

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 62-523.2: 666.3/.7

**ПОГОДЖЕНО**

Директор ННІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження

д.т.н., проф. /КАПЛУН В.В./  
вчене звання, науковий ступінь підпис

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

В.о. завідувача кафедри  
кафедри інженерії енергосистем

доц., к.т.н. /АНТИПОВ Є.О./  
вчене звання, науковий ступінь підпис

” ” 2023 р.  
число місяць рік

” ” 2023 р.  
число місяць рік

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему: «Розробка системи діагностики та захисту групи  
електродвигунів, які живляться від однієї секції шин на прикладі  
Житомирського виробництва будматеріалів»

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

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

**Гарант освітньої програми**

к.т.н., доцент  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Усенко С.М.  
(ПІБ)

**Керівник магістерської роботи**

д.т.н., професор  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Кривоносов В.Є.  
(ПІБ)

**Виконав**

(підпис)

Костюченко Д.А.  
(ПІБ)

КИЇВ – 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ  
В.о.завідувача кафедри  
електропостачання  
ім. проф. В.М. Синькова

К.Т.Н., доцент / АНТИПОВ Є.О.  
науковий ступінь, вчене звання підпис ПІБ

” ” 2022 року  
число місяць рік

ЗАВДАННЯ  
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
СТУДЕНТУ

Костюченко Денис Анатолійович  
(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Розробка системи діагностики та захисту групи електродвигунів, які живляться від однієї секції шин на прикладі Житомирського виробництва будматеріалів»

затверджена наказом ректора НУБіП України від \_\_\_\_\_ 2022 р. № \_\_\_\_\_

Термін подання завершеної роботи на кафедру \_\_\_\_\_ 2023.10.31  
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи:

Технологічна схема лінії виробництва силікатної цегли  
Нормативно-технічні, керівні, галузеві та методичні стандарти  
Рекомендації щодо застосування обладнання виробництва

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- 1) огляд роботи технологічної лінії житомирського виробництва будматеріалів та виявлення причин пошкодження асинхронних двигунів
- 2) аналіз неповнофазних режимів та пускових струмів на надійність роботи технологічної лінії виробництва силікатної цегли
- 3) розробка методу діагностики та захисту групи асинхронних двигунів, що живляться від однієї секції шин

Дата видачі завдання “ 28 ” червня 2023 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Кривонос В.Є.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Костюченко Д.А.  
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

**РЕФЕРАТ**

Магістерська робота: 78 стор., 36 рис., 2 табл., 43 джерела

Мета роботи – виявлення причин пошкодження асинхронних двигунів та розробка системи діагностики та захисту групи електродвигунів для технологічної лінії Житомирського виробництва будматеріалів.

*Об'єкт дослідження* – процес роботи технологічної лінії Житомирського виробництва будматеріалів.

*Предмет дослідження* – причини пошкодження асинхронних двигунів, системи діагностики та захисту групи електродвигунів.

*Методи дослідження.* Системний аналіз. Simulink моделювання.

В першому розділі виконано огляд роботи технологічної лінії Житомирського виробництва будматеріалів та виявлено причини пошкодження асинхронних двигунів та засобів діагностування режимів їх роботи.

У другому розділі проведено аналіз неповнофазних режимів та пускових струмів на надійність роботи технологічної лінії виробництва силікатної цегли.

У третьому розділі розроблено методу діагностики та захисту групи асинхронних двигунів, що живляться від однієї секції шин.

**Ключові слова:** технологічна схема лінії виробництва силікатної цегли, асинхронний двигун, неповнофазні режими, пускові струми, метод діагностики та захисту

Зміст	
РОЗДІЛ 1	ОГЛЯД РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ
ЖИТОМИРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА БУДМАТЕРІАЛІВ ТА ВИЯВЛЕННЯ ПРИЧИН ПОШКОДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ .....	
	6
2.1. Технологічна схема лінії виробництва силікатної цегли.....	
	6
2.2. Аналіз причин пошкодження асинхронних двигунів та засобів діагностування їх режимів роботи.....	
	11
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ НЕПОВНОФАЗНИХ РЕЖИМІВ ТА ПУСКОВИХ СТРУМІВ НА НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА СИЛІКАТНОЇ ЦЕГЛИ .....	
	19
2.1. Дослідження теплових процесів асинхронних електродвигунів під впливом неповнофазного режиму роботи.....	
	19
2.2. Дослідження теплових процесів асинхронних електродвигунів під дією струмового навантаження та розробка пристрою захисту від аварійних режимів роботи.....	
	23
2.3. Аналіз способів пуску і регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів.....	
	28
2.3.1. Основні вимоги до пуску асинхронного двигуна.....	
	28
2.3.2. Прямий пуск.....	
	29
2.4. Короткозамкнені асинхронні двигуни з підвищеним пусковим моментом.....	
	30
2.4.1. Асинхронний двигун з подвійною білячою клітчиною.....	
	30
2.4.2. Асинхронний двигун з глибокими пазами.....	
	32
2.5. Пуск асинхронного двигуна при зниженій напрузі.....	
	34
2.5.1. Реакторний пуск.....	
	34
2.5.2. Автотрансформаторний пуск.....	
	35
2.5.3. Пуск двигуна перемиканням «зірка - трикутник».....	
	36

2.6. Пуск асинхронного двигуна з фазним ротором.....	37
2.7. Асинхронний двигун з підвищеним пусковим моментом та спроможністю регулювання обертів при зміні навантаження.....	40

### РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ ТА ЗАХИСТУ ГРУПИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ, ЩО ЖИВЛЯТЬСЯ ВІД ОДНІЄЇ СЕКЦІЇ ШИН

.....	45
3.1. Інформаційна система діагностики та захисту електродвигуна.....	45
3.2. Інформаційна система діагностики та захисту групи електродвигунів.....	55
3.4 Розробка пристрою та програмного забезпечення діагностики причин температурного перевантаження ізоляції та захист електрообладнання від перегрівання.....	69

ВИСНОВКИ..... 73

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ..... 74

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ЖИТОМИРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА БУДМАТЕРІАЛІВ ТА ВИЯВЛЕННЯ ПРИЧИН ПОШКОДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

### 2.1. Технологічна схема лінії виробництва силікатної цегли

На рис. 1.1 на дано схему транспортної технологічної лінії виробництва силікатної цегли, до якої входять низка технологічних ланок та містить видобуток і доставку сировини, його збагачення та складування, технологічне виробництво і відвантаження продукції.

Вапно, яке потрапляє у ситос 1, далі завантажується до дезінтегратора 2, де подрібнюються шматки, що наявні в вапні, для утворення однорідної суміші. Після того, як виконано подрібнення вапна до однорідного стану, воно потрапляє до елеватора 3, за допомогою якого вапно транспортують до бункера 4, для подальшого зберігання до приготування суміші.

Одночасно з ним, в стрічковий ваговий дозатор 7, завантажують піщано-гравійну суміш, у необхідній кількості матеріалу. Далі, така відміряна, необхідна кількість суміші вже потрапляє на стрічковий транспортер 8, за допомогою якого доставляється на грохот 9. Після того як така піщано-гравійна суміш пройде грохот 9 та відсіються всі досить завеликі шматки гравію та грудки піску, і на виході до стрічкового конвеєра 5, ми матимемо вже повністю готову однорідну суміш піску з незначними частинками гравію яка грохи пізніше стане базою для приготування силікатної маси з якої вже й буде виготовлена безпосередньо силікатна цегла.

Після того, як суміш перемістяться по стрічковому конвеєру 5, вона потрапляє до живильника тарілчастого 6, який дозує необхідну кількість суміші та відправляє її в трубку мішалку 10, в яку в цей час з бункера 4, надійде віддозована необхідна кількість підготованого раніше вапна. В трубній мішалці 10, вапно та піщано-гравійна суміш микуються до однорідного стану, після чого попадають до гвинтового живильника за допомогою якого доставляється до тарілчастого живильника 13.

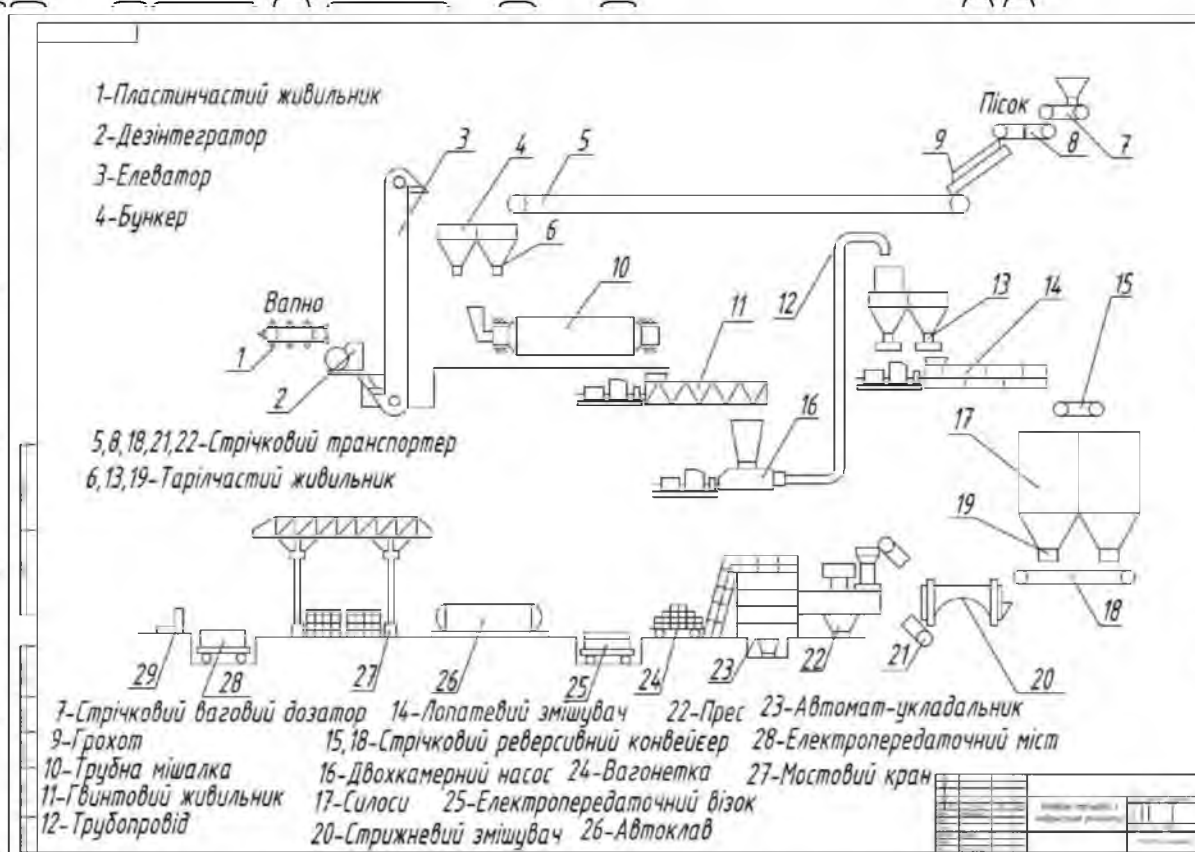


Рис. 1.1. Технологічна схема лінії виробництва силікатної цегли. 1 – пластинчастий живильник; 2 – дезінтегратор; 3 – елеватор; 4 – бункер; 5, 8, 18, 21, 22 – стрічковий транспортер; 6, 13, 19 – тарільчастий живильник; 7 – стрічковий ваговий дозатор; 9 – грохот; 10 – трубна мішалка; 11 – гвинтовий живильник; 12 – трубопровід; 14 – лопатевий змішувач; 15, 18 – стрічковий реверсивний конвейєр; 16 – двохкамерний пневмонасос; 17 – силоси (реактори); 20 – стрижневий змішувач; 22 – прес; 23 – автомат-укладальник; 24 – вагонетка; 25 – електропередаточний візок; 26 – автоклав; 27 – мостовий кран; 28 – електропередаточний міст; 29 – установка очищення платформ автоклавних вагонеток.

НУБІП України

Далі двоох-камерний пневмонасос 16, дає воду по трубопроводу 12, до того ж тарілчастого живильника 13 де вже розташована ніша на гравійна суміш разом з ванном, там вони з'єднуються та зволожуються. Такий спосіб приготування суміші називається силосним методом. Після всього цього вже зволожена суміш переміщується далі по лопатовому змішувачу 14, в якому ще раз ретельно міксується, а далі та суміш опиняється на стрічковому реверсивному конвеєрі, за сприяння якого доставляється до реакторів 17, де витримується десь більше години для гасіння, а потім до тарілчастого живильника 19.

Потім вже підготовлений силос переміщується на стрічковий транспортер 18, за допомогою якого потрапляє до стрижневого змішувача 20, з якого з використанням ще одного стрічкового транспортеру 21, підготовлена суміш для формування цегли доставляється до самого пресу 22, при пресуванні, раніше приготованій масі надається необхідна форма, і забезпечуються майбутні якісні характеристики цегли. Саме під час пресування, цегла набуває свою однорідність і міцність, а також виключається поява пустот.

Після формування кінцевої форми цегли, вона з використанням автомата-укладальника 23, перекладається на вагонетки 24, а з вже них з використанням електропередаточного візка 25, повністю формована, майже готова цегла переміщується до автоклаву 26, де піддається безпосередньо тепло-важливій обробці. Саме тут цегла проходить всі три стадії теплового впливу, після яких вона набуває кінцевого вигляду та набирає необхідну твердість.

Після чого готова силікатна цегла з використанням мостового крану 27, переноситься на склад де повністю остигає. Після цього, готова цегла з використанням електро-передаточного моста 28, переміщується до місць пакування та вилвантаження, де з використанням устаткування очищення платформи автоклавних вагонеток 29, цегла перевантажується, пакується та завантажується вже в вантажівки для подальшої її доставки замовникам.

На виході будемо мати такі види цегли: цегла силікатна (одинарна лицьова повнотіла біла) 250x120x65; цегла силікатна (одинарна лицьова повнотіла жовта) 250x120x65; цегла силікатна (одинарна лицьова пустотіла біла) 250x120x65;



Для керування місцевого перемикачі універсальні SA1 і SA2 виставляють у положення М. Тут створюються звичайні кола автоматичного керування електроприводами з використанням електромагнітних пускачів KM1, ... , KM6 та кнопок SB1, ... , SB6.

Для того щоб здійснити автоматичне керування, при якому початкові керуючі імпульси (команди) створюються реле часу, перемикачі SA1 і SA2 виставляють у положення А. Пуск потокової лінії може бути зроблений лише з її кінця. Першим запускається електродвигун M1. Для цього треба натиснути на кнопку «Пуск» SB3. Це приведе до того, що на напруга буде подана на котушку електромагнітного пускача KM1, він спрацює і замкне свої допоміжні (блокувальний) та головні замикаючі контакти. Головні контакти безпосередньо увімкнуть двигун M1 в електромережу, а два допоміжних контакта зашунтують кнопки «Пуск» SB3 і SB4, а третій допоміжний контакт виконує підготовку до роботи коло котушки електромагнітного пускача KM2, який призначений для керування електродвигуном M2.

Для пуску самого двигуна M2 потрібно задіяти кнопку «Пуск» SB7. Тоді буде подана напруга на котушку пускача KM2 і він спрацює і своїми головними контактами увімкне двигун M2 в електромережу, а допоміжними контактами зашунтує кнопки SB7 та SB8 і замкне коло живлення котушки реле часу KT1. Далі керування електроприводом потокової лінії буде відбуватись без участі оператора. Одержавши живлення, реле часу KT1 з витримкою часу, на 20-30% більшою від часу, потрібного для розгону привода завантажувального шнека, замкне свій замикаючий контакт і подасть напругу на котушку електромагнітного пускача KM3, призначеного для керування електродвигуном M3. Пускач KM3 спрацює, своїми головними замикаючими контактами увімкне в електромережу двигун M3, а допоміжними зашунтує кнопку «Пуск» SB10 і подасть напругу на котушку реле часу KT2.

Реле KT2 з витримкою часу замкне свій замикаючий контакт у колі котушки пускача електромагнітного KM4. Пускач KM4 спрацює, увімкне двигун M4, зашунтує кнопку «Пуск» SB12 і дасть напругу на котушку реле часу KT3.

Реле КТЗ з витримкою часу замкне свій власний замикаючий контакт у колі котушки пускача електромагнітного КМ5, який призначено для керування електродвигуном М5. Після того як пускач КМ5 спрацював вмикається такий двигун як М5, потім шунтується кнопка «Пуск» SB14 і подається живлення на котушку пускача електромагнітного КМ6, який призначено для керування електродвигуном М6. Після спрацювання пускача КМ6 вмикається двигун М6, шунтується кнопка «Пуск» SB16 і подається живлення на реле часу КТ4. Технологічна лінія почне працювати.

Якщо виникне така потреба, то термінова зупинка електродвигунів здійснюється за допомогою кнопок «Стоп»

## 2.2. Аналіз причин пошкодження асинхронних двигунів та засобів

### діагностування їх режимів роботи

Промисловість випускає новітні асинхронні двигуни серій 4А, 4АМ і АІР, зокрема й спеціального виконання, що відповідають усім вимогам міжнародних стандартів. Однак, незважаючи на всі відмінні характеристики, закладені в конструкцію асинхронних двигунів цих серій, аварійність у важких умовах експлуатації досить висока. Так, у сільському господарстві щорічно виходить з ладу 15-20% асинхронних двигунів [1], а за іншими даними - 20-25% [2, 3], у деяких випадках до 30% наявного парку [4]. Фактичний термін служби асинхронних двигунів у сільському господарстві менший за необхідний у два-три рази. 3,5 року для тваринництва, 4 роки для рослинництва і 5 років для допоміжних операцій [5].

Асинхронні двигуни, як правило, мають невеликий фактичний термін служби - близько 3-5 років, незважаючи на те, що вони оснащені пусковим захистом [6]. Відмови електроприводів через низьку якість асинхронних двигунів не перевищують 2-5%. Основною причиною відмови є аварійний режим роботи [7].

Більшість відмов асинхронних двигунів пов'язана з ушкодженням обмотки статора [8], а за даними [7], автори вважають, що на обрив фази, заклинювання і перевантаження припадає 70-80% усіх відмов асинхронних двигунів.

Найпоширенішою з них є обрив фази (40-50%). Згідно з методикою оцінки, проведеної фахівцями на півдні України, понад 50% асинхронних двигунів виходять з ладу через технічні перевантаження, заклинювання та руйнування підшипникових вузлів, а до 45% - через виникнення неприпустимої асиметрії фазної напруги мережі та обривів фаз [4]. Зі сказаного випливає, що виникнення асиметрії фазної напруги та обрив фазної лінії є одними з основних причин відмов асинхронних двигунів [9].

Асиметрія напруги проявляється у вигляді швидкого погіршення техніко-економічних характеристик електродвигуна (збільшення втрат електричної енергії, підвищене тепловиділення у вузлах), зниження експлуатаційної надійності та скорочення терміну служби електродвигуна [10].

У роботах [11, 12] розглянуто методи розрахунку несиметричних режимів роботи мереж електропередачі 380/220 В і представлено метод розрахунку стохастичних характеристик несиметрії (коефіцієнтів несиметрії напруги і струму) з використанням графіків навантаження (струму і потужності) підстанції 35-10/0,4 кВ і лінії електропередачі 0,38 кВ. Однак цей метод може бути використаний для вирішення протилежного завдання. А саме, відома асиметрія напруги в мережі може бути використана для визначення режиму роботи електрообладнання, зокрема асинхронних двигунів.

У роботі [13] описано методику, що використовує метод симетричних складових для розрахунку струмів і напруг споживачів, під'єднаних до трифазної та чотирифазної мережі, за умови несиметрії напруг у мережі за рахунок симетричних складових струму та напруги прямої, зворотної та нульової послідовності. Однак ця методика може бути використана для розрахунку струмів у трифазних чотирипровідних мережах з однофазними статичними елементами. Ця методика не враховує того, що під час зміни небалансу напруг

можуть змінюватися параметри електроприймача. Це відбувається в асинхронних двигунах, і відповідно змінюються фазні струми двигуна і мережі.

У роботі [14] представлено метод визначення параметрів асинхронного двигуна в разі обриву фази. Однак у роботі не враховується коефіцієнт навантаження під час визначення фазових параметрів асинхронного двигуна.

Залежно від значення коефіцієнта навантаження змінюється величина ковзання і, відповідно, параметри обмотки.

У роботі [15] аналізуються несиметричні режими роботи асинхронних двигунів у разі обриву фази і нейтральної точки ізоляції обмотки статора, обриві

фази асинхронного двигуна і з'єднанні нульової точки джерела живлення та обмотки статора двигуна; способи визначення параметрів фазних обмоток у Т-подібній схемі заміщення, моменти опору робочої машини, яку обертає

асинхронний двигун. Представлено метод визначення ковзання асинхронного двигуна під час обриву фази, що враховує слід зазначити, що під час розрахунку

значень ковзання не враховують тип робочої машини (її механічні характеристики, коефіцієнти, що характеризують зміну моменту опору робочої машини з частотою обертання) та технічні дані (момент опору за номінальної

частоти обертання, момент опору робочої машини при обриві фази, момент опору, момент опору, момент обриву фази, момент опору робочої машини, момент опору робочої машини, момент опору робочої машини, момент опору. Це впливає на точність розрахунку ковзання, параметрів двигуна і фазних струмів.

Для підвищення експлуатаційної надійності асинхронних двигунів, що працюють у промисловому виробництві з несиметричною фазною напругою,

необхідно вдосконалювати засоби діагностики. Це дає змогу оперативному персоналу отримати точні дані про режим роботи електрообладнання, стан робочих вузлів, точно визначити момент вимкнення від джерела живлення,

зношення ізоляції асинхронного двигуна, кількість несправностей і аварійних відмов [16].

Діагностика режиму роботи асинхронного двигуна здійснюється за такими параметрами (рис. 1.3)

- Струм (максимальний, прямої, зворотної, нульової послідовності, фазовий кут споживання струму, теплова дія струму);
- Напруга (мінімальна, нульової, зворотної послідовності);
- Температура (температура обмотки статора, сталі статора і корпусу).

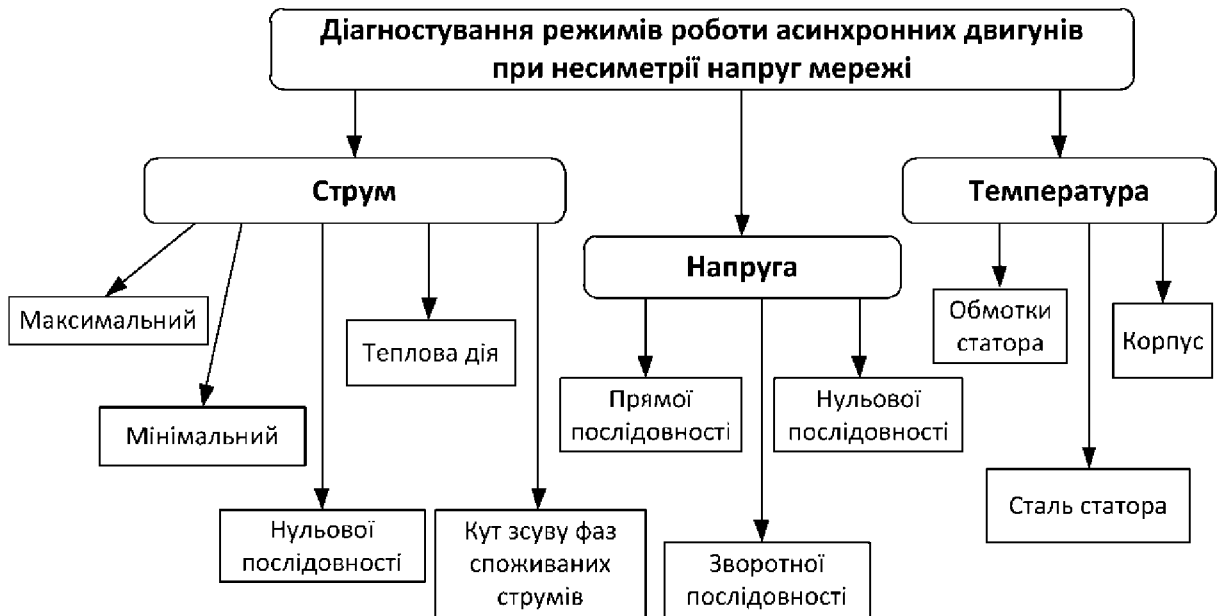


Рис. 1.3. Класифікація пристроїв захисту

Найпоширенішими є діагностичні пристрої, що реагують на зміну струму в ланцюзі живлення асинхронного двигуна. До них належать захист струмовими реле, що використовують принцип електромагнітної індукції, і теплові реле, які реагують на кількість тепла, що виділяється струмом, який проходить через спеціальні елементи.

