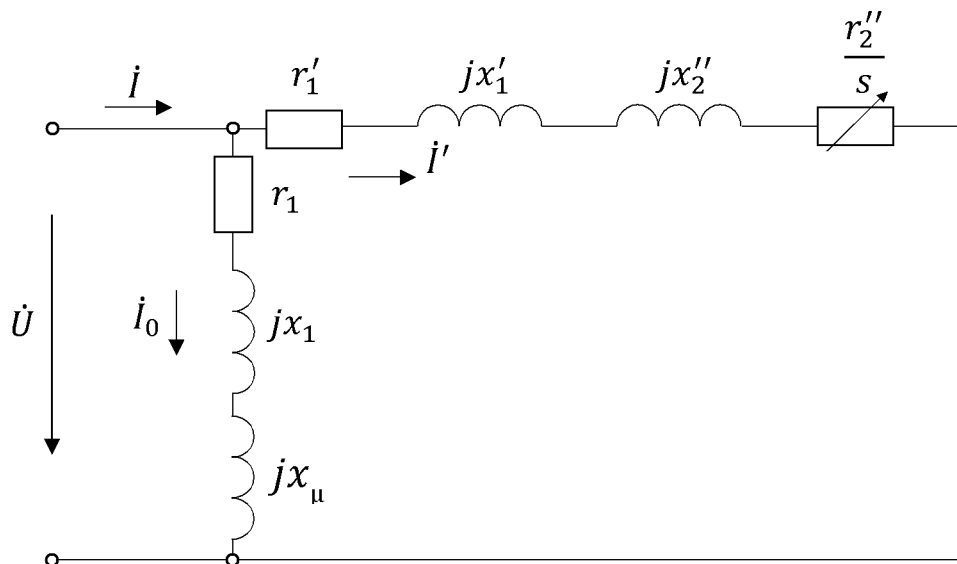


Рисунок 2.5 – Г-подібна схема заміщення асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором (для однієї фази)

На схемі (рис.2.5) позначено:

$\dot{U}$  – комплексне значення фазної напруги, В;

$\dot{i}$ ,  $\dot{i}'$ ,  $\dot{i}_0$  – комплексні значення струмів віток схеми, А;

$jx_1'$ ,  $jx_2''$ ,  $jx_1$ ,  $jx_u$  – реактивні опори схеми заміщення, Ом;

$r_1'$ ,  $r_2''$ ,  $r_1$  – активні опори схеми заміщення, Ом;

$s$  – ковзання асинхронного двигуна, в.о.

Запишемо рівняння втрат активної потужності у обмотці статора (у тілі 1 теплової схеми заміщення):

$$P_1 = 3r_1' I'^2 + 3r_1 I_0^2 . \quad (2.5)$$

Прийmemo, що асинхронний двигун приводу вовчка постійно працює за номінальної напруги  $U_H$  і запишемо рівняння діючих значень сил струмів у вітках Г-подібної схеми заміщення:

$$I' = \frac{U_H}{\sqrt{(r_1' + r_2''/s)^2 + (x_1' + x_2'')^2}}; \quad (2.6)$$

$$I_0 = \frac{U_H}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2}}. \quad (2.7)$$

Підставимо (2.6) і (2.7) у (2.5) і після перетворень отримаємо:

$$P_1 = 3U_H^2 \left( \frac{r_1'}{(r_1' + r_2''/s)^2 + (x_1' + x_2'')^2} + \frac{r_1}{r_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2} \right). \quad (2.8)$$

Запишемо рівняння втрат активної потужності у обмотці ротора (у тілі 2 теплової схеми заміщення):

$$P_2 = 3r_2''I'^2. \quad (2.9)$$

Підставимо (2.6) у (2.9) і після перетворень отримаємо:

$$P_2 = \frac{3r_2''U_H^2}{(r_1' + r_2''/s)^2 + (x_1' + x_2'')^2}. \quad (2.10)$$

Користуючись паспортними даними електродвигуна, запишемо рівняння втрат активної потужності у сталі (у тілі 3 теплової схеми заміщення):

$$P_3 = P_{\Sigma H} - (P_{1H} + P_{2H}), \quad (2.11)$$

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						49
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

де  $P_{\Sigma H}$  – сумарні номінальні втрати активної потужності, Вт,

$P_{1H}, P_{2H}$  – втрати активної потужності відповідно у обмотці статора і обмотці ротора за номінального завантаження, Вт.

У свою чергу, сумарні номінальні втрати активної потужності дорівнюють:

$$P_{\Sigma H} = P_H \left( \frac{1}{\eta_H} - 1 \right), \quad (2.12)$$

де  $P_H$  – номінальна потужність електродвигуна, Вт;

$\eta_H$  – номінальний к.к.д., в.о.

Підставимо (2.12) у (2.11) і отримаємо:

$$P_3 = P_H \left( \frac{1}{\eta_H} - 1 \right) - (P_{1H} + P_{2H}). \quad (2.13)$$

З викладеного випливає, що для визначення втрат активної потужності потрібно знати паспортні дані електродвигуна (номінальну напругу, номінальну потужність, номінальний к.к.д., параметри Г-подібної схеми заміщення) і його ковзання, яке залежить від завантаження електродвигуна.

Встановимо залежність між ковзанням  $s$  і коефіцієнтом завантаження  $k_3$  асинхронного двигуна приводу вовчка. Для цього запишемо момент на валу електродвигуна так [27]:

$$M = M_H \frac{s}{s_H}, \quad (2.14)$$

де  $M_H$  – номінальний момент електродвигуна, Н · м;

$s_H$  – номінальне ковзання асинхронного двигуна, в.о.

З іншого боку, момент опору механізмів вовчка дорівнює [24]:

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						50
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

$$M_c = M_0 + (M_{\text{оп.н}} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^x, \quad (2.15)$$

де  $M_0$  – момент пуску робочої машини, Н · м;

$M_{\text{оп.н}}$  – номінальний момент опору робочої машини за номінальної кутової швидкості електродвигуна, Н · м;

$\omega$  – кутова швидкість робочої машини, с<sup>-1</sup>;

$\omega_H$  – номінальна кутова швидкість робочої машини, с<sup>-1</sup>;

$x$  – коефіцієнт, що характеризує робочу машину, в.о.

Згідно [27] для механізму вовчка маємо:  $M_0 = 0,3M_H$ ;  $M_{\text{оп.н}} = k_3M_H$ ;  $x = 2$ .

Враховуючи це, а також те, що

$$\frac{\omega}{\omega_H} = \frac{1 - s}{1 - s_H}, \quad (2.16)$$

перепишемо рівняння моменту опору механізмів вовчка у такому вигляді:

$$M_c = 0,3M_H + (k_3M_H - 0,3M_H) \left( \frac{1 - s}{1 - s_H} \right)^2, \quad (2.17)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт завантаження електродвигуна, в.о.

В усталеному режимі роботи момент на валу асинхронного двигуна дорівнює моменту опору механізмів вовчка, тому дорівнюємо (2.14) і (2.17):

$$M_H \frac{s}{s_H} = 0,3M_H + (k_3M_H - 0,3M_H) \left( \frac{1 - s}{1 - s_H} \right)^2. \quad (2.18)$$

Перетворимо (2.18) у вигляді:

$$\frac{s_H(k_3 - 0,3)}{(1 - s_H)^2} s^2 - \left( \frac{2s_H(k_3 - 0,3)}{(1 - s_H)^2} + 1 \right) s + s_H \left( \frac{k_3 - 0,3}{(1 - s_H)^2} + 0,3 \right) = 0. \quad (2.19)$$

Розв'язавши (2.19) щодо ковзання, отримаємо:

$$s = \frac{-k_{2s} - \sqrt{k_{2s}^2 - 4k_{1s}k_{3s}}}{2k_{1s}}, \quad (2.20)$$

де

$$k_{1s} = \frac{s_H(k_3 - 0,3)}{(1 - s_H)^2}; \quad (2.21)$$

$$k_{2s} = -\frac{2s_H(k_3 - 0,3)}{(1 - s_H)^2} - 1; \quad (2.22)$$

$$k_{3s} = s_H \left( \frac{k_3 - 0,3}{(1 - s_H)^2} + 0,3 \right). \quad (2.23)$$

Таким чином, рівняння (2.8), (2.10), (2.13), (2.20) – (2.23) встановлюють залежності  $P_1 = f(k_3)$ ,  $P_2 = f(k_3)$ ,  $P_3 = f(k_3)$  і є математичною моделлю цих втрат.

Для дослідження вказаних залежностей запишемо згідно [29] необхідні паспортні дані асинхронного двигуна приводу вовчка у таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Паспортні дані асинхронного двигуна приводу вовчка

$U_H$ , В	$s_H$ , в.о.	$r'_1$ , Ом	$x'_1$ , Ом	$r''_2$ , Ом	$x''_2$ , Ом	$r_1$ , Ом	$x_1$ , Ом	$x_\mu$ , Ом
220	0,03	0,42	0,53	0,26	1,25	0,41	0,52	43,58

Задаємось коефіцієнтом завантаження електродвигуна у межах від 0 до 1,6 і виконуємо розрахунок у такій послідовності:

1) визначаємо ковзання за (2.20) – (2.23);

- 2) визначаємо втрати потужності  $P_1$  за (2.8);
- 3) визначаємо втрати потужності  $P_2$  за (2.10);
- 4) визначаємо втрати потужності  $P_3$  за (2.13).

Значення  $P_3$  є постійним і дорівнює 264,4 Вт. Результати розрахунку  $P_1 = f(k_3)$  і  $P_2 = f(k_3)$ , наведені на рис.2.6.

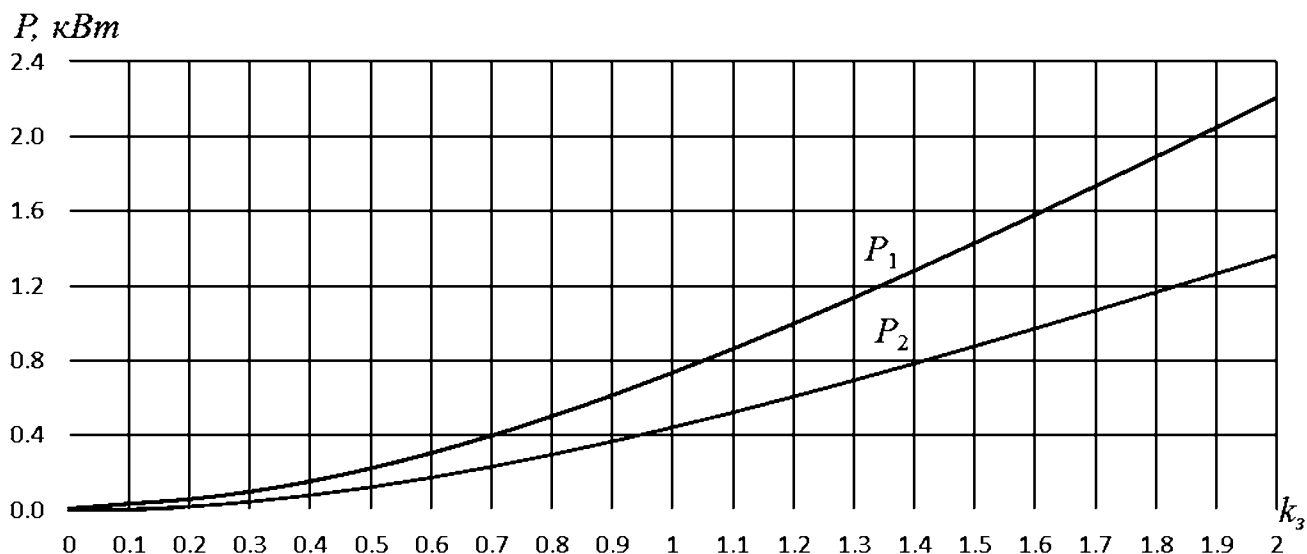


Рисунок 2.6 – Залежності втрат активної потужності у асинхронному двигуні приводу вовчка у функції коефіцієнта завантаження

З графіку (рис.2.6) видно, що зі збільшенням коефіцієнту завантаження асинхронного двигуна приводу вовчка втрати активної потужності у його обмотках зростають через підвищення струмів у обмотках. При цьому приріст втрат потужності у обмотках збільшується при зростанні коефіцієнта завантаження електродвигуна. На ділянці перевантаження такий приріст для обмотки статора становить від 128 Вт (при  $k_3 = 1,1$ ) до 159 Вт (при  $k_3 = 2$ ) і для обмотки ротора – від 80 Вт до 99 Вт при аналогічних завантаженнях.

