

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2023 р.

Кваліфікаційна робота
магістра

на тему Розробка інтелектуальної системи діагностики роботи

асинхронного двигуна у приводі технологічного обладнання

Виконав студент 2 курсу, групи ЕЛКМ-22
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

Олег ГРОСУ

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Керівник

к.т.н., доц., І. ГРИЦЮК

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Нормоконтроль:

Е. НЕМЦЕВ

(підпис)

(дата)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

(дата)

ЛУЦЬК – 2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

«_____» _____ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Олегу ГРОСУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Розробка інтелектуальної системи діагностики роботи асинхронного двигуна у приводі технологічного обладнання

керівник роботи Ірина ГРИЦЮК, канд. техн. наук, доцент
(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 11 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Напруга живлення (U_n) 380 В,
частота напруги живлення (f) 50 Гц, номінальна потужність на валу
двигуна ($P_{ном}$) 22 кВт, параметри асинхронного двигуна: число фаз (m) 3,
синхронна частота обертання (n_c) 3000 об./хв., ККД (η) 0,85
коефіцієнт потужності двигуна ($\cos \varphi$) 0,88, ступінь захисту – IP44,
електропривод знаходиться у закритому приміщенні, наявна підвищена
запиленість технічної атмосфери, $k_{зап.} = 3$, максимальна температура
навколишнього середовища $t = 50$ °C, режим роботи двигуна –
короткочасний, час безперервної експлуатації – $T_{екс.} = 5000$ годин,
вірогідність безвідмовної роботи електроприводу $P_{зад.} = 0,44$, задане
напрацювання на відмову $T_{0зад.} = 6000$ годин.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Огляд питань функціонування асинхронних двигунів у електроприводах технологічного обладнання.

2. Огляд типових несправностей асинхронних двигунів.

3. Огляд способів моніторингу стану асинхронних двигунів.

4. Розрахунок показників надійності роботи електропривода.

5. Моделювання роботи систем моніторингу стану асинхронних двигунів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 4	І. ГРИЦЮК, доц. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЕМЦЕВ		

7. Дата видачі завдання 2 жовтня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	02.10.23 – 15.10.23	
2.	Розділ 2	16.10.23 – 29.10.23	
3.	Розділ 3	30.10.23 – 12.11.23	
4.	Розділ 4	15.04.23 – 03.12.23	
5.	Розділ 5	04.12.23 – 10.12.23	

Студент _____
(підпис)

Олег ГРОСУ _____
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ірина ГРИЦЮК _____
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Олег ГРОСУ. Розробка інтелектуальної системи діагностики роботи асинхронного двигуна у приводі технологічного обладнання / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2023.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі здійснено огляд питань функціонування асинхронних двигунів у електроприводах технологічного обладнання, визначені особливості їх конструкції, фактори, що спричиняють виникненню несправностей та огляд типових несправностей асинхронних двигунів.

У другому розділі були визначені способи моніторингу стану, методи діагностики та принципи ідентифікації несправностей асинхронних двигунів, здійснено огляд попередніх досліджень з моделювання роботи асинхронних двигунів при здійсненні моніторингу стану.

У третьому розділі виконано розрахунок показників надійності роботи електропривода.

У четвертому розділі було здійснено моделювання роботи систем моніторингу стану асинхронних двигунів шляхом складання алгоритму виявлення несправностей асинхронних двигунів, розроблена апаратна структура комплексної системи моніторингу.

Ключові слова: асинхронний двигун, несправність, моніторинг стану, діагностика, надійність, апаратна структура, гібридна інтелектуальна система

SUMMARY

Oleg GROSU. Development of an intelligent diagnostic system for the operation of an asynchronous motor in the drive of technological equipment / Graduation qualifying work for obtaining an educational level «master» in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Lutsk, 2023.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four chapters, conclusions, a list of references and appendices.

In the first chapter, an overview of the functioning of induction motors in electric drives of technological equipment is given, the features of their design, the factors that cause malfunctions and an overview of typical induction motor malfunctions are determined.

In the second section, the methods of condition monitoring, diagnostic methods, and principles of identifying faults in induction motors are defined, and a review of previous studies on modeling the operation of induction motors during condition monitoring is made.

In the third section, we calculated the reliability indicators of the electric drive.

In the fourth section, we modeled the operation of induction motor condition monitoring systems by drawing up an algorithm for detecting induction motor faults, and developed the hardware structure of an integrated monitoring system.

Keywords: induction motor, fault, condition monitoring, diagnostics, reliability, hardware structure, hybrid intelligent system

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ОГЛЯД ПИТАНЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	10
1.1 Особливості конструкції асинхронних двигунів	10
1.2 Фактори, що спричиняють виникнення несправностей асинхронних двигунів	11
1.3 Огляд типових несправностей асинхронних двигунів	14
2 СПОСОБИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	28
2.1 Методи діагностики асинхронних двигунів	28
2.2 Принципи ідентифікації несправностей асинхронних двигунів	34
2.3 Огляд попередніх досліджень з моделювання роботи асинхронних двигунів при здійсненні моніторингу стану	38
3 РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	43
3.1 Опис системи електроприводу	43
3.2 Розрахунок надійності системи електроприводу	47
4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СТАНУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	55
4.1 Складання алгоритму виявлення несправностей асинхронних двигунів	55
4.2 Моделювання прямого пуску асинхронного двигуна	57
4.3 Розробка апаратної структури комплексної системи моніторингу	62

4.4 Застосування гібридної інтелектуальної системи для поліпшення роботи системи моніторингу	64
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	71
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	75
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	84

ВСТУП

Асинхронні двигуни у більшості промислових виробництв є основним джерелом електроприводу. Їх широке використання в приводах технологічного обладнання свідчить про їх високу надійність та ефективність, хоча і характеризуються наявністю ряду несправностей та підвищених експлуатаційних вимог. Наслідками виникнення таких несправностей можуть бути зниження експлуатаційної ефективності, відмови, негативні економічні наслідки та зниження безпеки роботи. Зазначене вимагає застосування сучасних, точних та комплексних методів діагностики для оцінки поточного стану асинхронних двигунів.

Останні роки визначаються широким впровадженням у промисловому секторі принципів автоматизації, інтелектуальних систем, що дозволяє спростити операції керування, знизити витрати та підвищити ефективність. Перехід до інтелектуальних систем керування вимагає здійснення постійності моніторингу та діагностики стану режимів роботи асинхронних двигунів. Розробка інтелектуальних систем дозволяє здійснити ретельну діагностику стану двигунів, підвищувати їх надійність у різноманітних технологічних застосуваннях.

Зазначене вимагає інтеграцію різноманітних алгоритмів машинного навчання з сучасними сенсорними технологіями, що дозволяють створювати прості, зрозумілі та адаптивні системи. Для виведення закономірностей та невідповідностей необхідно здійснювати аналіз параметрів двигуна (енергетичні показники, вібрація, температура та інші). Здійснення діагностики дозволяє передбачати майбутню поведінку в режимі реального часу.

Для впровадження інтелектуальної діагностики двигунів необхідно визначити основні принципи керування їх роботою. При цьому досліджується складна взаємодія факторів, що визначають загальний стан

асинхронного двигуна, що є результатом роботи діагностичної системи, і можна здійснювати прогнозування необхідності здійснення технічного обслуговування. Майбутні дослідження повинні бути направлені на покращення принципів діагностування двигуна.

Мета роботи – здійснити розробку інтелектуальної системи діагностики роботи асинхронного двигуна у приводі технологічного обладнання.

Завдання роботи:

- оглянути питання функціонування асинхронних двигунів у електроприводах технологічного обладнання,
- визначити способи моніторингу стану асинхронних двигунів,
- здійснити огляд попередніх досліджень з моделювання роботи асинхронних двигунів при здійсненні моніторингу стану,
- розрахувати показники надійності роботи електропривода,
- скласти алгоритм виявлення несправностей асинхронних двигунів,
- розробити апаратну структуру комплексної системи моніторингу.

Об’єкт досліджень – електромеханічні процеси у асинхронних двигунах.

Предмет досліджень – параметри роботи асинхронних двигунів.

1 ОГЛЯД ПИТАНЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

1.1 Особливості конструкції асинхронних двигунів

Асинхронний електродвигун – це тип електричного двигуна, який перетворює електричну енергію живлячої мережі у механічну енергію обертання валу двигуна [1].

У асинхронному двигуні, змінний струм живить обмотки статора, що призводить до утворення змінного магнітного поля, що обертається. Це магнітне поле індукуює струм у обмотці ротора, викликаючи його обертання [1].

Фізичними складовими елементами асинхронного двигуна є статор з обмотками та ротор, який може мати різне конструктивне виконання. Дане конструктивне виконання забезпечує надійність роботи двигуна та зниження вартості обслуговування.

У різних видах технічного обладнання і важконавантажених агрегатах, асинхронні двигуни отримали широке використання через їх здатність витримувати високі навантаження, працювати при високих частотах обертання без суттєвої втрати продуктивності.

Основними компонентами асинхронного двигуна, що впливають на його експлуатаційні характеристики, є (рис. 1.1) [2]:

- статор,
- статорні обмотки,
- місце приєднання до джерела живлення,
- ротор,
- обмотки або стрижні ротора,
- підшипники/підшипникові вузли.

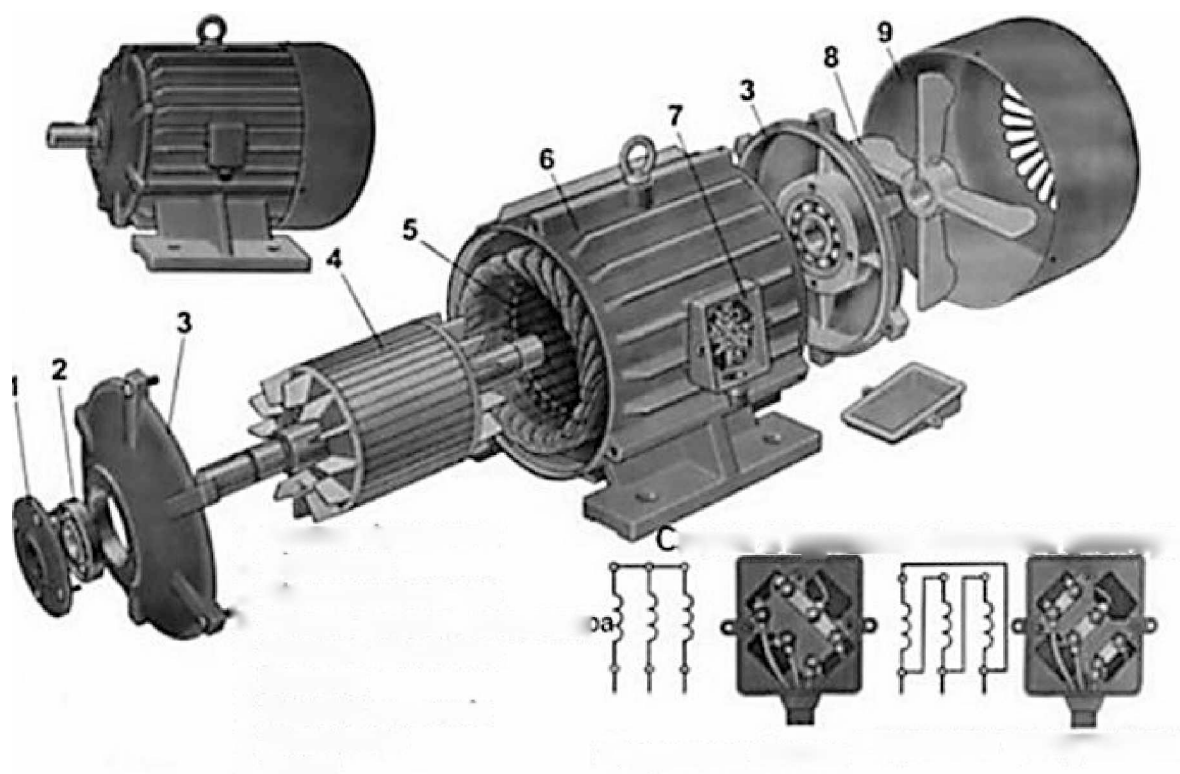


Рисунок 1.1 – Будова асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

1.2 Фактори, що спричиняють виникнення несправностей асинхронних двигунів

Виявлення несправностей – це дослідницький процес, при якому аналізуються статистичні дані роботи асинхронного двигуна та його продуктивність. Проведена робота дозволяє визначити, чи відповідають виміряні значення нормальному стану. Існують різні підходи до реалізації цього процесу [3].

Використання числених аналітичних даних, допоможе ідентифікувати потенційні проблеми в роботі. Необхідно спиратися на методи, які визначають частотні характеристики сигналів, чутливих до змін.

Виявлення несправностей є ключовим для забезпечення якості роботи агрегату, швидкості його обслуговування та мінімізації простоїв. Несправності в системах можуть призвести до значних ризиків роботи асинхронного двигуна, втрат ефективності роботи та ремонтпридатність. Щоб діагностувати проблеми роботи двигуна краще використати комбінацію кількох методів, включаючи аналіз даних, параметричний аналіз та використати різні стратегії, які дозволяють експлуатаційникам вчасно виявляти проблеми і запобігти аварійним ситуаціям [3].

Основна ідея складання алгоритмів виявлення несправностей полягає у порівнянні отриманих даних з пороговими значеннями для визначення можливих незадовільних станів. Діагностика спрямована на прогнозування майбутніх проблем, визначення терміну служби та аналіз ризиків відмов. Вірний вибір методу виявлення несправностей залежить від конкретної системи та її специфіки.