Основним недоліком використання струмових реле як захисного пристрою є те, що вони відключають двигун під час його запуску. Щоб захисний пристрій не відключав асинхронний двигун під час нормального пуску або короткочасних піків навантаження, він має спрацьовувати не миттєво, а з витримкою часу. Тому реле часу зазвичай використовують одночасно з реле струму.

У роботі [17] представлено схему захисту, яка, крім загальної схеми управління, містить у собі струмове реле, під'єднане безпосередньо до силового фазного кабелю або через трансформатор струму, і проміжне реле, що

спрацьовує з невеликою витримкою часу на відпускання. Відпускання проміжного реле має бути затримано на короткий час, щоб котушка цього пускача була знеструмлена в момент перемикання контактів струмового реле.

Недоліком цього способу є те, що асинхронний двигун не захищений у разі обриву фази, що контролює; під'єднання пускової кнопки з двома замкненими контактами потребує додаткового з'єднувального дроту, що особливо складно в разі реалізації захисту в оперативній установці.

Найефективнішим є струмовий захист у разі перекидання асинхронного двигуна, спричиненого як технічним перевантаженням, так і обривом фазних

проводів двигуна. Існують системи живлення трифазних асинхронних двигунів із блоками захисту від перекидання, що містять магнітний суматор у вигляді тороїдального магнітопроводу з однією вторинною обмоткою і кількома первинними обмотками. Кожна первинна обмотка послідовно підключена до

однієї з названих фаз асинхронного двигуна. У нормальному режимі роботи первинні обмотки за амперажем, що належать різним фазам, рівні між собою, а у вторинних обмотках протікає невеликий несиметричний струм. У разі обриву одного з асинхронних двигунів струм в обмотці, що належить до відповідної фази, різко зростає. Відповідно збільшується струм у вторинній обмотці, і

виконавчий механізм спрацьовує. Недоліком цього пристрою є складність налаштування, оскільки для кожної групи асинхронних двигунів необхідно підбирати ампер-витки обмоток двигуна і первинної обмотки суматора.

До струмових захистів належать пристрої захисту, що контролюють кут зсуву фаз між лінійними струмами асинхронного двигуна. Фазочутливі пристрої захисту можуть використовуватися для захисту асинхронних двигунів від профазного режиму. Принцип дії фазочутливого захисту заснований на зміні фазового кута між струмами навантаження двигуна. У повнофазному режимі цей кут дорівнює  $120^\circ$  і стає рівним нулю або  $180^\circ$  у разі обриву однієї з фаз [18].

Перевага фазочутливого захисту порівняно із захистом нульової послідовності або захистом із фільтром зворотної послідовності полягає в тому, що він реагує на обрив фази як до, так і після точки підключення. Базова модель

фазочутливих пристроїв вимикає асинхронний двигун негайно в разі обриву фази та з витримкою часу, що відповідає перевантаженню, у разі уповільнення ротора або технічного перевантаження.

Останніми роками в патентній літературі регулярно обговорюються пропозиції щодо створення пристроїв струмового захисту на основі теплового аналога електродвигуна. Перевага таких пристроїв полягає в тому, що їх можна легко встановити в безпосередній близькості від розподільного щита. У роботі [19] представлено безконтактну схему теплового релейного захисту асинхронних двигунів, що унеможливорює багаторазове повторне увімкнення несправного двигуна. У пристроях діагностики та захисту напруги, що включають фільтри прямої, нейтральної та зворотної напруги, контрольованими параметрами є пряма, нейтральна та зворотна напруга. Пристрої діагностики та захисту напруги використовуються для захисту від несиметрії напруги та протифазних режимів.

Режим відсутності фази виникає внаслідок обриву лінії електропередачі, перегорання запобіжника або розриву контактів у розподільчому пристрої.

При навантаженні асинхронного двигуна 70-80% від номіналу в цьому режимі струм статора на 40-60% перевищує номінальне значення. Для захисту асинхронних двигунів від режиму відхилення фаз необхідно контролювати напругу нейтральної точки.

Для захисту асинхронних двигунів від роботи в режимі зміщеної фази використовують реле нульової фазної напруги [20]. Котушка реле під'єднується між нульовим і нейтральним проводами обмотки статора, а розімкнуті контакти з'єднуються послідовно з колом керування магнітного пускача. Однак напруга нейтральної послідовності під час обриву фази залежить від ковзання і навантаження і тому істотно відрізняється для різних типів двигунів. Тому одним із недоліків використання реле нульової послідовності є те, що уставка напруги спрацьовування для кожного двигуна має налаштовуватися індивідуально. Для налаштування робочої напруги кожного двигуна використовуються реле напруги з робочими межами 15-30 В і 30-60 В. Іншим недоліком є необхідність

прокладання додаткових дротів для під'єднання нейтральної точки двигуна до пристрою захисту, що означає неможливість використання цього реле, якщо обмотки статора з'єднані в трикутник або не виведено нейтральну точку у вигляді зірки.

Діагностичні та захисні пристрої можна розділити на три групи за їхньою конструкцією. До першої групи належать так звані спеціальні пристрої, що діагностують і захищають асинхронні двигуни від одного аварійного режиму, наприклад, реле обриву фази. До другої групи належать універсальні пристрої, що захищають двигун у різних аварійних ситуаціях. Ці пристрої контролюють деякі критичні для асинхронного двигуна параметри (струм, температуру обмотки тощо). До третьої групи належать комплексні пристрої, що дають змогу діагностувати і захищати двигун у будь-якій аварійній ситуації. Цього може бути досягнуто шляхом контролю кількох параметрів асинхронного двигуна.

Для підвищення ефективності струмового захисту бажано додати елемент, що коригує роботу з урахуванням температури обмоток асинхронного двигуна, корпусу і сталі.

У пристрої [21] як датчик температури виступає аналог лямбда-діода.

Особливістю вольт-амперної характеристики лямбда-діода є наявність ділянки з негативним диференціальним опором. У разі послідовного підключення аналогів лямбда-діода в ланцюг генератора формується гармонійний генератор. У разі перегрівання одного з електродвигунів опір відповідного термістора збільшується, а вольт-амперна характеристика термістора збільшується, що призводить до виділення енергії в ланцюзі та спрацьовування виконавчого механізму. Аналог лямбда-діода, мабуть, більш вигідний, ніж монокристалічний лямбда-діод, оскільки ширину його вольт-амперної характеристики можна змінювати, індивідуально підбираючи співвідношення резисторів у резистивному ділянці. Ефективність роботи захисного пристрою залежить від поєднання керуючих параметрів, які забезпечуються цим пристроєм.

Для запобігання аваріям найефективнішим є поєднання температурного та фільтрувального захисту. Такі пристрої виконують ті самі функції, що й

температурний захист. Однак їхня перевага полягає в тому, що деякі функції температурного захисту вони виконують краще. Наприклад, температурний захист реагує на асиметрію напруги та обрив фази із затримкою до 7,5 хвилин, тоді як комбінований пристрій відключає асинхронний двигун без витримки часу. Перевагами інтегрованих пристроїв діагностики та захисту є розробка недорогих і надійних пристроїв, їхнє виготовлення у вигляді окремих модулів (блоків) і, в певних випадках, можливість вибору параметрів керування, що дають змогу використовувати пристрої для типових аварійних ситуацій конкретної машини.

Для асинхронних двигунів, що працюють у жорстких умовах експлуатації, найкраще використовувати комбіновані діагностичні пристрої, що містять температурний (або струмовий) захист від перевантаження, захист від надструмів, захист від перекидання і блоки захисту від несиметрії фазних напруг.

Тому, для більшості асинхронних двигунів, що працюють у промисловому виробництві, рекомендується використовувати комбіноване обладнання, особливо для інтенсивного захисту груп двигунів, які працюють на потокових лініях. Аналіз пристроїв захисту та діагностики показує їхню недосконалість і обмеженість застосування в складних виробничих умовах. Для підвищення надійності асинхронних двигунів у складних виробничих умовах необхідно розробляти нові багатофункціональні діагностичні прилади.

## РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ НЕПОВНОФАЗНИХ РЕЖИМІВ ТА ПУСКОВИХ СТРУМІВ НА НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА СИЛКАТНОЇ ЦЕГЛИ

### 2.1. Дослідження теплових процесів асинхронних електродвигунів під впливом неповнофазного режиму роботи

Для подальшого підвищення енергоефективності агропромислового комплексу необхідно розв'язати проблеми надійності та довговічності експлуатованого електрообладнання. Основними споживачами і перетворювачами електроенергії є електроприводи на базі асинхронних короткозамкнених двигунів, від надійності яких залежить нормальний перебіг будь-якого технічного процесу. Експлуатаційна надійність асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором залишається низькою як у промисловості, так і в сільському господарстві, а щорічна аварійність становить 20-25% [22-27]. В аварійному режимі роботи струми в обмотках статора і ротора двигуна перевищують свої номінальні значення. У результаті відбувається перегрівання обмоток і зношування ізоляції. Цей стан визначається не тільки величиною струму, а й його тривалістю.

Тому існує гостра потреба в дослідженні теплових процесів в асинхронних двигунах під час аварійних ситуацій і розробленні на основі цих досліджень пристроїв керування та захисту.

Одним із найпоширеніших аварійних режимів роботи асинхронних двигунів, що експлуатуються в сільськогосподарському виробництві, є режим неповної фази. Обробка великої кількості статистичних даних щодо відмов електродвигунів дала змогу встановити, що приблизно 40-50 % від числа відмов асинхронних двигунів припадає на неповнофазний режим [25, 26].

Позафазні режими супроводжуються збільшенням струму, що призводить до перегріву обмотки статора з інтенсивним тепловим зносом ізоляції обмотки [22].

Розглянемо напругу на клеммах двигуна за неповнофазного режиму роботи. Для цього проаналізуємо вплив неповнофазного режиму в таких асинхронних двигунах АИР100L4У3. У разі автономного живлення електродвигуна напруга зміщення нейтралі дорівнює  $\dot{U}_N = -110$  В, напруга на фазах, що залишилися в роботі, дорівнює  $\dot{U}_b = j190$  В,  $\dot{U}_c = -j190$  В. Симетричні складові напруги прямої, зворотної і нульової послідовностей відповідно дорівнюють  $\dot{U}_1 = 110$  В,  $\dot{U}_2 = -110$  В,  $\dot{U}_0 = 0$ . Кратності напруг прямої і зворотної послідовностей відповідно дорівнюють  $k_{U1} = 0,5$ ,  $k_{U2} = 0,5$ .

Відповідно до [22] швидкість теплового зносу ізоляції

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{\frac{B}{\Theta_u} \left( \frac{1}{\Theta_{cm}} - \frac{1}{\Theta_u} \right)}, \quad (2.1)$$

де  $\varepsilon_n$  – номінальна швидкість теплового зносу ізоляції, б.год/год;  $B$  – коефіцієнт, який характеризує клас ізоляції, К;  $\Theta_u$  – абсолютна номінальна температура ізоляції обмотки, К;  $\Theta_{cm}$  – абсолютна стала температура ізоляції обмотки, К.

В свою чергу

$$\Theta_{cm} = \tau_{cm} + \vartheta_{сер} + 273, \quad (2.2)$$

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

Стале перевищення температури обмотки [22]

$$\tau_{cm} = \tau_n \frac{a+k^2}{a+1-\alpha\tau_n(k^2-1)}, \quad (2.3)$$

де  $\tau_n$  – номінальне перевищення температури обмотки, °С;  $a$  – коефіцієнт втрат електродвигуна;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору матеріалу обмотки, 1/°С;  $k$  – кратність перевантаження за силою струму,

$$k^2 = \frac{U^2}{\left[ (R_1' + R_2'/s)^2 + (X_1' + X_2')^2 \right] I_n^2}. \quad (2.4)$$

Враховуючи вихідні дані для електродвигуна АИР100L4У3 отримуємо розрахункові дані, які наведені в табл. 1.

Таблиця 2.1

### Розрахункові дані

$\kappa_3$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
$s$	0,054	0,106	0,149	0,184	0,215	0,242	0,265
$k$	0,48	0,84	1,08	1,23	1,34	1,42	1,48
$I, A$	4,00	7,70	9,95	11,30	12,04	12,67	13,00
$\epsilon, \text{бгод/год}$	0,64	0,78	1,27	3,18	7,86	20,24	39,63

Оскільки множники напруги симетричних складових прямої та зворотної послідовностей дорівнюють між собою, цей режим є більш жорстким, ніж несиметричний всерізний режим, що призводить до нульового пускового моменту і більшого ковзання за однакових умов.

На рис. 2.1 наведена залежність сили струму в обмотці статора асинхронного електродвигуна в функції коефіцієнта завантаження  $I=f(\kappa_3)$ , на рис. 2.2 – залежність швидкості теплового зносу ізоляції обмотки статора в функції коефіцієнта завантаження асинхронного електродвигуна  $\epsilon=f(\kappa_3)$ .

Це означає, що робота в неповнофазному режимі навіть для малонавантажених асинхронних двигунів супроводжується значним збільшенням струму в обмотках статора та інтенсивним процесом теплового зносу ізоляції.

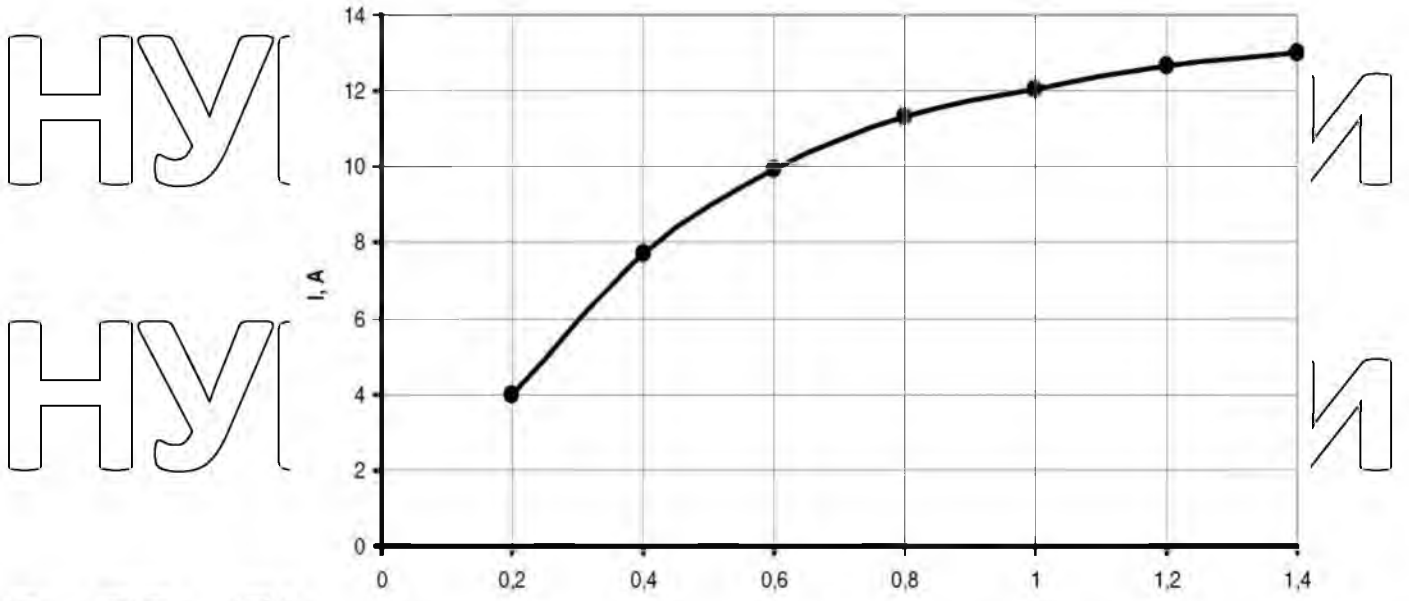


Рис. 2.1. Залежність сили струму в обмотці статора трифазного асинхронного електродвигуна в функції коефіцієнта завантаження

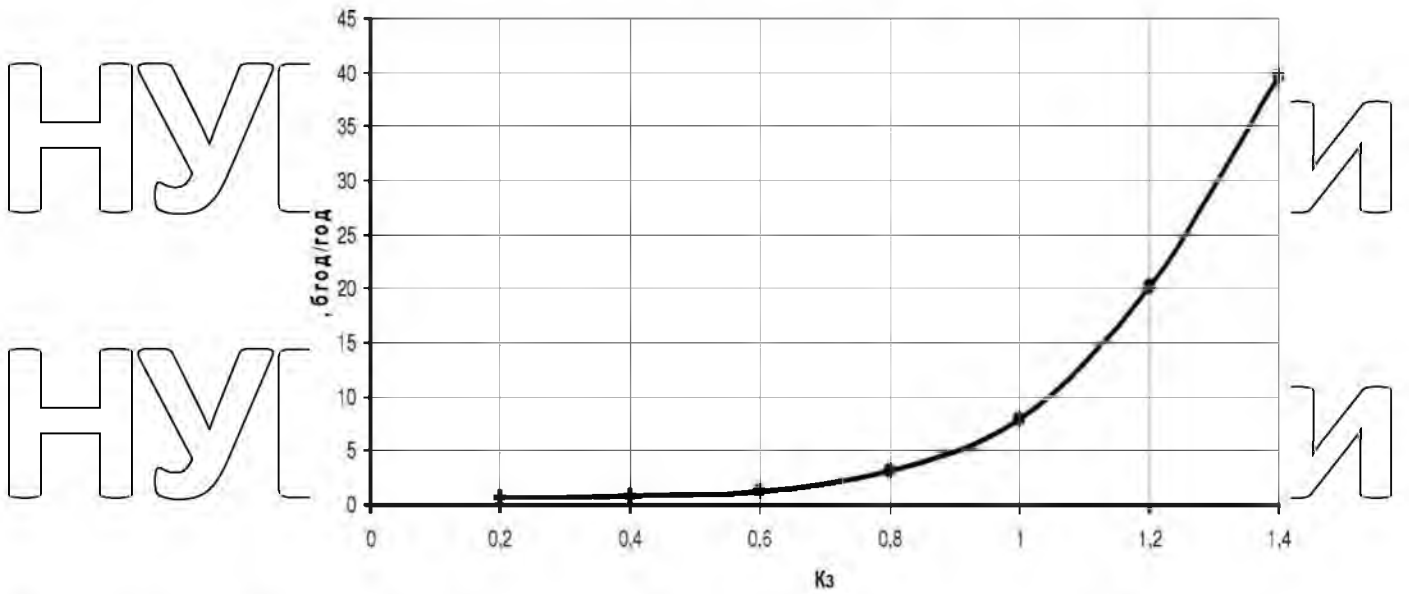


Рис. 2.2. Залежність швидкості теплового зносу ізоляції обмотки статора трифазного асинхронного електродвигуна в функції коефіцієнта завантаження

НУБІП України

## 2.2. Дослідження теплових процесів асинхронних електродвигунів під дією струмового навантаження та розробка пристрою захисту від аварійних режимів роботи

Експлуатаційна надійність асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором залишається низькою. В аварійному режимі роботи струм в обмотках статора і ротора двигуна перевищує номінальне значення. У результаті відбувається перегрівання обмоток і пошкодження ізоляції, причому цей стан визначається не тільки величиною струму, але і його тривалістю. Усі основні аварійні режими роботи спричиняють неприпустиме нагрівання обмоток, що призводить до виходу електродвигуна з ладу. Однією з основних причин відмови електродвигунів є недостатній захист від аварійних режимів роботи [28-30]. Тому одним зі шляхів підвищення експлуатаційної надійності асинхронних двигунів є розробка і застосування універсальних технічних заходів щодо захисту електродвигуна в процесі експлуатації.

Під час тривалої експлуатації асинхронні двигуни піддаються різним експлуатаційним впливам [28].

Одним з експлуатаційних впливів є сила струму двигуна, яка в процесі експлуатації змінюється залежно від навантаження робочої машини.

Здійснимо дослідження теплових процесів під дією струмового навантаження, для чого проаналізуємо вплив струмового навантаження на електродвигун АИР100L4У3 при кратностях напруг  $k_u = 0,9$  і  $k_u = 0,8$ .

Результати аналізу у вигляді залежностей  $I = f(k_3)$  та  $\varepsilon = f(k_3)$  наведено на рис. 2.3 та рис. 2.4.

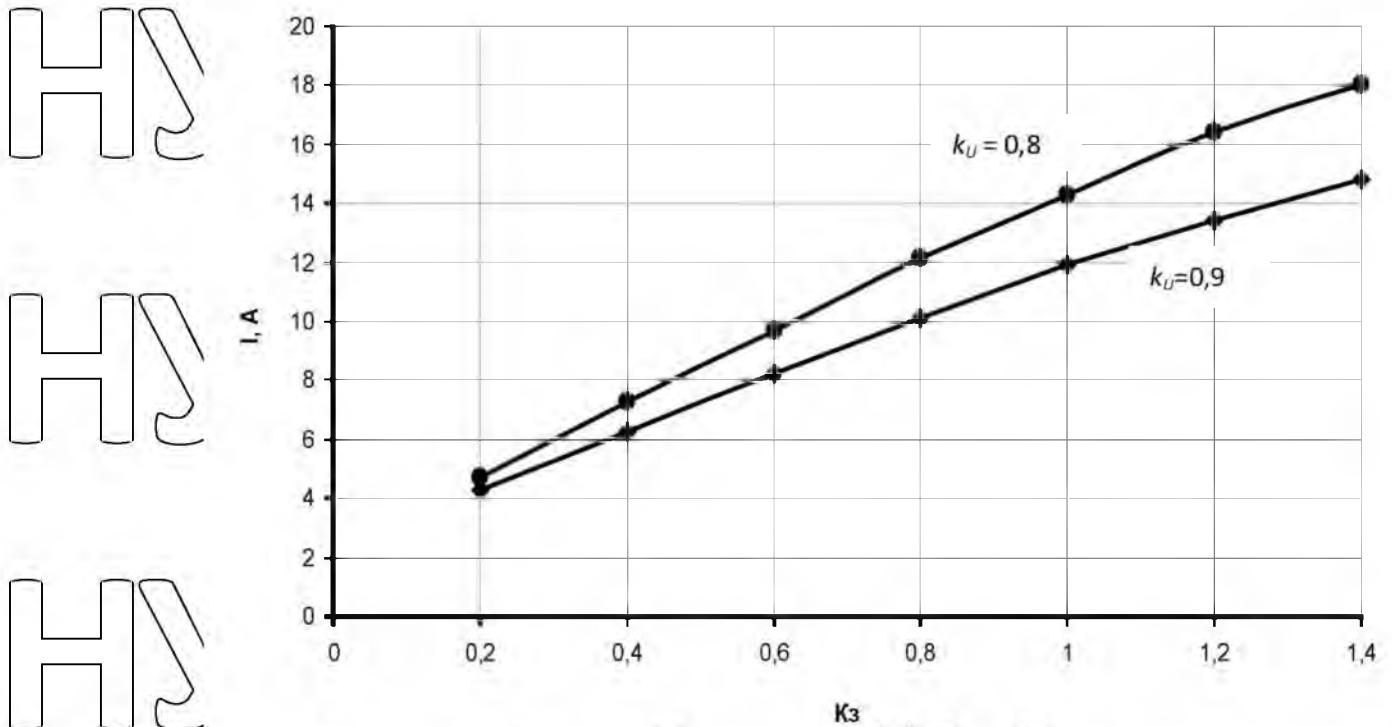


Рис. 2.3. Залежності сили струму в обмотці статора асинхронного електродвигуна в функції коефіцієнта завантаження при кратностях напруг  $k_u = 0,8$  і  $k_u = 0,9$

У результаті асинхронні двигуни дуже чутливі до відхилень напруги на затискачах. При зниженні напруги швидкість термічної деструкції ізоляції швидко зростає в повністю навантажених двигунах.