## 2.5 Дослідження усталеного перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції коефіцієнта завантаження

Згідно [25] розв'язання системи рівнянь (2.3) щодо усталеного перевищення температури таке:

$$\tau_{1y} = a \cdot P_1 + b \cdot P_2 + c \cdot P_3 \quad (2.24)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти впливу втрат активної потужності у тілах триелементної еквівалентної теплової схеми заміщення на нагрівання обмотки статора, °С/Вт.

Вказані коефіцієнти є незмінними протягом експлуатації і відповідно [25] дорівнюють:

$$a = \frac{\tau_{1к} + \tau_{1х} - \tau_{1н}}{P_{1х}}; \quad (2.25)$$

$$b = \frac{\tau_{1к} - a \cdot P_{1н}}{P_{2н}}; \quad (2.26)$$

$$c = \frac{\tau_{1н} - \tau_{1к}}{P_{3н}}. \quad (2.27)$$

де  $\tau_{1х}$ ,  $\tau_{1н}$ ,  $\tau_{1к}$  – стале перевищення температури обмотки статора відповідно в досліді холостого ходу, номінального режиму роботи і в досліді короткого замикання, °С;

$P_{1х}$  – втрати активної потужності у тілі 1 у досліді холостого ходу, Вт;

$P_{1н}$ ,  $P_{2н}$ ,  $P_{3н}$  – втрати активної потужності у відповідних тілах при номінальному навантаженні, Вт.

У (2.25), (2.26), (2.27) входять перевищення температури обмотки статора і втрати активної потужності у тілах теплової схеми заміщення для холостого ходу,

номінального режиму роботи і досліду короткого замикання. Перевищення температури обмотки статора у номінальному режимі роботи наводиться у паспортних відомостях асинхронного двигуна приводу вовчка ( $\tau_{1n} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$  [24]). Номінальні значення втрат активної потужності визначено у п.2.4 ( $P_{1n} = 737,3 \text{ Вт}$ ,  $P_{2n} = 441,7 \text{ Вт}$ ,  $P_{3n} = 264,4 \text{ Вт}$ ). Для визначення інших даних потрібно виконувати досліди холостого ходу і короткого замикання у виробничих умовах, що є ускладненим через необхідність наявності на виробництві регулятора напруги і пристрою для загальмовування ротору. Крім того, загальмувати ротор асинхронного двигуна, встановленого у вовчку, майже неможливо. Тому запропонуємо методику визначення вказаних даних.

Усталене перевищення температури обмотки статора на холостому ході згідно (2.1) дорівнює:

$$\tau_{1x} = \frac{P_x}{\Lambda}, \quad (2.28)$$

де  $P_x$  – сума втрат активної потужності в електродвигуні при холостому ході, Вт.

Сумарні втрати активної потужності в електродвигуні при холостому ході складаються з втрат активної потужності у обмотці статора на холостому ході і номінальних втрат у сталі:

$$P_x = P_{1x} + P_{3n}. \quad (2.29)$$

Рівняння втрати активної потужності у обмотці статора на холостому ході за (2.8) таке:

$$P_{1x} = 3U_n^2 \left( \frac{r_1'}{(r_1' + r_2''/s_x)^2 + (x_1' + x_2'')^2} + \frac{r_1}{r_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2} \right), \quad (2.30)$$

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		55

де  $s_x$  – ковзання при  $k_3 = 0$ .

Усталене перевищення температури обмотки статора у номінальному режимі роботи згідно (2.1) дорівнює:

$$\tau_{1н} = \frac{P_{н}}{\Lambda}. \quad (2.31)$$

Поділивши (2.28) на (2.31) та перетворивши, отримаємо вираз усталеного перевищення температури обмотки статора на холостому ході:

$$\tau_{1х} = \tau_{1н} \frac{P_x}{P_{н}}. \quad (2.32)$$

Усталене перевищення температури обмотки статора у досліді короткого замикання згідно (2.1) дорівнює:

$$\tau_{1к} = \frac{P_k}{\Lambda}, \quad (2.33)$$

де  $P_k$  – сума втрат активної потужності в електродвигуні у досліді короткого замикання, Вт.

Сумарні втрати активної потужності в електродвигуні у досліді короткого замикання складаються з номінальних втрат активної потужності у статорі і роторі:

$$P_k = P_{1н} + P_{2н}. \quad (2.34)$$

Поділивши (2.28) на (2.33) та перетворивши, отримаємо вираз усталеного перевищення температури обмотки статора при короткому замиканні:

$$\tau_{1к} = \tau_{1н} \frac{P_k}{P_H}. \quad (2.35)$$

Втрати активної потужності у обмотці статора на холостому ході з  $P_1 = f(k_3)$  (рис.2.6):

$$P_{1х} = 10 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати активної потужності в електродвигуні при холостому ході за (2.29):

$$P_x = 10 + 264,4 = 274,4 \text{ Вт.}$$

Усталене перевищення температури обмотки статора на холостому ході за (2.32):

$$\tau_{1х} = 115 \frac{274,4}{1443,4} = 22 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Сумарні втрати активної потужності в електродвигуні у досліді короткого замикання за (2.34):

$$P_k = 737,3 + 441,7 = 1179 \text{ Вт.}$$

Усталене перевищення температури обмотки статора у досліді короткого замикання за (2.35):

$$\tau_{1к} = 115 \frac{1179}{1443,4} = 94 \text{ }^\circ\text{C.}$$

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						57
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Розрахуємо коефіцієнти впливу втрат активної потужності у тілах триелементної еквівалентної теплової схеми заміщення на нагрівання обмотки статора за (2.25) – (2.27):

$$a = \frac{94 + 22 - 115}{10} = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C/Вт};$$

$$b = \frac{94 - 0,1 \cdot 737,3}{441,7} = 0,045 \text{ } ^\circ\text{C/Вт};$$

$$c = \frac{115 - 94}{264,4} = 0,08 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}.$$

Знайдемо усталене перевищення температури обмотки статора при  $k_3 = 1$ , за (2.24):

$$\tau_{1y} = 0,1 \cdot 737,3 + 0,045 \cdot 441,7 + 0,08 \cdot 264,4 = 115 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отримане значення співпадає з паспортним, тому отримані рівняння (2.24) – (2.27), (2.29), (2.30), (2.32), (2.34), (2.35) є вірними і такими, що разом з (2.8), (2.10), (2.13), (2.20) – (2.23) встановлюють залежність  $\tau_{1y} = f(k_3)$  і є математичною моделлю усталеного перевищення температури.

З метою дослідження вказаної залежності для асинхронного двигуна приводу вовчка задаємось коефіцієнтом завантаження електродвигуна у межах від 0 до 2 і виконуємо розрахунок усталеного перевищення температури обмотки статора за (2.24). Значення втрат активної потужності у тілах еквівалентної теплової схеми заміщення електродвигуна беремо з п.2.4.

Результати розрахунку  $\tau_{1y} = f(k_3)$  наведені на рис.2.7.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						58
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

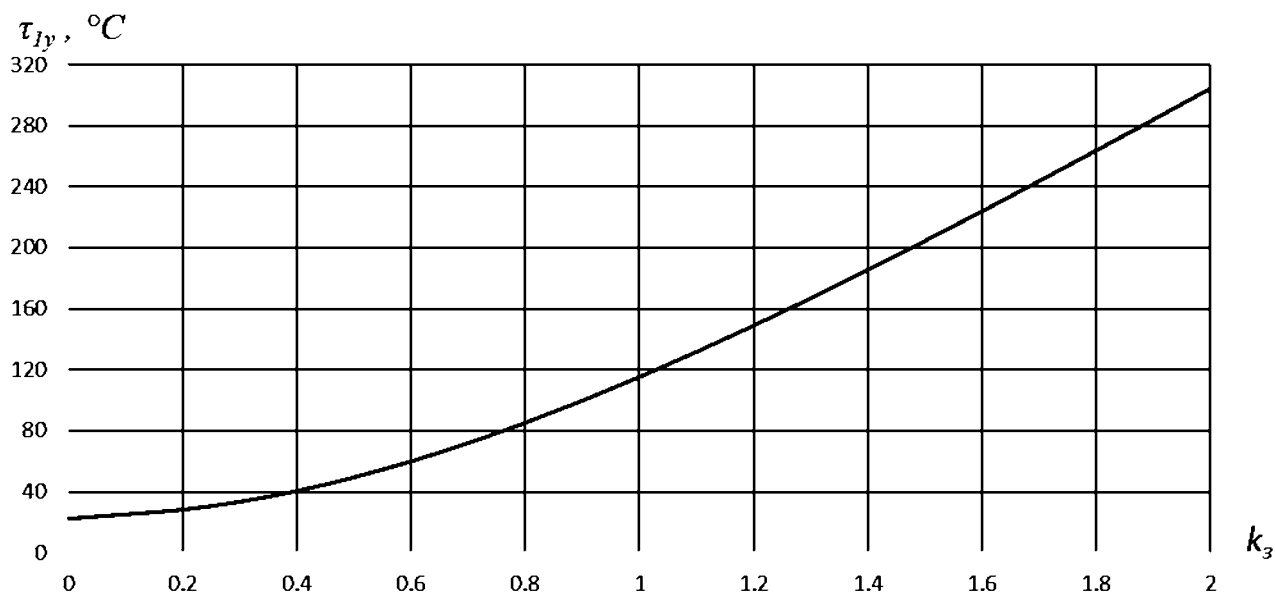


Рисунок 2.7 – Залежність усталеного перевищення температури обмотки статора у функції коефіцієнта завантаження

Із графіку (рис.2.7) видно, що зі збільшенням коефіцієнту завантаження асинхронного двигуна приводу вовчка усталене перевищення температури обмотки статора зростає внаслідок підвищення втрат активної потужності в обмотках електродвигуна. При цьому приріст усталеного перевищення температури обмотки статора збільшується при зростанні коефіцієнта завантаження електродвигуна, що обумовлене зростанням приросту втрат активної потужності у тілах електродвигуна. На ділянці перевантаження такий приріст становить від  $16,5^\circ C$  (при  $k_z = 1,1$ ) до  $20,4^\circ C$  (при  $k_z = 2$ ).