Асинхронні двигуни вважають досить надійними промисловими агрегатами, проте існують фактори, що можуть призвести до несправностей та відмов, що потребує розробки шляхів з оптимізації їх роботи. Серед таких факторів можна виділити [3]:

- температурні навантаження: електричні обмотки асинхронного двигуна можуть піддаватися термічному впливу завдяки діелектричним властивостям матеріалів двигуна. При досягненні температури, що перевищує критичний рівень, може відбутися деградація ізоляції, що може призвести до збоїв у роботі двигуна,

- механічні фактори: резонансні явища, спричинені неоднорідністю матеріалів або невідповідністю геометрії окремих частин асинхронного двигуна, можуть викликати додаткові напруження на структурні елементи двигуна (обмотки, ротор, підшипники та інше),

- електричні відхилення: гармонічні спотворення, що викликаються роботою систем живлення, і призводять до нестабільної роботи та перевантаження двигуна через коливання напруги,

- присутність вологи та парів води можуть викликати окислення і корозію контактних деталей та призводять до коротких замикань в обмотках двигуна,

- вібраційні навантаження, які можуть викликати нерівномірність у роботі двигуна, можуть бути спричинені похибками збирання та встановлення, дефекти підшипників або незбалансованість частин двигуна, що обертаються,

- забруднення середовища, де працює двигун, може погіршити процес охолодження двигуна – накопичення пилу, волокон та інших частинок може обмежувати циркуляцію повітря, що призводить до перегріву двигуна.

Зі статистичної точки зору ті чи інші фактори, що спричиняють дефекти в асинхронних двигунах, можна поділити наступним чином [3]:

- надмірне навантаження чи перегрів внутрішньої частини двигуна (до 30%),

- несправність підшипників та підшипникових вузлів (до 15%),

- короткі замикання між окремими статорними обмотками (до 15%),

- ушкодження статорних провідників (безпосередньо матеріалу та/або ізоляції (до 10%),

- викривлення повітряного проміжку між статором і ротором (до 8%),

- перекид між фазами живлення (до 7%),

- порушення цілісності обмотки фазного ротора (до 5%),

- дисбаланс частин двигуна, що обертаються (до 4%),

- погіршення міцності закріплення статорних обмоток (до 3%),

- порушення співвісності (до 3%).

Для забезпечення тривалого терміну служби двигуна важливо регулярно і вчасно здійснювати діагностику його стану, використовуючи

різноманітні діагностичні методи: спектральний аналіз, термографію та інші. Тільки проведення глибокого аналізу може допомогти виявити потенційні проблеми на ранніх стадіях та вжити необхідних заходів для їх вирішення.

1.3 Огляд типових несправностей асинхронних двигунів

На рис. 1.2 наведено фото зношеного і деформованого короткозамкненого ротора асинхронного двигуна [4].



Рисунок 1.2 – Фото зношеного і деформованого короткозамкненого ротора асинхронного двигуна [4]

Зношеність і деформація валу електродвигуна може бути результатом тривалої експлуатації, неправильної роботи або впливу високих механічних навантажень. Ця проблема може призвести до нерівномірної роботи двигуна та вібрацій, швидкого зношення підшипників та настання їх аварійного стану. Також можливе підвищене тепловиділення та перегрів

окремих компонентів асинхронного двигуна. З погіршенням стану ротора можуть з'явитися проблеми з передачею крутного моменту на виконавчі механізми, що в кінцевому стані призведе до зниження продуктивності обладнання або виходу останнього з ладу. Зношеність ротора може призвести до коротких замикань в статорних обмотках. Регулярний контроль стану ротора та своєчасне виявлення проблем з ним є ключовим для забезпечення довговічності роботи електричного двигуна.

На рис. 1.3 наведено фото частини валиків кочення підшипника, що були деформовані по сепараторному кільцю [4].



Рисунок 1.3 – Фото частини валиків кочення підшипника асинхронного двигуна [4]

Ушкодження валиків кочення підшипника може бути викликано перевантаженням або високими ударними навантаженнями. Недостатність змащування або використання недоречних змащувальних речовин може зумовити прискорене зношування підшипників. Потрапляння забруднюючих та/або абразивних речовин до підшипників може призвести до прискорення виходу підшипників з ладу. Пошкоджені елементи підшипників викликають нерівномірність обертання або вібрації, що

збільшує тепловиділення та прискорює зношення інших компонентів двигуна. Ушкодження підшипників може призвести до зупинки двигуна та виходу з ладу приєднаного технологічного або виробничого обладнання. Регулярний контроль і вчасне та планомірне обслуговування двигуна дозволить вчасно виявити та вирішити подібні проблеми з підшипниками.

На рис. 1.4 наведено фото частини валиків кочення підшипника, що були деформовані по сепараторному кільцю [4].



Рисунок 1.4 – Фото пошкоджених колекторних контактних пластин фазного ротора асинхронного двигуна [4]

Пошкоджені колекторні контактні пластини ротора можуть виникнути через надмірне навантаження, експлуатаційні помилки або порушення стану ізоляції між пластинами. Зазначене може призвести до коротких замикань та перегріву пластин. Подібні пошкодження можуть бути викликані механічним зношуванням через порушення або невідповідність контакту з контактними щітками. Пошкодження пластин може призвести до нестабільної роботи двигуна, частих відключень, виходу роторних обмоток з ладу, зниження загальної ефективності двигуна та підвищення енергоспоживання. У крайніх випадках, дана несправність може призвести

до спалаху або пожежі. Запобігання зазначених проблемам можуть сприяти регулярні перевірки та своєчасне обслуговування двигунів.

На рис. 1.5 наведено фото частини валиків кочення підшипника, що були деформовані по сепараторному кільцю [4].



Рисунок 1.5 – Фото поверхні магнітопроводу короткозамкненого ротора асинхронного двигуна [4]

Наявність іржі на поверхні магнітопроводу ротора може виникнути через вплив вологи та наступне окислення матеріалу, що може бути результатом тривалої експлуатації в умовах високої вологості або недостатності захисту поверхні від корозії. Іржа на магнітопроводі може знизити його магнітні властивості, що призведе до зниження загальної ефективності роботи асинхронного двигуна, створювати додатковий опір в обмотках, спричиняючи їх перегрів та швидше зношення ізоляції. Наявність іржі також може призвести до механічних пошкоджень і деформацій короткозамкненого ротора. Для вирішення зазначеної проблеми необхідно своєчасно виявляти зародки іржі, здійснювати очищення поверхні та застосовувати антикорозійні заходи, забезпечувати відповідні умови зберігання та роботи.

На рис. 1.6 наведено фото згорілих статорних обмоток асинхронного електродвигуна [4].

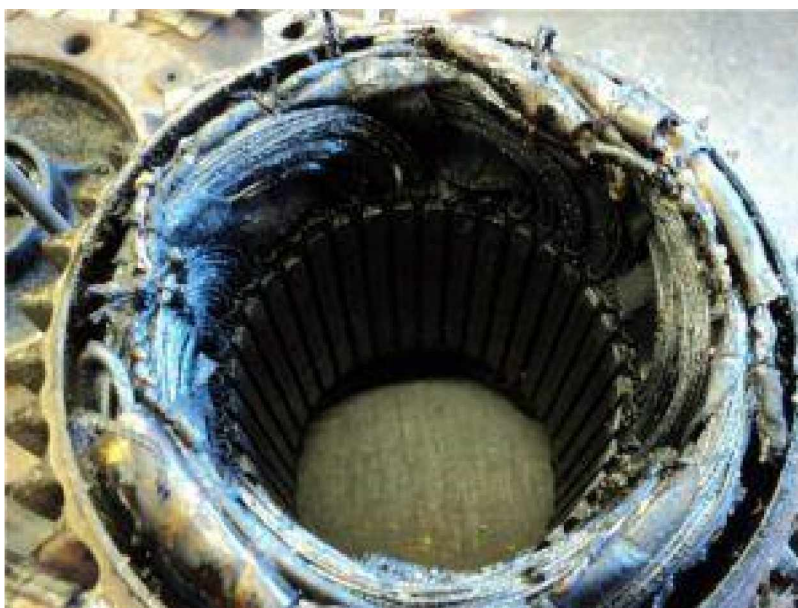


Рисунок 1.6 – Фото згорілих статорних обмоток асинхронного електродвигуна [4]

Згорілі статорні обмотки асинхронного електродвигуна можуть виникнути через перевантаження двигуна, міжвиткові короткі замикання, застосування надмірного змащування, недостатнє охолодження або пошкоджена ізоляція. Згорілі обмотки виключаються з роботи, що призводить до зниження ефективності роботи двигуна, його нестабільної роботи або до повної зупинки, інколи – викликати пожежу або пошкодження іншого електричного обладнання. Ремонт або заміна згорілих обмоток може бути трудомістким і коштовним процесом. Для запобігання зазначених проблем досить важливо забезпечити правильну експлуатацію обладнання, регулярно перевіряти стан ізоляції та забезпечувати відповідне охолодження двигуна. На допомогу у цьому може прийти застосування контролюючих та захисних пристроїв.

На рис. 1.7 наведено фото міжвиткових коротких замикань у статорній обмотці асинхронного двигуна [5].



Рисунок 1.7 – Фото міжвиткових коротких замикань у статорній обмотці асинхронного двигуна [5]

Міжвиткові короткі замикання статорних обмоток асинхронного двигуна є однією з найбільш поширених несправностей електричних машин. Причинами їх появи можуть бути механічні пошкодження, старіння ізоляції, вплив високих температур або вологи. Ці ушкодження призводять до перегріву двигуна і виходу його з ладу, може збільшитися споживана потужність і витрати на електроенергію, виникає нестабільність роботи двигуна та виплески гармонік вищого порядку в мережу живлення, виникають зайвий шум та вібрація електричної машини під час її роботи. Для усунення цих негативних явищ важливо регулярно проводити діагностику обладнання, яка дозволить вчасно виявити подібні дефекти і уникати великих фінансових втрат.

На рис. 1.8 наведено фото критичного ушкодження статорної обмотки асинхронного двигуна.



Рисунок 1.8 – Фото критичного ушкодження статорної обмотки асинхронного двигуна [5]

Ушкодження (рис. 1.8) можуть бути результатом ряду причин: тривале перевантаження двигуна, перегрів обмоток, пошкодження ізоляції, короткі замикання, вплив вологи, корозія металевих частин та руйнування ізоляційного матеріалу, механічні удари або вібрації, неправильне підключення або неправильне регулювання, «нормальне» зношення матеріалів протягом тривалого часу експлуатації.

На рис. 1.9 наведено тепловізійну картину нагріву частин асинхронного двигуна [6].

Тепловізійна картина роботи асинхронного двигуна може показати температуру окремих частин, а також показати елементи з надмірним перегрівом. Надмірний нагрів може бути результатом кількох факторів, серед яких можна виділити: тривале перевантаження двигуна, коли він працює на максимальних обертах, неналежне охолодження через засмічення або вихід з ладу системи вентиляції, невірне налаштування електричних параметрів.

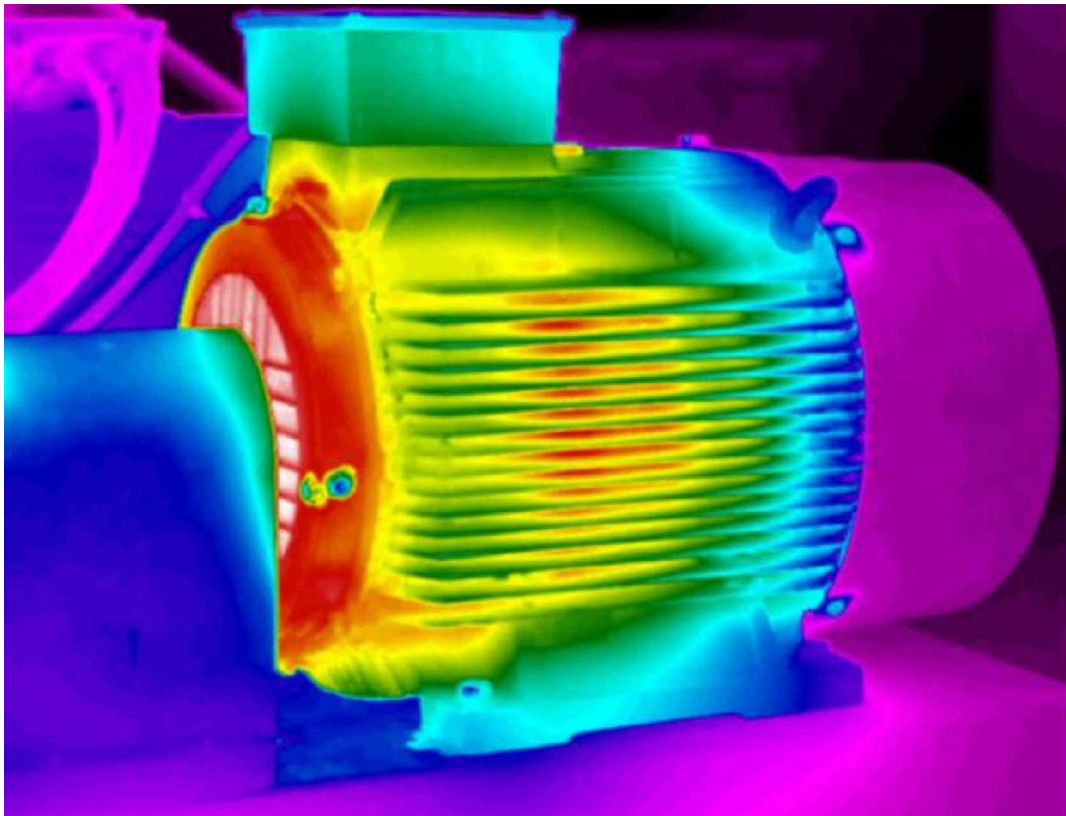


Рисунок 1.9 – Тепловізійна картина нагріву частин асинхронного двигуна [6]

Додатковими чинниками можуть бути втрати в ізоляції обмоток та міжвиткові короткі замикання; недостатність змащувального матеріалу в підшипниках; невірне встановлення двигуна або наявність дефектів конструкції.