У результаті аналізу умов експлуатації електродвигуна і роботи захисного пристрою було сформульовано вимоги до пристрою для захисту синхронних двигунів від аварійних режимів роботи:

- Струм на фазу, споживаний електродвигуном
- Фазні напруги в мережі
- Температура ізоляції обмоток статора двигуна

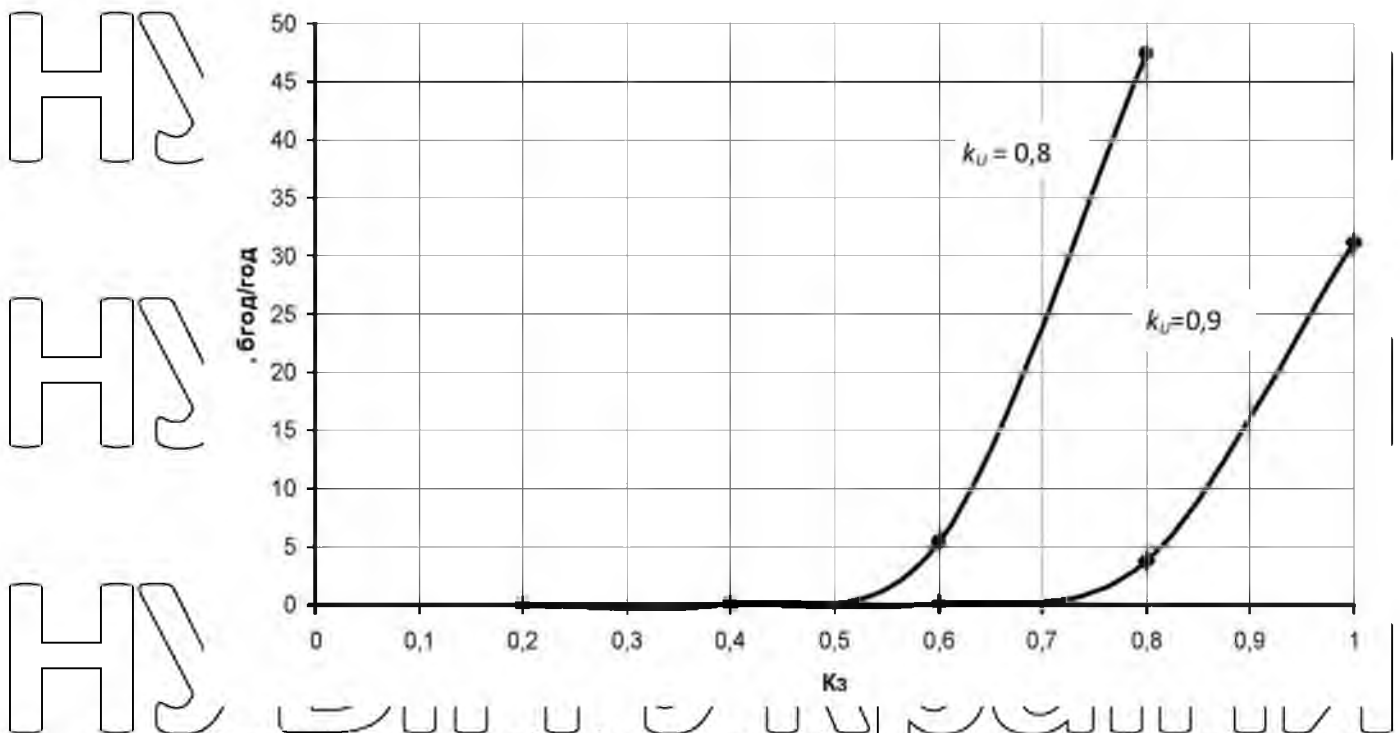


Рис. 2.4. Залежності зміни швидкості теплового зносу ізоляції обмотки

асинхронного електродвигуна в функції коефіцієнта завантаження при

кратностіх напругі  $k_U = 0,8$  і  $k_U = 0,9$

Крім того пристрій повинен:

- мати достатню швидкодію відключення захищеного електродвигуна;
- мати можливість постійного моніторингу напруги мережі, споживаного електродвигуном струму, температури ізоляції обмотки статора та відображення результатів на цифровому індикаторі;
- мати мале енергоспоживання;
- мати високу заводозахисність;
- мати можливість автоматичного відключення і включення електродвигуна, який захищається;
- бути реалізований на сучасній елементній базі;
- стабільно і надійно працювати в умовах сільських електричних мереж та при зміні температури навколишнього середовища в широких межах.

Цим вимогам відповідає пристрій, пропонується для захисту групи асинхронних електродвигунів від аварійних режимів роботи (рис. 2.5) [32].

Пристрій призначений для захисту електродвигунів і відключення їх від мережі змінного струму, якщо напруга в мережі падає нижче або перевищує задане значення, небезпечно збільшується струм, споживаний двигуном, і небезпечно підвищується температура ізоляції обмотки статора двигуна. Пристрій змонтовано на сучасній елементній базі та побудовано на базі мікроконтролера.

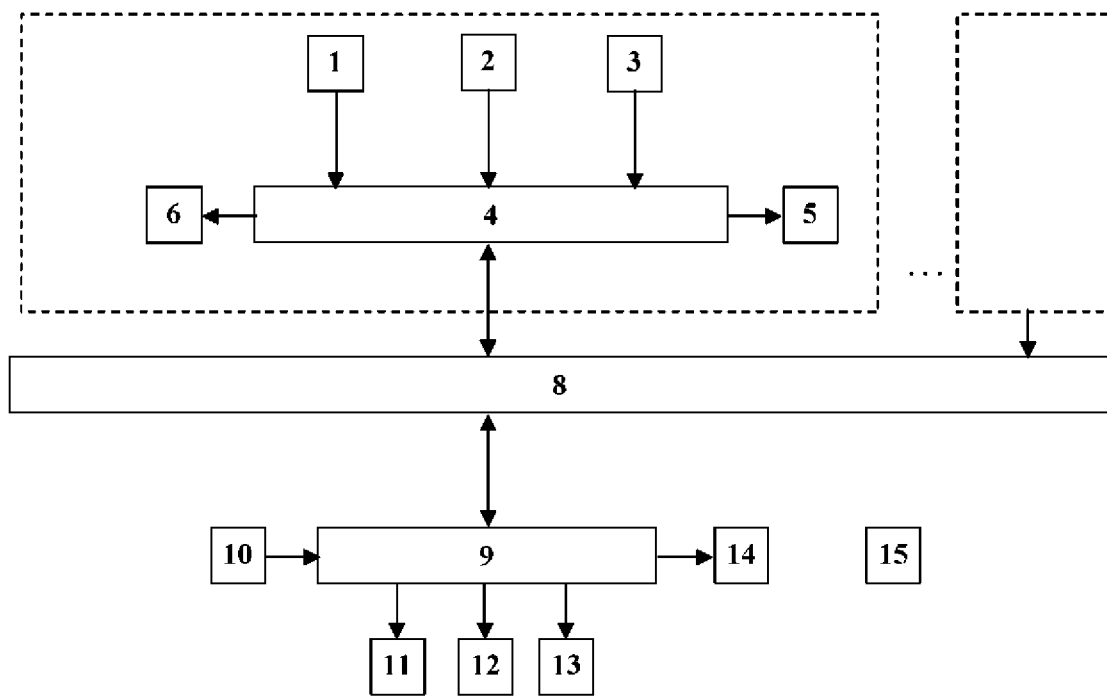


Рис. 2.5. Пристрій захисту групи асинхронних електродвигунів від аварійних режимів роботи

Пристрій захисту групи асинхронних двигунів від аварійного режиму роботи побудовано на базі ведучого пристрою, мікроконтролера 9 типу ATmega16, і декількох мікроконтролерів 4 типу ATmega8 в якості ведених пристроїв. Зв'язок між мікроконтролерами здійснюється по двонаправленій двопровідній шині I2C 8.

Пристрій містить блок керування електродвигуном 7, кожен з яких складається з веденого мікроконтролера 4, блок контролю температури ізоляції обмотки статора електродвигуна 1, блок контролю споживаного струму 2 і блок контролю фазної напруги 3, блок оптичних сигналів 5 і блок реле 6.

Крім того, є ведучий мікрокомп'ютер 9, клавіатура 10, блок цифрової індикації 11, блок оптичних сигналів 12, накопичувач 13, комунікаційний порт 14 і джерело живлення 15.

Обмін даними між ведучим і веденим пристроями відбувається по шині I2C; всі операції на шині I2C виконуються тільки по двох (2) лініях - лінії послідовних даних (SDA) і лінії послідовного тактового генератора (SCL). Кожен елемент ідентифікується унікальною адресою, що містить групу пристроїв і номер конкретного пристрою.

Блок керування двигуном 7 призначений для контролю температури ізоляції обмоток статора, струму, споживаного двигуном, напруги живлення та керування двигуном.

Блок контролю температури 1 і блок контролю струму 2 призначені для вимірювання і перетворення діагностичних параметрів, таких як температура ізоляції обмотки статора і струм, споживаний обмоткою статора двигуна, у корисні електричні сигнали, які надходять на відповідні порти мікроконтролера 4 для подальшого опрацювання.

Блок контролю напруги 3 призначений для вимірювання фазового значення напруги живлення та перетворення його в інформативний сигнал, який також подається на відповідний порт мікроконтролера 4 для подальшого опрацювання. Відомий мікроконтролер порівнює вхідні параметри діагностики із заданими значеннями. Залежно від значення вхідного параметра (після порівняння його із заданим значенням) мікроконтролер 4 видає сигнал на блок сигналізації 5 або відключає електродвигун за допомогою рележного блока 6.

Провідний мікроконтролер 9 задає основні потоки даних на шині, формує необхідні тимчасові інтервали, керує веденими мікроконтролерами 4 і обробляє дані, що надходять від них.

Залежно від стану провідного мікроконтролера сигнали надходять на блок цифрової індикації 11 і блок оптичних сигналів 12. Інформація зберігається в блоці пам'яті 13.

Для введення даних і керування пристроєм у системі передбачена клавіатура 10. Для контролю оператором поточних значень діагностичних параметрів пристрій забезпечено блоком цифрової індикації 11.

Визначення вхідних діагностичних параметрів, порівняння із заданими значеннями, приймання та видавання керівних сигналів здійснюється програмою.

Програма забезпечує введення даних про конструктивні, експлуатаційні та режимні фактори. Для цього в пристрої передбачено роз'єми для під'єднання програматора (для запису програми в мікроконтролер) і комунікаційного порту 14 (для обміну даними між пристроєм і ПК). Живлення пристрою здійснюється від блока живлення 15.

Інакше кажучи, пропонований пристрій захисту групи трифазних асинхронних двигунів контролює температуру ізоляції обмоток статора, струм, який споживає двигун, фазну напругу (наявність і рівень), забезпечує автоматичне вимикання двигуна в разі небезпечного відхилення від заданих значень, захищає двигун від основного аварійного режиму роботи і відмови знижуються до 5... 7%.

## **2.3. Аналіз способів пуску і регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів**

### **2.3.1. Основні вимоги до пуску асинхронного двигуна**

Основними характеристиками пуску асинхронного двигуна є пусковий момент і величина пускового струму [33]. При цьому повинні виконуватися такі вимоги:

1) пусковий момент повинен перевищувати зовнішній момент. Якщо пусковий момент, створюваний двигуном, перевищує момент опору вала, створюваний приводним механізмом, то ротор двигуна буде обертатися і досягне номінальної швидкості [34].

2) Пусковий струм не повинен перевищувати допустимого значення [33]. Пусковий струм має бути обмежений значенням, безпечним для нормальної роботи мережі, механічної та термічної міцності основних елементів двигуна.

3) Система пуску має бути максимально простою, а кількість і вартість пускових пристроїв мають бути зведені до мінімуму.

### 2.3.2. Прямий пуск

Цей спосіб застосовується для асинхронних двигунів з роторами малої або середньої потужності із зовнішньою кліткою. Обмотка статора підключається безпосередньо до мережі з номінальною напругою [33]. Конструкція двигуна цього типу така, що пусковий струм не спричиняє підвищення температури під час під'єднання статора до мережі, що небезпечно для механічної або термічної стійкості основних елементів двигуна [35].

Двигуни зазвичай запускають за допомогою електромагнітного вимикача  $K$  магнітного пускача (рис. 2.6, а) і розганяються автоматично по механічній характеристиці (рис. 2.6, б) від точки П, відповідної початкового пускового моменту, до точки Р (перетину механічних характеристик 1 двигуна і приводним механізмом 2), що відповідає умові [33].

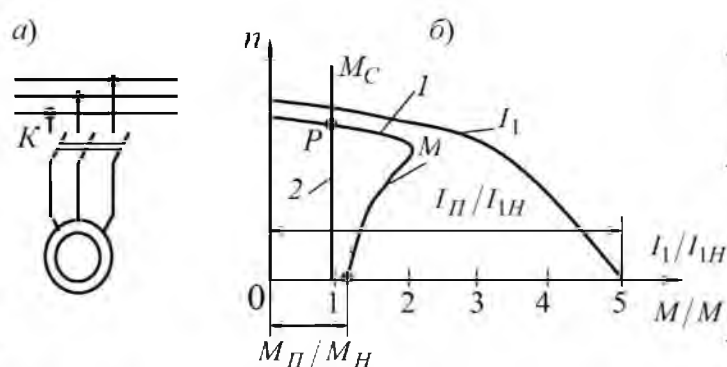


Рис. 2.6. Схема прямого пуску (а) та пускові характеристики двигуна (б)

Недоліками цього способу є відносно низький пусковий момент і великі пускові струми, що перевищують у п'ять-сім разів номінальне значення струму [33].

Сучасні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором проектують у такий спосіб, щоб пуск здійснювали безпосередньо за рахунок електродинамічних сил, що діють на обмотку, і умов нагрівання обмотки.

Пускові струми можуть бути знижені шляхом зміни конструкції обмотки ротора, включення додаткових резисторів у роторну мережу або зниження напруги живлення. Перші два способи дають змогу знизити пусковий струм за збереження досить високого значення пускового моменту. Використання третього способу неминуче знижує пусковий і критичний момент, який залежить від другого ступеня напруги живлення [33].

## 2.4. Короткозамкнені асинхронні двигуни з підвищеним пусковим моментом

### 2.4.1. Асинхронний двигун з подвійною білячою клітиною

Для досягнення високих значень ККД асинхронні двигуни проектуються з малими значеннями ковзання ( $s = 0,01-0,03$ ), що можливо за низького ефективного опору обмотки ротора. Однак у цьому разі пусковий момент двигуна буде низьким (нижчим за номінальний), що ускладнює використання прямого пуску. Проблема виникає під час проектування асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором, коли ефективний опір обмотки ротора під час пуску досить великий і зменшується зі збільшенням швидкості обертання ротора. Ця проблема розв'язується застосуванням обмотки ротора спеціальної конструкції та використанням ефекту витіснення струму в обмотці ротора. Такі двигуни називаються двигунами з підвищеним пусковим моментом [33].

Одним із варіантів такої конструкції є винайдений М.О. Дрибо-Добровольським асинхронний двигун із двокамерним ротором, що має дві електрично з'єднані або роз'єднані обмотки: робочу обмотку 1 розташовано в задній частині корпусу ротора, а пускову обмотку 2 - ближче до периферії (рис.

2.7, а). Магнітна провідність зони робочої обмотки вища, ніж магнітна провідність зони пускової обмотки, і розсіяний потік також вищий (магнітна провідність зони пускової обмотки штучно знижується за рахунок відкриття

пазів, що зменшує розсіяний потік). Пускова обмотка виготовляється з латуні, алюмінієвої бронзи або інших матеріалів з високим питомим опором, а робоча - з міді [33].

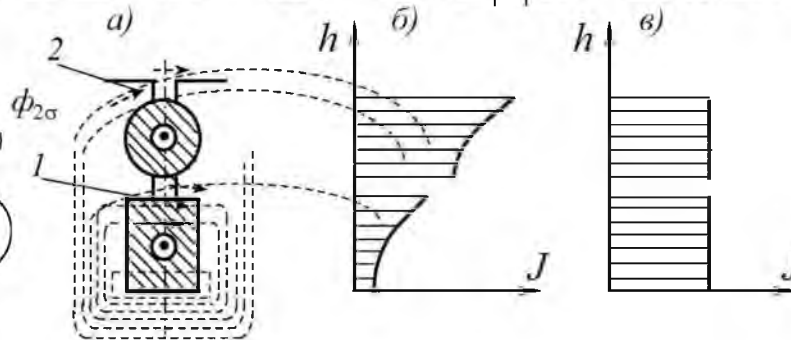


Рис. 2.7. Розріз паза (а) ротора з подвійною білячою кліткою і розподіл (б, в) густини струму по висоті паза ( $h$ )

В момент включення двигуна частота струму в його роторній обмотці  $f_2 = f_1$ . Обидві обмотки електрично з'єднані паралельно, і струм розподіляється

між робочою і пусковою обмотками обернено пропорційно їхнім імпедансам.

Оскільки робоча обмотка має дуже високу індуктивну реактивність, її повний опір у кілька разів перевищує повний опір пускової обмотки, що має дуже низьку

індуктивну реактивність. Струм у робочій обмотці в цьому разі значно менший

за струм у пусковій обмотці. Через великий індуктивний опір розсіювання

робочої обмотки струм у ній на великий кут відстає від електрорушійної сили,

створюваної індуктованим потоком, внаслідок чого ця обмотка під час пуску

створює відносно невеликий пусковий момент. І навпаки, струм пускової

обмотки під час пуску не тільки великий за величиною, а й через малий

індуктивний опір великий ефективний опір цієї обмотки практично синфазний

із взаємно індуктивною електрорушійною силою, унаслідок чого ця обмотка

створює досить великий обертальний момент [33].

По мірі розгону ротора зменшується ковзання і частота  $f_2 = f_1 s$  знижується

індуктивний опір робочої обмотки. Після завершення процесу розгону значення

ковзання стають меншими, і роль реактивного опору в розподілі струму

зменшується. Розподіл струму в обмотці ротора визначається танго залежністю.

$$I_{2П} / I_{2Р} \approx R_{2Р} / R_{2П}$$

і струм проходить в основному по робочій обмотці ротора, у якій  $R_{2Р} \ll R_{2П}$

Таким чином, у двокаскадному роторі струм у початковій фазі пуску нагнітається в зовнішню пускову обмотку, створюючи великий пусковий момент, а після закінчення пускового процесу протікає по робочій обмотці з малим ефективним опором, у результаті чого двигун працює з високим ККД. Для спрощення технології виготовлення двокаскадні двигуни виконуються з електрично пов'язаними литими алюмінієвими обмотками. Зниження реактивного опору пускової обмотки таких роторів досягається завдяки збільшенню аперттури пазів, а збільшенню значення ефективного опору - завдяки зменшенню перерізу пускової обмотки [33].

#### 2.4.2. Асинхронний двигун з глибокими пазами

Принцип роботи цього двигуна також заснований на явищі витіснення струму. Обмотки ротора з глибокими пазами працюють як змінний опір під час пуску й автоматично зменшуються в міру збільшення швидкості обертання ротора. На рис. 2.8 а показано найімовірніший розподіл магнітного потоку в пазах ротора. Видно, що когерентність потоку на ділянці провідника, розташованій поблизу дна паза (ділянка 1'-1'), більша, ніж когерентність потоку на ділянці провідника, розташованій поблизу поверхні паза (ділянка 2'-2'). Тому волокна, розташовані знизу, створюють велику ЕРС розсіювання, а волокна, розташовані зверху, - малу ЕРС розсіювання [33].

Це особливо помітно при нерухомому роторі, коли частота струму в його ланцюзі дорівнює частоті струму в статорі. Діаграма рис. 2.8, б показує протидію ЕРС розсіювання  $E_2$ , основної ЕРС  $E_2$ , що перешкоджає проходженню струму  $I_2$  і витісняє його в верхню частину паза. Площа поперечного перерізу провідника зменшується, що призводить до збільшення ефективного опору і зменшення індуктивного опору (струмопровідна здатність ефективного частини перерізу

менша за струмопровідну здатність усього провідника). Збільшення ефективного опору знижує пускові струми і збільшує пусковий момент [33].

Зі збільшенням частоти обертання ротора частота струму в ньому зменшується, і ефект витіснення слабшає. У міру наближення частоти обертання ротора до синхронної швидкості крива 1 розподілу струму по висоті канавки (рис. 2.8) збігається з кривою 2 наприкінці пуску.

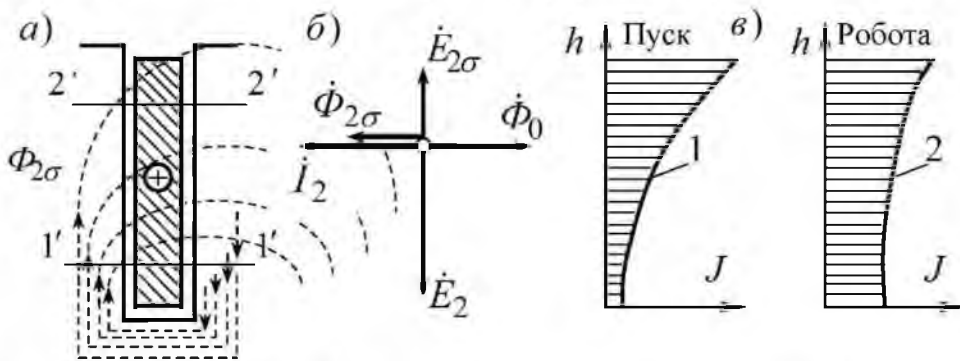


Рис. 2.8. Паз (а) глибокопазного ротора, діаграма ЕРС і розподіл щільності струму (в) по висоті паза (h)

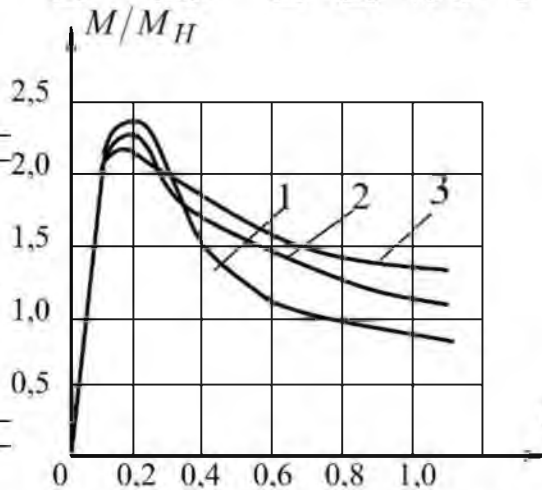


Рис. 2.9. Характеристики двигунів з різними обмотками роторів

Залежності  $M=f(s)$  двигунів з різними конструкціями обмоток ротора наведені на рис. 2.9 (крива 1 - для двигуна з звичайною короткозамкненою

обмоткою, крива 2 - для двигуна з глибокопазним ротором, крива 3 - для двигуна з двоохлітінним ротором) [33].

Найбільший пусковий момент отримується в двигуні з двоохлітківим ротором. Кратність пускового моменту для нього  $M_{п}/M_{н} = 1,3-1,7$ , при кратності пускового струму  $I_{п}/I_{н} = 4,5-6$ . За рахунок більшої величини потоку розсіювання в роторній обмотці коефіцієнта потужності і ККД двигунів з підвищеним пусковим моментом трохи нижче, ніж двигунів нормального виконання [33].

## 2.5. Пуск асинхронного двигуна при зниженій напрузі

Якщо прямий пуск двигунів із короткозамкненим ротором неможливий через падіння напруги в мережі, використовують різні способи пуску зі зниженою напругою. Оскільки крутний момент пропорційний другому ступеню напруги на виводах обмотки статора або другому ступеню пускового струму, пусковий момент знижується, і пуск зниженою напругою спричиняє проблеми [33]. Цей метод пуску використовують для пуску потужних високовольтних двигунів на холостому ході або за невеликих навантажень [35].

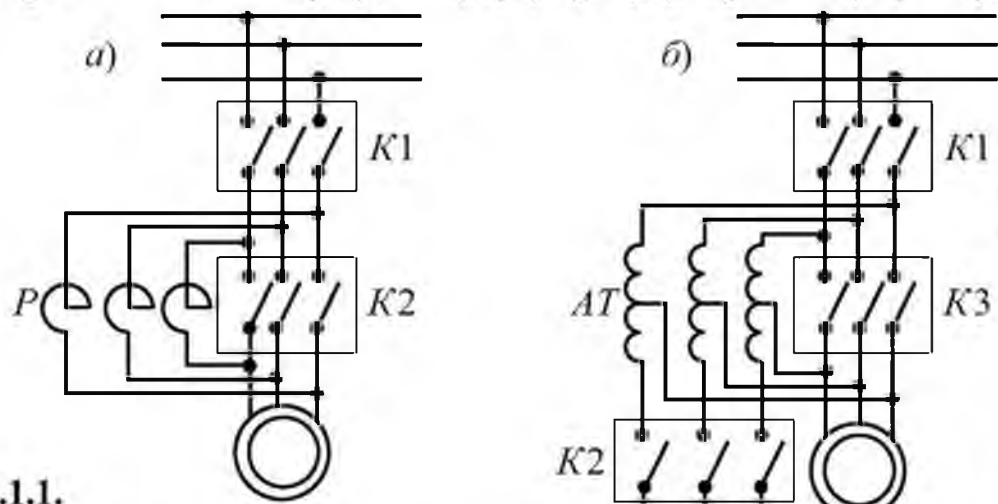


Рис. 2.10. Схеми пуску асинхронних двигунів при зниженій напрузі

### 2.5.1. Реакторний пуск

Здійснюють за схемою рис. 2.10, а. За допомогою ключа  $K1$  двигун отримує живлення через трифазний реактор (реактивну або індуктивну кодушку)

Р. На опорі реактора створюється падіння напруги  $\Delta U_D = X_{\Sigma} I_D$ , внаслідок чого до обмотки статора буде прикладена знижена напруга  $U_D = U_C - \Delta U_D$  [33].