## 2.6 Дослідження поточного перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції часу

Згідно [28] поточне перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна при нагріванні описується таким рівнянням:

(2.36)

Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата

$$\tau_{1i} = \tau_{1yi} \left( 1 - e^{-\frac{t_i}{T_H}} \right) + \tau_{1\text{поч.}i} \cdot e^{-\frac{t_i}{T_H}},$$

де  $\tau_{1i}$  – поточне перевищення температури обмотки статора на  $i$ -й ділянці робочого циклу, °С;

$\tau_{1yi}$  – усталене перевищення температури обмотки статора на  $i$ -й ділянці робочого циклу, °С;

$\tau_{1\text{поч.}i}$  – початкове перевищення температури обмотки статора на  $i$ -й ділянці робочого циклу, °С;

$t_i$  – час роботи електродвигуна на  $i$ -й ділянці робочого циклу, с;

$T_H$  – постійна часу нагрівання електродвигуна, с.

Постійна часу нагрівання електродвигуна згідно [28]:

$$T_H = \frac{c \cdot m \cdot \tau_{1H}}{\Delta P_H}, \quad (2.37)$$

де  $c$  – еквівалентна питома теплоємність електродвигуна, Дж/(кг·°С);

$m$  – маса електродвигуна, кг.

Згідно [28] поточне перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна при охолодженні описується таким рівнянням:

$$\tau_{1i} = \tau_{1\text{поч.}i} \cdot e^{-\frac{t_i}{T_o}}, \quad (2.38)$$

де  $T_o$  – постійна часу охолодження електродвигуна, с.

Постійна часу охолодження електродвигуна згідно [24]:

$$T_o = 5 \cdot T_H. \quad (2.39)$$

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		60

Для асинхронного двигуна приводу вовчка маємо:  $c = 390 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ,  
 $m = 60,6 \text{ кг}$  [29]. Тоді

$$T_H = \frac{390 \cdot 60,6 \cdot 115}{1443,4} = 1883 \text{ с};$$

$$T_o = 5 \cdot 1883 = 9415 \text{ с}.$$

Таким чином, рівняння (2.8), (2.10), (2.13), (2.20) – (2.39) є математичною моделлю усталеного перевищення температури асинхронного двигуна приводу вовчка, на вході якої – коефіцієнт його завантаження. Результати розрахунків перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції часу за цією математичною моделлю для усіх робочих циклів наведені у додатку А до роботи. Результат розрахунку  $\tau_1 = f(t)$  для 16 циклу (середина робочої зміни) показаний на рис.2.8.

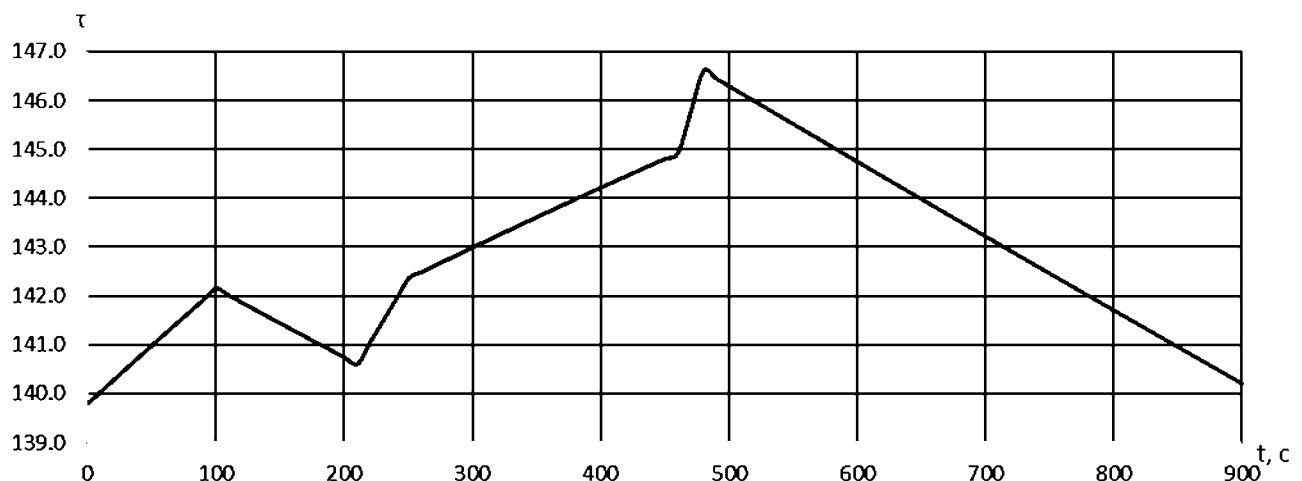


Рисунок 2.8 – Залежність поточного перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна у функції часу для 16 циклу роботи

З результатів розрахунку, наведених на рис.2.8, видно що перевищення температури на цьому циклі роботи асинхронного двигуна коливається у межах від  $139,8^\circ\text{C}$  до  $146,8^\circ\text{C}$ , що суттєво перевищує номінальне значення. Лінійність

зміни перевищення температури на ділянках цього графіку обумовлене тим, що час роботи електродвигуна на цих ділянках занадто малий у порівнянні з його постійною нагрівання, а час охолодження є замалим у порівнянні з його постійною охолодження.

З результатів розрахунків поточного перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна для всієї робочої зміни, які наведено у додатку А, впливає, що у першу годину роботи перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна не перевищує номінальне значення, але постійно зростає з  $10^{\circ}\text{C}$  до  $103^{\circ}\text{C}$ . На початку другої години роботи перевищення температури сягає номінального значення і продовжує збільшуватись кожного циклу. Приріст перевищення температури з кожним циклом зменшується, що обумовлене тепловим насиченням електродвигуна. Перед моментом настання обідньої перерви воно дорівнює  $147^{\circ}\text{C}$ , що на  $32^{\circ}\text{C}$  перевищує номінальне. За період обідньої перерви персоналу електродвигун встигає охолонути до перевищення температури  $105^{\circ}\text{C}$ , але з початком роботи воно знов поступово зростає і досягає номінального значення наприкінці першого пообіднього циклу роботи, а наприкінці робочого дня знов досягає  $147^{\circ}\text{C}$ .

## 2.7 Дослідження швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка у функції коефіцієнта завантаження

Нагрівостійкість ізоляції асинхронного двигуна приводу вовчка визначається швидкістю протікання у ній хімічних реакцій при роботі електродвигуна. Якщо враховувати вплив на строк служби ізоляції обмотки статора тільки температури, то можна записати вираз швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна на  $i$ -й ділянці робочого циклу [24]:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_H e^{B\left(\frac{1}{\theta_H} - \frac{1}{\theta_i}\right)}, \quad (2.40)$$

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк. 62
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

де  $\varepsilon_n$  – номінальна швидкість теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна, баз.год/год;

$B$  – коефіцієнт, що характеризує ізоляцію, К;

$\Theta_i$  – поточна абсолютна температура обмотки статора, К;

$\Theta_n$  – номінальна абсолютна усталена температура обмотки статора, К.

Згідно [24] для асинхронного двигуна приводу вовчка:  $\varepsilon_n = 1$  баз.год/год;  
 $B = 12700$  К;  $\Theta_n = 428$  К.

Поточна абсолютна температура обмотки статора дорівнює:

$$\Theta_i = \tau_{1i} + \vartheta_{\text{сер.}i} + 273, \quad (2.41)$$

де  $\vartheta_{\text{сер.}i}$  – температура навколишнього середовища, °С.

Після підстановки вказаних значень і (2.41) у (2.40), отримаємо:

$$\varepsilon_i = 1 \cdot \exp \left( 12700 \left( \frac{1}{428} - \frac{1}{\tau_{1i} + \vartheta_{\text{сер.}i} + 273} \right) \right). \quad (2.42)$$

Вказане рівняння встановлює залежність швидкості теплового зношення обмотки статора від усталеного перевищення температури та температури навколишнього середовища.

Таким чином, математична модель швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка має вигляд, наведений на аркуші 21ЕМД.11260458.02.25.220000.УП графічної частини роботи.

Задаємось коефіцієнтом завантаження електродвигуна від 0 до 2, температурою навколишнього середовища 10 °С, 20 °С, 30 °С, 40 °С і визначаємо швидкість теплового зношення ізоляції асинхронного двигуна приводу вовчка протягом робочого дня, користуючись вказаною математичною моделлю.

Результати розрахунків швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна у функції часу для усіх робочих циклів наведені у додатку Б до роботи. Результат розрахунку  $\varepsilon = f(t)$  для 16 циклу (середина робочої зміни) показаний на рис.2.9.

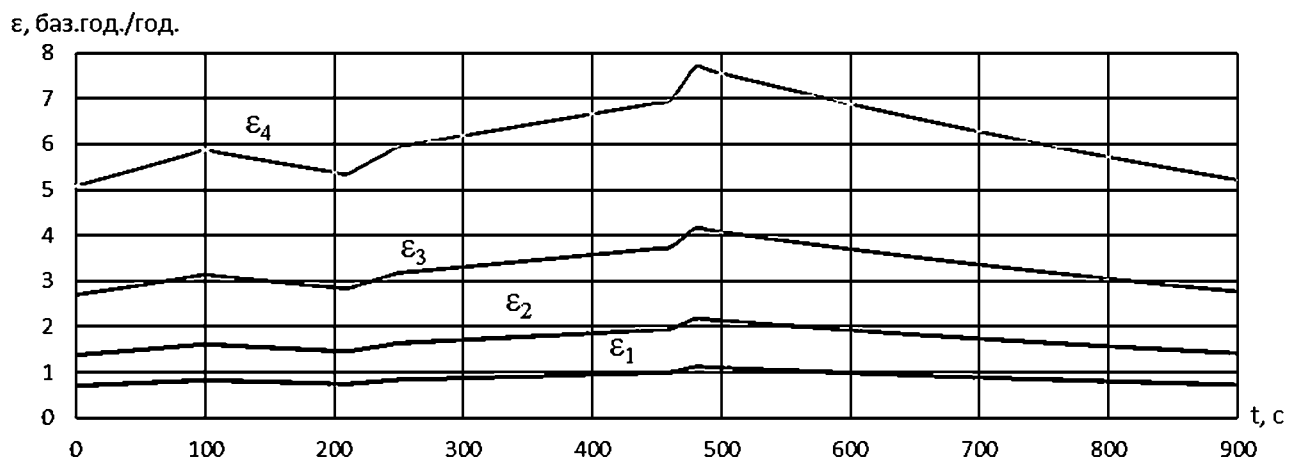


Рисунок 2.9 – Залежність швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна у функції часу для 16 циклу роботи

На рис.2.9 позначено:  $\varepsilon_1$  – залежність  $\varepsilon = f(t)$  за  $\vartheta_{\text{сер.}} = 10^\circ\text{C}$ ;  $\varepsilon_2$  – залежність  $\varepsilon = f(t)$  за  $\vartheta_{\text{сер.}} = 20^\circ\text{C}$ ;  $\varepsilon_3$  – залежність  $\varepsilon = f(t)$  за  $\vartheta_{\text{сер.}} = 30^\circ\text{C}$ ;  $\varepsilon_4$  – залежність  $\varepsilon = f(t)$  за  $\vartheta_{\text{сер.}} = 40^\circ\text{C}$ .

З результатів розрахунків, наведених на рисунку 2.9, видно, що значний вплив на швидкість зношення ізоляції обмотки статора має температура навколишнього середовища.

Швидкість теплового зношення ізоляції за температури навколишнього середовища  $10^\circ\text{C}$  перевищує номінальне значення тільки при великих перевантаженнях. Максимальне зношення досягає 1,11, а середнє значення за цикл роботи дорівнює приблизно 0,85 базових годин за годину.