На рис. 1.10 наведено тепловізійну картину нагріву підшипника асинхронного двигуна [7]. Тепловізійне зображення підшипника асинхронного двигуна вказує на його підвищену температуру. Такий надмірний нагрів підшипника може бути викликаний кількома причинами: недостатність змащування в підшипнику, що призводить до зростання сил тертя. Тривала експлуатація двигуна в такому режимі може призвести до зношення підшипника. Перегрів підшипника може бути також викликаний неправильним регулюванням або встановленням, наявністю забруднень у мастилi. Зазначене викликає важливість регулярної перевірки стану підшипників та проведення профілактичного обслуговування двигуна.

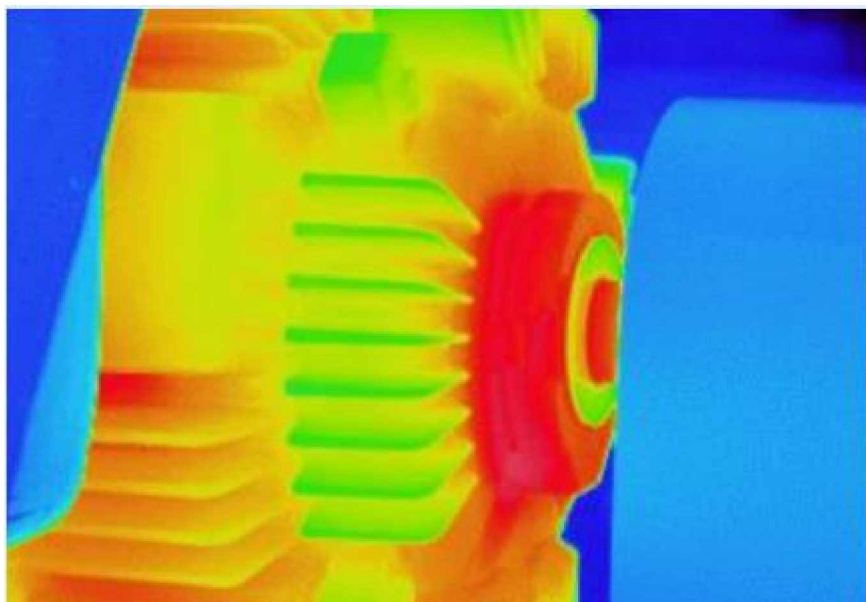


Рисунок 1.10 – Тепловізійна картина нагріву підшипника асинхронного двигуна [7]

На рис. 1.11 наведено картину впливу перехідної напруги у мережі на форму напруги живлення асинхронного двигуна [8].

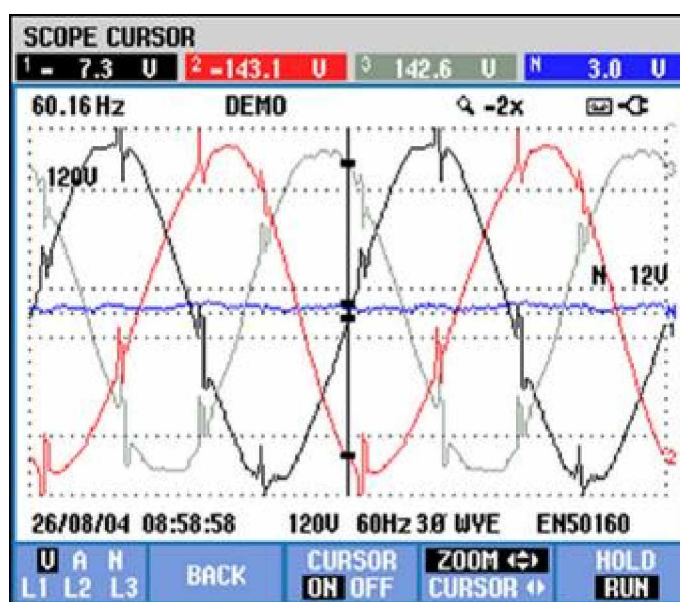


Рисунок 1.11 – Картина впливу перехідної напруги у мережі на форму напруги живлення асинхронного двигуна [8]

Графік (рис. 1.11) показує негативний вплив перехідної напруги у живлячій мережі на напругу асинхронного двигуна. Такі перешкоди в електричній мережі можуть бути спричинені наявністю ряду факторів: наявність коротких замикань в мережі, запуск потужних електричних споживачів з великим стартовим струмом, наявність електромагнітних перешкод від роботи інших пристроїв, атмосферні явища (наприклад, блискавка), відключення або приєднання великих ділянок мережі, пошкодження ізоляції, порушення стану заземлень або неправильне налаштування захисного обладнання. Для уникнення подібних проблем необхідно використовувати фільтруючі пристрої, стабілізатори напруги та правильно налаштовувати захисне обладнання.

На рис. 1.12 наведено картину гармонічних викривлень напруги живлення асинхронного двигуна [8].

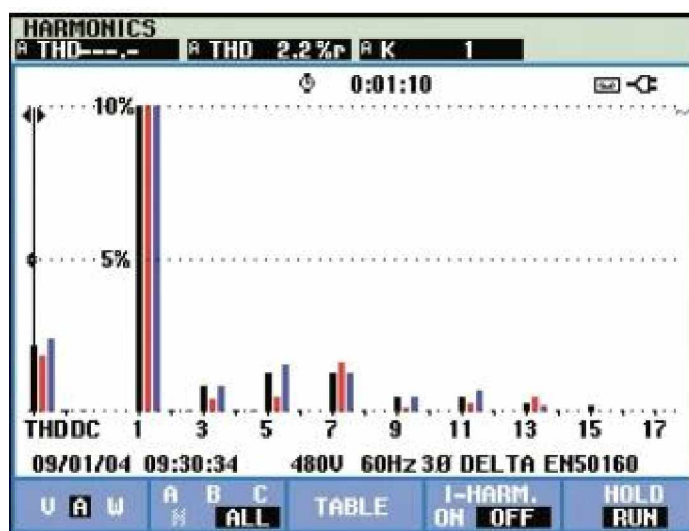


Рисунок 1.12 – Картина гармонічних викривлень напруги живлення асинхронного двигуна [8]

<https://www.fluke.com>

Гармонічні викривлення (рис. 1.12) часто виникають через наявність нелінійних навантажень в електричних мережах (перемикачі живлення, перетворювачі частоти, діодні та тиристорні мости, трансформатори,

незбалансовані навантаження та асиметрія системи). Висі гармоніки можуть також бути згенеровані під час пуску потужних електродвигунів під навантаженням, при виникненні коротких замикань або перепадів напруги. Для контролю та зниження рівня гармонічних коливань та подальших викривлень напруги дуже важливо використовувати фільтруючі пристрої та спеціалізоване обладнання.

На рис. 1.13 наведено картину коливань, що викликаються дисбалансом частин асинхронного двигуна, що обертаються [8].

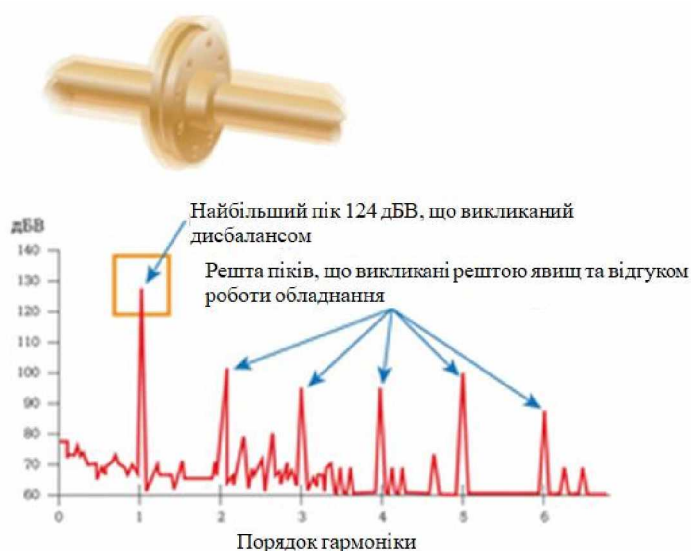


Рисунок 1.13 – Картина коливань, що викликаються дисбалансом частин асинхронного двигуна, що обертаються [8]

Дисбаланс частин асинхронного двигуна, що обертаються, може бути викликаний різними причинами: зношені або пошкоджені підшипники, неправильна установка або фіксація двигуна на опорі, люфт або деформація окремих деталей двигуна, злам елементів ротора або вала; наявність вибоїв, тріщин та інших дефектів матеріалу, з яких зроблено частини, що обертаються; забруднення та накопичення забруднень та продуктів корозії, що може вплинути на порушення рівноваги. Важливим також є необхідність здійснення періодичного технічного обслуговування

та перевірки стану всіх компонентів двигуна. Наявність дисбалансу може призвести до передчасного зношення окремих частин двигуна та зниження його продуктивності.

На рис. 1.14 наведено схему зміщення частин кочення підшипників, що викликають розхитування валу асинхронного двигуна [8].

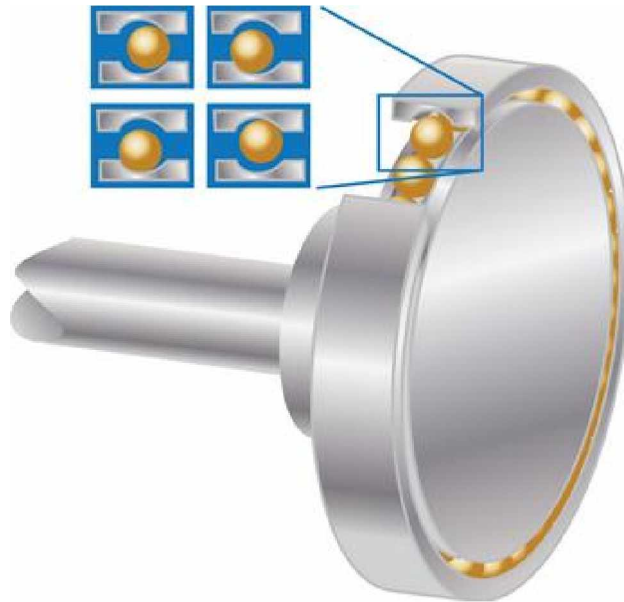


Рисунок 1.14 – Схема зміщення частин кочення підшипників, що викликають розхитування валу асинхронного двигуна [8]

На представленій схемі (рис. 1.14) показано зміщення частин кочення підшипників, що призводить до розхитування валу асинхронного двигуна. Причиною цього може бути: тривале використання підшипників без задовільного змащування; періодичні ударні навантаження; надмірні вібрації під час роботи двигуна; неправильна установка підшипника; забруднювачі, що потрапляють всередину підшипника; погана якість матеріалу підшипників; наявність осередків корозії на частинах кочення; невірний підбір підшипника, що не відповідає навантаженням на двигун. Регулярний огляд та обслуговування підшипникових вузлів і підшипників є запорукою тривалої та надійної роботи двигуна.

На рис. 1.15 наведено схеми порушення центрування валу асинхронного двигуна і технологічного обладнання [8].

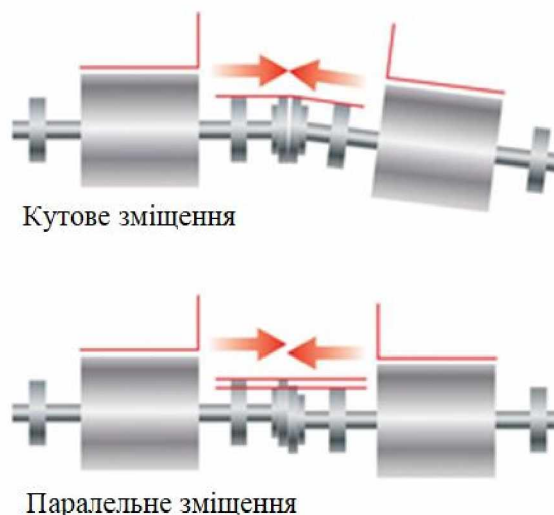


Рисунок 1.15 – Схеми порушення центрування валу асинхронного двигуна і технологічного обладнання [8]

Порушення центрування валу асинхронного двигуна і валу технологічного обладнання може виникнути через: неправильну установку та/або фіксацію обладнання, що може викликати зміщення відносно осі обертання; тривала експлуатація обладнання, що призвела до його зношення та деформацій окремих частин; механічні удари; підвищена вібрація під час роботи; неправильна установка підшипників або їх зношення, що призводить до кутового або паралельного зміщення; наявність дефектів у матеріалах або порушення технології виготовлення деталей; температурні зміни, що викликають теплове розширення деталей і порушення центрування; наявність корозії та інших пошкоджень на поверхні валу; недостатнє або неправильне обслуговування або відсутність регулярного технічного огляду. Для забезпечення правильної роботи асинхронних двигунів дуже важливо проводити регулярний контроль та корекцію центрування.