По мірі розгону двигуна знижується ЕРС  $E_{2s}$ , індукована в обмотці ротора і пусковий струм. В результаті цього зменшується падіння напруги  $\Delta U_D$ , а напруга, прикладена до обмотки статора двигуна, автоматично зростає в міру розгону двигуна. Іноді в ланцюг статора включають активний опір [33; 34].

Після досягнення нормальної частоти обертання включається ключ  $K2$ , шунтовий реактор, в результаті чого на двигун подається повна напруга мережі.

При реакторному пуску, для зменшення пускового струму в  $K$  раз:

$$K = \frac{I_D}{I_D} = \frac{U_C}{U_D}$$

необхідно знизити напругу теж в  $K$  раз. При цьому пусковий момент

$$M_D = cU^2 = c \left( \frac{U_H}{K} \right)^2 = \frac{M_{пн}}{K^2}$$

зменшується в  $K^2$  раз.  $M_{пн}$  – пусковий момент при номінальній напрузі мережі.

Значне зниження пускового моменту є недоліком реакторного пуску [33].

### 2.5.2. Автотрансформаторний пуск

Підключення двигуна до мережі через понижувальний трансформатор АТ здійснюється в такій послідовності (рис. 2.10, б). Спочатку вмикаються ключі  $K1$  і  $K2$  для подачі на двигун понижувальної напруги. У разі досягнення двигуном певної швидкості клавіша  $K2$  вимикається, і живлення двигуна подається через частину обмотки автотрансформатора АТ (у цьому разі виконує роль реактора). Під час подальшого ввімкнення клавіші  $K3$  мережева напруга подається на обмотки статора двигуна. Пускові автотрансформатори розраховані на короткочасну роботу і мають кілька гілок для різних значень вторинної напруги, що дає змогу зменшити масу і габарити [33; 35].

### 2.5.3. Пуск двигуна перемиканням «зірка - трикутник»

Це можливо для двигунів, що працюють за схемою, за якої обмотки статора з'єднані в "трикутник" (з'єднано всі шість кінців обмоток статора), або для двигунів, що приводять у рух механізми з низьким пусковим моментом [33].

Якщо на період пуску обмотку статора перемкнути на схему «зірка», а напругу живлення залишити тим же, що і при схемі «трикутник», то напруга на фазу зменшиться в  $\sqrt{3}$ . В  $\sqrt{3}$  зменшиться й фазний струм, а електромагнітний момент - в три рази, так як  $M=cU^2$ . У період пуску зменшиться в три рази (в порівнянні зі схемою «трикутник») і лінійний струм. Робота двигунів в схемі «зірка» вигідна до навантажень, які перевищують 40-50% від номінальної: ККД і коефіцієнт потужності помітно підвищуються [33; 35].

Схема пуску перемиканням «зірка - трикутник» приведена на рис 2.11. У момент перемикання обмотку статора на короткий час від'єднують від мережі, а потім знову прислудують до неї [33].

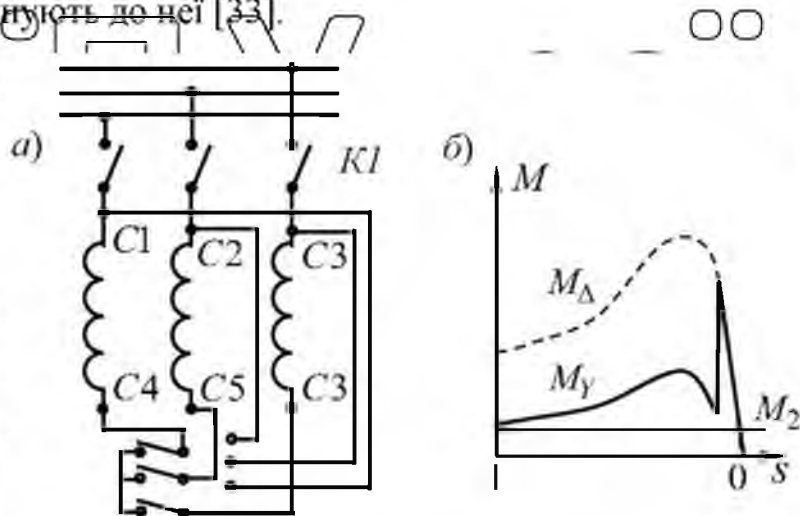


Рис. 2.11. Пуск перемиканням з зірки в трикутник

Це призводить до появи вільної складової магнітного потоку і формування великих кидків струму, що перевищують номінальне значення [33]. Цей метод широко використовувався для пуску низьковольтних двигунів, але у зв'язку зі збільшенням потужності мережі втратив своє значення і нині застосовується рідко [36].

## 2.6. Пуск асинхронного двигуна з фазним ротором

Двигуни з фазним ротором використовують рідше, ніж двигуни з короткозамкненим ротором. Їх застосування виправдане в тих випадках:

- якщо двигуни з короткозамкненим ротором неприйнятні з погляду регулювання швидкості [33].

- якщо пуск асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором зниженою напругою неприйнятний через великий статичний момент на валу під час пуску

$M_3$ , а прямий пуск таких двигунів неприйнятний через великий вплив пускового струму на мережу [33].

- коли приведена маса настільки велика, що теплова енергія, що виділяється у вторинному ланцюзі двигуна, спричиняє неприпустиме нагрівання обмотки короткого замикання ротора [33].

Включення додаткового активного резистора в ланцюг фазного ротора не тільки знижує пусковий струм, а й збільшує пусковий момент [36]. Перше впливає безпосередньо з рівняння пускового струму (за L-подібною схемою заміщення) [33]:

$$I = \frac{U_c}{\sqrt{(R_1 + R_2 + R_D)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

у разі збільшення ефективного опору ланцюга ротора максимальне значення кривої зміщується в бік більших значень ковзання, залишаючись при цьому незмінним.

Схему пуску при введенні в ланцюг ротора додаткового опору (реостата) показано на рис. 2.12, а. Графік зміни струму і частоти обертання показано на рис. 2.12, б. Під час додавання опору ротор двигуна розганяється за рахунок дії обертового моменту, що змінюється за кривою 4, показаною на рис. 2.13. Зі збільшенням швидкості обертання обертовий момент  $M$  зменшується і може виявитися нижчим за певний момент  $M = M_{I_{\min}}$ . Тому при досягненні двигуном моменту  $M = M_{I_{\min}}$ , відповідно точці  $a$  кривої 4, частина опору пускового

реостата виводять, замикаючи контактор  $K3$ , що призводить до збільшення струму обмотки статора (рис. 2.12, б). Обертальний момент при цьому миттєво зростає до  $M_{II\max}$ , а потім при збільшенні частоти обертання змінюється за влучним висловом 3, відповідної опору реостата  $R_{II2} = R_{D1} + R_{D2}$ . При розгоні до точки б, що відповідає тому ж моменту  $M = M_{II\min}$ , виводять другу ступінь опору реостата, і двигун переходить на характеристику 2, відповідну  $R_{II1} = R_{D1}$  [33].

Таким чином, при поступовому (ступеневу) зменшенні пускового опору пусковий момент змінюється від  $M_{II\max}$  до  $M_{II\min}$ , а частота обертання зростає по ламаній кривій, показаної на рис. 2.12, б або рис. 2.13 жирними лініями [33].

Після закінчення пуску пусковий реостат повністю відключається контактором  $K1$ , обмотка ротора замикається накоротко, двигун переходить на роботу за природною характеристикою 1 і розганяється до швидкості обертання, що відповідає моменту навантаження на валу двигуна (точка Р). Струм обмотки

статора і швидкість обертання досягають заданого значення (б на рис. 2.12), що відповідає моменту на валу двигуна [35].

Збільшення пускового моменту при збільшенні опору роторної ланцюга можна показати за допомогою векторної діаграми (рис. 2.14) [33]. При  $R_D = 0$  струм роторного ланцюга  $I_{2II}$  великий, але відстає від ЕРС на порівняно великий кут  $\psi_2$ . Активна складова струму, що визначає момент, не велика і дорівнює  $I_{2IIA}$ . При включенні опору  $R_D$ , струм  $I_{2II}$  і кут  $\psi_2$  зменшуються. Активна складова струму  $I'_{2IIA}$  і разом з нею момент збільшуються.

Таким чином, включивши реостат в ланцюг ротора, можна здійснити пуск двигуна при  $M_{II} = M_{II\max}$  різко зменшити пусковий струм [33].

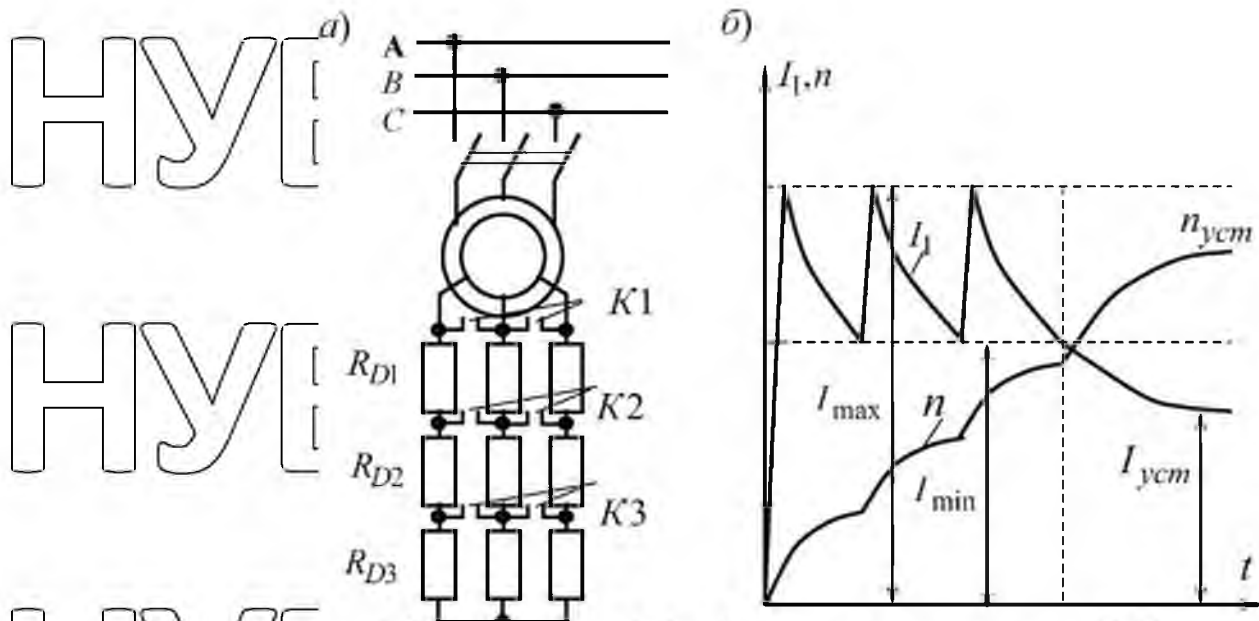


Рис. 2.12. Реостатний пуск асинхронного двигуна (а), графіки зміни частоти обертів і струму (б)

Під час запуску двигуна з фазним ротором у ланцюг ротора послідовно або паралельно може бути під'єднаний індуктивний резистор (реактор) [35, 36]. Він виконує функцію автоматичного регулятора струму ротора. Якщо частота струму ротора на початкових етапах пуску становить  $f_2 = f_1$ , індуктивний опір

реактора великий і обмежує величину пускового струму. По мірі розгону ротора зменшується його ЕРС  $E_{2s}$  але одночасно зменшуються частота і результуючий індуктивний опір ланцюга ротора  $X_{2s}$ , в результаті чого струм ротора зменшується повільніше, ніж при включенні пускового реостата без реактора.

При зменшенні індуктивного опору реактора зростає  $\cos\psi_2$ . Електромагнітний момент  $M = c_{m1} \Phi_m I_2 \cos\psi_2$  при цих умовах також змінюється повільніше і на початку розгону його значення може бути вище, ніж без реактора [33].

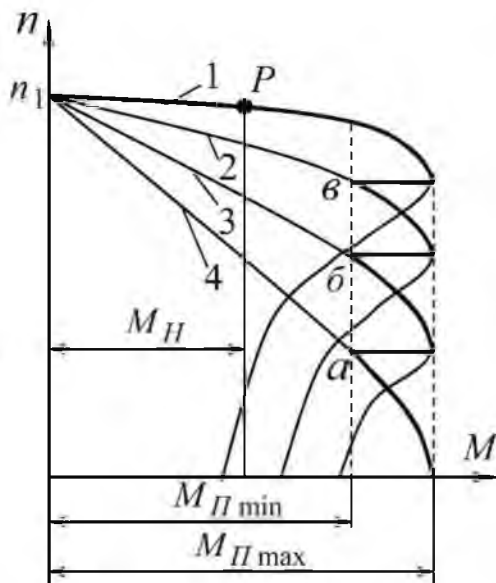


Рис. 2.14. Пускова діаграма асинхронного двигуна

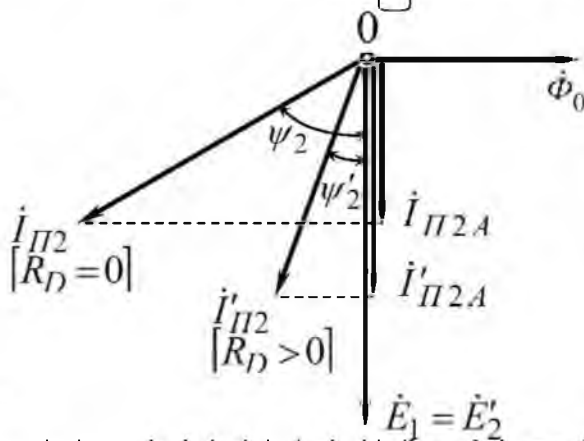


Рис. 2.15. Векторна діаграма струмів ротора при реостатному пуску

## 2.7. Асинхронний двигун з підвищеним пусковим моментом та спроможністю регулювання обертів при зміні навантаження

Ротор цього двигуна складається з двох тритиснутих один до одного роторів, причому перший ротор виконаний у вигляді масиву, другий - класичної конструкції з короткозамкненими обмотками, магнітним шунтом усередині магнітопроводу статора з обмотками, що намагнічують, і трансформатором струму через силовий випрямляч. Живлення здійснюється від блоку.

На рис. 2.16 показано конструкцію асинхронного двигуна зі статором 1 і ротором 2.

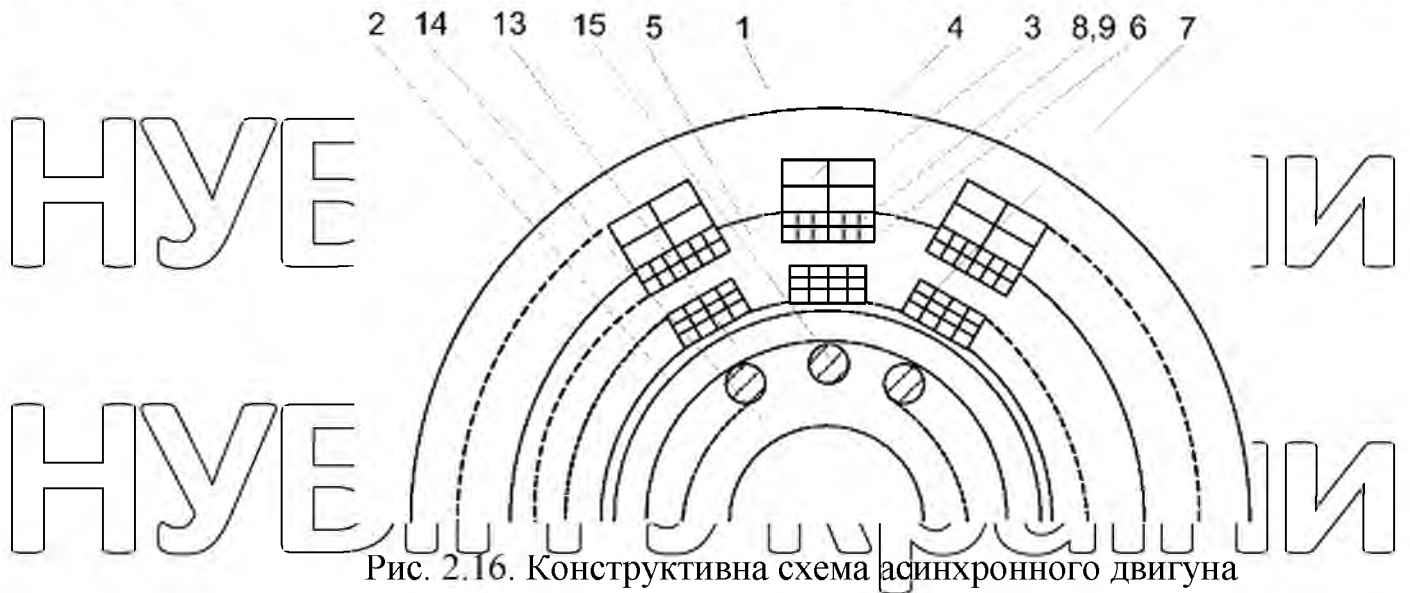


Рис. 2.16. Конструктивна схема асинхронного двигуна

Статор 1 має на внутрішній циліндричній поверхні паз 3, у якому розміщені трифазні обмотки 4 і внутрішній магнітний шунт 5 з пазами 6 і 7 на внутрішній і зовнішній циліндричних поверхнях.

У пазах 6 і 7 розміщено тороїдальну намагнічену обмотку, що складається з двох частин 8 і 9, одна з яких 8 отримує живлення від силового випрямляча 10, як показано на мал. 1.11. Силевий випрямляч 10 під'єднано до виходу блока трансформаторів струму 11. Друга намагнічувальна обмотка 9 отримує живлення від блока керування 12.

Ротор двигуна 2 складається з двох роторів 13 і 14, притиснутих один до одного. Зовнішній ротор 13 має менший радіальний розмір, ніж внутрішній ротор 14, і виготовлений зі сталі. Внутрішній ротор 14 за своєю конструкцією нагадує звичайний асинхронний двигун із короткозамкнутою обмоткою 15.

Перетин стрижнів обмотки короткого замикання 15 підібрано таким чином, щоб за номінального режиму роботи ковзання двигуна було мінімальним.

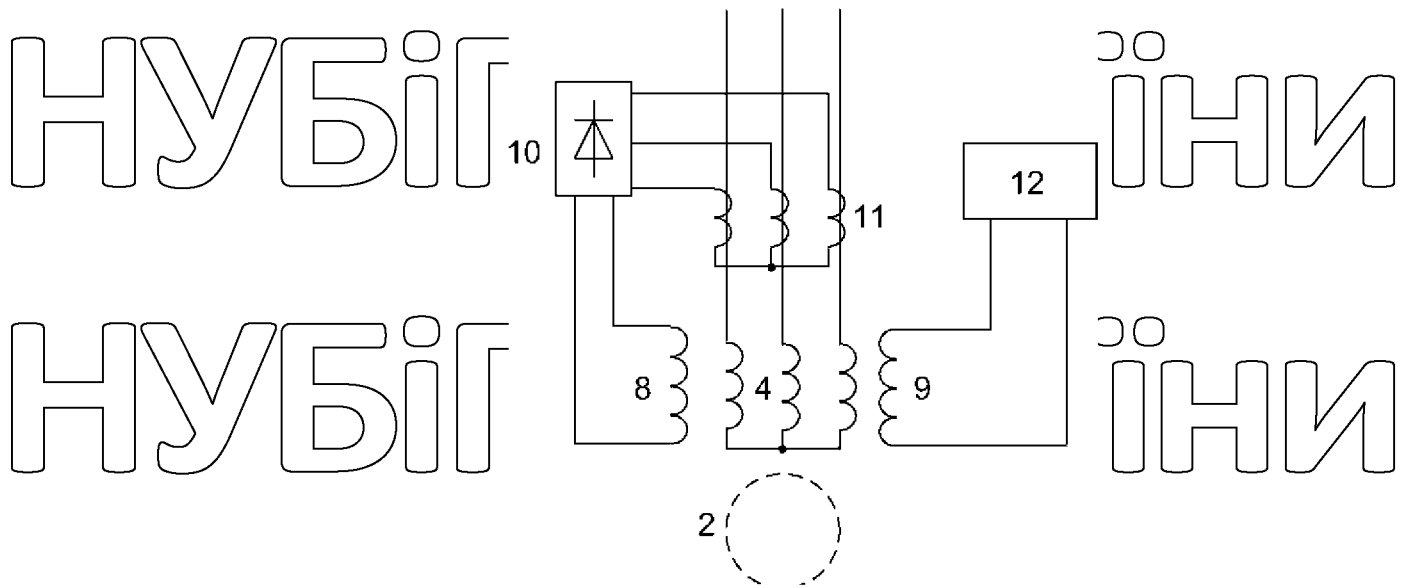


Рис. 2.17. Схема включення

Електромагнітний момент асинхронного двигуна створюється сумарною дією електромагнітних моментів, зумовлених взаємодією вихрових струмів у масиві 13 двигуна, струмів у короткозамкненій обмотці 15 і магнітного поля машини. При цьому моменти, створювані короткозамкненими обмотками 15, переважають у зонах малого ковзання, а моменти, створювані масивом 13, переважають у зонах великого ковзання.

Режим пуску і режим регулювання та стабілізації частоти обертання двигуна здійснюється таким чином [37, 38]. Під час увімкнення двигуна (пуску) струм, споживаний обмоткою статора 4, значно перевищує номінальний струм двигуна. У результаті струм у намагнічувальній обмотці 8, що живиться від блока трансформатора струму 11 через силовий випрямляч 10, стає максимальним, магнітний шунт 5 насичується, і його потік витісняється в ротор [36].

Під час пуску електромагнітна частота ротора максимальна, тому ( $f_2 = f_1$ ) у результаті під час пуску струм в обмотці ротора 15 практично дорівнює нулю і спостерігається явище "витіснення", коли струм у масиві 13 витісняється до зовнішньої поверхні. У результаті під час пуску струм в обмотці ротора 15 практично дорівнює нулю, а витіснення струму в масиві 13 до зовнішньої

поверхні збільшує його ефективний опір. Таким чином, двигун має високий пусковий момент ( $M_{пуск}$ ), рис. 2.18, при зменшених пускових струмів [36].

Зі збільшенням частоти обертання струм, споживаний обмоткою статора 4, зменшується, а отже, зменшується і струм у намагнічувальній обмотці 8.

Магнітопровід шунта 5 стає ненасиченим, і частина магнітного потоку, створеного обмоткою 4, замикається через шунт 5, що призводить до зменшення потоку ротора. Крім того, зменшується електрорушійна частота ротора 2, що знижує вплив струму "витіснення". Це призводить до зменшення

ефективного опору масиву і збільшення струму в обмотці короткого замикання 15. Електромагнітний момент двигуна збільшується і працює з прослизанням S1 [36].

Таким чином, під час пуску асинхронні двигуни мають значно менший пусковий струм і більший обертальний момент, ніж асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором.

Регулювання швидкості асинхронних двигунів здійснюється шляхом зміни величини магнітного потоку, що замикається через шунт.

Під час збільшення струму в намагнічувальній обмотці 9 під впливом сигналів від блока керування 12 магнітний шунт 5 насичує зовнішній ротор 13, збільшуючи тим самим магнітний потік, що замикається через внутрішній ротор 14 [36].

Таким чином, закорочена обмотка 15 має низький ефективний опір і починає брати участь у генерації електромагнітного моменту. Механічні характеристики двигуна починають зміщуватися вліво, ковзання S2 зменшується (частота обертання збільшується). 118. Що більший струм у намагнічувальній обмотці 9, то більша частина магнітного потоку замикається через внутрішнє ядро ротора 2. Тому електромагнітний момент, що виникає в двигуні за великих струмів намагнічувальної обмотки, зумовлений переважно взаємодією струму обмотки ротора з магнітним полем машини. Змінюючи струм намагнічувальної

обмотки, можна в широкому діапазоні змінювати частоту обертання асинхронного двигуна [36].

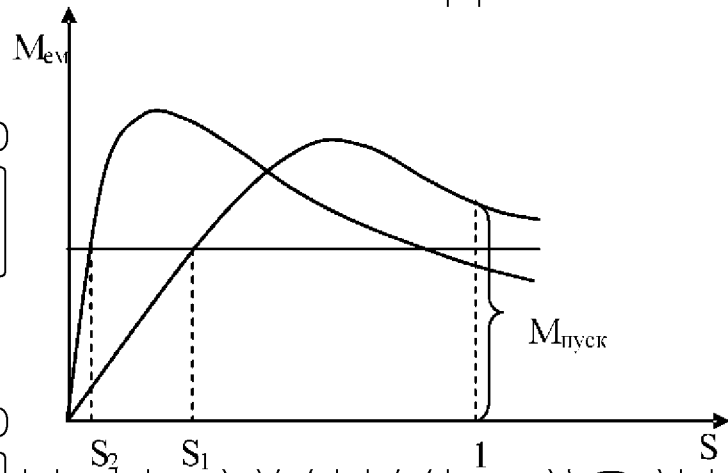


Рис. 2.18. Механічна характеристика двигуна

Під час зміни навантаження на валу асинхронного двигуна змінюється струм, споживаний обмоткою 4 статора 1. При цьому змінюється вихідна напруга силового випрямляча 10 і обмотки 8, що намагнічує, що, своєю чергою, змінює насичення магнітного шунта. Таким чином, при зміні величини навантаження на валу асинхронного двигуна змінюється і величина електромагнітного моменту, що забезпечує стабілізацію частоти обертання асинхронного двигуна [36].