Зі збільшенням температури навколишнього середовища охолодження обмотки стає недостатнім. Так, при температурі  $20^\circ\text{C}$  швидкість теплового

зношення коливається від 1,39 до 2,19 баз.год./год.; при 30°С – від 2,69 до 4,16 баз.год./год.; при 40°С – від 5 до 7,7 баз.год./год.

З результатів розрахунків швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора, наведених у додатку Б, можна побачити, що за температури навколишнього середовища 10°С перевищення швидкості зношення ізоляції є прийнятним, і складає 1,18 базових годин за годину. За температури навколишнього середовища 20°С швидкість зношення досягає 2 баз.год./год., що є неприпустимим значенням, за дві з половиною години роботи, наприкінці 17 циклу роботи зношення дорівнює 2,2 базові години за годину. Після обідньої перерви значення зношення досягає 2,2 приблизно за той самий час, а до кінця робочого дня максимальне зношення дорівнює 2,3 баз.год./год. Зі збільшенням температури навколишнього середовища тривалість роботи з нормальною швидкістю зношення ізоляції стає все менше. При температурі 30°С швидкість теплового зношення ізоляції перевищує значення у 2 баз.год./год. вже за дві години роботи, і на кінець 9 циклу дорівнює 2,3 баз.год./год., а на кінець 17 циклу роботи, перед обідньою перервою, – 4,25 баз.год./год. Після перерви двигун трохи остигає, що дає йому пропрацювати з прийнятним зношенням ізоляції ще приблизно одну годину, після чого поступово зростає до кінця робочого дня, коли дорівнює 4,36 баз.год./год. За температури навколишнього середовища 40°С охолодження обмотки статора електродвигуна є зовсім недостатнім, і вже на кінець 7 циклу роботи швидкість зношення ізоляції дорівнює 2,7 баз.год./год. При такому режимі роботи наприкінці 17 циклу зношення дорівнює 7,8, через одну годину після обідньої перерви – 3,7, а під кінець дня, 32 циклу роботи, – 8 базових годин за годину роботи.

Значне перевищення номінального значення теплового зношення ізоляції обмотки статора призводить до швидкої втрати її діелектричних властивостей, що в свою чергу викликає виткові замикання, збільшення протікаючого струму по

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк. 65
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

обмотках і ще більше перегрівання. Тому приймаємо, що значення швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка, після якого настають різкі незворотні хімічні процеси у ізоляції, що призводять до її швидкого руйнування і виходу електродвигуна з ладу, дорівнює 2 баз.год./год.

## 2.8 Висновки по розділу 2

За результатами дослідження, проведеного у другому розділі, можна зробити такі висновки:

1. Переробка м'яса нижчого сорту призводить до перевантажень асинхронного двигуна приводу вовчка, його підвищеному нагріву і прискоренню теплового зношення його ізоляції.

2. Діагностичним параметром експлуатаційного режиму роботи приводного електродвигуна є швидкість теплового зношення його ізоляції, яка є функцією коефіцієнта завантаження і часу роботи.

3. Для контролю усталених теплових процесів в асинхронному двигуні найбільш раціональною з точки зору експлуатаційних розрахунків є еквівалентна теплова схема заміщення, у якій електродвигун розглядається як система трьох тіл: обмотка статора, обмотка ротора і сталь.

4. У режимі перевантаження асинхронного двигуна приводу вовчка втрати активної потужності у його обмотках зростають, при цьому приріст їх зростання становить у середньому 3 Вт на кожний 1 % перевантаження.

5. Приріст зростання втрат активної потужності у обмотках приводного електродвигуна призводить до приросту зростання усталеного перевищення температури його обмотки статора у середньому на 4°C на кожні 10 % перевантаження.

6. Функціонування асинхронного двигуна приводу вовчка у повторно-короткочасному режимі роботи з перевантаженнями призводить до того, що

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		66

протягом 8 годин робочої зміни поточне перевищення температури його обмотки статора перевищує номінальне значення, неодноразово сягаючи свого найбільшого значення за зміну у 147°C.

7. Робота приводного електродвигуна зі збільшеним перевищенням температури його обмотки статора обумовлює зростання швидкості теплового зношення ізоляції понад номінальне значення за температур навколишнього середовища від 20°C і вище: при температурі 20°C вона коливається від 1,39 до 2,19 баз.год./год., при 30°C – від 2,69 до 4,16 баз.год./год., при 40°C – від 5 до 7,7 баз.год./год.

8. Як граничне значення швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка, після якого настають різкі незворотні хімічні процеси у ізоляції, що призводять до її швидкого руйнування і виходу електродвигуна з ладу, прийнято 2 баз.год./год.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						67
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

### 3 РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИВОДУ ВОВЧКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА М'ЯСНОГО ФАРШУ

#### 3.1 Вимоги до пристрою захисту

При дослідженнях, проведених у другому розділі, встановлено, що теплове реле, яке має захищати асинхронний двигун приводу вовчка, не спрацьовує. Внаслідок цього відбувається прискорення теплового зношення ізоляції цього електродвигуна. Тому у роботі було прийнято рішення про заміну теплового реле на пристрій захисту, який необхідно розробити.

Суть роботи цього пристрою полягає у реалізації математичної моделі швидкості теплового зношення ізоляції, наведеної на листі 21ЕМД.11260458.02.25.220000.УП графічної частини роботи. Для цього у нього мають уводитись фізичні величини, які характеризують конструкцію і номінальний режим роботи електродвигуна; він має вимірювати змінні фізичні величини, які характеризують режим роботи асинхронного двигуна; він має робити розрахунки поточних значень швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка після чого сигналізувати про збільшення нагрівання електродвигуна та відключати при недопустимому його нагріванні.

Значення фізичних величин, що мають уводитись у пристрій і бути незмінними:

- реактивні опори схеми заміщення ( $x'_1, x''_2, x_1, x_\mu$ ), Ом;
- активні опори схеми заміщення ( $r'_1, r''_2, r_1$ ), Ом;
- втрати активної потужності у сталі ( $P_3$ ), Вт;
- номінальний струм електродвигуна ( $I_H$ ), А;
- номінальне ковзання асинхронного двигуна ( $s_H$ ), в.о;

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						68
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

- коефіцієнти впливу втрат активної потужності у тілах триелементної еквівалентної теплової схеми заміщення на нагрівання обмотки статора ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ), °C/Вт;
- постійна часу нагрівання електродвигуна ( $T_H$ ), с;
- постійна часу охолодження електродвигуна ( $T_O$ ), с;
- номінальна швидкість теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна ( $\varepsilon_H$ ), баз.год/год;
- коефіцієнт, що характеризує ізоляцію ( $B$ ), К;
- номінальна абсолютна усталена температура обмотки статора ( $\theta_H$ ), К.

Цей пристрій захисту має вимірювати такі фізичні величини:

- 1) сили струмів у фазах електродвигуна ( $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ), А;
- 2) час роботи електродвигуна ( $t$ ), с;
- 3) поточне значення температури навколишнього середовища ( $\vartheta_{сер}$ ), °C.

Сили струмів у фазах електродвигуна мають вимірюватись за допомогою первинних вимірювальних перетворювачів, якими є інтегральні первинні вимірювальні перетворювачі струму. Вони включаються у коло фаз живлення асинхронного електродвигуна.

Час роботи електродвигуна має контролюватись за допомогою таймера мікроконтролера, який включається одночасно з електродвигуном.

Поточне значення температури навколишнього середовища має вимірюватись за допомогою первинного вимірювального перетворювача, яким є цифровий термометр. Він встановлюється у корпусі вовчка.

За вимірними значеннями сил струмів має визначатись середньоквадратичне значення сили струму:

$$I = \frac{\sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}}{3}. \quad (3.1)$$

Потім за знайденим середньоквадратичним значенням сили струму має визначатись коефіцієнт завантаження електродвигуна:

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		69

$$k_3 = \frac{I}{I_H} \quad (3.2)$$

Далі розрахунки мають здійснюватися згідно математичної моделі швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка, яка наведена на 21ЕМД.11260458.02.25.220000.УП. При розрахунку поточного перевищення температури ізоляції обмотки статора у якості початкового перевищення температури обирається  $0^\circ\text{C}$  (якщо електродвигун запускається вперше) і попередньо розрахована температура (якщо електродвигун працює). Розрахунки мають здійснюватися за допомогою мікроконтролера.

Якщо у результаті розрахунку швидкість теплового зношення ізоляції буде знаходитися у межах  $1,5 \leq \varepsilon < 2$ , то має подаватись світлова сигналізація про аномальність теплового стану електродвигуна. Якщо у результаті розрахунку швидкість теплового зношення ізоляції  $\varepsilon \geq 2$ , то електродвигун має відключатись за допомогою реле, контакт якого включається у коло керування електродвигуном, і має подаватись світлова і звукова сигналізація. Повторне включення двигуна має проводитись при значенні швидкості теплового зношення ізоляції  $\varepsilon \leq 1$ .

Пристрій має встановлюватись у шафі керування, до якої підключається асинхронний двигун приводу вовчка.

### 3.2 Розробка принципової електричної схеми системи захисту вовчка і структурної електричної схеми пристрою захисту

Принципова електрична схема системи керування і захисту вовчка, у якій встановлено пристрій захисту, що розробляється, наведена на 21ЕМД.11260458.02.25.310000.ЭЗ графічної частини роботи.

Система працює наступним чином. Вмикання автоматичного вимикача SF2 дає живлення мікроконтролерному пристрою захисту А1 і звуковій НАЗ та світловій HL10 сигналізації.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						70
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Давачі Холла В1, В2, В3 встановлені усередині пристрою на струмопровідних пластинах, до яких підключаються фазні провідники живлення електродвигуна М2.

Реле К1 пристрою захисту отримує живлення за припустимого значення швидкості теплового зношення ізоляції обмоток електродвигуна М2, розрахованого пристроєм А1. Нормально замкнений контакт реле К1.1 пристрою розмикається, перериваючи живлення сигналізації. Нормально відкритий контакт К1.2 замикається, що дозволяє запустити електродвигун тільки при ввімкненому пристрої захисту. За критичного значення швидкості теплового зношення ізоляції обмоток електродвигуна М2, реле К1 втрачає живлення. Нормально замкнений контакт К1.1 замикається, запускаючи звукову НАЗ та світлову НЛ10 сигналізацію відключення електродвигуна. Нормально відкритий контакт реле К1.2 пристрою розмикається, що призводить до розімкнення контакту КМ3 і зупинки електродвигуна М2.

Перелік матеріалів і обладнання для підключення пристрою захисту наведений у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Перелік матеріалів і обладнання для підключення пристрою захисту

Поз. позн.	Найменування	Кіл.	Примітки
	Вимикач автоматичний		
SF1	AB2000/1-C10 230/400-У3, ТУ У 31.2-25019584-001: 2006	1	$I_{нрт} = 10 \text{ А}$
	Сигналізація звукова		
НАЗ	EBL-1002, ТУ У 15.4-28359378-002:2007	1	$U_{ном} = 230 \text{ В}$
	Арматура світлосигнальна		
НЛ10	AD22-22DS, ТУ 2001 АГИЕ.303652.001ТУ	1	$U_{ном} = 230 \text{ В}$

Схема електрична структурна пристрою захисту наведена на 21ЕМД.11260458.02.25.320000.Э1. На ній показано, що він складається з шести

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк. 71
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

блоків: блоку живлення; блоку вимірювання струму; блоку вимірювання температури навколишнього середовища; мікроконтролера; блоку сигналізації; блоку реле.