На рис. 1.16 наведено картину зміни напруги живлення асинхронного двигуна під впливом широтно-імпульсної модуляції [8].

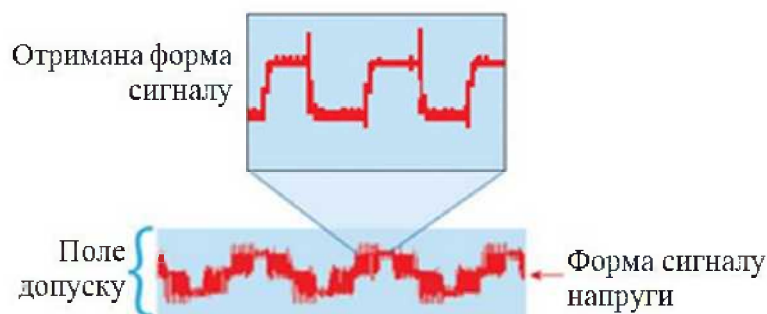


Рисунок 1.16 – Картина зміни напруги живлення асинхронного двигуна під впливом широтно-імпульсної модуляції [8]

На представленому зображенні (рис. 1.16) видно, як форма сигналу напруги живлення асинхронного двигуна змінилася під впливом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). ШІМ часто використовується для регулювання крутного моменту або частоти обертання двигунів, але її застосування може викликати певні проблеми: генерування високочастотних гармонік, які можуть спричинити перегрів та зношення підшипників; викликають продукування електромагнітних перешкод у розташованому поряд обладнанні; спричинити додаткові втрати потужності в електродвигуні через виникнення високочастотного змінного магнітного потоку. Імпульси від ШІМ можуть призвести до виникнення резонансних явищ в системі живлення, а наявність довгих провідників або кабелів у системі може посилити ефект високочастотних коливань. З огляду на зазначене, досить важливо використовувати відповідне обладнання та впроваджувати методи для зменшення впливу ШІМ на асинхронний двигун та інші компоненти енергетичної системи.

2 СПОСОБИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

2.1 Методи діагностики асинхронних двигунів

Найбільш застосовуваними методами діагностики асинхронних двигунів є [9]:

- визначення середньоквадратичного значення вимірюваних сигналів,
- аналіз вібрацій,
- спектрографічний аналіз,
- аналіз спектрів сигналів,
- високочастотна (ультразвукова) діагностика,
- методи статистичної обробки сигналів,
- оцінка стану з використанням нейронних мереж,
- застосування принципів штучного інтелекту.

Одним з головних завдань визначення стану асинхронного двигуна є визначення методу моніторингу та діагностики несправностей.

У загальному випадку можна розрізнити наступні підходи [9]:

- експериментальний підхід,
- модельний підхід,
- статистичний підхід.

Моніторинг стану залежить також від застосованого способу технічного обслуговування двигуна, які можна розділити на три види [9]:

- заплановане,
- при відмовах,
- за поточним станом.

Заплановане технічне обслуговування передбачає регулярний огляд і ремонт асинхронного двигуна через визначені проміжки часу. Це потребує залучення відповідних фахівців для здійснення ремонту та діагностики стану двигуна. Обслуговування при відмові передбачає роботу асинхронного двигуна до його повної відмови. Цей підхід зазвичай

дорожчий, оскільки може вимагати заміни обладнання замість ремонту або заміни окремих деталей. Обслуговування за поточним станом передбачає моніторинг і періодичне оновлення інформації про реальний стан машини під час її роботи та застосування профілактичних заходів на ранніх етапах виявлення несправностей, що дозволить уникнути серйозних ушкоджень та втрат робочого часу. Зазначене вимагає впровадження та розвиток культури обслуговування на основі стану для запобігання неочікуваним аварійним станам й зменшити час простою електроприводів та витрат на обслуговування. Тому, основною метою здійснення моніторингу стану асинхронного двигуна є створенні надійного механізму виявлення несправностей на ранніх етапах, щоб дозволить своєчасно відключити електричну машину для діагностики та ремонту, й уникнути непередбачених перерв у роботі та додаткових грошових і енергетичних втрат [10].

Численні дослідження показують, що значна частина несправностей у асинхронних двигунах виникають у статорах, роторах та підшипниках.

Зазвичай несправності виникають у певній послідовності – несправність у одній частині електричної машини може розвинути та викликати більш серйозну несправність у іншому місці машини. Дане положення пояснює важливість виявлення несправностей на ранніх стадіях.

Усі методи виявлення несправностей можна розділити на три основні категорії [11]:

- підхід на основі аналізу параметрів,
- модельний підхід,
- статистичний підхід.

Виокремлюють два способи моніторингу складових частин електричних машин – руйнівний і неруйнівний.

Зазначені методи можуть бути застосовані для виявлення ключових проблемних питань експлуатації асинхронних двигунів: дефектність

роторів, міжвиткові замикання, погіршення ізоляції та вихід з ладу підшипникових опор. Головним завданням при цьому є знаходження оптимального балансу між точністю вимірювань та витратами на проведення цих вимірювань, практичністю та можливістю здійснення даних вимірювань при загальних зменшених економічних витрат.

Підхід, що базується на вивченні параметрів сигналів, реалізується шляхом аналізу сигналів, що відповідають наявності несправностей у часовому та частотному діапазонах – параметри сигналів слугують для діагностики несправностей. Для здійснення моніторингу різноманітних технічних несправностей можуть бути проконтрольовані: струм, напруга, потужність, коливання, температура та акустичні параметри. При здійсненні моніторингу стану роботи обладнання необхідно розрізняти стаціонарний та перехідний режими.

Дослідженнями доведено, що несправності асинхронних двигунів продукують додаткові частотні компоненти у сигналах струму в обмотках статора, що позначається на частотному спектрі струму [11].

Даний метод засновано на спектральному аналізі, який може бути використаний для дистанційного онлайн-моніторингу стану асинхронних двигунів. Частотні спектри двигуна з ушкодженими стрижнями ротора мають характерні верхні та нижні частотні смуги (бічні частотні смуги) [11].

Для справних асинхронних двигунів характерна симетрія струмів у обмотках та рівномірного магнітного поля. При наявності ушкоджень стрижнів ротора виникає асиметрія, порушується картина обертового магнітного поля, що призводить до виникнення додаткових частоти та до викривлення гармонічного спектра струму ао напруги у статорних обмотках двигуна. Ці додаткова частоти можуть бути описані рівняннями [11]:

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (2.1)$$

$$f_- = f_1 \cdot (1 - 2s) \quad (2.2)$$

$$f_+ = f_1 \cdot (1 + 2s) \quad (2.3)$$

На відхилення цих частот впливає кількість стрижнів у роторі, що вийшли з ладу. Зазначене може погіршити можливості пуску двигунів, що пояснюється недостатністю пускового моменту [11].

Іншим негативним явищем є зміна або нерівномірність осевого зазору між ротором і статором. Зміна повітряного проміжку погіршує форму магнітного поля та параметрів охолодження, призводить до неприпустимого торкання між ротором і статором. Асиметрія магнітного поля може призвести до модуляції шкідливих значень струмів намагнічування, критична величина якого пропорційний частоті обертання (величині ковзання). Даний струм намагнічування може викликати пульсацію крутного моменту та вібрацію двигуна, що може бути виявлено шляхом проведення спектрального аналізу вібрацій.

На рис. 2.1 наведено спектральний склад модуля струму статора асинхронного двигуна, що не має пошкоджень. Спектральний склад струму без наявності пошкоджень демонструє відповідну характеристики роботи двигуна в ідеальних умовах. Основна складова струму, що міститься біля нуля частоти, відображає основний робочий струм двигуна і свідчить про переважання основної частоти струму в спектрі. Невеликі піки у розподілі, розташовані правіше від основного компонента, являють собою вищі гармоніки, які зазвичай обов'язково присутні в суцільному спектрі струму асинхронних двигунів, але їх інтенсивність є досить низькою у здоровому двигуні. Наявність зазначених гармонік можуть виникати внаслідок порушення у роботі системи живлення або через взаємодію з іншими електричними компонентами.

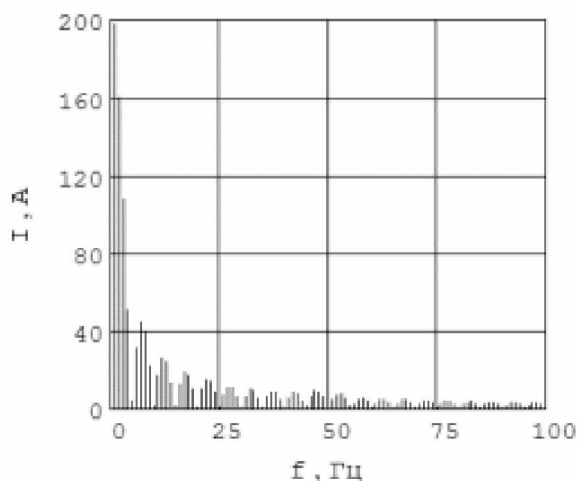


Рисунок 2.1 – Спектральний склад модуля струму статора асинхронного двигуна без пошкоджень

Така характеристика спектру свідчить про коректну роботу асинхронного двигуна без аномалій або відхилень. Представлені значення струму та частоти підтверджують відсутність пошкоджень в обмотках статора або інших дефектах, які могли б впливати на роботу двигуна.

Відсутність значних піків на високих частотах вказує на те, що двигун працює без суттєвих пошкоджень. Якщо на спектрограмі з'явилися б нові частотні компоненти або зросла інтенсивність існуючих – це говорило б про наявність ушкоджень або дефектів у асинхронному двигуні. Загалом, представлений спектр свідчить про стабільну і коректну роботу асинхронного двигуна без видимих ознак пошкоджень або дефектів.

На рис. 2.2 наведено спектральний склад модуля струму статора асинхронного двигуна при наявності пошкоджень. Спектр (рис. 2.2) значно відрізняється від спектра (рис. 2.1) двигуна. В діапазоні частот від 0 до 25 Гц спостерігається ряд піків з амплітудами до 20 А. Це може свідчити про нерівномірний струм у статорних обмотках, що може говорити про пошкодження або дефекти. Найвищий пік спостерігається приблизно на частоті 50 Гц (і досягає майже 20 А). Ця частота може відображати основну робочу частоту двигуна, але значуща амплітуда на цій частоті може свідчити про можливі проблеми в роботі. В діапазоні частот від 50

Гц до 75 Гц спостерігається зменшення інтенсивності спектра і з'являються окремі сплески, які можуть указувати на присутність вищих гармонік або додаткових пошкоджень. На частотах вище 75 Гц можна побачити знову підвищення інтенсивності спектра, що може вказувати на проблеми, пов'язані з високочастотними перешкодами або дефектами в обмотках.

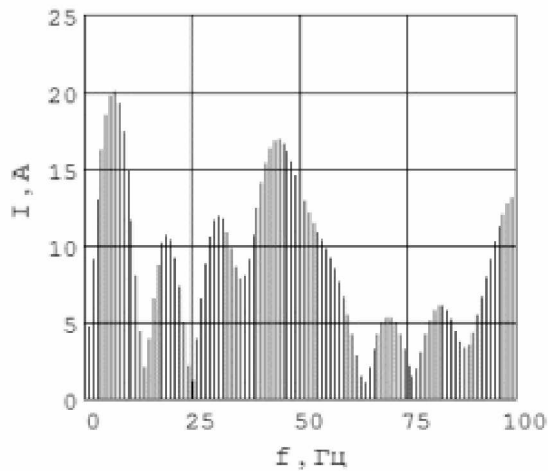


Рисунок 2.2 – Спектральний склад модуля струму статора асинхронного двигуна при наявності пошкоджень

Відмінності в спектральному складі свідчать про те, що асинхронний двигун може мати дефекти або пошкодження, які впливають на його роботу. Спектральний аналіз є ефективним інструментом для діагностики стану асинхронних двигунів, оскільки він дозволяє виявляти невеликі зміни в роботі машини на ранніх стадіях.

Для адекватної оцінки наявності зламаних стрижнів ротора та несправностей підшипників може слугувати вимірювання струму статора. Перевагою цього методу є простота виявлення несправності, а також визначення тяжкості цих порушень. При цьому необхідно виділити основну частоту роботи двигуна і частоту несправності. Відповідні амплітуди можна отримати шляхом оцінки за допомогою методу найменших квадратів та критеріального аналізу частотних амплітуд.

При використанні спектрального аналізу струму статора в ustalених режимах роботи асинхронного двигуна необхідно зважати на ступінь його навантаженості. Зі зміною навантаження змінюється частотний спектр, якщо маємо порушення цілісності стрижнів ротора, що пояснюється зміною картини інерції та говорить про можливість таким чином виявити несправність і робити це у автоматичному режимі.

Іншим способом виявлення поломки стрижня ротора може бути контроль низькочастотних коливань при роботі під навантаженням, зміні крутного моменту, при коливаннях напруги живлення та іншого. Тобто, аналіз струму (або інших характерних величин) необхідно здійснювати під час перехідних процесів. Для пошуку несправності необхідно складання певного алгоритму, який дозволяє розкласти вихідний сигнал на певні частоти, контроль зміни яких говорить про певний тип несправності і дозволяє визначити її серйозність. Зміна амплітуди і частоти пояснює наявність несправності певного виду [12].