Виконання зовнішнього ротора у вигляді масиву, виключення проміжного циліндра та розміщення магнітного шунта всередині магнітного кола статора дає змогу використовувати обмотки статора барабанного типу з удвічі меншим числом витків у фазу, ніж у тороїдальних обмоток, що значно спрощує конструкцію асинхронного двигуна та зменшує його радіальні розміри. Цього можна досягти.

## РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ ТА ЗАХИСТУ ГРУПИ АСИНХРОННИХ ДВІГУНІВ, ЩО ЖИВЛЯТЬСЯ ВІД ОДНІЄЇ СЕКЦІЇ ШИП

### 3.1. Інформаційна система діагностики та захисту електродвигуна

Системи діагностики та захисту електродвигунів призначені для діагностики причин підвищення температури ізоляції обмотки, визначення товщини пилового шару на ізоляції обмотки статора, обліку кількості пусків, виявлення розгалужень в обмотці, визначення часу профілактичного огляду, захисту електродвигуна за температурою, захисту роботи в умовах неповної фази тощо.

На тлі економічної кризи багато українських компаній переходять від систем періодичного профілактичного обслуговування до обслуговування після ремонту обладнання. Своєчасний контроль кількості пусків електродвигунів, ізоляція статора і видалення пилу з обмоток, контроль температури обмоток вище допустимих значень, своєчасне оповіщення про аварійні ситуації та їхні причини, захист електродвигунів сприяють збільшенню терміну служби устаткування і безаварійній роботі підприємств. Цілеспрямоване профілактичне обслуговування має змогу скоротити чисельність обслуговувачого персоналу, знизити матеріальні та накладні витрати. Основними причинами скорочення терміну служби електродвигунів є прискорене старіння ізоляції обмотки статора внаслідок механічних ударів по ізоляції під час частих пусків і теплові перевантаження як під час загального перегрівання ізоляції, так і під час її локального перегрівання. За даними статистичних досліджень, (80-85) % відмов електричних машин, що працюють у чорній металургії, пов'язано з пробоем ізоляції обмотки статора. Термін служби ізоляції при теплових перевантаженнях визначається за такою формулою

$$B = C e^{-b\theta_{\text{ном}}} \cdot (\text{рік, місяць, дні}), \quad (3.1)$$

де  $B$  і  $C$  – коефіцієнти, які залежать від класу ізоляції,  $\theta_{\text{нор}}$  – постійна припустима температура,  $b$  – величина, що залежить від складу ізоляції, її якості, ступені старіння та ін., прийнята  $=0,069^{\circ\text{C}^{-1}}$ .

Слід зазначити, що перегрів ізоляції обмоток електродвигуна понад допустимі значення навіть при температурі  $8-10^{\circ\text{C}}$  може скоротити термін служби більш ніж удвічі. У багатьох галузях промисловості України електродвигуни можуть експлуатуватися в умовах підвищеної запиленості, наприклад, у металургії, вуглевидобутку, портах, що перевантажують вугілля та інші сипучі матеріали. Тривала робота електродвигунів у таких умовах призводить до відкладення пилу на верхній передній поверхні обмоток статора. Товщина пилу різна: в електродвигунів потужністю  $50$  кВт і більше верхня лицьова поверхня обмотки вкрита пилом завтовшки  $2-5$  см, а нижня частина обмотки -  $0,2-0,3$  см. Шар пилу на обмотках призводить до зниження тепловіддачі та локального підвищення температури ізоляції під шаром пилу.

Розрахунки та експерименти показують, що залежно від товщини пилу різниця температур між чистою і запиленою ізоляцією має лінійний характер і залежить від теплопровідності пилу, тобто його складу.

Під час прямого пуску електродвигунів, коли пусковий струм у  $5-7$  разів перевищує номінальний, в ізоляції виникають динамічні та теплові перевантаження, які спричиняють зношування ізоляції в пазах статора і мікротріщини в ізоляції в місцях виходу проводів із пазів. Мікротріщини в ізоляції разом із пилом, особливо струмопровідним (наприклад, окалиною, вугільним або графітовим пилом), збільшують поверхневі струми, що призводить до локального перегріву ізоляції і зниження терміну служби двигуна. Нормативне число пускових циклів залежить від потужності електродвигуна і становить  $1000$  циклів для великих машин і  $2000$  циклів для малопотужних машин. Після досягнення зазначеної кількості пускових циклів необхідно проводити регулярне технічне обслуговування електродвигуна.

Вимірювання повного зносу ізоляції при підвищенні температури вище допустимих значень дозволяє планувати технічне обслуговування електродвигуна.

Для розв'язання цього завдання було розроблено нові пристрої діагностики та захисту електродвигунів. Введення нових елементів і їх взаємозв'язок дають змогу діагностувати теплові перевантаження в обмотках електродвигуна, а також локальні перегриви вкритої пилом ізоляції. Прилад виявляє розгадування в обмотках, захищає електродвигун від теплового перевантаження, неповнофазного режиму мережі та обривів фаз у силовому кабелі, визначає товщину пилового шару в обмотках статора, веде облік кількості пусків і визначає час для своєчасного проведення ремонтних робіт.

Розроблений пристрій дає змогу визначати товщину пилового шару на ізоляції обмоток шляхом контактного вимірювання та безперервного порівняння температур на нижньому і верхньому фронтах обмоток статора двигуна.

Згідно з рівнянням теплового балансу електричної машини

$$dQ = \Delta P dt = c m d\theta + K_{me} S_n \Delta\theta dt, \quad (3.2)$$

де  $dQ$  – теплова енергія, яка виділяється в машині при протіканні робочого струму;  $c$  – питома теплопровідність машини;  $m$  – маса машини;  $S_n$  – площа охолодження машини;  $K_{me}$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $\Delta\theta$  – перевищення температури ізоляції обмотки над температурою навколишнього середовища.

З огляду на ослаблення теплового потоку  $q$  від ізоляції обмотки статора до повітря через плоско-паралельну стінку пилу через одиничну площу –  $S$ , що визначається виразом:

$$q = -\alpha \frac{d\theta}{dx} S, \quad (3.3)$$

де  $q$  – тепловий потік,  $\alpha$  – коефіцієнт теплопровідності пилу,  $\theta$  – температура зміни потоку вздовж осі  $x$ .

Залежність товщини покриття пилу  $H$  від різниці температур ізоляції, покритої і не покритої пилом –  $\Delta\theta_{уу}$  у сталому режимі при номінальному струмі навантаження, для інженерного розрахунку, визначиться за виразом:

$$H = \alpha \Delta Q_{\text{ус}} \quad (\text{м}) \quad (3.4)$$

Товщина шару пилу може бути визначена шляхом порівняння температур ізоляції покритого і непокритого пилу. Якщо ізоляційні поверхні обмотки чисті, то температури ізоляції у верхній і нижній частині фронту обмотки зростатимуть однаково. Одночасне досягнення критичних температур дає змогу зробити висновки про всі причини, що призводять до перегрівання ізоляції, як от струмові перевантаження через несправність підшипників у двигуні або приводному механізмі, нефазна робота мережі, підвищене навантаження на вал двигуна та інші причини.

Тому вимірювання температури ізоляції у двох точках на лицьовій стороні обмотки дає змогу, по-перше, чітко визначити засмічення обмотки пилом через різницю температур і, по-друге, виявити теплові перевантаження одночасно з підвищенням температури. У першому випадку визначається товщина шару пилу і подається сигнал. У другому випадку, якщо температура досягає заданого критичного значення, двигун відключається від живлення і подається сигнал. Допустимі та критичні температури ізоляції залежать від класу ізоляції. Наприклад, для двигунів із класом ізоляції обмотки F температура обмотки не має перевищувати 105 °С, а робоча температура (допустима температура) становить 90 °С за температури навколишнього середовища до +40 °С.

Оскільки температура є домінуючим фактором погіршення ізоляції в електродвигунах, погіршення ізоляції може бути визначено шляхом вимірювання температури ізоляції обмотки статора і часу роботи двигуна за цієї температури.

Згідно з [39], знос ізоляції за одиницю часу визначається за таким рівнянням

$$\beta = \frac{1}{B} = \frac{1}{C} e^{\beta \theta_{\text{дон}}} \quad (3.5)$$

Переходячи до безрозмірної величини  $Z = C\beta$ , загальне зношення ізоляції за час певного циклу нагрівання та охолодження обмотки електродвигуна дорівнює:

$$Z = \frac{\tau e^{b\theta_{\text{нор}}}}{b\Delta\theta_{\text{пер}}} \left[ 4e^{b\Delta\theta_{\text{пер}}} + e^{b\Delta\theta_{\text{пер}}} \left( 1 + \frac{t_{\text{пер}}}{\tau} \right) - 5 \frac{t_{\text{пер}}}{\tau} \right] \quad (3.6)$$

де  $\tau$  – постійна нагрівання електродвигуна  $\tau = \frac{1}{3} t_{\text{доп}}$  – час, за який електродвигун нагріється до  $\theta_{\text{нор}}$  допустимої температури при робочому струмі,  $\Delta\theta_{\text{пер}} = \theta_{\text{нор}} - \theta_{\text{пер}}$  перевищення температури при перегріванні ізоляції,  $t_{\text{пер}}$  – період часу перегрівання ізоляції.

Таким чином, за результатами вимірювання часу і температури ізоляції можна розрахувати залишковий ресурс двигуна і визначити, коли необхідно проводити профілактичне обслуговування.

Постійна часу нагріву – це постійна величина для кожного двигуна, яка визначається питомою теплоємністю і масою під час протікання робочого струму через обмотки двигуна. Якщо режим роботи двигуна залишається незмінним (постійний робочий струм), то постійна часу нагріву може змінитися під час зміни опору будь-якої з фазних обмоток статора, тобто під час виникнення розгалуженого ланцюга. Тому, визначивши постійні часу нагріву наявних електродвигунів і порівнявши їх зі значеннями, що регулярно трапляються, можна зробити висновки про наявність ланцюгів розгалуження обмоток статора.

Режим холостого ходу виникає під час падіння пускового моменту до значення, недостатнього для обертання ротора (режим короткого замикання), внаслідок зникнення напруги живлення, обриву фазних дротів або пошкодження контактів пускача, що призводить до перегрівання обмоток і виходу двигуна з ладу; у робочому режимі падає момент на валу, збільшується двофазний струм, перегрівання ізоляції навантаження, у разі мимовільного вимкнення двигуна від мережі, що призводить до виходу двигуна з ладу. Безпосередній контроль рівня мережевої напруги на обмотках статора дає змогу виявити позафазні режими в

електромережі, обрив лій електропередачі, ослаблення контактів пускача або їх вихід з ладу, що забезпечує своєчасний захист двигуна.

На рис. 3.1 представлена блок-схема пристрою захисту АД: 1 – комутаційний блок, 2 – електродвигун, що працює в режимі зміни навантаження не більше ніж 10%, 3,4 – блоки вимірювання температури верхньої і нижньої лобових частин обмотки статора, 5, 6 – мікропроцесори, 7 – блок передачі сигналу, 8 – блок живлення й контролю лінійних напруг, 9 – блок прийому сигналу, 10 – виконавчий блок, 11 – дисплей, 12 – блок живлення.

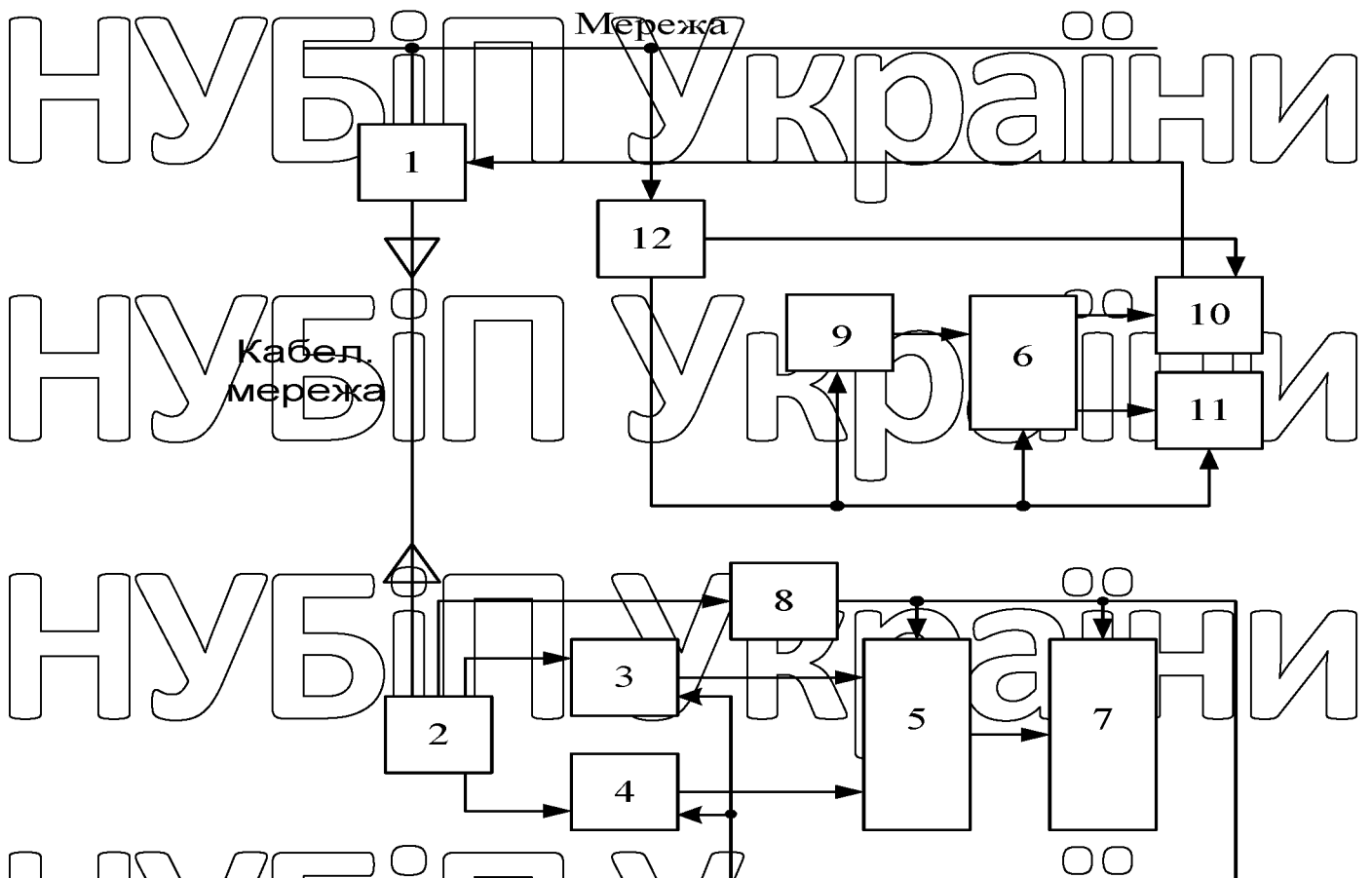


Рис. 3.1. Блок-схема пристрою захисту АД

На рис.3.2 показано розміщення терморезисторів на обмотці статора електродвигуна.

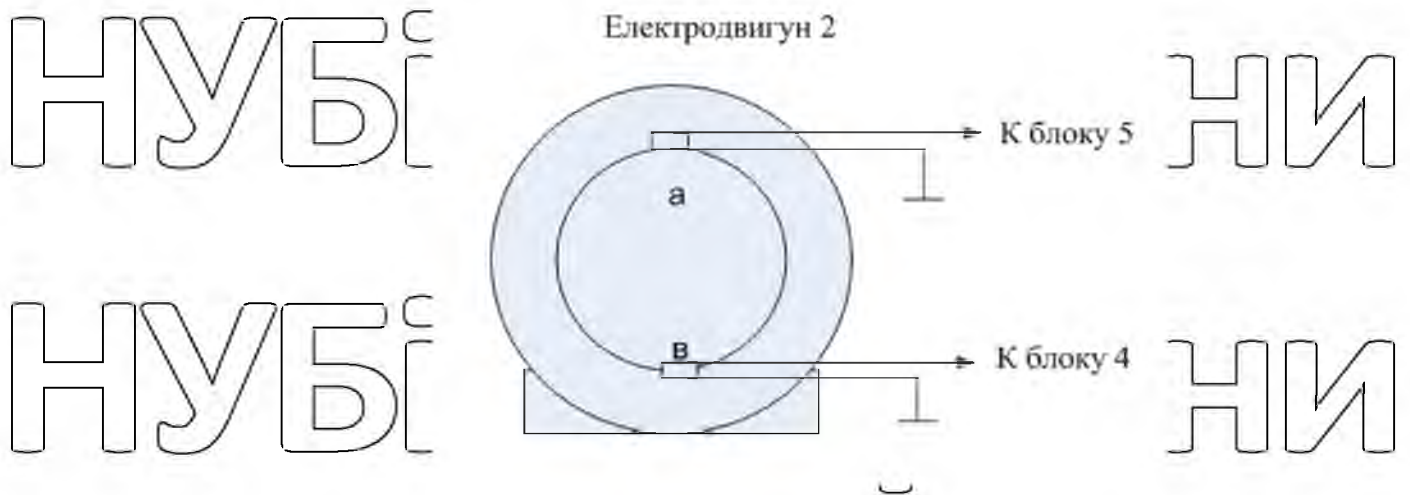


Рис. 3.2. Розміщення терморезисторів на обмотці статора електродвигуна

Позиція а – терморезистор розміщений на верхній лобовій частині обмотки, позиція в – терморезистор розміщений у нижній лобовій частині обмотки.

Блок комутації 1 під'єднаний до мережі електроживлення і вмикає та вимикає двигун 2. Терморезистори закріплені на передній верхній і нижній частинах обмоток двигуна та під'єднані до відповідних блоків вимірювання аналогових сигналів і цифрового перетворення 3 і 4, виходи блоків 3 і 4 під'єднано до входів мікропроцесора 5, вихід якого під'єднано до блока 7 (передавання сигналів), блок подавання мережевої напруги та керування 8 під'єднано безпосередньо до фазних обмоток (мал. 3), блок подавання мережевої напруги і керування 8 під'єднано безпосередньо до фазних обмоток "бобинки" (мал. 3) машини 2. Три виходи блока 8 керують рівнем мережевої напруги, під'єднаної до входів мікропроцесора 5, а четвертий вихід під'єднано до блоків 3, 4, 5 і 7 для подачі живлення. Блоки 3, 4, 5, 7 і 8 встановлені на корпусі двигуна 2. Блок 7 з'єднаний радіоканалом із блоком приймання сигналів 9, вихід блока 9 з'єднаний із входом мікропроцесора 6, вихід мікропроцесора 6 з'єднаний із дисплеєм 11 і виконавчим пристроєм 10, що керує блоком комутації 1, блок живлення 12 з'єднаний із мережею електроживлення, яка має вхід, під'єднаний до мережі електроживлення зі входами й виходами до блоків 6, 9, 10 і 11 для подавання живлення.

Блок комутації 2 являє собою електромагнітний пускач відповідного розміру з силовими і робочими колами, кнопкою "пуск" і "стоп" для дистанційного керування електродвигуном.

Блоки 3 і 4 вимірюють і перетворюють температурні сигнали за допомогою цифрового термометра Dallas (Maxim) DS 1821 T, який перетворює аналогові температурні сигнали безпосередньо в цифрові коди. Вимірювальні елементи (термістори) в блоках 3 і 4 закріплені відповідно у верхній і нижній частинах лицьової поверхні обмотки статора, як показано на мал. 2.2. Це забезпечує похибку вимірювання температури не більше ніж  $0,05^{\circ}\text{C}$ .

Мікропроцесори 5 і 6 виконані на базі мікроконтролерів Atmel mega 168V і слугують для приймання й оброблення сигналів. Мікропроцесор 5 з'єднаний із приймачем 7, виконаним на базі мікромодуля Sim 20 компанії SimCom, через двонаправлену шину SPI.

Блок 8 призначений для подачі та контролю мережевої напруги, що формується трьома однофазними трансформаторами, під'єднаними до фазних обмоток двигуна, вторинна обмотка яких містить мостовий випрямляч із паралельною послідовною фільтрацією. Дві позитивні напруги підключаються до входу мікропроцесора 5 через одну лінійну шину, утворюючи датчик мережевої напруги, який дає змогу контролювати напругу і струм фаз двигуна. Після датчика мережевої напруги та послідовного діода в кожній лінії під'єднано три позитивні виходи випрямленої напруги, що дає змогу подавати живлення на блоки 3, 4, 5 і 7 незалежно від несиметрії мережевої напруги, негативний потенціал якої під'єднано до спільної точки.

Блок 9 являє собою блок приймання сигналу, виконаний аналогічно блоку 6 і сполучений із ним радіоканалом.

Мікропроцесор 6 виконано аналогічно блоку 5 і призначено для приймання й оброблення інформації та керування виконавчим пристроєм 10. Вихід мікропроцесора 9 під'єднаний до дисплея 11 для відображення візуальної інформації.

Виконавчий пристрій 11 виконаний у вигляді проміжного реле, контакти якого з'єднані послідовно з колом керування пускачем, блока комутації 1 і слугують для аварійного відключення двигуна від мережі.

Блок живлення 12 слугує для подачі живлення на блоки 8, 9, 10 і 11 і виконаний за стандартною методикою отримання постійної напруги.

Робота обладнання полягає в такому.

Блок живлення 12 під'єднується до мережі й активізує роботу блока приймання сигналу 9, мікропроцесора 6, дисплея 11 і виконавчого блока 10. За допомогою кнопки "Пуск" блок комутації 1 подає напругу на електродвигун 2 і

блок 8 управління живленням і напругою мережі. Блок 8 подає живлення на блоки 3, 4, 5 і 7. Мікропроцесор 5 активізується і через блок передачі сигналу 7 подає сигнал на блок прийому сигналу 9, а мікропроцесор 6 фіксує запуск електродвигуна. Надалі під час увімкнення електродвигуна блоком комутації 1

мікропроцесор 6 підсумовує ці сигнали, тим самим підраховуючи кількість пусків електродвигуна і відображаючи їх на дисплеї 11.

Блоки 3 і 4 вимірюють температуру нижнього і верхнього ізоляторів обмоток статора електродвигуна в процесі роботи. Мікропроцесор 5 фіксує час запуску електродвигуна і час досягнення температурою обмоток певного

значення, визначає константу нагрівання електродвигуна  $\tau$  і передає це значення в мікропроцесор 6. Мікропроцесор 6 зберігає цю константу нагріву як постійну.

Надалі під час під'єднання електродвигуна до мережі визначається нове значення

константи нагріву і порівнюється з вихідним. Якщо константа нагріву

змінюється більш ніж на 10%, то визначається наявність короткого замикання в

обмотці двигуна, що відображається на дисплеї 11. Блоки 3 і 4 вимірюють

температуру ізоляції обмотки, і коли температура обмотки досягає критичної

точки, мікропроцесор 6 подає сигнал на блок виконання 10, який розмикає

ланцюг керування блока комутації 1 і відключає електродвигун 2 від

електромережі.

Запалення обмоток статора в робочому режимі призводить до різних

значень температури на виході блоків 3 і 4. Ця різниця температур і значення

коєфіцієнта теплопровідності пилу вводяться як константи в мікропроцесор 9, який розраховує товщину пилу на поверхні ізоляції (рівняння 4). Дані про товщину пилу і температуру обмотки виводяться на дисплей 11. У разі досягнення критичної температури на виході блоків 3 або 4 мікропроцесор 6 подає сигнал на виконавчий блок 10, який розмикає ланцюг керування блока комутації 1 і відключає електродвигун 2 від мережі. Якщо температура обмотки досягає критичного значення одночасно за двома термісторами в блоках 3 і 4, мікропроцесор 6 подає сигнал на виконавчий блок 10, який розмикає ланцюг керування блока комутації 1, електродвигун 2 відключається від мережі, а інформація записується на дисплей 11.