Блок живлення підключається до мережі і забезпечує необхідною напругою всі елементи пристрою.

Блок вимірювання струму вимірює силу струму у фазах живлення асинхронного електродвигуна і у вигляді аналогового сигналу передає дані до мікроконтролера.

Блок вимірювання температури навколишнього середовища вимірює температуру усередині корпусу вовчка і у вигляді цифрового сигналу передає дані до мікроконтролера.

Мікроконтролер проводить розрахунки швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного електродвигуна вовчка в реальному часі з урахуванням змінних показників, що поступають до нього з вимірювальних блоків, і постійних величин, що записані на постійному запам'ятовувачі мікроконтролера. Після розрахунків, він порівнює результати з закладеними величинами, в залежності від чого керує роботою сигналізації і електродвигуна за допомогою виконавчих блоків.

Блок сигналізації, що контролюється мікроконтролером, інформує оператора вовчка про перевищення швидкості теплового зношення ізоляції у півтори рази від номінального.

Блок реле, що контролюється мікроконтролером, відключає асинхронний електродвигун вовчка та вмикає звукову і світлову сигналізацією про відключення двигуна при перевищенні теплового зношення ізоляції у два рази від номінального значення.

### 3.3 Розробка принципової електричної схеми пристрою захисту

Принципова електрична схема пристрою захисту наведена на 21ЕМД.11260458.02.25.330000.ЭЗ.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						72
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Пристрій захисту необхідно підключити до мережі живлення 230 В.

Трансформатор напруги Т1 знижує напругу до 12 В. Вторинна обмотка трансформатора Т1 підключена до діодів VD1-VD4, що утворюють діодний міст для випрямлення змінного струму.

Випрямлений струм поступає на вхід стабілізатора DA1, який стабілізує постійний струм і видає на виході 12 В постійної напруги. DA2 приймає на вхід 12 В, а на виході видає стабілізовані 5 В постійної напруги. Світлодіоди VD5 і VD6 сигналізують про наявність 12 і 5 В напруги у схемі відповідно.

Стабілізована напруга 5 В від блоку живлення подається до давачів струму, давача температури та мікроконтролера.

Давачі струму DA3-DA5 вимірюють струм, що протікає по фазним проводам живлення асинхронного електродвигуна, який захищає пристрій. Виміряні значення, у вигляді аналогового сигналу, передаються до АЦП мікроконтролера.

Давач температури DD1 вимірює температуру навколишнього середовища у корпусі вовчка. Виміряні значення, у вигляді цифрового сигналу, передаються до мікроконтролера. Резистор R1 вмикається між плюсом живлення і лінією даних давача температури, і призначений для підтягування лінії даних до логічної одиниці.

Мікроконтролер DD2 отримує дані від вимірювальних приладів і записані дані з постійного запам'ятовувача мікроконтролера та виконує розрахунки згідно математичної моделі швидкості теплового зношення ізоляції, наведеної на 21ЕМД.11260458.02.25.220000.УП. Мікроконтролер DD2 розпочинає розрахунки і запускає лічильник вбудованого таймера за першого пуску двигуна. В результаті розрахунків подаються сигнали на бази біполярних транзисторів VT1 і VT2.

Коли мікроконтролер отримує живлення, відкривається транзистор VT2 і котушка реле К1 отримує живлення. Розмикається контакт К1.1, розриваючи коло керування світловою та звуковою сигналізацією, і замикається контакт К1.2, включений у коло керування асинхронним двигуном, що дозволяє запустити електродвигун тільки при ввімкненому пристрої.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		73

Якщо в результаті розрахунків мікроконтролер отримує значення швидкості теплового зношення ізоляції  $\varepsilon \geq 1,5$ , то відкривається транзистор VT1, що забезпечує живлення від 12 вольт світлодіода VD7, який сигналізує про аномальність теплового стану електродвигуна.

Якщо в результаті розрахунків мікроконтролер отримує значення швидкості теплового зношення ізоляції  $\varepsilon \geq 2$ , то закривається транзистор VT2 з витримкою часу у 5 секунд після пуску двигуна. При закриванні транзистора VT2 котушка реле K1 втрачає живлення, що замикає контакт K1.1, замикаючи коло керування світловою та звуковою сигналізацією відключення асинхронного двигуна, і розмикає контакт K1.2, що відключає електродвигун. Транзистор VT2 залишається закритим, поки в результаті розрахунків мікроконтролер не отримає значення зношення ізоляції  $\varepsilon \leq 1$ .

Конденсатор C18 призначений для зрушення якоря реле з місця. Діод VD8 призначений для замикання струму котушки індуктивності при закриванні транзистора VT2. Резистор R8 призначений для обмеження струму котушки K1 та розрядки конденсатора при закриванні транзистора VT2.

Конденсатори C1-C17 і дросель L1 призначені для фільтрації імпульсів або шумів. Резистори R2-R7 призначені для обмеження струму.

Таблиця 3.2 – Перелік матеріалів і обладнання для принципової електричної схеми пристрою захисту

Поз. позн.	Найменування	Кіл.	Примітки
	Трансформатор		
T1	ТПШ-20-220-50	1	$U_2=12$ В
	Діоди випрямні		
VD1-VD4	1N5817	4	$U_{ном} = 20$ В
VD8	1N5817	1	$U_{ном} = 20$ В

Продовження таблиці 3.2

Світлодіоди			
VD5	L-7104GD-12V	1	$U_{ном} = 12 \text{ В}$
VD6	L-7113GD-5V	1	$U_{ном} = 5 \text{ В}$
VD7	L-7113ID-12V	1	$U_{ном} = 12 \text{ В}$
Конденсатори			
C1	JRC1E102M05001000210000B	1	$C=1000 \text{ мкФ}$
C2,C4	GRM155R71E104KE14D	2	$C=0,1 \text{ мкФ}$
C3	JRK1E101M03500800070000B	1	$C=100 \text{ мкФ}$
C5,C8,C11	GRM155R71E103KA01D	3	$C=0,01 \text{ мкФ}$
C6,C9,C12	GRM155R61E105KA12D	3	$C=1 \text{ мкФ}$
C7, C10	GRM21BR71E334K	2	$C=0,33 \text{ мкФ}$
C13	GRM21BR71E334K	1	$C=0,33 \text{ мкФ}$
C14	JRK1E470M02500630070000B	1	$C=47 \text{ мкФ}$
C15-C17	GRM155R71E104KE14D	3	$C=0,1 \text{ мкФ}$
C18	JRK1E100M01500400070000B	1	$C=10 \text{ мкФ}$
Резистори			
R1	CF-100	1	$R=4,7 \text{ кОм}$
R2-R4	CF-100	3	$R=0,750 \text{ кОм}$
R5- R7	CF-100	3	$R=10 \text{ кОм}$
R8	CF-100	1	$R=0,510 \text{ кОм}$
Дросель			
L1	CM453232-121KL	1	$L=120 \text{ мкГн}$
Транзистори			
VT1-VT2	C945	2	$I_c=0,1 \text{ А}$
Стабілізатори			
DA1	IC L7812	1	$U_{ст}=12 \text{ В}$
DA2	IC L7805	1	$U_{ст}=5 \text{ В}$
Давач температури повітря			
DD1	DS18B20	1	$U_{ном} = 3,0-5,5 \text{ В}$

Продовження таблиці 3.2

	Давачі струму		
DA3-DA5	CSA-1 VG	3	U <sub>ном</sub> = 4,5-5,5 В
	Мікроконтролер		
DD2	ATmega328P-AU	1	U <sub>ном</sub> = 2,7-5,5 В
	Електромагнітне реле		
K1	HF33F-012-Z3	1	U <sub>ном</sub> = 12 В

3.4 Техніка безпека при експлуатації пристрою захисту

При монтажі, налагодженні і експлуатації пристрою захисту необхідно дотримуватись діючих Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), Правил техніки безпеки (ПТБ), Правил технічної експлуатації (ПТЕ), Правил безпечної експлуатації електроустановок (ПБЕЕ), Будівельних норм і правил (БНіП), Державних будівельних норм (ДБН), інструкцій підприємства тощо.

Будь-які роботи з пристроєм захисту повинні виконувати тільки працівники, які пройшли спеціалізовані навчання та мають відповідні кваліфікаційні посвідчення, пройшли вступний, повторний і цільовий інструктажі з електробезпеки та виробничих інструкцій, отримали групу з електробезпеки не нижче III, допущені до роботи наказом керівника підприємства. На ПП «Агропродукт» такими працівниками є електрики, які входять до штату підприємства.

Перед початком робіт відповідальний за електрогосподарство, який має мінімум IV групу допуску, оформлює наряд-допуск, в якому затверджено перелік робіт і робітники, відповідальні за безпечне їх проведення. На ПП «Агропродукт» відповідальною особою є інженер-енергетик підприємства.

До початку робіт з пристроєм захисту працівники мають спорядити засоби індивідуального захисту, а саме: робочий костюм, каску, діелектричні рукавички, захисні окуляри, діелектричний килимок, а також підготувати інструменти з

ізолюваними ручками, комплект переносних заземлень та потрібні плакати безпеки. Усі роботи мають проводити не менше двох працівників.

Перед початком монтажу керівник робіт, що суміщує допускача, наглядача і працівника, що готує робоче місце, має:

1. Вимкнути живлення всього обладнання, яке знаходиться в зоні проведення робіт, відключаючи силовий автоматичний вимикач QF1 і комутаційний автоматичний вимикач SF1. Щоб перешкодити їх помилковому вмиканню – від'єднати кінці проводів від комутаційних апаратів.

2. Вивісити на вказаних автоматичних вимикачах попереджувальні плакати «Не вмикати! Працюють люди».

3. Перевірити відсутність напруги на всіх струмопровідних частинах за допомогою будь-якого сертифікованого покажчика напруги.

4. Встановити переносне заземлення на струмопровідні частини, що можуть опинитись під напругою.

5. Провести цільовий інструктаж, пояснивши особливості роботи пристрою захисту, його схему підключення та потенційні небезпеки на робочому місці, другому члену бригади, що буде виконувати монтаж обладнання.

6. Провести допуск робітника із підписом у наряді і журналі допуску.

Перед монтажем пристрою необхідно здійснити візуальний огляд для виявлення можливих дефектів, що могли виникнути під час транспортування. Потрібно перевірити наявність слідів ударів, тріщин, подряпин на корпусі, цілісність світлодіодів сигналізації роботи пристрою та зовнішніх під'єднувальних блоків – давача температури і світлової сигналізації.

Під час монтажу потрібно від'єднати теплове реле КК2 і замість нього встановити пристрій захисту. Для цього надійно закріпити у шафі мікроконтролерний пристрій захисту асинхронного двигуна від перевантажень, відповідно до плану виконання робіт і підключити його, дотримуючись схеми підключення.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						77
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Апарат захисту треба розташовувати в доступних для обслуговування місцях таким чином, щоб унеможливити його механічне пошкодження. При цьому установлювати апарат треба так, щоб під час його обслуговування було усунуто небезпеку для обслуговуючого персоналу та можливість пошкодження оточуючих предметів.

Після закінчення підключення пристрою всі заходи безпеки треба провести у зворотному порядку: зняти переносне заземлення і плакати, ввімкнути напругу, перевірити наявність напруги [30].