2.2 Принципи ідентифікації несправностей асинхронних двигунів

Питання виявлення та усунення дефектів при роботі асинхронних двигунів набуває великого значення у різноманітних інженерних застосуваннях та активно досліджується в промисловості та у соціальній сфері. Основними цілями процесів ідентифікації несправностей є виявлення та обмеження впливу можливих збоїв на ранніх етапах, пошук шляхів підвищення ефективності роботи систем за допомогою реконфігурації систем керування, зниження витрат на технічне обслуговування, забезпечення високої надійності, запобігання незапланованим простоюванням та збільшенні ефективності роботи енергетичних систем [13].

Непередбачувані збої у роботі асинхронних двигунів можуть призвести до значних економічних втрат, погіршення якості технологічних процесів, завдати серйозної шкоди обслуговуючому персоналу та призвести до інших негативних факторів. Зазначене говорить про необхідність впровадження системи діагностики несправностей, які дозволять здійснити моніторинг стану асинхронного двигуна та оцінити безпеку роботи електроприводу в цілому. Особливий інтерес представляють автоматизовані онлайн-системи виявлення та діагностики несправностей [14].

Несправність – це недозване відхилення хоча б однієї характеристики, властивості або параметра системи від прийнятного значення. Несправності можуть проявитися в окремих вузлах установок, датчиках, виконавчих механізмах [14].

Процес виявлення несправностей складається з двох етапів [14]:

- прийняття рішення про наявність або відсутність несправності,
- визначення місця несправності.

Моніторинг стану об'єкта – це процес спостереження за характеристиками системи та виявлення змін та тенденцій змін характеристик, що відстежуються, і які можуть бути використані для визначення необхідності технічного обслуговування, прогнозування періодів настання аварійних станів та для оцінки поточного стану об'єкта.

Виявлення несправностей полягає у ідентифікації незадовільної роботи досліджуваної системи.

Виокремлення несправності полягає у встановленні конкретного місцезнаходження несправності (або компонента, що є несправним) з супутнім визначенням величини або об'ємів несправності. Спільний процес ідентифікації та виокремлення несправності називають діагностикою несправності.

Ефективність методу виявлення несправності характеризується рядом важливих показників [15]:

- здатність виявляти навіть «незначні» несправності,
- здатність виявляти несправності навіть при короткочасності їх виникнення,
- здатність виокремлювати загальний «шум» при роботі систем,
- мінімізація помилкових «виявлень».

Методи виявлення та діагностики несправностей поділяють на дві категорії [15]:

- методи, які не використовують моделі,
- методи, засновані на моделях.

Модельні методи використовують переваги відповідних знань, що реалізуються прикладними програмами. У випадку застосування модельного методу можна керувати ступенем точності моделі системи. Більшість модельних методів базується на аналітичній концепції для будови номінальної моделі системи для генерування вихідних сигналів, які містять інформацію або свідчать про наявність несправності [16].

Методи моделювання можна розділити на [16]:

- моделі на основі даних,
- аналітичні моделі,
- статистичні модель.

Для досить складних та розгалужених систем створення математичних моделей високої точності на основі фізичних принципів може бути досить складним, трудомістким, а, іноді, і неможливим завданням.

Моделі на основі даних формуються на базі інформації, отриманої з досліджуваного процесу [16].

Аналітичні моделі ґрунтуються на відомих фізичних взаємодіях у досліджуваному об'єкті і можуть бути побудовані з використанням даних з датчиків, на оцінці параметрів та інших [16].

Моделі, засновані на статистичних даних, будуються на основі раніше отриманих знань про досліджуваний процес [16].

Моделі на основі даних та статистичні застосовують у випадках, коли аналітична форма моделі процесу невідома та відсутні експертні знання про протікання процесу при несправностях [16].

Якщо застосовується дослідження без використання моделі, то його можна реалізувати шляхом здійснення моніторингу сигналів протікання процесів у досліджуваній системі: на першому етапі використовують значення сигналу з відповідного датчика (напруги, струму, температури і т.п.). На другому етапі відбувається вилучення або розрахунок «корисної» інформації, шляхом застосування відповідного методу обробки сигналу (метод рядів Фур'є, Вейвлет-перетворення і т.п.). На третьому етапі відбувається визначення та/або ідентифікується несправності за відповідними порівняльними даними. Безмодельні методи можуть бути використані для частотної, часової та частотно-часової області та вимагають здійснення спостережень [17].

Переваги модельних методів полягають у відсутності необхідності здійснення натурних спостережень і можуть бути використані для виявлення потенційних дефектів, не вимагаючи наявності статистичних даних.

Для діагностики та пошуку несправностей у асинхронного двигуна розробка аналітичної моделі може бути досить складним завданням. Будь-яка модель не повністю і не досить адекватно описати абсолютно усі процеси у двигуні на всіх можливих режимах його роботи.

Моделі, засновані на статистиці, можна використовувати разом із безмодельним методом діагностики на основі отриманих сигналів. Навіть досвідчені фахівці не рідко помиляються при визначенні несправностей, а знання, що при цьому знадобляться, потребують використання численних джерел інформації для прийняття вірного рішення.

2.3 Огляд попередніх досліджень з моделювання роботи асинхронних двигунів при здійсненні моніторингу стану

Для виявлення несправностей асинхронного двигуна існує багато різноманітних досліджень. Вони пропонують прості та ефективні методи для відповідних умов їх роботи.

Аналіз струмів статора для виявлення дефектів і струмів ротора під час роботи в стаціонарному режимі, а, надто, при перехідних процесах, стикається з численними проблемами, включаючи розширений частотний спектр, шуми та інше.

Методика досліджень роботи асинхронних двигунів за [18] базується на інноваційному уніфікованому підході до виявлення та прогнозування дефектів як для нелінійних дискретних часових систем з множинними входами та виходами. Запропонована концепція враховує як вхідні, так і вихідні розбіжності, аналізуючи різні часові характеристики. Аномалії, що характеризують наявність несправностей, можуть мати постійний або раптовий характер. Виявлення наявних дефектів здійснюється шляхом апроксимації отриманих даних у функції часу. Загальний сигнал ідентифікації може бути сформований за допомогою використання порівняльного методу для реєстрації аномалій, які характеризують перевищення встановлених порогових критеріїв. Стабільність роботи даної системи спирається на можливість оптимізації та підвищення точності контролю відмов.

У [19] для дослідження створюється ортогональна модель асинхронного двигуна, у якій реалізуються асиметрія живлення та міжфазні короткі замикання у обмотці статора. Результати моделювання були порівняні з експериментальними даними, що показало ефективність створеної моделі та можливість її використання для аналізу стаціонарних та перехідних режимів роботи асинхронних двигунів.

У [20] представлено математичну модель асинхронного двигуна за наявності короткого замикання між статорними обмотками. Модель застосовує концепцією множинних електричних та індуктивних зв'язків і враховує просторові гармоніки, ефекти перекосу та колювання форми магнітного потоку в повітряному зазорі. Здійснений за допомогою створеної моделі аналіз підтверджує появу зазначених гармонік при виникненні коротких замикань між шарами статорних обмоток.

Складена у [21] модель асинхронного двигуна враховує наявність дефектів у статорі й роторі (зокрема, короткі замикання між окремими електричними ланцюгами, ушкодження стрижнів ротора та інші). Діагностичні процедури ґрунтуються на оцінці параметрів моделі шляхом порівняння з попередніми даними, що притаманні стабільній роботі досліджуваної системи при нормативних умовах експлуатації. Для ідентифікації параметрів несправності використовується метод контролю вихідної помилки.

У [22] наведено методологію аналізу сигналів миттєвої потужності, що споживається асинхронним двигуном. Миттєва потужність визначається залежною від значення напруги і струму, а її значення використовується як показник наявності відхилень у приводній системі.

Дослідження [23] спирається на інформацію про параметри вібрацій у асинхронному двигуні. На заміну дослідженню нестационарної поведінки за допомогою перетворення Фур'є пропонується використання вейвлет-перетворення у поєднанні зі статистичними критеріями для оптимізації діагностики.

У [24] представлена система діагностики дефектів (міжвиткових коротких замикань, механічні дефекти, ушкодження стрижнів ротора наявність ексцентриситету та інше), для чого було запропоновано комбінований підхід. Цей підхід базується на використанні нейронних мереж та алгоритмів обробки сигналів при стаціонарних та перехідних режимах роботи електричної машини.

Дослідження [25] запропонували алгоритм, що використовує метод найменших квадратів для аналізу перехідних струмових процесів. Залишкові значення струмів аналізуються за допомогою диференціальних рівнянь.

Автори [26] запропонували використовувати методику діагностики асинхронних машин, що базується на аналізі струмових сигналів при використанні удосконалених алгоритмів їх обробки. Запропонована методика здатна ідентифікувати різноманітні дефекти асинхронних машин. Використаний алгоритм визначення несправностей базується на байєрівському методі оцінки стану.

У [27] представлено методологію діагностики несправностей асинхронного двигуна на базі аналізу векторів трифазних струмів статора. Метода дозволяє виявляти наявність дефектів у стрижнях ротора та короткі замикання у статорних обмотках. Крім того, відбувається класифікація і оцінка ступеня несправності. Для тестування та оптимізації моделі були використані попередньо-отримані дані на різних режимах роботи асинхронного двигуна. Модель показала високу точність та потенціал для її ефективного використання для діагностики роботи асинхронних двигунів.

У [28] запропоновано до застосування аналітичний підхід, що базується на ідентифікації асиметрії в роторі двигуна за рахунок контролю струмів під час пуску та під час зупинки двигуна, а також шляхом виявлення наявного ексцентриситету.

Джерело [29] робить акцент на широкому застосуванні штучного інтелекту для контролю стану електричних машин та діагностики несправностей. Було запропоновано модельну систему, що базується на створенні нейронної мережі та застосуванні принципів нечіткої логіки. Аналогічний підхід запропоновано у [30], який визначає комплексний метод, заснований на адаптивних нейронечітких логічних системах. Це дозволяє ідентифікувати короткі замикання у статорних обмотках.

Дослідники [31] представили уніфікований метод, що ґрунтується на нейронній нечіткій моделі, робота якої спрямована на ідентифікацію дефектів ротора. Для тренування складеної системи використовувалась залежність між крутним моментом та частотою обертання (природна характеристика двигуна) – відхилення при роботі моделі визначались на основі порівняння обчисленого і виміряного значення частоти обертання. Запропонований метод оптимізує використання експериментальних даних при розробці системи діагностики та ефективно визначає наявність чи відсутність несправностей у стрижнях ротора при різних режимах роботи.

У [32] розроблена адаптивна нейромережева система для діагностики дефектів ізоляції і дефектів у підшипниках асинхронного двигуна. Складена система аналізує п'ять вхідних параметрів: струм, частоту обертання, температура обмоток, температура підшипників та параметри вібрації. Для аналізу використовується комбінований метод роботи штучних нейронних мереж і методів нечіткої логіки. Зокрема була застосовано багаторівневу нейронну мережу прямого поширення та нечіткі правила для складання системи висновків. Складена модель дає досить високі результати отримання даних та високу точність передбачень.

У [33] було застосовано методику, яка дозволяє ідентифікувати дефекти обмотки статора асинхронного двигуна, на основі аналізу середньоквадратичного значення струмів статора та їх розсіювання шляхом використання системи нечіткої логіки. Вхідні параметри отримані шляхом аналізу вектору струму під час роботи асинхронного двигуна на різних режимах. Система нечіткої логіки здатна визначити поточний стан двигуна з досить високою точністю незалежно від наявності «шумів».

У [34] запропоновано підхід, що ґрунтується на використанні нейронних мереж, що здатні ідентифікувати та локалізувати міжвиткові короткі замикання у статорних обмотках асинхронного двигуна з використанням багаторівневого персептрону в нейронній мережі прямого поширення з елементами зворотного поширення.

Аналіз наведених модельних методів діагностики дефектів асинхронних двигунів, говорить про те, що якісна діагностика вимагає створення точних моделей. Будова таких моделей часто є складним завданням, особливо у контексті методів обчислень, широким використанням нейронних мереж, нечіткої логіки та різних перетворень – зазначене дозволяє отримати релевантний результат. Зазначені підходи показують зручність їх використання для діагностики дефектів трьохфазних асинхронних двигунів.

3 РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Опис системи електроприводу

Електропривод являє собою поєднання електричних і механічних компонентів для виконання певного технологічного процесу. Електроприводи набули популярності у промисловості через їх беззаперечні переваги і є ключовим інструментом для механізації та автоматизації виробничих процесів [35].

Якість роботи електроприводу безпосередньо впливає на ефективність роботи підприємств.

Система керування електроприводом дозволяє здійснювати регулювання процесу роботи двигуна та приєднаного до нього навантаження при перетворенні електричної енергії у енергію механічну за умови утримання визначених параметрів роботи у відповідності до завдання.

З експлуатаційної точки зору необхідно забезпечити надійну роботу пристроїв електричного приводу, що забезпечить високу точність підтримки заданої частоти обертання та крутного моменту на валу двигуна.

Управління двигуном електропривода базується на автоматизації електромеханічних принципів шляхом перемикання контактів у електричному колі живлення двигуна. Перевагами такої системи управління є підвищення надійності, збільшення строку служби компонентів, зниження ризику виникнення аварійних ситуацій, зниження вібрацій та електромагнітних випромінювань, можливість оптимізації принципів обслуговування та підтримання продуктивності роботи двигунів [35].