Блок 8 (контролю живлення та мережевої напруги) під'єднаний безпосередньо до фази обмотки електродвигуна 2 і контролює рівень мережевої напруги, а також може виявити відсутність фазового режиму в мережі живлення, обрив мережевого дроту, згоріле контактне з'єднання пускача в блоці комутації 1 або його несправність. У разі виникнення безфазного режиму зникає один із сигналів на виході блока 8 і вхід мікропроцесора 5, подається сигнал на блоки 7, 9 і мікропроцесор 6, а інформація про аварійний безфазний режим виводиться на дисплей 11. У режимі неповної фази мережа живлення блоків 3, 4, 5 і 7 захищається незмінною. Блоки 3 і 4 вимірюють температуру обмоток, і якщо температура ізоляції досягає критичного значення за допомогою термістора в блоці 3 або 4, то мікропроцесор 6 подає сигнал на виконавчий пристрій 10, який розмикає ланцюг керування комутаційного блока 1 і відключає електродвигун 2 від мережі живлення. Він відключає його і фіксує інформацію на дисплеї 11.

У робочому режимі мікропроцесор 6 фіксує час увімкнення електродвигуна 2, обчислює час, упродовж якого температура ізоляції не змінювалася, і фіксує значення температури ізоляції за цей період. При цьому враховується найбільше значення температури терморезистора в блоці 3 або 4.

Отримані дані обробляються в процесорі 9 згідно з рівняннями (5) і (6), обчислюється кінцевий період ізоляції, тим самим встановлюється час профілактичного обслуговування двигуна.

Контроль з урахуванням несиметричних коефіцієнтів мережевого струму і напруги, швидкості та паспортних даних рівняння ЕД дає змогу виявити несправність обмотки статора ЕД у разі погіршення ПДЯ.

### 3.2. Інформаційна система діагностики та захисту групи електродвигунів

В умовах конкуренції підвищення продуктивності та забезпечення безперебійної роботи технічних ліній і виробничих комплексів неможливе без оцінювання стану електрообладнання. Розвиток мереж зв'язку GSM-GPRS

уможливив діагностику та захист груп електродвигунів, керованих із диспетчерського пункту, з'явилася можливість створення інформаційних систем.

На рис. 3.3 показано діагностику й керування групою АД із використанням каналу зв'язку GSM-GPRS.

Для отримання інформації про стан кожного блоку обладнання необхідно вирішити такі завдання:

- визначення можливої кількості блоків обладнання, що підлягають опитуванню;

- визначення тривалості інтервалу отримання інформації про стан об'єкта;

- коригування інтервалу опитування в разі виявлення початкових стадій аварійної ситуації;

- мінімізація вартості інформаційних комплексів для діагностики та захисту електрообладнання.

Початковий період опитування  $\tau_{p1}$ , при роботі двигуна в нормальному режимі, повинен задовольняти умові

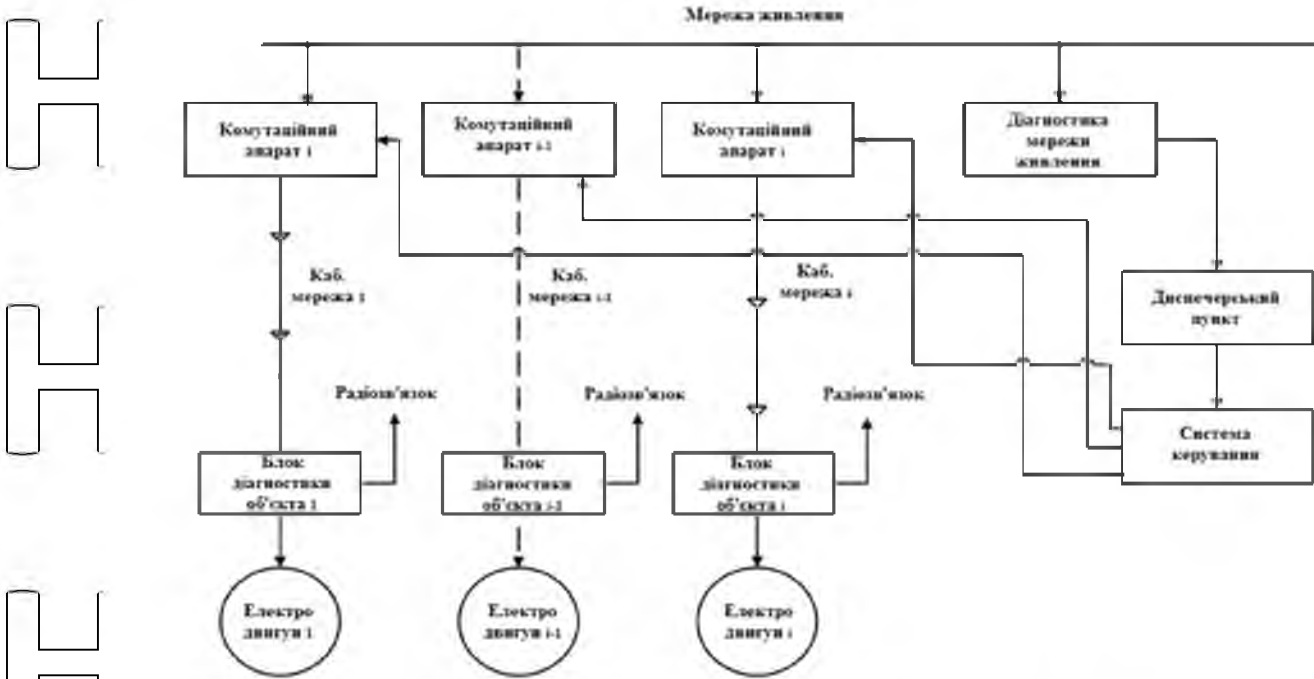


Рис. 3.3. Схема діагностики та управління групою АД з використанням каналу зв'язку GSM-GPRS

$$K = \frac{I_{нагр}}{I_{ном}} = 1,73, \tau_{доп} = 0,5 \rightarrow 0,6, \quad (3.7)$$

де  $\tau_{доп}$  — допустимий час роботи двигуна з перевантаженням і визначається при роботі двигуна в двофазному режимі, як найважчому режимі, при якому коефіцієнт струмового перевантаження дорівнює:

$K = \frac{I_{нагр}}{I_{ном}} = 1,73, \tau_{доп} = 8 - 12$  минут для двигунів потужністю до 5 кВт, 15-20 минут, для двигунів потужністю до 50 кВт и 30-40 минут для двигунів потужністю більш 75 кВт та залежить від постійної нагрів двигуна.

Початковий період опитування  $\tau_{рi}$ , при роботі двигуна в нормальному режимі, повинен задовольняти умові:

$$\tau_{рi} > n (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4), \quad (3.8)$$

де  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$  — час, необхідний для опитування датчиків, обробку первинної інформації, передачу первинної інформації на головний сервер, прийняття рішення і спрацьовування комутаційної апаратури.

На рис. 3.4 наведено графік зміни температури ізоляції обмотки статора двигуна 5 кВт, з коефіцієнтом  $K = 1,25$ . На цьому графіку показана динаміка

зміни періоду опитування двигуна  $\tau_{pi}$ , що знаходиться в перехідному тепловому режимі.

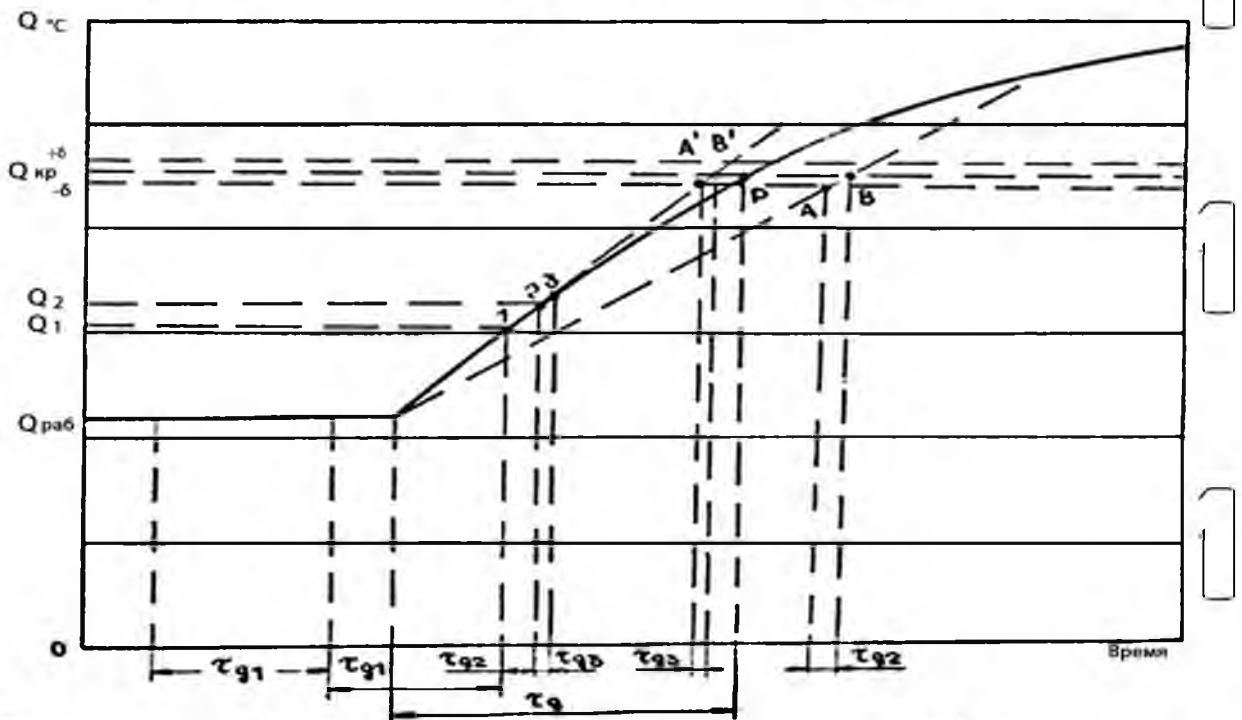


Рис. 3.4. Графік зміни температури ізоляції обмотки статора двигуна 1 кВт з коефіцієнтом перевантаження  $K \approx 1,25$

На графіку показано, як інтенсивність зміни температури ізоляції впливає на скорочення періоду до отримання першої інформації. Тривалість періоду, протягом якого надходить чергова інформація про несправності двигуна, визначається рівнянням:

$$\tau_{pi+1} = \frac{2\delta(\theta_{крт}^{\circ C})}{\Delta\theta^{\circ C}} \tau_{pi}, \quad (3.9)$$

де  $\delta$  – межа довірчого інтервалу, обумовлена класом точності вимірювальних засобів,  $\theta_{крт}^{\circ C}$  – критична температура нагріву ізоляції, досягнення якої є визначальним моментом відключення електродвигун від мережі,  $\Delta\theta^{\circ C}$  – приріст температури за період часу між попереднього і подальшому опитуваннями.

Отримане рівняння (3.9) є результатом розв'язання системи лінеаризованих рівнянь експоненціальної кривої для нагрівання ізоляції обмотки

статора. Похибка лінеаризації становить 1,8% порівняно з лінеаризацією за методом Рунге-Кутти.

У сталому тепловому режимі нагріву ізоляції, при  $\Delta\theta \text{ } ^\circ\text{C} = 0$ , встановлюється початковий період опитування. Усунення впливаючого фактору,

що викликав температурне перевантаження ізоляції обмоток, може привести до

виконання нерівності  $\tau_{pi+1} \geq \tau_{pi}$ , при виконанні цієї умови встановлюється

початковий період між опитуваннями стану електродвигунів. Появи градієнта

температур  $\frac{d\theta \text{ } ^\circ\text{C}}{dt} \neq 0$  призведе до відповідному коригуванню тривалості між

опитуваннями стану електродвигунів.

На рис. 3.5 представлено графік зміни температури ізоляції обмотки статора залежно від тривалості переходу від одного подюса до іншого в разі усунення чинників, що викликають аномальний режим.

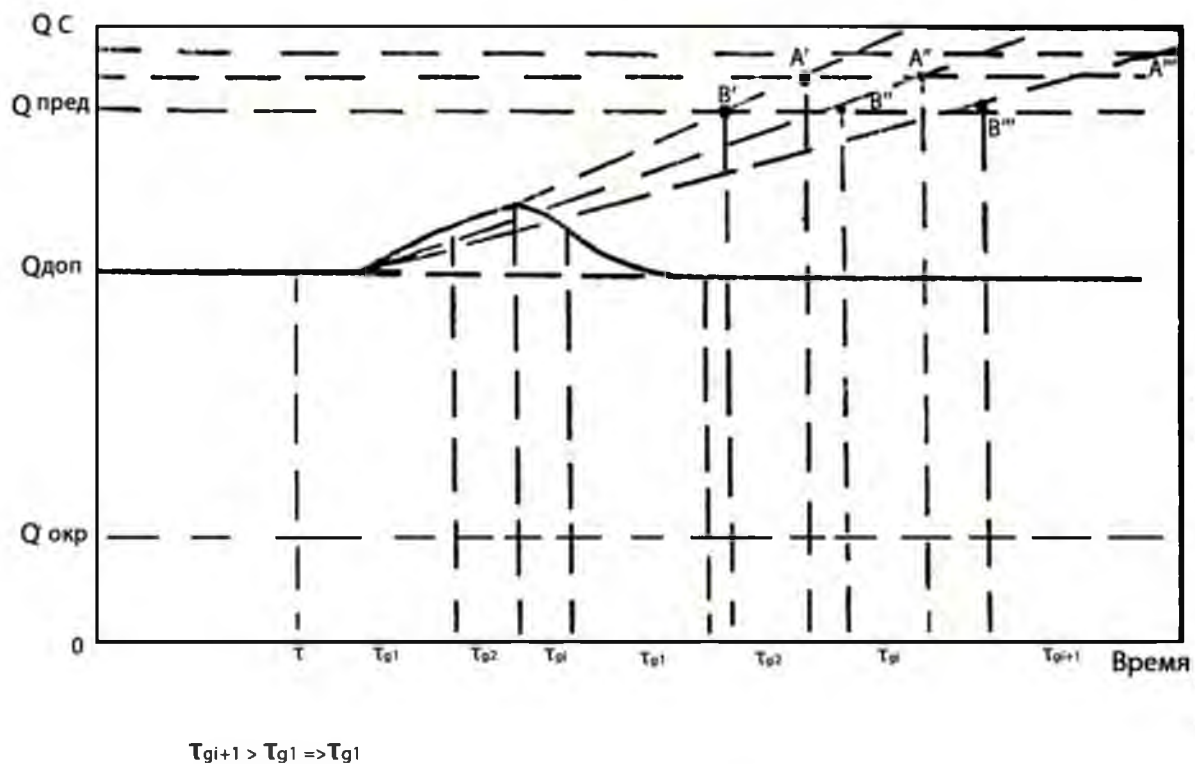


Рис. 3.5. Графік зміни температури ізоляції обмотки статора і тривалості між опитуваннями при усуненні фактору, який викликає аномальний режим

Час роботи електродвигуна з моменту виникнення аварійної ситуації (точка 1 на рис. 3.4) до досягнення температурою ізоляції критичного значення (точка Р на рис. 3.4) визначається за таким рівнянням:

$$\tau = \tau_n \ln \frac{\theta_{крт} \text{ } ^\circ\text{C} - \theta_{нор} \text{ } ^\circ\text{C}}{\theta_{крт} \text{ } ^\circ\text{C} - \theta_1 \text{ } ^\circ\text{C}}, \quad (3.10)$$

где  $\theta_1$  – значення температури при першому вимірі в момент виявлення передаварійної ситуації;  $\theta_{нор}$  – температура електродвигуна в нормальному режимі роботи.

Число електродвигунів в єдиній інформаційній системі визначиться при виконанні умови  $\tau_{р+1} = \min \tau_p$ , визначиться виразом:

$$n \leq \frac{\tau_p \min}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4}. \quad (3.11)$$

У таблиці 3.1 надано результати розрахунків кількості електродвигунів єдиної інформаційної системи.

Таблиця 3.1  
Результати розрахунків кількості електродвигунів єдиної інформаційної системи

№	Потужність двигуна кВт	Постійна нагріву, минут	Кількість двигунів шт.
1	5-10	10-24	не більше 35
2	10 -20	26-35	не більше 50
3	20 -25	45-50	не більше 90
4	25 и більш	75-90	не більше 150

**3.3. Аналіз впливу несиметрії напруг мережі живлення на робота ЕТК та розробка системи діагностики і захисту електродвигуна**

Для забезпечення електропостачання технологічних ліній було модернізовано та введено в експлуатацію підстанцію 6/0,4 кВ, десять

розподільчих підстанцій 0,4 кВ, кабельну мережу 6 кВ завдовжки 4,1 км і кабельну мережу 0,4 кВ завдовжки 80 км.

Протяжність кабельної мережі, великі пускові струми і наявність однофазних споживачів електроенергії призводять до зниження якості електроенергії нижче за норми, встановлені ГОСТ 13109-97, що спричиняє позаштатну роботу електродвигунів, аварійні простої і зниження продуктивності всієї технологічної лінії.

Виходячи з показників аварійності та причин простоїв технічного обладнання, можна зробити висновок, що основним завданням підвищення економічної ефективності технологічної лінії є проведення дослідження якості електроенергії, виявлення перевантажень електродвигунів, пов'язаних із відхиленнями якості електроенергії, та вжиття заходів щодо нормалізації роботи всієї лінії.

Динаміка зміни рівнів показників якості електроенергії, що відображається приладом Fluke 438, відповідає вимогам стандарту ISO 9001 на підстанції ПС-1 на фідерних повітряних лініях і конвеєрних лініях.

Одночасно з вимірюванням показників, що характеризують напругу даної секції шин, проводилися вимірювання на вході підстанції і струмів навантаження електродвигунів.

На рис. 3.6 представлено графік зміни середньоквадратичних значень фазних напруг на шинах 0,4 кВ підстанції СШ-1, усереднених за однохвилинні інтервали часу.

На рис. 3.7 наведено гістограму розподілу фазних напруг на шинах 0,4 кВ підстанції СШ-1.

На рис. 3.8 представлено графік зміни діючих значень фазних струмів конвеєрних ліній, які споживають електроенергію від підстанції СШ-1.

На рис. 3.9 представлено графік зміни частоти та коефіцієнта небалансу напруги зворотної послідовності на шинах 0,4 кВ СШ-1 за період з 11:56:50 3 жовтня 2022 року до 12:26:50 3 жовтня 2022 року.

Результати вимірювань ПКЕ мережі (осцилограми рис. 3.6 – рис. 3.9) показують, що коефіцієнт асиметрії напруги перебуває в діапазоні (0,3 - 3,8)%, що перебуває в межах значень, визначених ГОСТ 13109-97. Максимальне відхилення фазної напруги становить +10%.

Режим роботи ЕД при живленні від несиметричної мережі призводить до виникнення зворотного струму в обмотках статора ЕД і зворотного магнітного поля. Опір зворотної послідовності електродвигуна приблизно дорівнює опору загальмованого двигуна і становить, таким чином, від п'яти до однієї восьмої опору прямої послідовності. Струм зворотної послідовності накладається на струм прямої послідовності і спричиняє додаткове нагрівання статора і ротора (особливо в масивній частині ротора), прискорюючи старіння ізоляції і призводячи до зниження номінальної потужності двигуна (зниження ККД двигуна). Дисбаланс напруги в 5% знижує доступну потужність двигуна на 5-10%. У результаті момент, що прикладається до ротора двигуна, буде

$$M = M_1 + M_2 = \left( m_1 I_{21}^2 / r_2' + m_2 I_{22}^2 / (2-s) \right) \frac{p}{\omega_1} \quad (3.12)$$

де:  $M_1$  – обертальний момент прямої послідовності;  $M_2$  – обертальний момент зворотної послідовності;  $m_1$  – число фаз;  $I_{21}^2$  – ток прямої послідовності во вторичній обмотке;  $I_{22}^2$  – ток зворотної послідовності во вторичній обмотке;  $r_2'$  – приведено активний опір фаз обмотки ротора;  $p$  – число пар полюсів;  $\omega_1$  – кутова швидкість;  $s$  – ковзання.

Зниження крутного моменту призводить до уповільнення конвеєрної лінії.

За коефіцієнта асиметрії 2% продуктивність перевантаженого комплексу знижується на 5,8%.

Для оцінки процесів, що відбуваються в електродвигуні під час його роботи в умовах асиметрії напруги, було використано імітаційну модель MATLAB із розширеннями Simulink (рис. 3.10).