Під час експлуатації пристрою захисту треба регулярно проводити огляд на наявність механічних пошкоджень чи будь-яких інших аномалій, перевіряти правильність роботи пристрою захисту. При цьому персонал має дотримуватись таких заходів безпеки:

1. Особи, які працюють із пристроєм, повинні пройти інструктаж з техніки безпеки, знати правила надання першої медичної допомоги при ураженні електричним струмом та вміти їх практично застосовувати, а також знати правила пожежогасіння і вміти користуватися засобами пожежогасіння.

2. Під час регулювання та ремонту пристрою можна використовувати місцеве освітлення. Як джерело можуть використовуватись переносні лампи напругою не більше 36 В, які повинні бути захищені скляними або сітчастими ковпаками. Використовувати саморобні переносні лампи заборонено.

3. Всі інструменти для технічного обслуговування повинні мати ручки з ізоляційного матеріалу.

4. Заміна перегорілих або несправних частин пристрою захисту виконується тільки при вимкненій напрузі. Усі частини, які замінюються, повинні відповідати номіналам.

5. Під час роботи з пристроєм заборонено вставляти або виймати блоки з корпусу при увімкненій напрузі живлення, підключати та відключати з'єднувальні проводи при наявності сигналу на виході пристрою, а також виконувати паяння при увімкненому джерелі живлення.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		78

6. Профілактичний огляд, чищення та ремонт пристрою виконуються тільки після повного його вимкнення. Забороняється знімати корпус з пристрою, що працює.

### 3.5 Техніко-економічні показники впровадження пристрою захисту

Через відсутність контролю якості м'яса і можливості видалення з нього твердих фракцій, при надходженні сировини до вовчка виникає велике перевантаження, що в свою чергу призводить до перегріву і швидкого зношення ізоляції обмоток електродвигуна. Внаслідок цього асинхронний двигун виходить з ладу 1 раз на 2 роки, що має значний вплив на прибуток підприємства, через витрати на відновлення електродвигуна і призупинення виробництва.

Найбільш економічно ефективним рішенням цієї проблеми було обрано – удосконалення системи захисту асинхронного двигуна від перевантажень, шляхом розрахунку швидкості теплового зношення ізоляції обмоток і порівняння цього значення з базовим.

Розроблений пристрій має вимикати електродвигун приводу вовчка на нетривалий час при перевищенні швидкості зношення ізоляції у 2 рази від номінального, що забезпечить охолодження електродвигуна і запобігатиме значному пришвидшенню перегріву його обмоток. Так як швидкість теплового зношення ізоляції обмоток електродвигуна не буде перевищувати номінальне значення більше ніж у 2 рази, регулярність виходу асинхронного двигуна з ладу через зношення ізоляції обмоток зменшиться до не більше ніж 1 разу на 10 років [31].

Відповідно до [32], середня вартість ліквідації наслідків відмови електродвигуна:

$$C_{\text{відм}} = \Gamma_{\text{дм}} + \Gamma_{\text{кр}} + \Gamma_{\text{пн}}, \quad (3.3)$$

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						79
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

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

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

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

Грошові витрати, вказані у (3.3) можна виразити як частину вартості нового електродвигуна:

$$\Gamma_{\text{дм}} = 0,025 \cdot V_{\text{дв}}; \quad (3.4)$$

$$\Gamma_{\text{кр}} = 0,5 \cdot V_{\text{дв}}; \quad (3.5)$$

$$\Gamma_{\text{пн}} = 0,1 \cdot V_{\text{дв}}; \quad (3.6)$$

де  $V_{\text{дв}}$  – вартість нового електродвигуна, грн.

Підставивши (3.4-3.6) у (3.3) отримаємо:

$$C_{\text{відм}} = 0,625 \cdot V_{\text{дв}}. \quad (3.7)$$

Приблизна вартість двигуна АИР132М2 дорівнює 12 000 гривень. Тоді:

$$C_{\text{відм}} = 0,625 \cdot 12000 = 7500 \text{ грн.}$$

Таблиця 3.3 – Вартість деталей пристрою

Поз. позн.	Найменування	Кіл.	Вартість, грн./шт.
	Трансформатор		
T1	ТПШ-20-220-50	1	450

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк. 80
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Продовження таблиці 3.3

		Діоди випрямні	
VD1-VD4	1N5817	4	20
VD8	1N5817	1	20
		Світлодіоди	
VD5	L-7104GD-12V	1	4
VD6	L-7113GD-5V	1	5
VD7	L-7113ID-12V	1	4
		Конденсатори	
C1	JRC1E102M05001000210000B	1	10
C2,C4	GRM155R71E104KE14D	2	1
C3	JRK1E101M03500800070000B	1	8
C5,C8,C11	GRM155R71E103KA01D	3	1
C6,C9,C12	GRM155R61E105KA12D	3	1
C7, C10	GRM21BR71E334K	2	8
C13	GRM21BR71E334K	1	8
C14	JRK1E470M02500630070000B	1	5
C15-C17	GRM155R71E104KE14D	3	1
C18	JRK1E100M01500400070000B	1	6
		Резистори	
R1	CF-100	1	3
R2-R4	CF-100	3	3
R5- R7	CF-100	3	3
R8	CF-100	1	3
		Дросель	
L1	CM453232-121KL	1	30
		Транзистори	
VT1-VT2	C945	2	3
		Стабілізатори	
DA1	IC L7812	1	15

Продовження таблиці 3.3

DA2	IC L7805	1	15
	Давач температури повітря		
DD1	DS18B20	1	70
	Давачі струму		
DA3-DA5	CSA-1 VG	3	300
	Мікроконтролер		
DD2	ATmega328P-AU	1	100
	Електромагнітне реле		
K1	HF33F-012-Z3	1	65

Додаткові капіталовкладення у пристрій можна порахувати як:

$$K = V_{\text{комп}} + V_p + V_m + V_{\text{то}}, \quad (3.8)$$

де  $V_{\text{комп}}$  – вартість складових компонентів, з яких виготовляється пристрій, що наведені у табл.3.3, грн.;

$V_p$  – вартість роботи, що включає витрати на виготовлення, програмування мікроконтролера, монтаж та налагодження пристрою, не більше 0,4 собівартості пристрою, грн.;

$V_m$  – вартість додаткових матеріалів, що включають витрати на корпус пристрою, кабелі, пристрої захисту та комутації, грн.;

$V_{\text{то}}$  – вартість технічного обслуговування, не більше 0,05 собівартості пристрою на рік, грн.

Сума вартості компонентів, з яких складається пристрій, наведених у таблиці 3.3, дорівнює  $V_{\text{комп}} = 1900$  грн.

Вартість роботи з пристроєм приймаємо як:

$$V_p = 0,4 \cdot V_{\text{комп}}, \quad (3.9)$$

$$B_p = 0,4 \cdot 1900 = 760 \text{ грн.}$$

Вартість додаткових матеріалів прийmemo як вартість апаратів, необхідних для підключення пристрою до схеми керування електродвигуном (автоматичний вимикач, проміжне реле, світло-звукова сигналізація), що дорівнює  $B_m = 400$  грн.

Вартість технічного обслуговування, що витрачається за рік, прийmemo як:

$$B_{\text{то}} = 0,05 \cdot B_{\text{комп}}, \quad (3.10)$$

$$B_{\text{то}} = 0,05 \cdot 1900 = 95 \text{ грн./рік.}$$

Підставляючи отримані значення у (3.8) отримаємо:

$$K = 1900 + 760 + 400 + 95 = 3155 \text{ грн.}$$

Із введенням пристрою частота відмов електродвигуна приводу вовчка має зменшитись мінімум у 5 разів, тобто не статись жодного разу за гарантований термін роботи електродвигуна.

Тоді економічний ефект за рік, без врахування втрат прибутку від простою лінії, від введення пристрою буде:

$$E = \frac{C_{\text{відм}}}{N_0}, \quad (3.11)$$

де  $N_0$  – кількість років до відмови електродвигуна, через вихід з ладу обмоток, до введення пристрою захисту, рік;

Тоді:

$$E = \frac{7500}{2} = 3750 \text{ грн.}$$

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						83
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Термін окупності пристрою можна розрахувати так:

$$T_o = \frac{K}{E}, \quad (3.12)$$

Тоді:

$$T_o = \frac{3155}{3750} = 0,85 \text{ року.}$$

Таблиця 3.4 – Техніко-економічні показники

Показники	Варіант	
	базовий	проектний
Додаткові капіталовкладення, грн.	-	3455
Кількість відмов асинхронного двигуна протягом гарантованого терміну експлуатації, шт.	5	-
Витрати на відновлення асинхронного двигуна у розрахунку на один рік експлуатації, грн.	3750	-
Річний економічний ефект від зниження витрат на відновлення асинхронного двигуна, грн.	-	3750
Термін окупності пристрою захисту, рік	-	0,85

Впровадження мікроконтролерного пристрою захисту дозволяє зменшити втрати підприємства на відновлення асинхронного двигуна приводу вовчка за

рахунок відсутності виходів з ладу обмоток електродвигуна через їх недопустимий нагрів протягом гарантованого терміну роботи.

Економічний ефект від введення пристрою в експлуатацію полягає у збереженні витрат, яких потребувало відновлення електродвигуна, що дорівнює 3750 грн. на 1 рік.

Термін окупності пристрою невеликий і становить 0,85 року, оскільки вартість пристрою менша за потенційні втрати від виходу двигуна з ладу і дорівнює 3155 грн.

### 3.6 Висновки по розділу 3

Виконані дослідження та розробка пристрою захисту асинхронного двигуна приводу вовчка технологічної лінії виробництва м'ясного фаршу дозволили зробити такі висновки:

1. У процесі роботи вовчка спостерігались перевантаження асинхронного двигуна, що призводило до його перегрівання та прискореного зносу ізоляції обмоток. Це спричиняло часті виходи двигуна з ладу, зростання експлуатаційних витрат і простої виробничої лінії. Тому були встановлені вимоги до пристрою захисту, які б забезпечили надійний захист електродвигуна.

2. Запропонований пристрій здійснює моніторинг споживаного струму і температури навколишнього середовища, у режимі реального часу проводить розрахунки за допомогою мікроконтролера за математичною моделлю швидкості теплового зношення ізоляції та відключає електродвигун у разі досягнення нею недопустимого значення. Його впровадження дозволяє зменшити частоту виходу двигуна з ладу до нуля протягом 10 років експлуатації.

3. Завдяки впровадженню пристрою захисту витрати на відновлення одного електродвигуна щорічно зменшуються на 3750 грн. Загальна вартість пристрою – 3155 грн., що дає термін окупності додаткових капітальних вкладень у розмірі 0,85 року.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						85
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що технологія виробництва м'ясного фаршу, яка використовується на ПП «Агропродукт», не дозволяє контролювати якість м'яса, яке надходить у вовчок, і позбавляється твердих фракцій (жил, дрібних кісточок тощо) з цього м'яса, що обумовлює періодичне перевантаження приводного електродвигуна і вихід його з ладу кожні два роки через теплове зношення ізоляції.

2. Обґрунтовано, що теплове реле, яке є головним елементом існуючої системи захисту асинхронного двигуна приводу вовчка від перевантажень, не забезпечує його надійний захист через те, що не враховує початковий стан електродвигуна, теплова модель теплового реле не відповідає тепловій моделі електродвигуна, температурна компенсація реле має великий розкид спрацьовування.

3. Розроблено математичну модель швидкості теплового зношення ізоляції електродвигуна приводу вовчка, яка враховує коефіцієнт завантаження електродвигуна і температуру навколишнього середовища та на відміну від існуючих ґрунтується на його еквівалентній триелементній тепловій схемі заміщення.