Для керування асинхронним двигуном досить часто використовують магнітні пускачі, механізм яких дозволяє безпосередньо запускати електродвигун, від'єднувати його від мережі живлення, забезпечити захист від коротких замикань та перевантажень. Двигун запускається у відповідності до його природної характеристики і протидіючий момент гальмування двигуна знаходиться під впливом моменту навантаження.

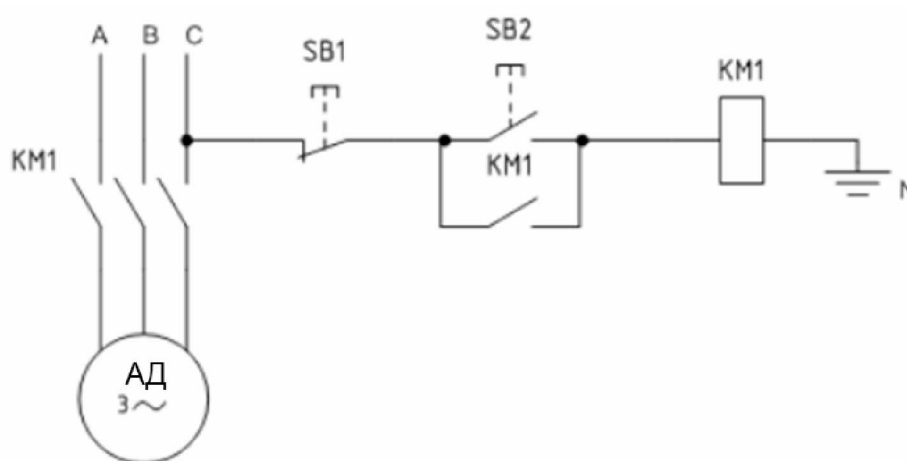


Рисунок 3.1 – Схема прямого пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Серед факторів, які визначають стійкість роботи електроприводу визначається різноманітними чинниками, які визначаються специфікою функціонування компонентів системи та зовнішніми впливами.

Підвищення величини струму у обмотках може призвести до перегріву та погіршення ізоляційних властивостей. Високі механічні навантаження можуть викликати механічні ушкодження, погіршення міцності з'єднань, вихід з ладу елементів кочення та інш. Ефективність використання тих чи інших компонентів системи можна визначити за допомогою вагових коефіцієнтів, які показують відношення фактичних показників роботи того чи іншого компонента системи до їх нормативних значень.

Під зовнішніми впливами розуміють впливи від навколишнього середовища: підвищена вологість, пил, коливання атмосферного тиску і зовнішньої температури, потрапляння і розвиток живих організмів, вплив радіації – усе це впливає на стабільність функціонування елементів системи.

Для забезпечення стабільності роботи електроприводів можна застосувати концепцію підвищення надійності, яка полягає у впровадженні додаткових заходів [35]:

- підвищення внутрішньої надійності, яка полягає в оптимізації роботи окремих елементів або використання більш якісних і коштовних компонентів,

- підвищення надійності загальної структури електроприводу, що полягає у застосуванні в системі дублюючих або резервних елементів.

Для підвищення надійності роботи електроприводу необхідно визначити його основні компоненти (рис. 3.1). У наведеній системі управління електроприводом використано електромагнітний пристрій, у якості якого може бути реле, контактор або магнітний пускач. Останні є досить складними за конструкцією пристроями і включають у себе ряд блоків, що виконують певні функції і працюють на певних законах (магнітопровід, обмотка, контакти, пружні елементи та інше), і які разом формують цілісну систему.

На рис. 3.2 наведено схему контактора: на стаціонарному осерді 14 магнітної системи розміщена електрична котушка 12. Рухома частина магнітної системи – ярмір 8 – з'єднано з рухомим основним контактом 5. Останній підключається до електричного ланцюга через гнучкий провідник 7. При подачі напруги на котушку (через контакт 13), ярмір притягається до осердя. При цьому контакт 5 з'єднується з фіксованим контактом 1, що забезпечує комутацію електричного струму I [36].

Пружина 6 створює необхідний тиск основних контактів у активному стані. При стиканні контактів має місце тертя та взаємне притирання їх поверхонь – зазначене сприяє зменшенню перехідного опору. Ярмір 8 може

також здійснювати допоміжні та/або блокуючі контакти (10, 11), які призначені для керування ланцюгами низької напруги. Рухомий механізм контактора під впливом сили тяжіння та пружини 9 повертається у вихідний стан.

Електрична дуга, яка виникає під час розмикання основних контактів, згасає в спеціальній камері 4, виконаній з жароміцного ізолюючого матеріалу, а для оптимізації процесу гасіння дуги можуть використовуватися додаткові ізоляційні перегородки і металеві сітки.

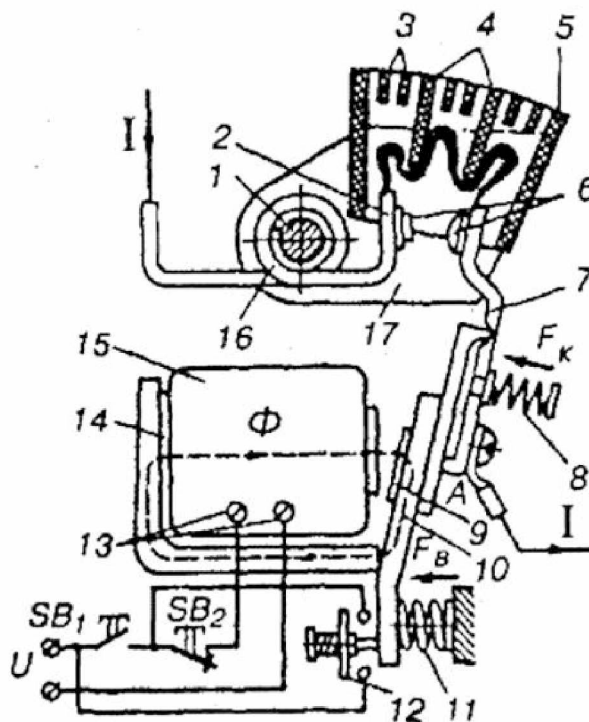


Рисунок 3.2 – Конструктивна схема контактора: 1 – сталеве осердя, 2 – нерухомий контакт, 3 – полум'ягасильна решітка, 4 – ізоляційні перегородки, 5 – дугогасна камера, 6 – контактні накладки, 7 – рухомий контакт, 8 – пружина, 9 – немагнітна прокладка з латуні, 10 – якір, 11 – пружина, 12 – допоміжні контакти, 13 – клеми, 14 – магнітопровід, 15 – котушка, 16 – струмопровід, 17 – полюсний наконечник

Для огляду та розрахунку параметрів надійності розглянемо основні компоненти: магнітопровід, обмотка, перетворюючий пристрій (для перетворення електромагнітного імпульсу на механічну дію) і контактна система.

Головними причинами відмов електромагнітних пристроїв є контактна система, несправність обмотки та механічні неполадки. Надійність роботи цих пристроїв залежить від умов експлуатації та частоти спрацювання [36].

Асинхронний двигун, як частина електроприводу, також є елементом, що знижує загальну надійність другого через їх складну будову і вимогливість до режимів роботи. Зазвичай, неполадки виникають через дефекти обмоток (міжвиткові та міжобмоткові короткі замикання), проблеми з підшипниками та втрата геометрії окремих частин, що обертаються [1].

Основними проблемними питаннями до перемикачів, вимикачів, кнопкових пунктів та автоматичних вимикачів є формуванням провідних шарів на контактних поверхнях, пробій ізоляції та механічні проблеми.

Загальна надійність електроприводів у значній мірі залежить від електричного навантаження, що має відображення на зміні температури контактних зон. Більш того, для нормальної роботи контактних зон обов'язковим є наявність нормованого контактного тиску.

3.2 Розрахунок надійності системи електроприводу

Для розрахунку надійності системи електроприводу визначимо вихідні дані (рис. 3.3).

- електропривод знаходиться у закритому приміщенні,
- наявна підвищена запиленість технічної атмосфери, $k_{зан.} = 3$,

- максимальна температура навколишнього середовища $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- режим роботи двигуна – короткочасний,
- час безперервної експлуатації – $T_{\text{екс.}} = 5000$ годин,
- вірогідність безвідмовної роботи електроприводу $P_{\text{зад.}} = 0,44$,
- задане напруження на відмову $T_{0\text{зад.}} = 6000$ годин.

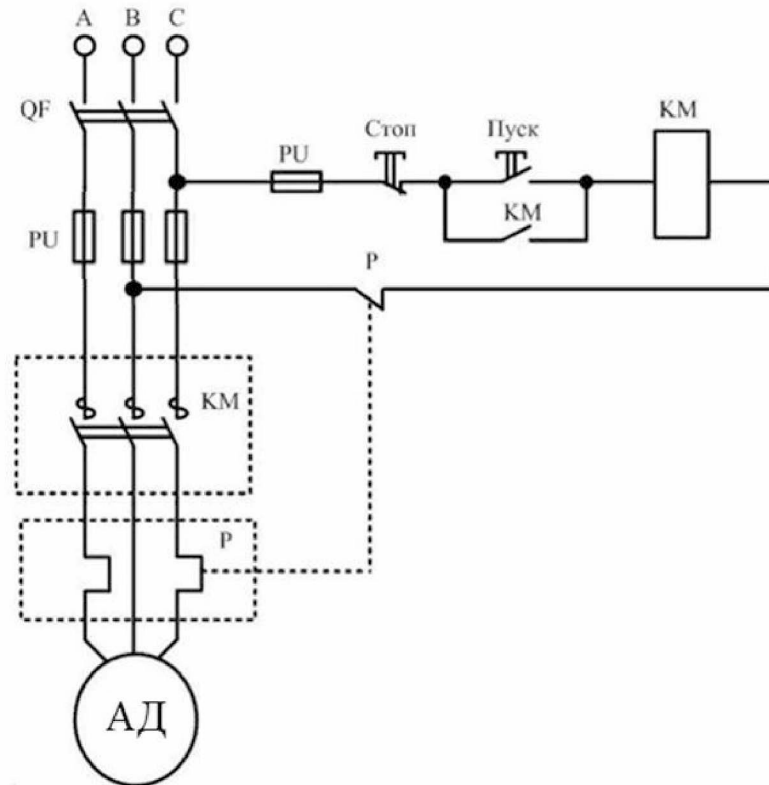


Рисунок 3.3 – Схема прямого пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором: А, В, С – фази живлення, АД – асинхронний двигун, КМ – контактори реле пуску КМ, Р – контактор теплового реле, РУ – запобіжники, QF – вимикач, «Пуск» – кнопка пуску, «Стоп» – кнопка зупинки

Для оцінки надійності використаємо експоненційний розподіл відмов за допомогою методу розрахунків показників безвідмовності з використанням коефіцієнтів надійності.

Значення коефіцієнта надійності i -го елемента [37]:

$$k_i = \frac{\lambda_i}{\lambda'_{баз.}} \quad (3.1)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента,

$\lambda'_{баз.}$ – інтенсивність відмов базового елемента з урахуванням запиленості середовища [37]:

$$\lambda'_{баз.} = \lambda_{баз.} \cdot k_{зан.} \quad (3.2)$$

де $\lambda_{баз.}$ – інтенсивність відмов базового елемента: $\lambda_{баз.} = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$.

$$\lambda'_{баз.} = 0,5 \cdot 10^{-7} \cdot 3 = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1} \quad (3.3)$$

Результуючий коефіцієнт надійності елементів електроприводу з урахуванням визначених вище елементів та з урахуванням електричних навантажень та температури навколишнього середовища [37]:

$$k'_i = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot k_i \quad (3.4)$$

де a_1 – коефіцієнт, що враховує відхилення комплексного впливу температури навколишнього середовища та електричного навантаження від номінального значення,

a_2 – коефіцієнт, що враховує відхилення лише температури навколишнього середовища від номінального значення,

a_3 – коефіцієнт, що враховує зниження лише електричного навантаження по відношенню до номінального значення,

a_4 – коефіцієнт, що враховує час використання елемента (відношення часу роботи елемента до часу роботи електроприводу).

Коефіцієнт надійності релейно-контакторних апаратів [37]:

$$k_i' = k_{i0} \cdot a_3 \left(\prod_{j=1}^{n_k} \dots \right) \cdot \frac{f_\phi}{f_{ном.}} \quad (3.5)$$

де k_{i0} – коефіцієнт надійності ланцюга котушки,

k_{ik} – коефіцієнт надійності контактної системи,

a_3 – коефіцієнт, що враховує рівень електричного навантаження контакту,

n_k – кількість контактів,

f_ϕ – фактичне число спрацьовувань апарату за годину, $f_\phi = 7$,

$f_{ном.}$ – номінальне число спрацьовувань апарату за годину, $f_{ном.} = 11$.

Вірогідність безвідмовної роботи електроприводу [37]:

$$P_{ЕП} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (3.6)$$

де n_i – кількість однотипних елементів в i -й групі електропривода,

n – загальна кількість елементів електропривода,

Напрацювання на відмову [37]:

$$= \left[\frac{\dots}{\dots} \right] \quad (3.7)$$

Середній час відновлення [37]:

$$\tau_{\theta} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i \cdot k_i' \cdot \tau_{\theta i}}{\sum_{i=1}^n n_i \cdot k_i'} \right) \quad (3.8)$$

де $\tau_{\theta i}$ – витрата часу відновлення i -го елемента.

Розрахунок надійності окремих елементів системи при їх послідовному з'єднанні за умови, що відмова будь-якого елемента призводить до відмови всієї системи, представимо у вигляді табл. 3.1.