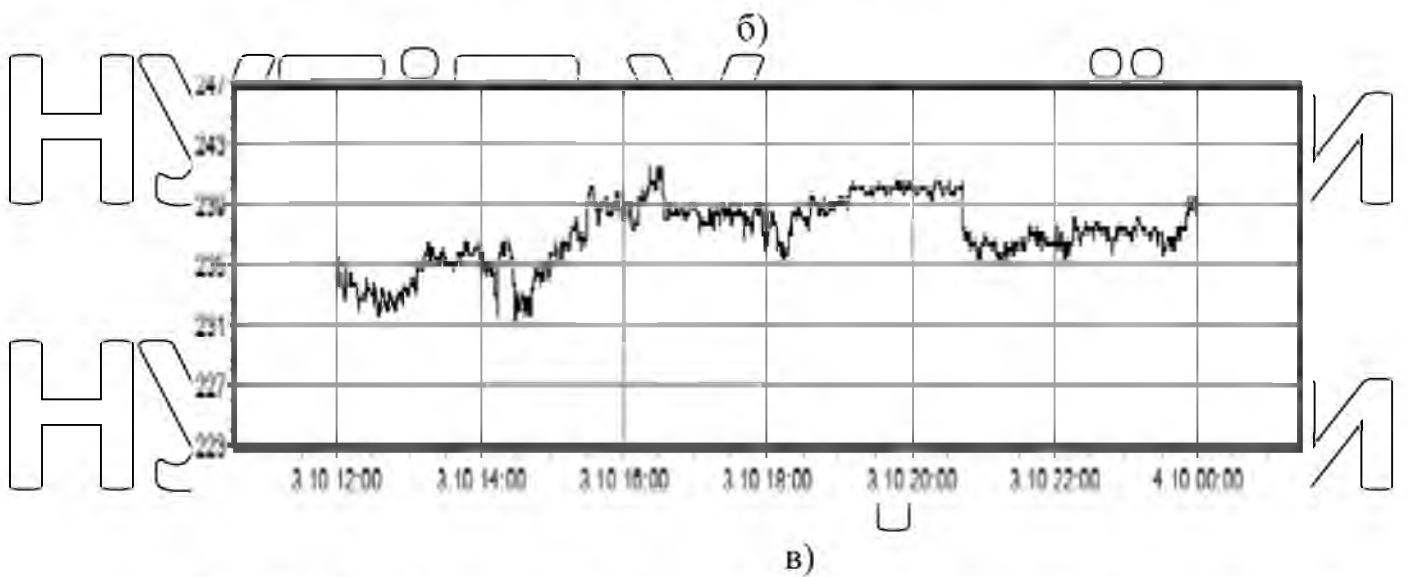
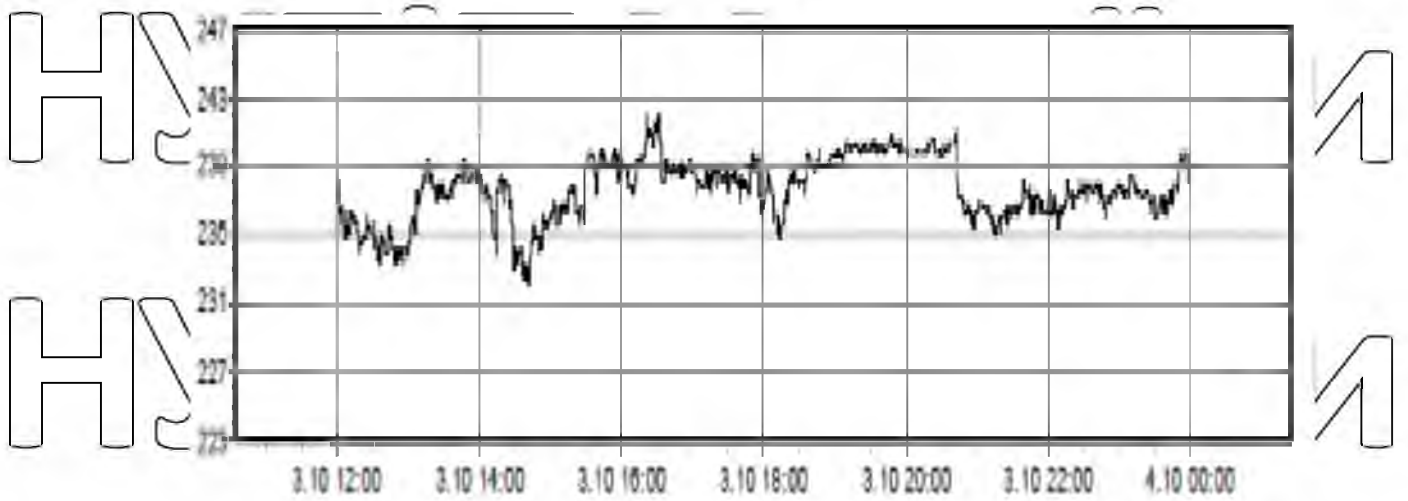
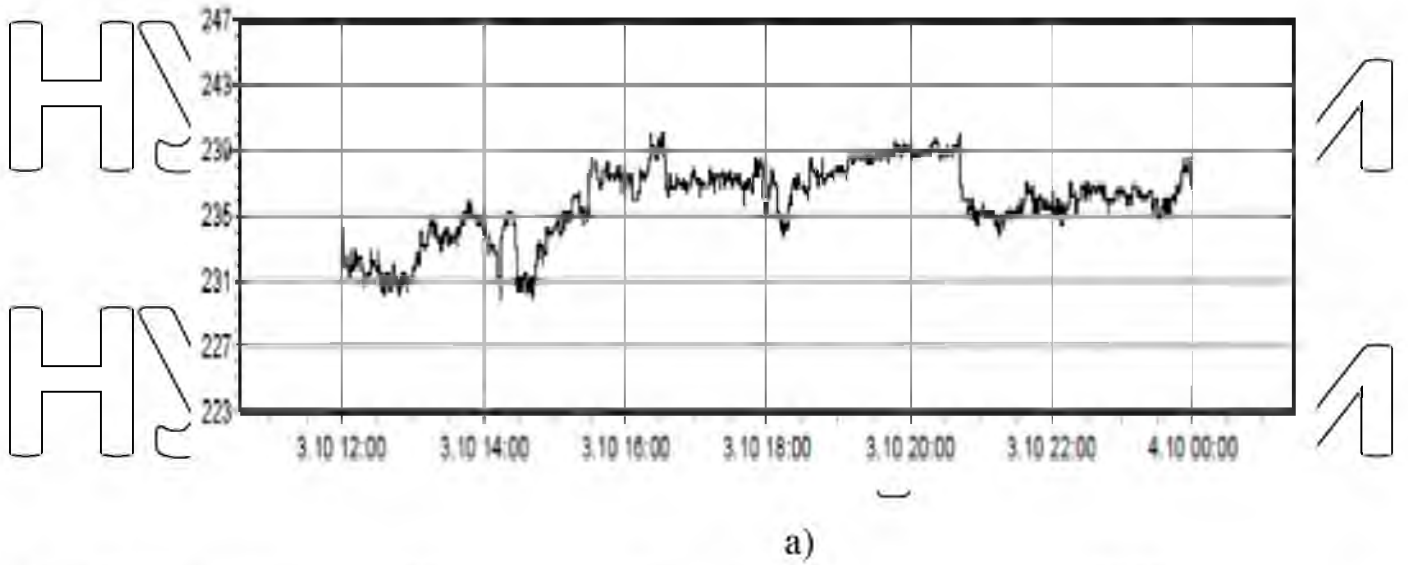
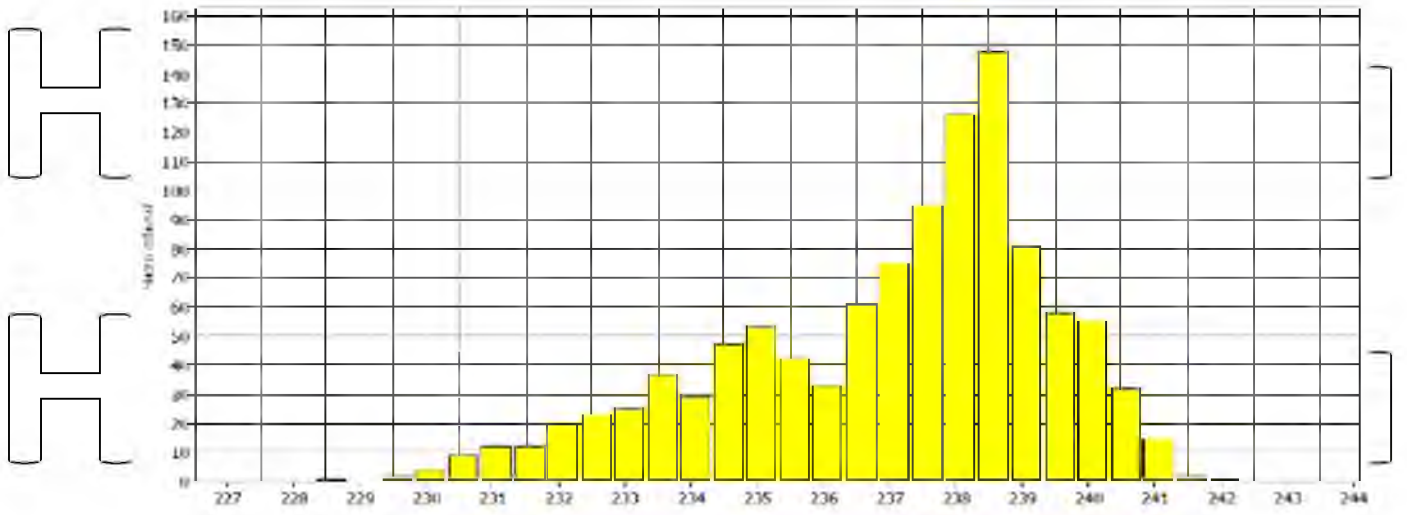
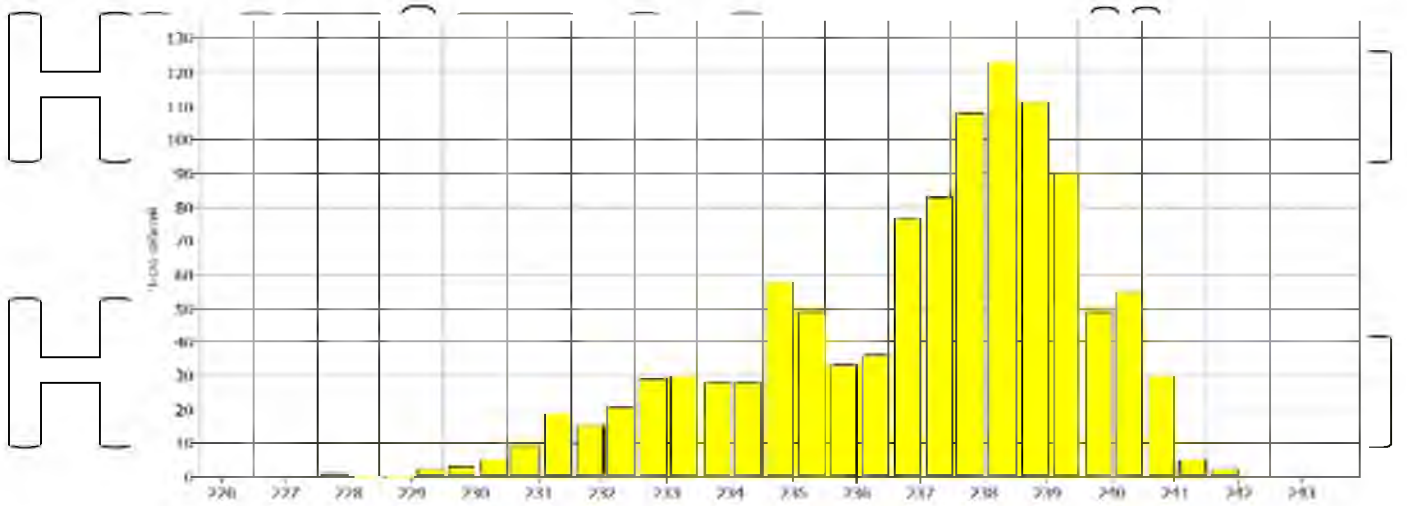


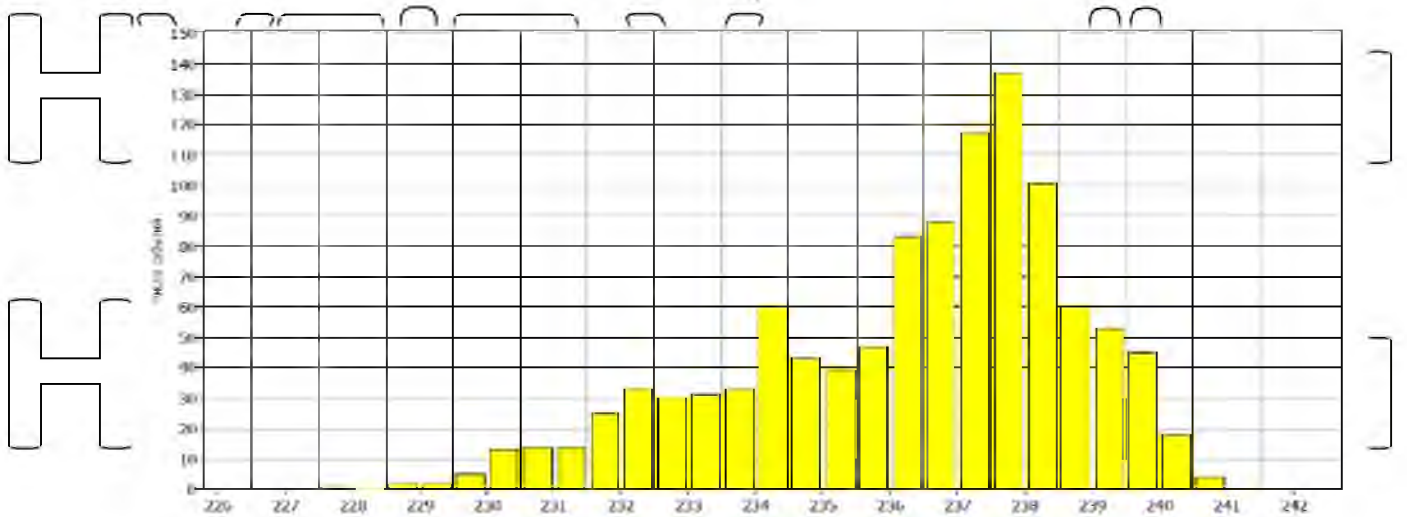
Рис. 3.6. Графіки діючих значень фазних напруг шин 0,4 кВ підстанції ПС-1 в період наєу с 11:55:50 до 12:26:50 (а – фаза А, б – фаза В, в – фаза С)



а)



б)



в)

Рис. 3.7. Гістограми розподілу фазних напруг ший 0,4 кВ підстанції ПС-1 в період часу с 15:30 до 9:45 (а – фаза А, б – фаза В, в – фаза С)

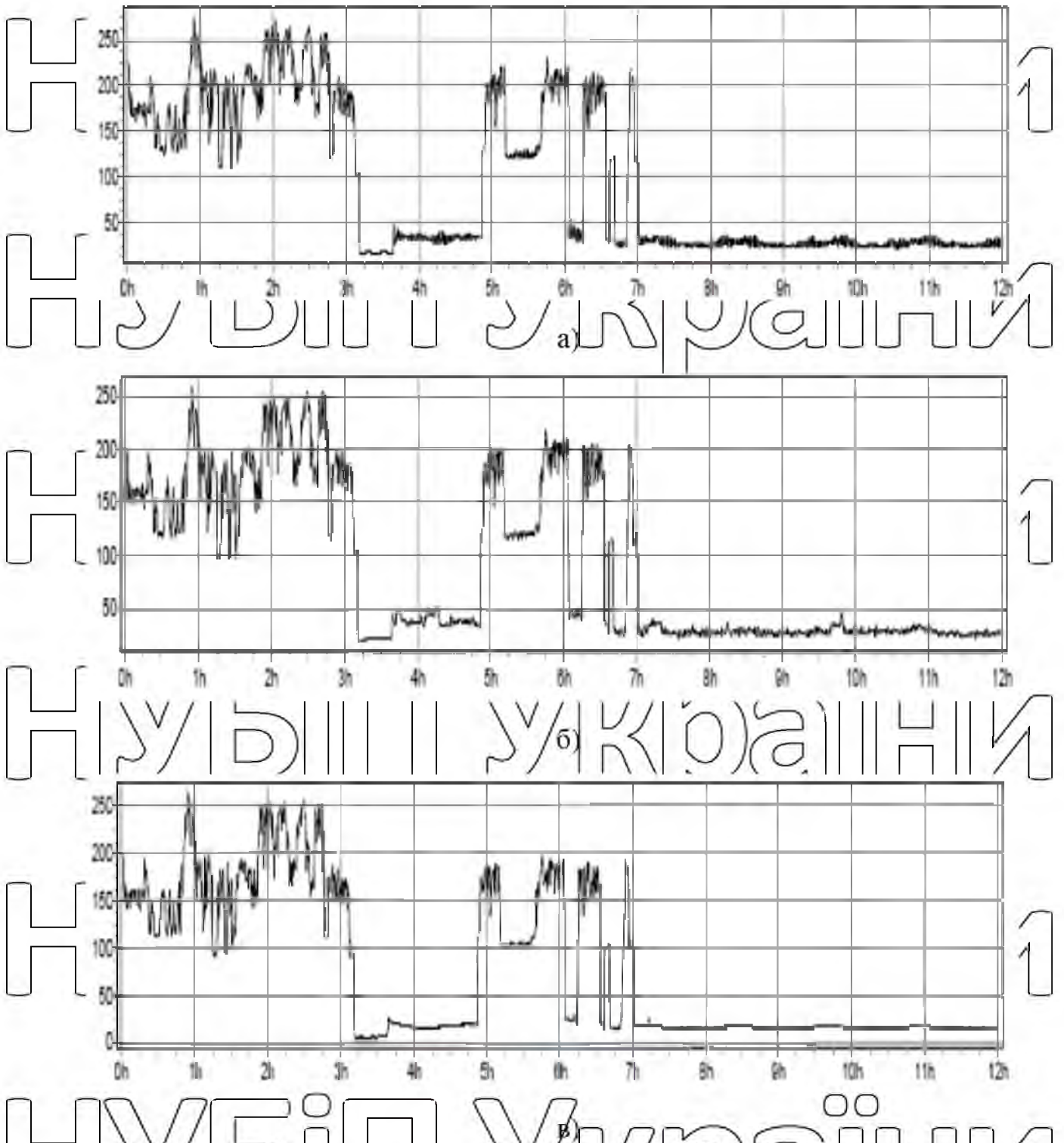


Рис. 3.8. Графіки діючих значень фазних струмів присіднання ПС-5 (дві конвеєрні лінії, які отримують живлення від підстанції ПС-1), в період часу з 13:30 до 9:00. (А - фаза А, б - фаза В, в - фаза С).

НУБІП України

# НУБІП України

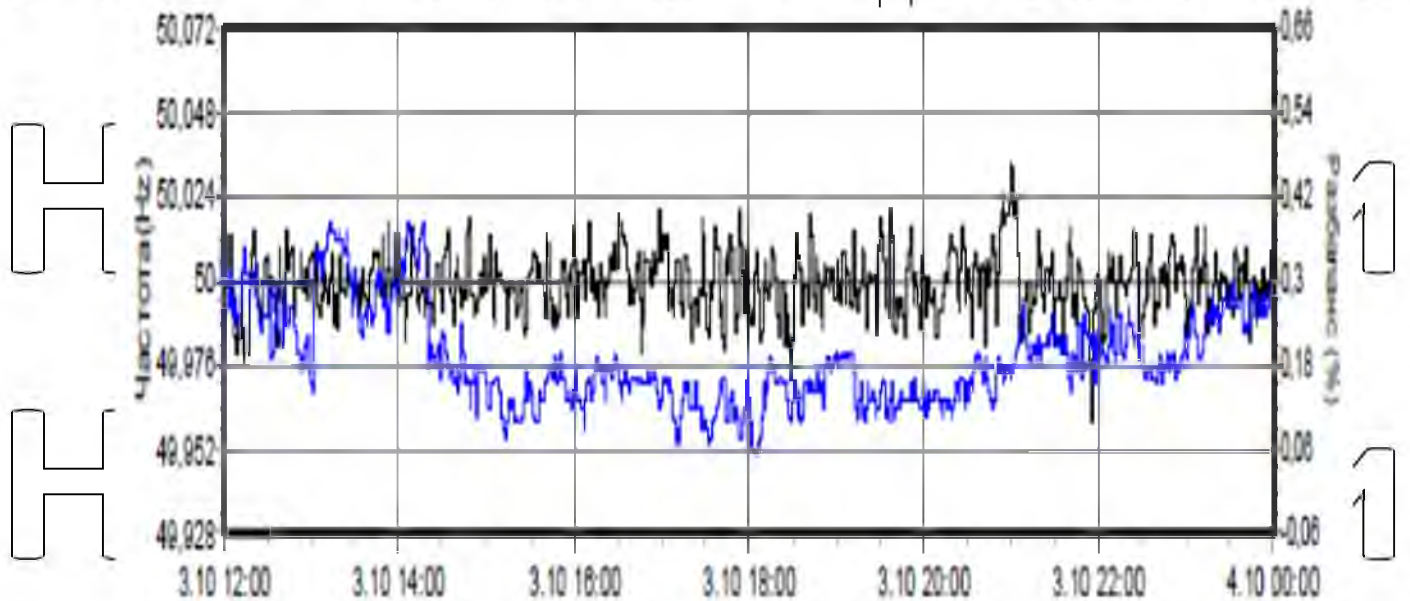


Рис. 3.9. Графік змін частоти і коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю шин 0,4 кВ підстанції ПС-1 в період часу з 11:56:50 03.10.2013 р по 12:26:50 03.10.2013 р

Було отримано робочі характеристики АД у симетричній і несиметричній системах напруги. Як приклад на рис. 3.11 наведено динамічні механічні характеристики АД у симетричній (а) і несиметричній (б) системах живильної напруги. За результатами математичного моделювання було побудовано графік зміни моментів для прямої та зворотної послідовностей і побудовано результуючу залежність ковзання моменту за коефіцієнта несиметрії 2%. Зниження результуючого моменту на валові АД склало 7,8%.

# НУБІП України

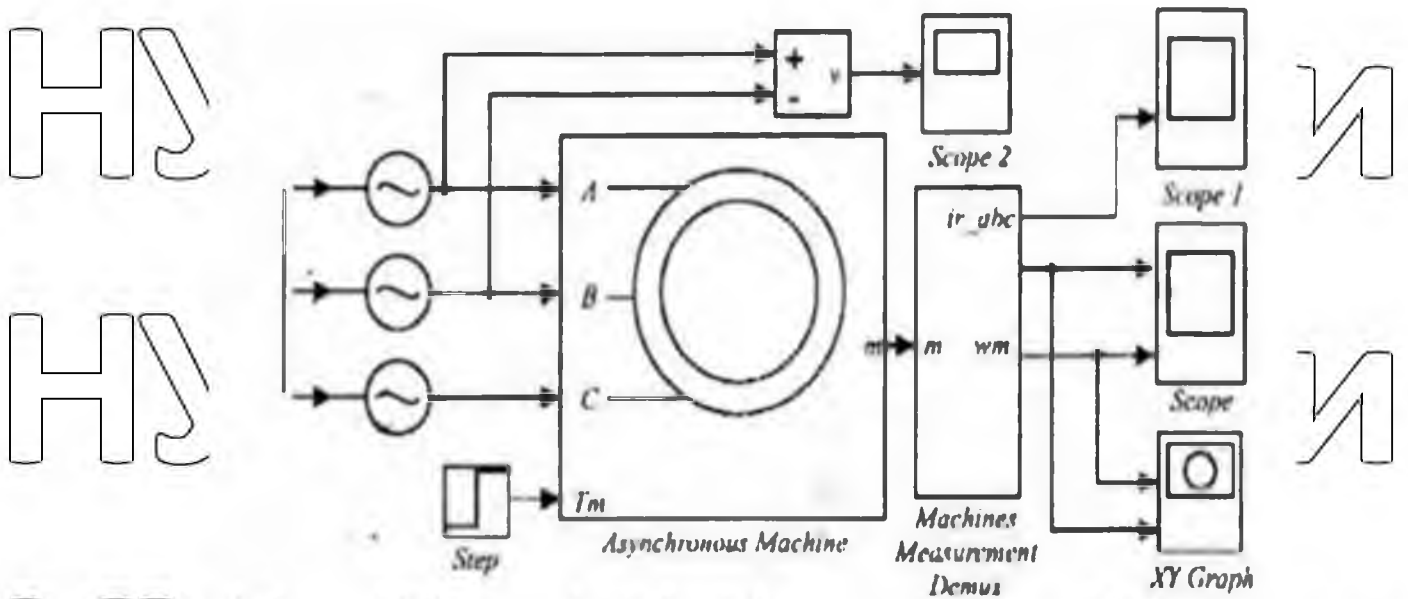
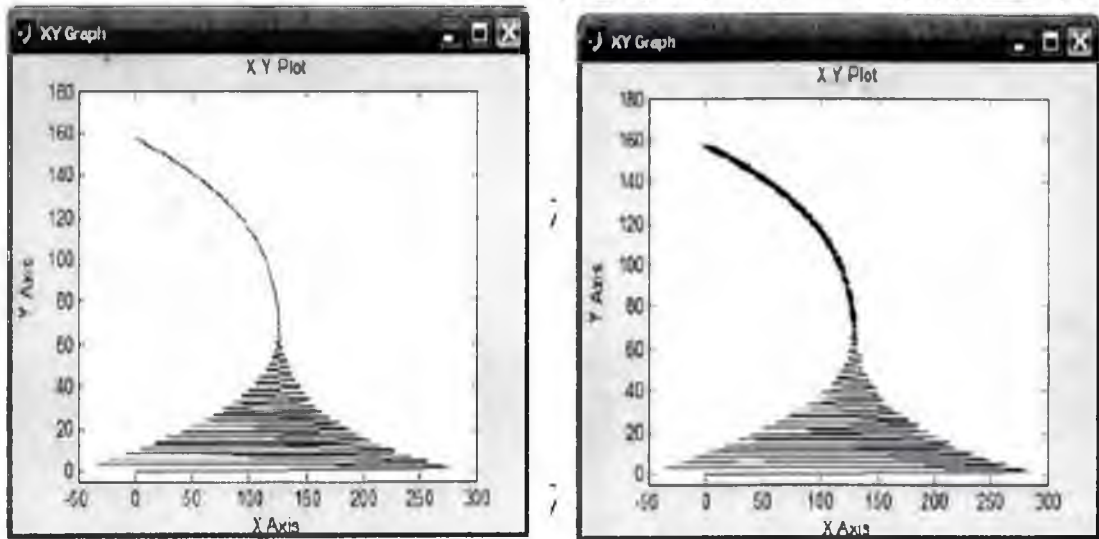


Рис. 3.10. Математическая модель АД в системе MATLAB



а)

б)

Рис. 3.11. Динамічна механічна характеристики АД а) при симетричному живить напрузі; б) при несиметричному напрузі харчування мережі 2 %

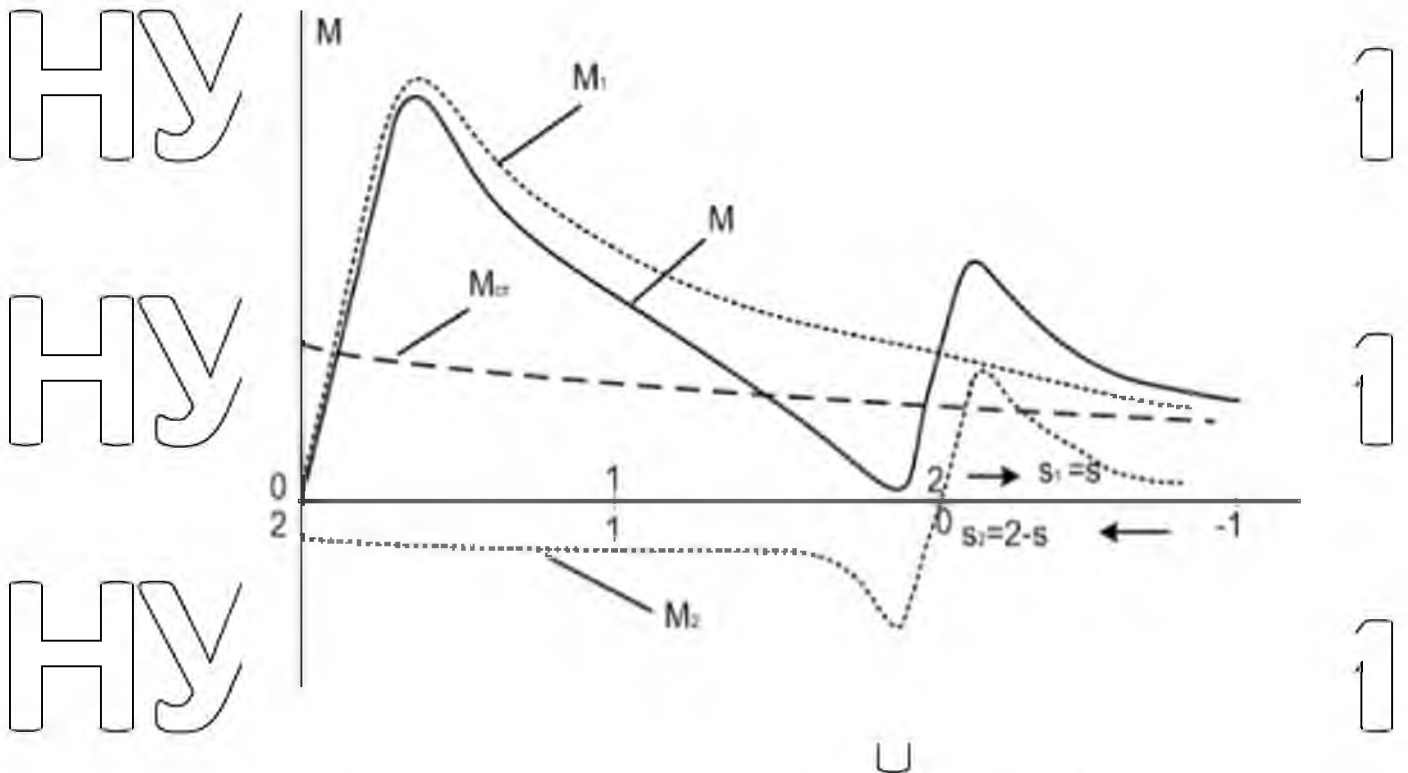


Рис. 3.12. Моменти прямої ( $M_1$ ) і зворотної ( $M_2$ ) послідовностей і результуючий момент ( $M$ ) асинхронної машини в функції ковзання при коефіцієнті несиметрії напруги мережі живлення 2%