4. Дослідження, проведені за моделлю швидкості теплового зношення ізоляції електродвигуна приводу вовчка, показали, що при перемелюванні вовчком м'яса нижчого гатунку протягом 8 годин робочої зміни поточне перевищення температури обмотки статора приводного електродвигуна більшість робочого часу перевищує номінальне значення, неодноразово сягаючи свого найбільшого значення за зміну у 147 °С, що обумовлює збільшення швидкості теплового зношення ізоляції до 1,4...7,7 баз.год./год. в залежності від температури навколишнього середовища.

5. Розроблено пристрій захисту асинхронного двигуна приводу вовчка, що здійснює моніторинг споживаного струму і температури навколишнього середовища, у режимі реального часу проводить розрахунки за допомогою

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						86
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

мікроконтролера за математичною моделлю швидкості теплового зношення ізоляції та відключає електродвигун у разі досягнення нею значення у 2 баз.год./год., який відрізняється від існуючих тим, що враховує температуру навколишнього середовища і попередній тепловий стан електродвигуна.

6. Впровадження розробленого пристрою захисту обумовлює відсутність відмов електродвигуна приводу вовчка внаслідок перевантажень протягом гарантованого терміну служби і дозволяє отримати ПП «Агропродукт» щорічно додатковий прибуток у розмірі 3750 грн. на один електродвигун. Термін окупності додаткових капітальних вкладень становить 0,85 року.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
						87
Зм	Аркш	№ докум	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Vovk O., Kvitka S., Halko S., Strebkov O. Energy-Saving Control of Asynchronous Electric Motors for Driving Working Machines. Modern Development Paths of Agricultural Production. Trends and Innovations. Cham: Springer International Publishing, 2019. P.415-423. DOI: 10.1007/978-3-030-14918-5\_43
2. Вовк О.Ю. Проблема експлуатаційної надійності асинхронних двигунів. Розвиток наук в умовах нової реальності: проблеми та перспективи: збірник наукових праць з матеріалами II Міжнародної наукової конференції, м. Київ, 3 травня, 2024 р. / Міжнародний центр наукових досліджень. Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп, 2024. С.115-121.
3. Tareq M.A. Al-Quraan, Oleksandr Vovk, Serhii Halko, Serhii Kvitka, Olena Suprun, Oleksandr Miroshnyk, Vitalii Nitsenko, Nurul Mohammad Zayed and K.M. Anwarul Islam. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. Inventions, 7(4), 2022, p.92. doi: 10.3390/inventions7040092
4. Квітка С.О., Вовк О.Ю., Волошина А.А., Стребков О.А. Розробка системи забезпечення ресурсоенергозберігаючого експлуатаційного режиму роботи асинхронного електродвигуна // Енергетика і автоматика. 2016. № 4(30). С.89-97.
5. Янчева М.О., Дроменко О.Б., Большакова В.А., Онищенко В.М. Технології зберігання, консервування та переробляння м'яса. Ч. 2. Технології виробництва м'ясних продуктів (у схемах і таблицях) : навч. посібник. Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х., 2018. 105 с.
6. Технологія м'яса та м'ясних продуктів : підручник / М. М. Клименко, Л. Г. Віннікова, І. Г. Береза та ін.; За ред. М. М. Клименка. К.: Вища освіта, 2006. 640 с.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркул	№ докум	Підпис	Дата		88

7. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості : підручник / В. Г. Мирончук, І. С. Гулий, М. М. Пушанко та ін. ; за ред. В. Г. Мирончука. Вінниця : Нова книга, 2007. 648 с.
8. Інноваційне обладнання м'ясопереробних виробництв : підручник / О. М. Чепелюк, О. М. Гавва, І. Г. Бабанов та ін. Київ ; Сталь, 2021. 805 с.
9. Каталог електродвигунів АІР. URL : [https://xn--80aqy.com.ua/uk/katalog\\_elektrovyguniv\\_air/](https://xn--80aqy.com.ua/uk/katalog_elektrovyguniv_air/) (дата звернення: 02.11.2024).
10. Назарян Г.Н., Федюшко Ю.М., Сотник О.В., Ковальов О.В. Технічні характеристики та якісні показники електричних двигунів. Довідниковий посібник. Х: ТОВ «Планета-прінт», 2016. 201 с.
11. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Харків : Форт, 2017. 760 с.
12. Василега П.О. Електропривод робочих машин : підручник. Суми : Сумський державний університет, 2022. 290 с.
13. Автоматичні вимикачі. URL : <https://220-v.com.ua/elektrotekhnichne-obladnannia-ta-komplektuiuchi> (дата звернення: 02.11.2024).
14. Козлов В. Д., Соломаха М. І. Електричні апарати. Модуль 2. Комутаційні апарати низької та середньої напруги : посібник. К.: НАУ, 2006. 84 с.
15. Теплові реле. URL : <https://www.technokabel.com.ua/13082-rele-teplovoe-rt2m.html> (дата звернення: 08.11.2024).
16. Магнітні пускачі. URL : <https://www.technokabel.com.ua/13074-puskateli-magnitnie-serii-pmm.html> (дата звернення: 08.11.2024).
17. Матвійчук В.А., Рубаненко О.Є., Гунько І.О. Діагностування електрообладнання : навчальний посібник. Вінниця : ВНАУ, 2020. 138 с.
18. Чорний О.П., Зачепа Ю.В., Титюк В.К., Чорна О.А. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів : навчальний посібник. Кременчук : ЧП Щербатых А. В., 2019. 122 с.
19. Купін А.І., Кузнєцов Д.І. Інформаційна технологія для групової діагностики асинхронних електродвигунів на основі спектральних характеристик

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцил	№ докум	Підпис	Дата		89

та інтелектуальної класифікації. Кривий Ріг : Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2016. 200 с.

20. Губаревич О.В. Надійність і діагностика електрообладнання : підручник. Сєверодонецьк : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. 248 с.

21. Бурштинський М.В., Копчак Л.С., Хай М.В. Апарати захисту та керування в електричних установках низької напруги : навч. посіб. Львів : Львівська політехніка, 2008. 184с.

22. Гвоздєв О. В., Ялпачик Ф.Ю., Рогач Ю.П., Кюрчева Л.М Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва : навч. посібник. Суми : Довкілля, 2004. 420 с.

23. Вовк О.Ю., Квітка С.О., Яковлєв В.Ф. Аналітичне порівняння методів визначення усталеного перевищення температури обмоток статора асинхронного електродвигуна. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія "Механізація та автоматизація виробничих процесів". Суми : СНАУ, 2011. №8(23). С.114-116.

24. Овчаров С.В. Ресурсоенергосберегающие эксплуатационные режимы силового электрооборудования. К.: Видавництво ТОВ "Аграр Медіа Груп", 2012. 293 с.

25. Вовк О.Ю. Сталий процес нагрівання асинхронного електродвигуна. Праці ТДАТА. 2002. Вип.5. С.62-66.

26. Квітка С.О., Вовк О.Ю., Квітка О.С. Математична модель теплового стану асинхронного електродвигуна у нестационарних режимах. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Вип.175. Харків : ХНТУСГ, 2016. С.140-142.

27. Розрахунок механічної характеристики асинхронного двигуна за наявності в ній мінімального моменту / Бакуменко В.Б., Тарасова В. В., Ручка О. О., Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Тарасов К. С. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. Харків: ХНАДУ, 2019. Вип.15. С. 17-27.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцил	№ докум	Підпис	Дата		90

28. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній / Є.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко та ін.; За ред. Є.Л. Жулая. К. : Вища освіта. 2001. 288 с.

29. Кравчик А.Э., Шлаф М.М, Авонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А : Справочник. М. : Энергоиздат, 1982. 504 с.

30. НПАОП 40.1-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок.

31. Черевко Г.В., Горбонос Ф.В., Іваницька Г.Б., Павленчик Н.Ф. Економіка підприємств : навч. посіб. /; за заг. ред. Г. В.Черевка. Львів : Апріорі, 2004. 384 с.

32. Вовк О.Ю., Квітка С.О., Квітка О.С. Оцінка економічної ефективності періодичного діагностування асинхронних електродвигунів. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, Вип.175 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». 2016. С.125-127.

					21ЕМД.11260458.02.25.000000ПЗ	Арк.
Зм	Аркцил	№ докум	Підпис	Дата		91

## Додаток А

Результати розрахунків поточного перевищення температури обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка протягом робочої зміни (8 год.)

У таблицях наведенні значення поточного перевищення температури наприкінці кожної ділянки. З 1 ділянки по 5 ділянку – робота електродвигуна, 6 ділянка – охолодження електродвигуна.

Таблиця А1 – Залежність  $\tau_1 = f(t)$  для 1 робочого дня

Номер ділянки	1	2	3	4	5	6
$t, \text{с}$	100	110	40	210	20	420
Номер циклу	$\tau_1, \text{°C}$					
1	9,6	15,6	19,9	35,4	38,3	36,6
2	44,3	48,3	52,0	64,1	66,6	63,7
3	70,0	72,6	75,7	85,3	87,7	83,8
4	89,1	90,5	93,3	101,1	103,2	98,7
5	103,2	103,9	106,4	112,8	114,8	109,8
6	113,7	113,7	116,1	121,4	123,3	118,0
7	121,4	121,1	123,2	127,8	129,7	124,0
8	127,2	126,5	128,5	132,6	134,4	128,5
9	131,5	130,5	132,5	136,1	137,9	131,9
10	134,6	133,5	135,4	138,7	140,4	134,3
11	137,0	135,7	137,6	140,6	142,4	136,2
12	138,7	137,3	139,2	142,1	143,8	137,5
13	140,0	138,6	140,4	143,1	144,8	138,5
14	140,9	139,5	141,2	143,9	145,6	139,3
15	141,6	140,1	141,9	144,5	146,2	139,8
16	142,2	140,6	142,4	144,9	146,6	140,2
17	142,5	141,0	142,7	145,3	146,9	100,2*
18	104,6	105,2	107,7	113,9	116,0	110,9

Продовження таблиці А1

19	114,7	114,8	117,0	122,3	124,2	118,8
20	122,2	121,8	124,0	128,5	130,3	124,6
21	127,8	127,0	129,1	133,1	134,9	129,0
22	131,9	130,9	132,9	136,4	138,2	132,2
23	134,9	133,8	135,7	139,0	140,7	134,6
24	137,2	135,9	137,8	140,8	142,6	136,3
25	138,9	137,5	139,3	142,2	143,9	137,6
26	140,1	138,7	140,5	143,2	144,9	138,6
27	141,0	139,6	141,3	144,0	145,7	139,3
28	141,7	140,2	142,0	144,6	146,2	139,9
29	142,2	140,7	142,4	145,0	146,7	140,3
30	142,6	141,0	142,8	145,3	147,0	140,6
31	142,9	141,3	143,0	145,5	147,2	140,8
32	143,1	141,5	143,2	145,7	147,4	–

Примітка. \* – час охолодження на цій ділянці дорівнює 3600 с.

## Додаток Б

Результати розрахунків швидкості теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна приводу вовчка протягом робочої зміни (8 год.)

У таблицях наведенні значення швидкості теплового зношення ізоляції наприкінці кожної ділянки. З 1 ділянки по 5 ділянку – робота електродвигуна, 6 ділянка – охолодження електродвигуна.