Сумарне значення коефіцієнтів помножених на кількість елементів:

$$\sum_{i=1}^n n_i k_i' = 3252,8.$$

Таблиця 3.1 – Розрахунки показників надійності елементів електроприводу до підвищення надійності окремих елементів

Елементи	АД	КМ _{ЦК}	КМ _{КС}	КК _{ЦК}	КК _{КС}	QF	"Пуск"	"Стоп"	ФА
k_i	240	–	–	–	–	4,4	4	4	5
k_{i0}	–	18	18	11	15	–	–	–	–
k_{jk}	–	18	18	11	15	–	–	–	25
k_n	0,95	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
f_{Φ}	–	4	4	4	4	–	–	–	–
a_1	5	–	–	–	–	0,95	0,95	0,95	0,95
a_2	0,95	–	–	–	–	0,95	0,95	0,95	0,95
a_3	0,65	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
a_4	4	3	3	3	3	3	0,85	0,85	4
k_i'	2964,0	49,7	49,7	30,4	41,4	10,1	2,6	2,6	15,3
n_i	1	1	1	2	2	1	1	1	2
$n_i \cdot k_i'$	2964,0	49,7	49,7	60,7	82,8	10,1	2,6	2,6	30,7
$\frac{n_i \cdot k_i'}{\sum n_i \cdot k_i'}$	0,911	0,01527	0,01527	0,01866	0,02545	0,00311	0,00080	0,00080	0,00943
P_i	0,478	0,988	0,988	0,985	0,980	0,997	0,999	0,999	0,992
$T_{0i}, \text{годин}$	675	40271	40271	32949	24163	197510	766805	766805	65178
$\tau_{\theta i}, \text{годин}$	5	2	2	3	3	1	1	1	0,5
$\frac{n_i \cdot k_i' \cdot \tau_{\theta i}}{\sum n_i \cdot k_i'}$	4,556	0,0305	0,0305	0,0560	0,0763	0,0031	0,0008	0,0008	0,0047

Визначені коефіцієнти надійності окремих елементів дозволяють в цілому розрахувати показники надійності електроприводу.

Коефіцієнт готовності [37]:

$$k_{gom.} = \frac{T_0}{T_0 + \tau_g} \quad (3.9)$$

$$P_{EP} = \frac{1}{e^{(1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 5000 \cdot 3252,8)}} = 0,08784 < P_{зад.}$$

$$T_0 = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 3252,8} = 2050 \text{ годин} < T_{0зад.}$$

$$\tau_g = 4,56 \text{ годин.}$$

$$k_{gom.} = \frac{2050}{2050 + 4,56} = 0,9978$$

Для забезпечення необхідного рівня надійності можна впровадити запропоновані вище заходи, підвищивши надійність окремих елементів системи: асинхронного двигуна, запобіжника, теплового реле, контактора.

Причинами виходу з ладу двигунів є невідповідність конструктивного виконання двигунів умовам експлуатації, невірному вибору двигунів по потужності і незадовільного обслуговування, неякісне виготовлення, відмови з вини заводів-виробників. Деякі відмови двигунів викликані нерівномірністю повітряного зазору, що приводить до зачіплювання частин машини. Це може бути обумовлено тим, що технологічний процес і стан обладнання не забезпечує потрібну обробку станин, підшипникових вузлів і пакетів якоря. Нерівномірність повітряного зазору може бути викликана також прогином вала при його недостатній жорсткості. Причиною відмов обмоток двигунів часто є низька якість ізоляції

обмоткових проводів і просочуючих лаків. Передчасні відмови обмоток викликаються часто недосконалими технологічними процесами, неякісним просочуванням, намоткою і укладенням в пази витків обмотки якоря. Пошкодження підшипників виражається у вигляді зносу укладок в гніздах підшипників, витікання мастила із підшипників при їх несправностях, порушення роботи змащування кілець в підшипниках. Таким чином вирішальною є надійність механічної частини електродвигуна.

Замінивши існуючий двигун на більш надійний, для якого маємо коефіцієнти, наведені в табл. 3.2 і повторно здійснюємо розрахунки за наведеними вище формулами. Результати цих розрахунків наведено в табл. 3.2.

$$\sum_{i=1}^n n_i k_i' = 1096,9.$$

Таблиця 3.2 – Розрахунки показників надійності елементів електроприводу після підвищення надійності окремих елементів

Елементи	АД	КМ _{ЦК}	КМ _{КС}	КК _{ЦК}	КК _{КС}	QF	"Пуск"	"Стоп"	ФА
k_i	70	—	—	—	—	4,4	4	4	5
k_{i0}	—	12	12	8	11	—	—	—	—
k_{jk}	—	15	15	8	12	—	—	—	25
k_n	0,95	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
f_ϕ	—	4	4	4	4	—	—	—	—
a_1	5	—	—	—	—	0,95	0,95	0,95	0,95
a_2	0,95	—	—	—	—	0,95	0,95	0,95	0,95
a_3	0,65	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
a_4	4	3	3	3	3	3	0,85	0,85	4
k_i'	864,5	38,8	38,8	22,1	32,3	10,1	2,6	2,6	15,3
n_i	1	1	1	2	2	1	1	1	2
$n_i \cdot k_i'$	864,5	38,8	38,8	44,1	64,5	10,1	2,6	2,6	30,7
$\frac{n_i \cdot k_i'}{\sum n_i \cdot k_i'}$	0,788	0,03541	0,03541	0,04025	0,05882	0,00923	0,00238	0,00238	0,02798
P_i	0,806	0,990	0,990	0,989	0,984	0,997	0,999	0,999	0,992
$T_{0i}, \text{годин}$	2313	51498	51498	45305	30999	197510	766805	766805	65178
$\tau_{ei}, \text{годин}$	5	2	2	3	3	1	1	1	0,5
$\frac{n_i \cdot k_i' \cdot \tau_{ei}}{\sum n_i \cdot k_i'}$	3,941	0,0708	0,0708	0,1207	0,1765	0,0092	0,0024	0,0024	0,0140

$$P_{EP} = \frac{1}{e^{(1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 5000 \cdot 1096,9)}} = 0,4404 > P_{зад.}$$

$$T_0 = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1096,9} = 6077 \text{ годин} > T_{0зад.}$$

$$\tau_{\theta} = 4,41 \text{ години.}$$

$$k_{\text{от.}} = \frac{6077}{6077 + 4,41} = 0,9993.$$

Здійснені розрахунки основних показників надійності дозволили визначити середній час відновлення системи, забезпечено показники напрацювання на відмову та вірогідності безвідмовної роботи.

4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СТАНУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

4.1 Складання алгоритму виявлення несправностей асинхронних двигунів

Несправності, що виникають при роботі асинхронних двигунів, можуть негативно впливати на якість продукції, що випускається підприємствами, змінюється хід процесів, виникають матеріальні збитки, ставиться під загрозу безпека роботи персоналу та інша шкода. Виявлення зазначених проблем можна або експериментальним шляхом, або з використанням моделі.

Створення моделей дозволяє спрогнозувати показники роботи асинхронних двигунів. Створити модель можна за допомогою програмних засобів, які ґрунтуються на визначених математичних залежностях, що встановлюють залежність між вхідними і вихідними даними.

Модель визначає, у які періоди роботи двигуна визначені показники виходять за встановлені норми, що може дозволити ідентифікувати проблеми. Алгоритм виявлення несправностей асинхронних двигунів для подальшого моделювання можна представити графічно (рис. 4.1).

Функціонування моделі полягає у порівнянні параметрів при справному і несправному стані двигуна, визначаючи відмінності для оцінки стану. Пошуку відповідних різниць для визначення несправності можуть перешкоджати «шуми», тому складені моделі повинні враховувати можливі помилки через зовнішні впливи.

Для здійснення моніторингу асинхронних двигунів збирають дані про значення: напруги, струму, частоти обертання, температури, вібропараметри та інше.

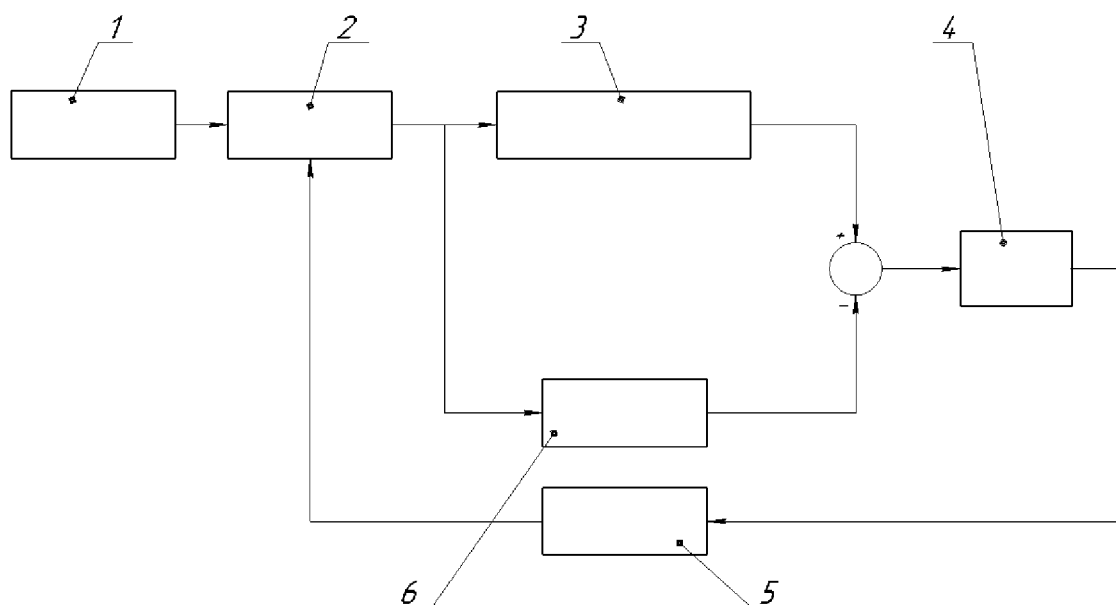


Рисунок 4.1 – Алгоритм для складання моделі моніторингу стану асинхронного двигуна: 1 – асинхронний двигун, 2 – блок контролю параметрів, 3 – блок обчислення параметрів роботи, 4 – блок порівняння, 5 – блок прийняття рішення, 6 – блок алгоритмізації

Перевагою складених моделей є їх здатність працювати автономно, дистанційно та незалежно перевіряти параметри і виявляти дефекти, супутньо здійснюючи оповіщення обслуговуючого персоналу. Модель повинна визначати пріоритетність визначення параметрів та мати можливість використання кількох джерел інформації про стан об'єкта дослідження.

Маючи інформацію про попередні дані функціонування асинхронних двигунів можна скористатися алгоритмом для визначення несправностей шляхом порівняння (рис. 4.2). Даний алгоритм будується на основі складної методології, що передбачає виокремлення різних рівнів ієрархії параметрів з попередньо визначеного набору.

Для забезпечення точності та ефективності роботи системи необхідно глибоко занурюватися в механіку процесу для реалізації фактичних зв'язків при стаціонарних і перехідних режимах роботи асинхронного двигуна, що дозволить підвищити точність і релевантність результатів.

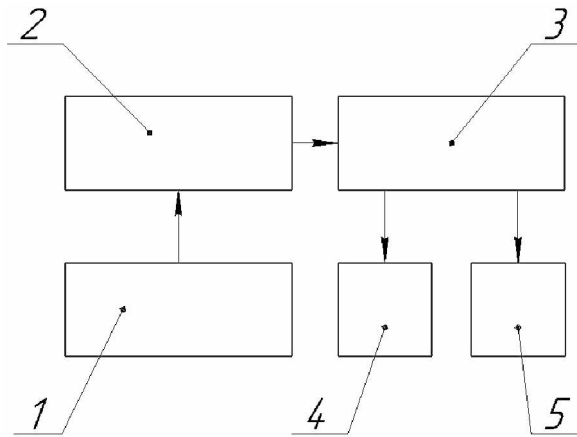


Рисунок 4.2 – Алгоритм для визначення несправностей шляхом порівняння: 1 – асинхронний двигун, 2 – блок порівняння параметрів, 3 – блок діагностики несправності, 4 – блок індикації несправності, 5 – блок ідентифікації несправності

Перевагами застосування даного методу є:

- пришвидшене виявлення несправностей,
- підвищена надійність інформації про місце та тип несправності,
- універсальність запропонованої методології,
- широка адаптивність до різних сценаріїв поведінки системи.

4.2 Моделювання прямого пуску асинхронного двигуна

На рис. 4.3 наведено схему прямого пуску асинхронного двигуна у програмі Matlab/Simulink. Прямий пуск – це метод пуску електричного двигуна, при якому він безпосередньо підключається до мережі [38].