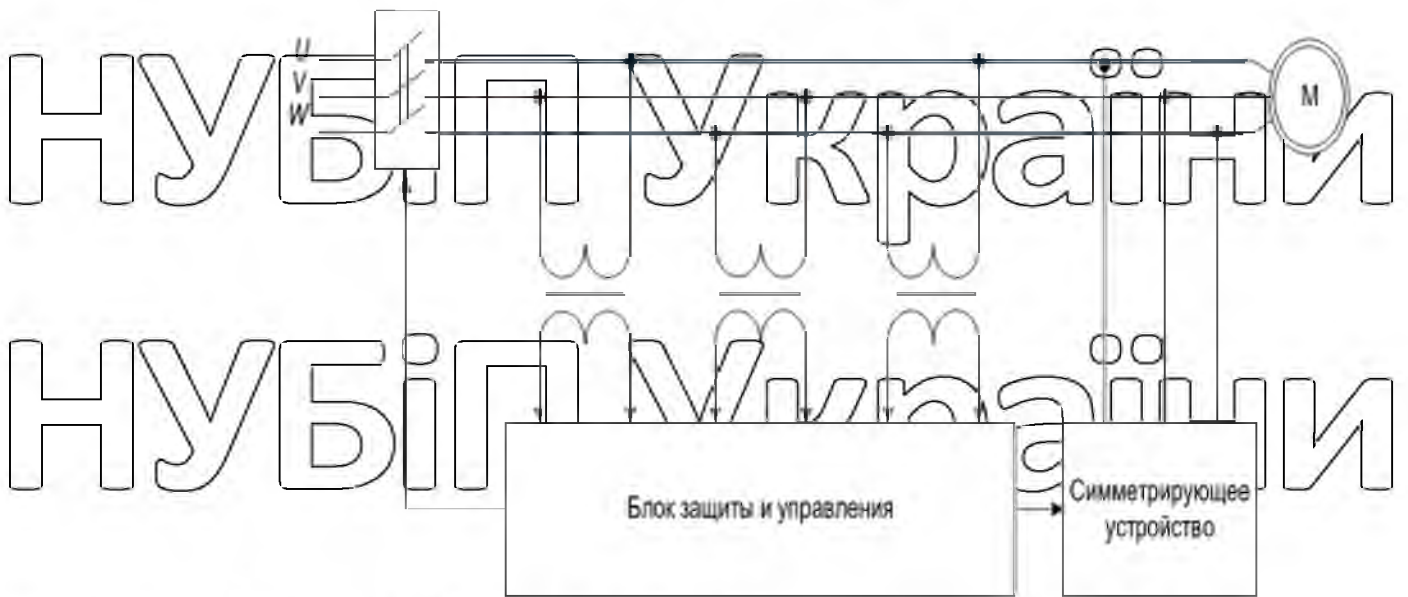


Рис. 3.13. Блок-схема пристрою захисту і компенсації несиметричних режимів роботи двигуна

Балансувальні пристрої ефективні для роботи електрообладнання в умовах несиметрії мережевої напруги.

Найефективніші балансувальні пристрої поєднують у собі функції балансувального і захисного роз'єднувачів. Блок-схему такого пристрою наведено на рис. 3.13.

Під час під'єднання двигуна до мережі інформація про напругу через понижувальний трансформатор надходить на блок керування захистом, який у разі виникнення "нормально припустимого" відхилення напруги живлення під'єднує реле. Якщо напруга симетрична, то СУ відключається. Пропонований пристрій змодельовано в імітаційній моделі MATLAB, схему якої наведено на рис. 3.14. 3.14.

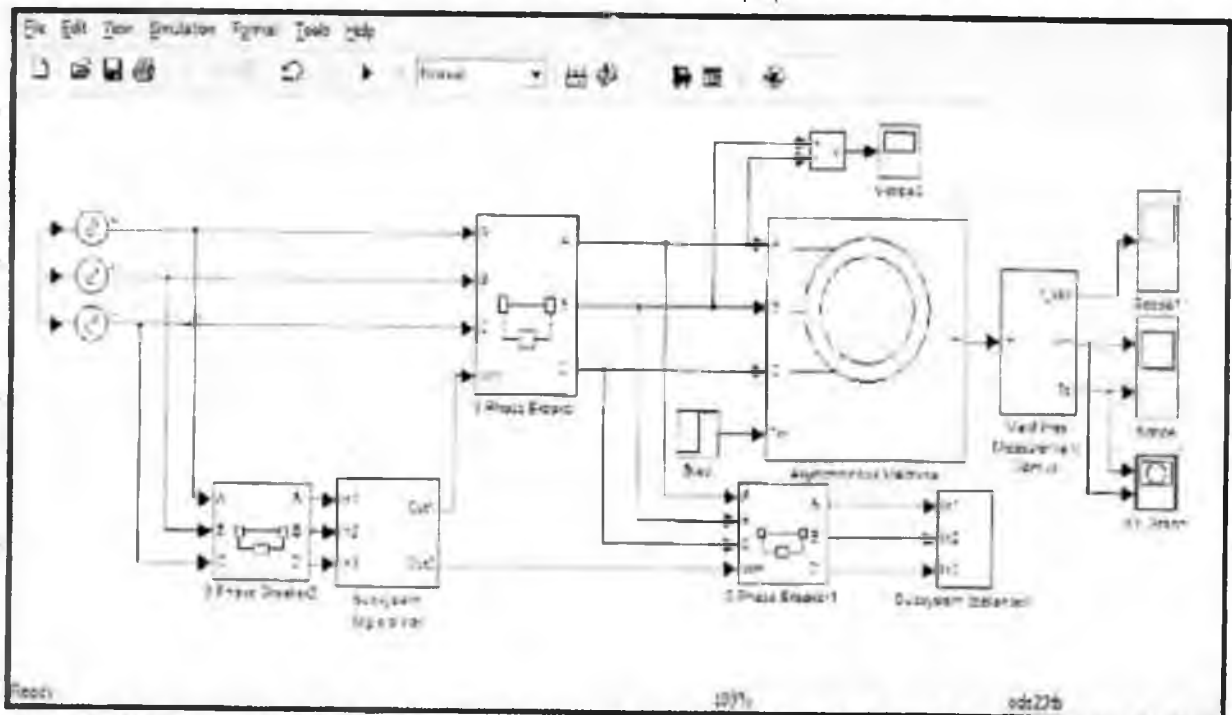


Рис. 3.14. Схема імітаційної моделі асинхронного електродвигуна з пристроєм захисту і компенсації несиметрії в системі MATLAB

Прототип пристрою було випробувано на КПК, і коефіцієнт асиметрії на терміналі 380 В АТ, 165 кВт вдалося знизити з 2,2 до 0,3%, що призвело до збільшення продуктивності конвеєрної лінії КПК на 4,1%.

### 3.4 Розробка пристрою та програмного забезпечення діагностики причин температурного перевантаження ізоляції та захист електрообладнання від перегрівання

У ЕД, що працюють у запиленому середовищі, неповна оцінка температурних ефектів локального перегріву ізолятора призводить до прискореного старіння, а якщо датчик температурного захисту ЕД вкритий шаром пилу, то це призводить до хибного вимкнення від мережі ЕД. Діагностика причин температурного перевантаження, як локального перегріву ізоляції, так і перегріву всього ЕД, дасть змогу:

- виявити момент виникнення аварійної ситуації, пов'язаної з пошкодженням ізоляції, і визначити час вжиття превентивних заходів;
- запобігти спрацюванню температурного захисту ЕД і його відключення від мережі електропостачання.

Для ЕД, що працюють у зазначених умовах, розроблено пристрій для вимірювання температурного захисту ЕД і товщини шару пилу на поверхні ізоляції, блок-схему якого наведено на рис. 3.15. 3.15.

Пристрій містить у собі блок комутації, датчик температури з аналого-цифровим перетворенням (DS 1821 Т фірми Dallas (Maksim)) для вимірювання температури контакту пилоутворювальної і непилоутворювальної частин електричної ізоляції ЕД, мікроконтролер Atmel ATmega88, блок керування й сигналізації, джерело живлення і сигнальний блок, а також джерело живлення для всього пристрою.

Новизна розробленого пристрою полягає в тому, що діагностика струмового перевантаження і визначення товщини пілового покриття здійснюються за двома величинами: температурою і швидкістю її зміни.



Рис. 3.15. Блок-схема пристрою діагностики причин теплового навантаження та температурного захисту ЕО

Для виконання діагностичних вимог.

1. Датчики температури встановлюються на поверхні обмоток генератора в місцях ймовірного прилипання пилу і в місцях його відсутності
2. За значеннями температури датчики визначають перевантаження за струмом, граничні значення локального запилення ізоляції і товщину пилового покриття обмотки.

Виявлення граничного запилення визначає терміни проведення профілактичних заходів. Виявлення струмових перевантажень визначає момент відключення ЕД від електромережі.

Принцип дії.

#### 1. Нормальна робота ЕД.

За нормальної роботи ЕД показання датчиків температури, встановлених у запиленій і незапиленій частинах електричної ізоляції обмоток ЕД, однакові та їхні значення не перевищують допустимої робочої температури ЕД, наприклад,  $80^{\circ}\text{C}$ . Це свідчить про те, що ЕД працює нормально.

#### 2. Режим струмового перевантаження.

Збільшення значення температури датчика зі збільшенням струму навантаження відбувається одночасно. Коли значення температури датчика досягає допустимого значення, наприклад  $105^{\circ}\text{C}$ , ЕД вимикається від мережі і формується сигнал, що інформує про перевантаження за струмом.

### 3. Режим виявлення пилу та визначення його товщини.

Пил на поверхні обмотки ЕД нерівномірний: якщо пил прилипає до частини поверхні ізоляції МЕ, то температура датчика, встановленого в цій зоні, підвищується, а температура датчика, встановленого на вільній від пилу поверхні ізоляції, залишається незмінною. Різниця температур двох датчиків збільшується в міру запилення одного з них. За цією різницею температур визначається рівень запиленості. Коли шар пилу досягає критичного значення, настає час проводити профілактику. Ця різниця температур становить  $5^{\circ}\text{C}$  і не прискорює старіння ізоляції.

На рис 3.16 надано алгоритм роботи мікроконтролера пристрою діагностики причин теплового навантаження і температурного захисту ЕО:  $t_{д1}$  – температура першого датчика,  $t_{д2}$  – температура другого датчика,  $t_{доп}$  – допустима температура нагріву ізоляції,  $H$  – товщина шару пилу,  $H_{доп}$  – допустима товщина шару пилового покриття,  $I$  – сила струму навантаження.

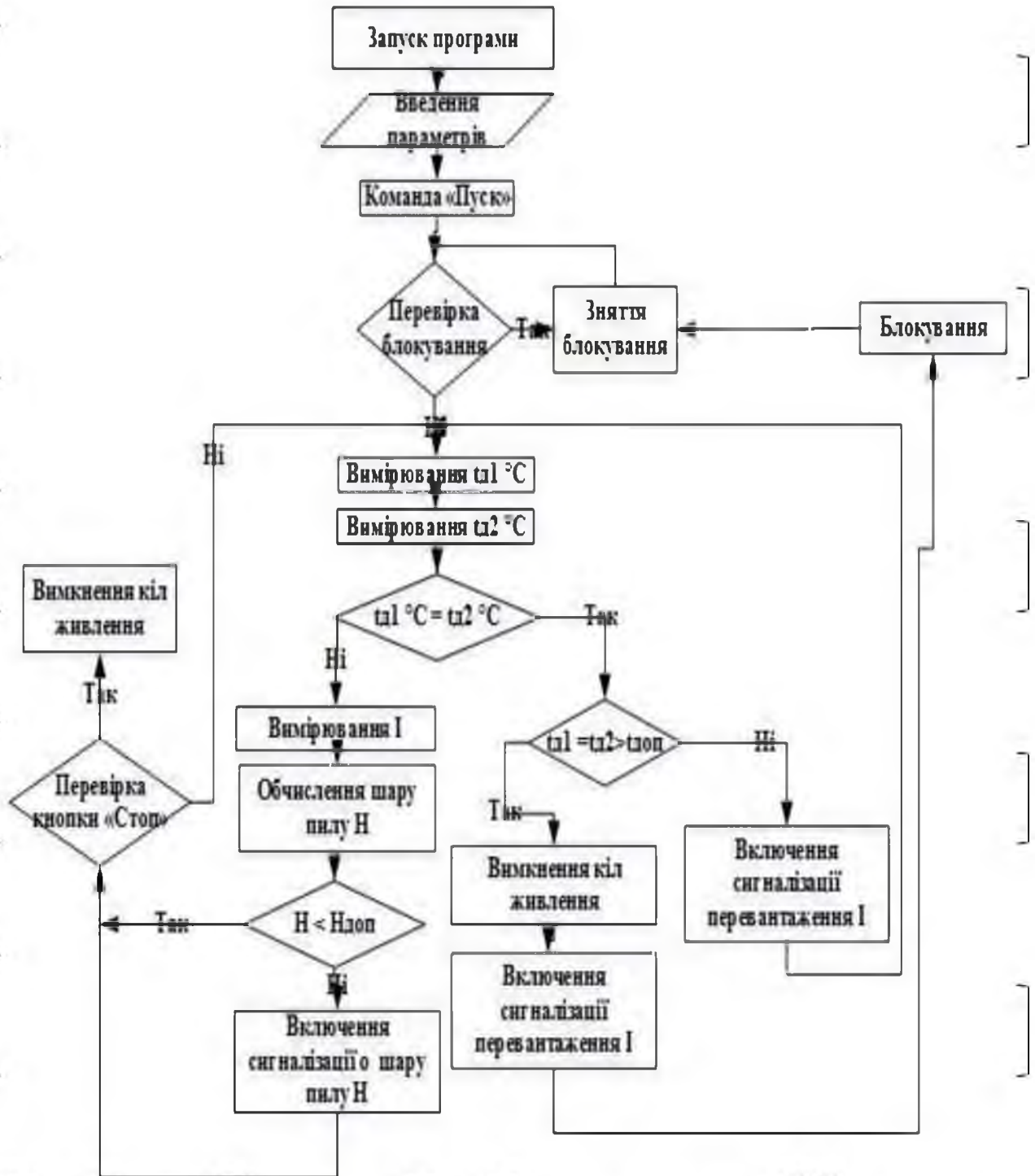


Рис. 3.16 Алгоритм роботи пристрою діагностики причин теплового навантаження і температурного захисту ЕО

## ВИСНОВКИ

Принцип побудови багаторівневих систем діагностики та захисту електрообладнання розглядається насамперед як єдиний комплекс, у якому визначено п'ять рівнів функцій захисту: контроль силової мережі, контроль кола струму, тепловий контроль електрообладнання, температурний контроль, контроль стану ізоляції електрообладнання та порядок їхньої взаємодії.

Теоретично показано й експериментально підтверджено, що причинами внутрішніх перенапруг, які призводять до відмов інверторів, є режими зсуву фаз і перепадів напруги, вимкнення заживлених з'єднань і неправильні вимкнення напруги.

Можна розробити метод контролю напруги живлення, струму навантаження і температури заживленого з'єднання шляхом увімкнення конденсатора паралельно до живильної батареї та послідовного підключення твердотільного реле.

Аналіз осцилограм показує, що час падіння напруги на клеммах обладнання залежить від потужності дбж. Під час компенсації реактивної потужності, коли коефіцієнт потужності дорівнює 1, напруга повністю спадає за 79 мс, що достатньо для виявлення падіння напруги і вимкнення технологічної лінії без пошкодження. Якщо коефіцієнт потужності більший за 0,9 то надмірна компенсація реактивної потужності збільшує втрати потужності обладнання.

Моделювання впливу небалансу живильної напруги на роботу асинхронних двигунів показало, що за величини небалансу живильної напруги понад 2% режим роботи двигуна не належить до номінального, а за величини небалансу живильної напруги 2,1% продуктивність технологічної лінії знижується до 5,8%.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сырых Н. Н., Некрасов А. И., Кабдин Н. Е. Определение параметров асинхронного электродвигателя при обрыве фазы. *Техника в сельском хозяйстве*. 2001. № 2. С. 20–23.

2. Жарков В. Я. Защита электродвигателей в АПК. М.: АгроНИИТЭИИТО, 1989. 28 с.

3. Грундулис А. О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1982. 104 с.

4. Данилов В. Н. Классификация устройств защиты электродвигателей от аварийных режимов. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 1987. № 6. С. 34–37.

5. Кобзистый О. В. Совершенствование защиты электродвигателей от несимметрии питающего напряжения: автореф. дис. канд. техн. наук / Азово–Черноморская Государственная агроинженерная академия. Зеленоград, 2000. 24 с.

6. Ермолаев С. А., Мунтян В. А., Кюрчев В. Н. Эксплуатация и ремонт электрооборудования и средств автоматизации в системе АПК / под ред. С. А. Ермолаева. К.: Альтур, 1997. 414 с.

7. Тубис Я. Б., Белов Г. К. Температурная защита асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве. М.: Энергия, 1977. 104 с.

8. Данилов В. Н. Защита электродвигателей от аварийных режимов. *Техника в сельском хозяйстве*. 1988. № 2. С. 19–22.

9. Попова І. О. Грищенко О. К. Аналіз впливу асиметрії напруги на процес теплового ізносу ізоляції асинхронних електродвигунів. *Сб. наук. праць ТДАУ* / 1998. Вип. 1, Т. 8. С. 14–18

10. Корчемний М. О. Філоненко А. Ф., Юсупов М. А. Експлуатаційна надійність електродвигунів у сільськогосподарському виробництві. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. К.: Урожай, 1991. Вип. 73. С. 78–80.

11. Рожавский С. М. Несимметричные режимы работы сельскохозяйственных электрических сетей 380/220 В. М.: МИИСП, 1970. 55 с.

12. Рожавский С. М., Поздняк В. П., Зубко В. М., Заварская Т. Д. К вопросу о сроке службы асинхронных электродвигателей в непрерывно нагруженных сельскохозяйственных сетях. *Электрификация сельскохозяйственного производства: Труды КИМЭСХ*. Харьков, 1971. Вып. 14–16.

13. Левин М. С. [и др.] Качество электроэнергии в сетях сельских районов / под ред. акад. И. А. Будзко. М.: Энергия, 1975. 224 с.

14. Сырых Н. Н., Некрасов А. И., Кабдин Н. Е. Определение параметров асинхронного электродвигателя при обрыве фазы. *Техника в сельском хозяйстве*. 2001. № 2. С. 20–23.

15. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей: 4-е изд., перераб. и доп. / под ред. Л. Г. Мамиконянца. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.

16. Гольдберг О. Д., Абдуллаев И. М., Абиев А. Н. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей / под ред. О. Д. Гольдберга. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.

17. Жарков В. Я. Защита электродвигателей с тяжелым пуском: информ. листок. Запорожский ЦНТИ. Запорожье, 1988. 4 с.

18. Грундулис А. О. Теоретическое исследование кольцевого детектора фазочувствительного устройства защиты электродвигателя. *Труды Латв. СХА*. 1987. Вып. 238. С. 4–18.

19. Кобылянский А. В., Рубаненко А. Е., Шумский А. М. Тепловая защита электродвигателей. *Энергетик*. 1987. № 7. С. 31–32.

20. Mc Partland James L. Protecting motors against running overcurrent. *Elec. Contr. and Maint.* 1987. V. 86, № 6. P. 26–29.

21. А. с. 1674302 СССР, МКИ Н 02 Н 7/08, 5/04. Устройство для температурной защиты группы электродвигателей от аномальных режимов работы / А. Я. Чураков, В. Я. Жарков, В. В. Овсянников, О. П. Жаркова (СССР). № 4666499/24-07, заявлено 26.01.89, опублик. 30.08.91, Бюл. № 32. — 4 с.

22. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. К.: УСХА, 1990. 168 с.

23. Квітка С.О., Нестерчук Д.М., Квітка О.С. Дослідження теплових процесів асинхронних електродвигунів під дією струмового навантаження та розробка пристрою захисту від аварійних режимів роботи. *Таврійський державний агротехнологічний університет: праці*. Мелітополь: ТДАТУ, 2013. Вип. 13, Т. 5. С. 172 – 177.

24. Вовк О.Ю., Квітка С.О., Квітка О.С. Вплив зниження напруги живлячої мережі на теплове зношення ізоляції асинхронного електродвигуна. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. Харків: ХНТУСГ, 2014. Вип. 153. С. 79 – 81.

25. Квітка С.О., Вовк О.Ю., Квітка О.С. Пристрій контролю функціонального стану та захисту групи асинхронних електродвигунів від аварійних режимів роботи. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. Харків: ХНТУСГ, 2014. Вип. 153. С. 85 – 87.

26. Квітка С.О., Вовк О.Ю., Нестерчук Д.М. Дослідження теплових процесів асинхронних електродвигунів та розробка пристрою захисту від аварійних режимів роботи. *Таврійський державний агротехнологічний університет: праці*. Мелітополь: ТДАТУ, 2010. Вип. 10, Т. 4. С. 18 – 23.

27. Кондратюк О.Ю., Егоров А.Б. Анализ аварийных режимов работы асинхронных двигателей к вопросу выбора их эффективной защиты. *Система обробки інформації*. 2006. Вип. 4(53). С. 79 – 86.

28. Овчаров В. В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. К.: УСХА, 1990. 168 с.

29. Грундулис А.О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве. М.: Агрпромиздат, 1988. 104 с.

30. Мусин А.М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты. М.: Колос, 1979. 112 с.

31. Пат. 48876 Україна, МПК H02H 7/09 (2006.01). Пристрій для захисту трифазного асинхронного електродвигуна від аварійних режимів роботи / С.О. Квітка, Д.М. Нестерчук, О.С. Квітка (Україна). № U200909849; заявл. 28.09.2009; опубл. 12.04.2010, Бюл. № 7. 4 с.

32. Пат. 67971 Україна, МПК H02H 7/09 (2006.01). Пристрій автоматичного захисту групи електродвигунів від аварійних режимів роботи / С.О. Квітка, О.Ю. Вовк, О.С. Квітка (Україна). № U20N10072; заявл. 15Ж2011; опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5. 4 с.

33. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины и микромашины: учебник для электротехнических специальностей вузов.: изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1990. 528 с.

34. Яцун М.А. Електричні машини. Львів. Львівська політехніка, 2004 440 с.

35. Вольдек А.И. Электрические машины Л.: Энергия, 1974. 840 с.

36. Кацман М.М. Электрические машины: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1990. 463 с.

37. Проектирование электрических машин / Под ред. Кобылова И. П. М.: Энергия, 1980. 485 с.

38. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины; учебник для вузов: в двух томах. Том 1: 3-е изд., стереот. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 652 с.

39. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.

40. Кривонос В.В., Борякін А.О. Комп'ютерна програма «Контроль стану групи асинхронних електродвигунів та їх захисту від аварійних режимів»

41. Кривонос В.С., Гриб О.Г., Карпалюк І.Т., Кривонос В.В., Борякін А.О., Василенко С.В. Комп'ютерна програма «Пристрій діагностики

неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів початкового моменту виткового заїкання в статорних обмотках і захисту електродвигуна»

42. Скосирев В.Г., Азархов О.Ю., Шайко-Шайковський О.Г. Пристрій діагностування та захисту електродвигуна

43. Кривоносов В.Є., Жежеленко І.В., Московець О.В., Василенко С.В. Спосіб контролю і теплового захисту обмоток електричних машин, які працюють у запиленому середовищі

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України