Таблиця Б1 – Залежність  $\varepsilon_1 = f(t)$  за  $\vartheta_{\text{сер.}} = 10^\circ\text{C}$  для 1 робочого дня

Номер ділянки	1	2	3	4	5	6
$t, \text{с}$	100	110	40	210	20	420
Номер циклу	$\varepsilon_1, \text{ баз.год./год}$					
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000
2	0,0001	0,0002	0,0003	0,0010	0,0013	0,0010
3	0,0018	0,0024	0,0033	0,0082	0,0101	0,0071
4	0,0116	0,0132	0,0170	0,0336	0,0404	0,0274
5	0,0403	0,0427	0,0528	0,0891	0,1049	0,0698
6	0,0960	0,0966	0,1163	0,1770	0,2056	0,1351
7	0,1775	0,1725	0,2039	0,2890	0,3323	0,2167
8	0,2757	0,2616	0,3052	0,4116	0,4700	0,3047
9	0,3791	0,3537	0,4089	0,5321	0,6047	0,3904
10	0,4780	0,4407	0,5061	0,6418	0,7269	0,4680
11	0,5664	0,5176	0,5916	0,7365	0,8319	0,5345
12	0,6415	0,5826	0,6634	0,8148	0,9188	0,5894
13	0,7030	0,6355	0,7219	0,8779	0,9885	0,6334
14	0,7521	0,6776	0,7683	0,9275	1,0433	0,6680
15	0,7906	0,7105	0,8044	0,9660	1,0857	0,6948
16	0,8203	0,7358	0,8322	0,9954	1,1182	0,7153
17	0,8429	0,7551	0,8534	1,0178	1,1429	0,0313*
18	0,0455	0,0478	0,0589	0,0981	0,1153	0,0766

Продовження таблиці Б1

19	0,1046	0,1047	0,1258	0,1896	0,2198	0,1443
20	0,1887	0,1828	0,2156	0,3035	0,3487	0,2272
21	0,2881	0,2728	0,3178	0,4265	0,4867	0,3153
22	0,3914	0,3647	0,4211	0,5460	0,6203	0,4003
23	0,4893	0,4506	0,5171	0,6541	0,7406	0,4766
24	0,5762	0,5261	0,6010	0,7468	0,8434	0,5417
25	0,6496	0,5896	0,6712	0,8232	0,9281	0,5953
26	0,7096	0,6411	0,7281	0,8845	0,9958	0,6381
27	0,7573	0,6820	0,7731	0,9327	1,0490	0,6716
28	0,7946	0,7139	0,8082	0,9700	1,0901	0,6976
29	0,8233	0,7384	0,8351	0,9985	1,1216	0,7174
30	0,8453	0,7571	0,8556	1,0201	1,1454	0,7324
31	0,8619	0,7712	0,8711	1,0364	1,1634	0,7438
32	0,8744	0,7818	0,8827	1,0486	1,1769	0,0000

Таблиця Б2 – Залежність  $\varepsilon_2 = f(t)$  за  $\vartheta_{\text{сер.}} = 20^\circ\text{C}$  для 1 робочого дня

Номер ділянки	1	2	3	4	5	6
$t, \text{с}$	100	110	40	210	20	420
Номер циклу	$\varepsilon_2, \text{ баз.год./год}$					
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0002	0,0001
2	0,0003	0,0005	0,0008	0,0028	0,0035	0,0027
3	0,0049	0,0063	0,0085	0,0203	0,0249	0,0178
4	0,0282	0,0321	0,0408	0,0778	0,0926	0,0641
5	0,0924	0,0975	0,1194	0,1965	0,2296	0,1559
6	0,2110	0,2122	0,2531	0,3777	0,4355	0,2921
7	0,3786	0,3685	0,4321	0,6025	0,6883	0,4579
8	0,5760	0,5480	0,6347	0,8439	0,9579	0,6336
9	0,7803	0,7305	0,8387	1,0782	1,2182	0,8025
10	0,9734	0,9008	1,0278	1,2894	1,4521	0,9539
11	1,1444	1,0502	1,1929	1,4703	1,6517	1,0828

Продовження таблиці Б2

12	1,2887	1,1756	1,3308	1,6193	1,8159	1,1887
13	1,4064	1,2773	1,4425	1,7386	1,9472	1,2733
14	1,5001	1,3579	1,5308	1,8324	2,0502	1,3396
15	1,5732	1,4207	1,5995	1,9048	2,1298	1,3908
16	1,6295	1,4690	1,6522	1,9602	2,1906	1,4299
17	1,6725	1,5057	1,6924	2,0023	2,2367	0,0726*
18	0,1038	0,1088	0,1326	0,2154	0,2511	0,1702
19	0,2289	0,2292	0,2727	0,4031	0,4642	0,3109
20	0,4014	0,3894	0,4558	0,6314	0,7206	0,4790
21	0,6008	0,5703	0,6597	0,8730	0,9903	0,6547
22	0,8046	0,7520	0,8626	1,1051	1,2481	0,8219
23	0,9954	0,9201	1,0492	1,3130	1,4781	0,9707
24	1,1633	1,0667	1,2110	1,4900	1,6734	1,0969
25	1,3043	1,1891	1,3457	1,6352	1,8334	1,2000
26	1,4190	1,2881	1,4543	1,7513	1,9610	1,2822
27	1,5099	1,3664	1,5401	1,8422	2,0609	1,3465
28	1,5808	1,4272	1,6066	1,9124	2,1380	1,3961
29	1,6354	1,4740	1,6577	1,9660	2,1969	1,4339
30	1,6769	1,5095	1,6965	2,0066	2,2414	1,4626
31	1,7083	1,5364	1,7258	2,0372	2,2750	1,4842
32	1,7320	1,5566	1,7478	2,0602	2,3002	0,0000

Таблиця Б3 – Залежність  $\varepsilon_3 = f(t)$  за  $\vartheta_{\text{сер.}} = 30^\circ\text{C}$  для 1 робочого дня

Номер ділянки	1	2	3	4	5	6
$t, \text{с}$	100	110	40	210	20	420
Номер циклу	$\varepsilon_3, \text{ баз.год./год}$					
1	0,0000	0,0000	0,0001	0,0004	0,0005	0,0004
2	0,0010	0,0015	0,0022	0,0073	0,0092	0,0070
3	0,0126	0,0159	0,0211	0,0483	0,0586	0,0425
4	0,0659	0,0744	0,0935	0,1727	0,2039	0,1436

Продовження таблиці Б3

5	0,2034	0,2142	0,2595	0,4173	0,4838	0,3346
6	0,4464	0,4488	0,5310	0,7777	0,8907	0,6086
7	0,7794	0,7596	0,8840	1,2139	1,3784	0,9343
8	1,1629	1,1089	1,2757	1,6744	1,8897	1,2737
9	1,5537	1,4589	1,6646	2,1156	2,3772	1,5959
10	1,9189	1,7820	2,0212	2,5099	2,8115	1,8821
11	2,2395	2,0632	2,3301	2,8452	3,1797	2,1244
12	2,5086	2,2977	2,5868	3,1201	3,4811	2,3223
13	2,7270	2,4873	2,7937	3,3395	3,7214	2,4799
14	2,9003	2,6371	2,9570	3,5113	3,9093	2,6031
15	3,0352	2,7534	3,0836	3,6440	4,0542	2,6980
16	3,1390	2,8427	3,1807	3,7452	4,1649	2,7704
17	3,2180	2,9107	3,2545	3,8220	4,2487	0,1618*
18	0,2272	0,2376	0,2870	0,4552	0,5269	0,3638
19	0,4825	0,4830	0,5701	0,8274	0,9465	0,6460
20	0,8240	0,8006	0,9302	1,2693	1,4401	0,9753
21	1,2106	1,1519	1,3236	1,7295	1,9507	1,3141
22	1,5998	1,4998	1,7098	2,1661	2,4330	1,6327
23	1,9603	1,8185	2,0612	2,5537	2,8596	1,9138
24	2,2748	2,0941	2,3639	2,8816	3,2197	2,1506
25	2,5376	2,3230	2,6143	3,1494	3,5133	2,3434
26	2,7503	2,5074	2,8157	3,3627	3,7467	2,4965
27	2,9185	2,6528	2,9741	3,5293	3,9289	2,6159
28	3,0493	2,7656	3,0968	3,6577	4,0693	2,7078
29	3,1497	2,8520	3,1908	3,7557	4,1763	2,7779
30	3,2261	2,9177	3,2621	3,8299	4,2573	2,8309
31	3,2839	2,9673	3,3160	3,8857	4,3182	2,8708
32	3,3273	3,0045	3,3564	3,9276	4,3640	0,0000

Таблиця Б4 – Залежність  $\varepsilon_4 = f(t)$  за  $\vartheta_{\text{сер.}} = 40^\circ\text{C}$  для 1 робочого дня

Номер ділянки	1	2	3	4	5	6
$t, \text{с}$	100	110	40	210	20	420
Номер циклу	$\varepsilon_4, \text{ баз.год./год}$					
1	0,0001	0,0001	0,0002	0,0011	0,0015	0,0013
2	0,0028	0,0042	0,0060	0,0182	0,0228	0,0176
3	0,0306	0,0382	0,0499	0,1097	0,1319	0,0972
4	0,1476	0,1656	0,2057	0,3689	0,4321	0,3095
5	0,4312	0,4529	0,5438	0,8551	0,9847	0,6928
6	0,9119	0,9167	1,0762	1,5487	1,7628	1,2257
7	1,5520	1,5143	1,7502	2,3693	2,6751	1,8451
8	2,2741	2,1732	2,4843	3,2215	3,6164	2,4806
9	2,9993	2,8242	3,2034	4,0284	4,5036	3,0771
10	3,6697	3,4191	3,8564	4,7436	5,2872	3,6025
11	4,2537	3,9331	4,4181	5,3479	5,9479	4,0444
12	4,7411	4,3594	4,8824	5,8410	6,4860	4,4039
13	5,1353	4,7027	5,2553	6,2334	6,9137	4,6893
14	5,4468	4,9731	5,5486	6,5399	7,2474	4,9118
15	5,6890	5,1828	5,7757	6,7760	7,5043	5,0830
16	5,8748	5,3435	5,9496	6,9561	7,7002	5,2134
17	6,0162	5,4655	6,0816	7,0924	7,8483	0,3466*
18	0,4790	0,4999	0,5984	0,9291	1,0682	0,7502
19	0,9821	0,9832	1,1517	1,6431	1,8682	1,2974
20	1,6367	1,5922	1,8374	2,4725	2,7893	1,9224
21	2,3630	2,2535	2,5733	3,3227	3,7278	2,5557
22	3,0841	2,8998	3,2866	4,1204	4,6045	3,1448
23	3,7453	3,4859	3,9295	4,8227	5,3738	3,6604
24	4,3179	3,9893	4,4794	5,4133	6,0193	4,0922
25	4,7936	4,4052	4,9321	5,8936	6,5433	4,4422
26	5,1771	4,7390	5,2948	6,2748	6,9587	4,7193
27	5,4795	5,0015	5,5793	6,5719	7,2822	4,9350

Продовження таблиці Б4

28	5,7142	5,2046	5,7994	6,8005	7,5310	5,1007
29	5,8941	5,3601	5,9676	6,9747	7,7204	5,2269
30	6,0308	5,4781	6,0952	7,1065	7,8636	5,3222
31	6,1340	5,5671	6,1914	7,2056	7,9713	5,3939
32	6,2116	5,6340	6,2636	7,2799	8,0521	0,0000

Примітка. \* – час охолодження на цій ділянці дорівнює 3600 с.