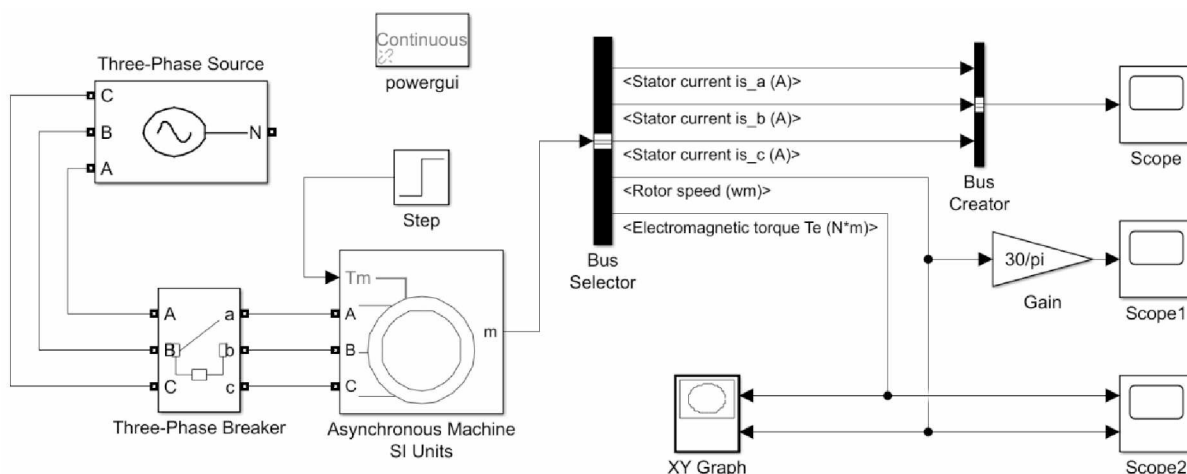


Рисунок 4.3 – Схема прямого пуску асинхронного двигуна у програмі Matlab/Simulink

Для створення даної схеми були використані наступні вбудовані блоки [38]:

- «Three-Phase Source» – джерело живлення, що подає трифазну напругу до системи (A, B і C – три фази джерела живлення),
- «Three-Phase Breaker» – блок, що використовується для вмикання або вимикання живлення двигуна,
- «Powergui» – блок, який задає параметри роботи схеми і дозволяє схемі працювати коректно,
- «Step» – блок, що генерує ступінчастий сигнал, і який використовується для «вмикання» асинхронного двигуна,
- «Asynchronous Machine SI Unit» – основний блок, який моделює роботу асинхронного двигуна на основі вхідної напруги та струму,
- «Bus Selector» – блок, що вибирає певні сигнали з групи сигналів, які надходять до нього (для наведеної схеми сприймається струм статора, частота обертання ротора та електромагнітний крутний момент),
- «Bus Creator» – блок, що об'єднує декілька сигналів в один сгрупований сигнал,
- «Gain ($30/\pi$)» – блок, що множить вхідний сигнал на певне значення (у нашому випадку $30/\pi$).

– «Scopes» – блоки для відображення «вимірних» сигналів, що змінюються в часі та дозволяють візуалізувати динаміку системи.

– «XY Graph» – блок для будови графіка, який відображає залежність між двома сигналами (у нашому випадку – між частотою обертання і крутним моментом на валу двигуна).

Послідовність роботи схеми наступна: коли моделювання запускається, джерело «Three-Phase Source» подає трифазну напругу до блоку «Three-Phase Breaker», який, у свою чергу, може відкрити або закрити ланцюг, пропускаючи або блокуючи струм живлення асинхронного двигуна.

При запуску системи блок «Step» генерує сигнал, який активує блок «Three-Phase Breaker», тим самим забезпечуючи струм живлення на блоці «Asynchronous Machine SI Units». Параметри цього блоку імітує прямий пуск асинхронного двигуна. На виході цього блоку отримуємо «відгук» двигуна: струм у обмотках статора, колову швидкість обертання ротора та електромагнітний крутний момент – ці сигнали направляються на блок «Bus Selector».

Сигнали з блоку «Bus Selector» подаються на блоки «Scope», «XY Graph» та «Gain».

Блок «Scope» дозволяє користувачу спостерігати за зміною форми досліджуваних сигналів у реальному часі. Блок «XY Graph» відображає залежність між крутним моментом та коловою швидкістю обертання ротора. Блок «Gain» дозволяє перетворити колову швидкість обертання ротора (значення – у радіанах) у частоту обертання ротора (значення – у кількості обертів за секунду).

Загалом, ця схема використовується для моделювання і аналізу роботи асинхронного двигуна при прямому пуску. Її можна використовувати для дослідження різних характеристик двигуна, вивчення його реакції на різні умови роботи та оптимізації параметрів для досягнення найкращої ефективності роботи асинхронного двигуна.

Результати моделювання роботи асинхронного двигуна при прямому пуску, що дозволяють вивчити його характеристики, реакцію на різні вхідні сигнали та оптимізувати його роботу, наведено на рис. 4.4 – 4.7.

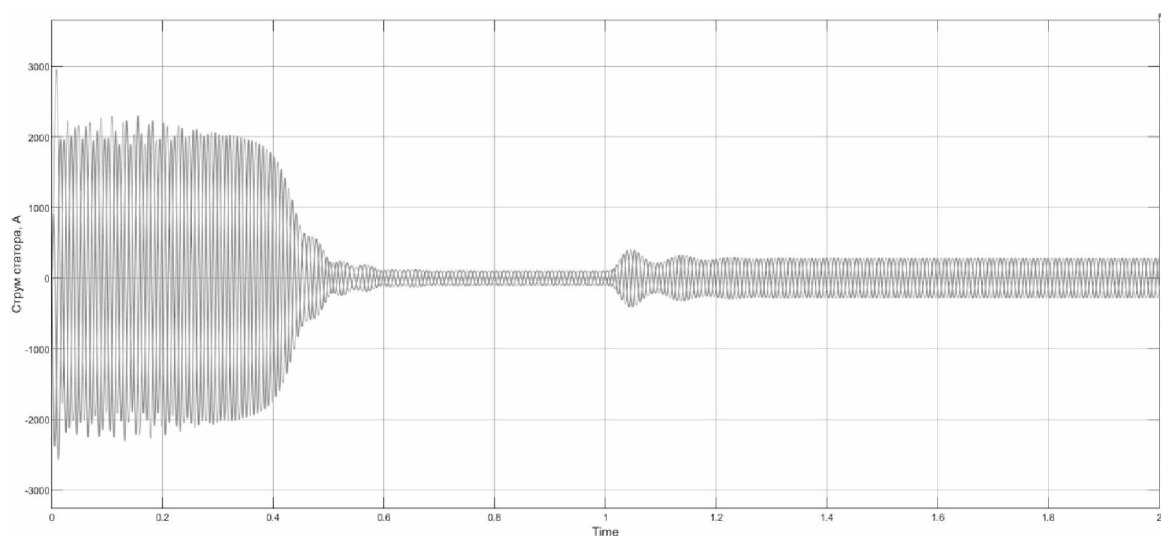


Рисунок 4.4 – Характер зміни значення узагальненого вектора струму в фазах статорних обмоток

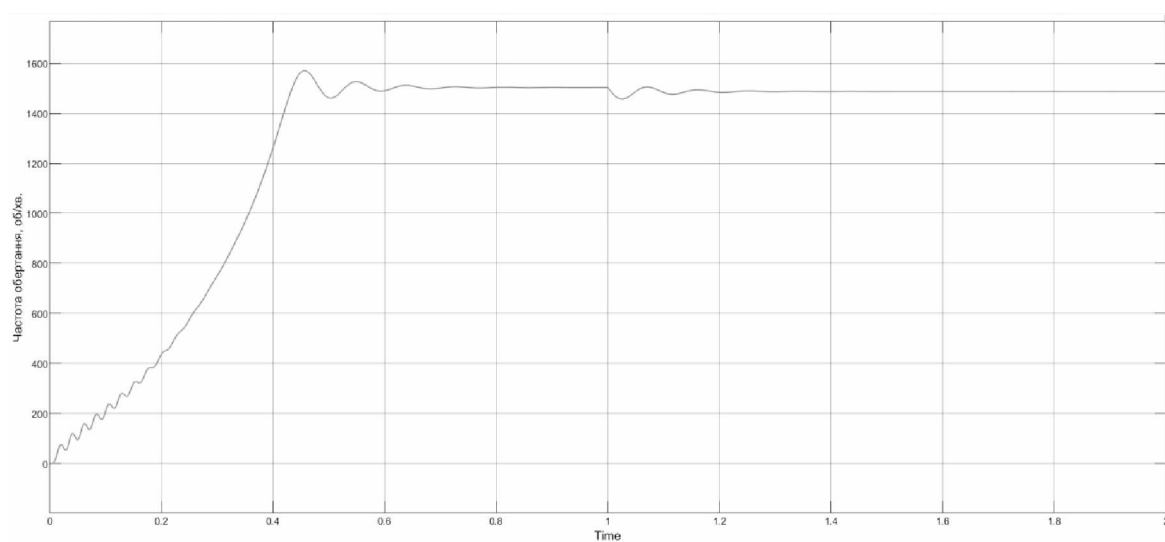


Рисунок 4.5 – Характер зміни частоти обертання ротора асинхронного двигуна

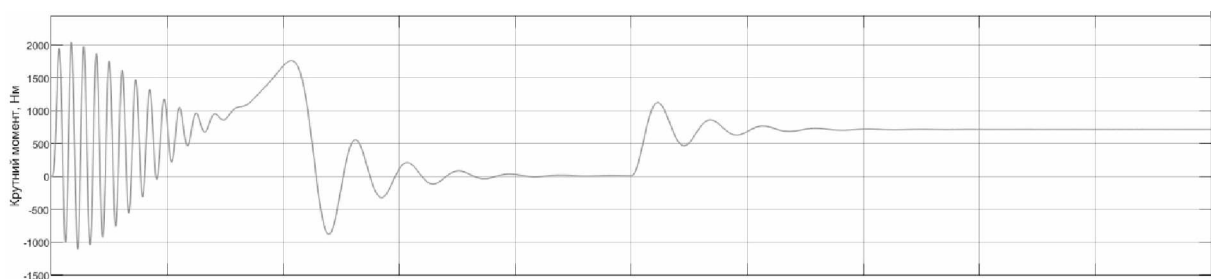


Рисунок 4.6 – Характер зміни електромагнітного крутного моменту на валу асинхронного двигуна

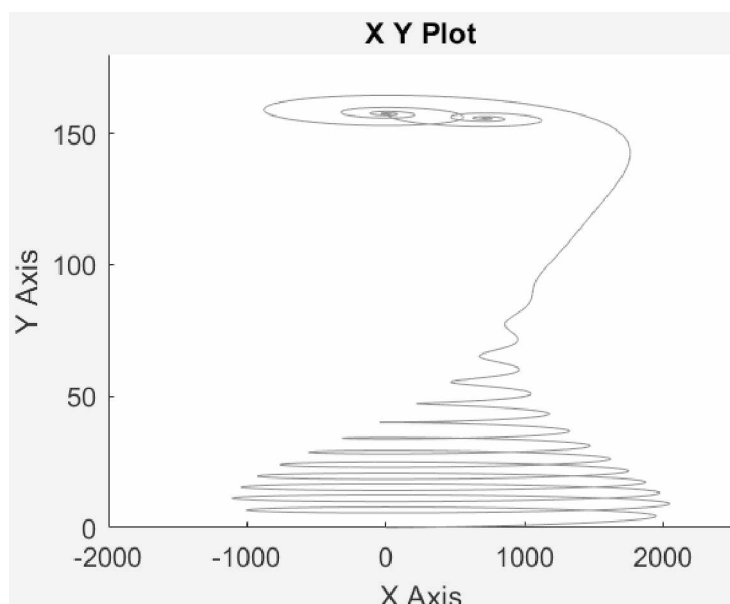


Рисунок 4.7 – Зображення залежності електромагнітного крутного моменту на валу асинхронного двигуна від частоти обертання ротора

Моніторинг стану асинхронного двигуна є складним завданням через значну кількість взаємопов'язаних параметрів, непередбачуваних подій та необхідність здійснення складних і тривалих розрахунків. При моніторингу роботи асинхронного двигуна передбачає кілька етапів: збір, аналіз, зберігання та відображення даних про його роботу під впливом внутрішніх і зовнішніх факторів.

Змінюючи розмір певної ділянки на часовому спектрі, ми можемо підсилити масштаб варіацій контрольованого параметру та спостерігати за піковими відхиленнями, які вказують на потенційні проблеми.

4.3 Розробка апаратної структури комплексної системи моніторингу

Головне, що нас цікавить – виявлення несправності та визначення способу їх усунення або прийняття дій керування. Моніторинг зазвичай здійснюється за допомогою автоматизованих апаратних систем.

Апаратну структуру комплексної системи моніторингу розробимо відповідно до традиційної трирівневої архітектури. Кожен із цих рівнів слугує певній меті та відіграє важливу роль у загальному функціонуванні розроблюваної системи (рис. 4.8):

- нижній рівень – базовий – містить пристрої, що відповідає за збір та обробку початкових даних. Ці пристрої накопичують первинну інформацію безпосередньо з джерела сигналів, за умови забезпечення точності та надійності при їх подачі в систему моніторингу. Супутньо відбувається координація з об'єктом дослідження, виконуються завдання синхронізації та координації з основним об'єктом спостереження або вимірювання. Координація є ключовим моментом при збиранні даних і здійсненні моніторингу в реальному часі.

- середній рівень – міститься між пристроями збирання даних і пристроями для обробки сигналу на верхньому рівні. В основному, цей рівень будують з використанням логічних контролерів, які допомагають автоматизувати процеси, керувати потоком даних і забезпечувати плавні переходи між рівнями, а також мікроконтролери – компактні, але потужні пристрої, які здатні швидко обробляти інформацію, які завдяки своїм властивостям гнучкості дозволяють функціонувати в режимі реального часу та ефективно виявляти та реагувати на будь-які надзвичайні або небезпечні ситуації при роботі двигунів та реагувати на них з мінімальною затримкою. Інтеграція процесорів на середньому рівні дозволяє здійснювати безпосередню обробку аналогових сигналів і перетворювати їх у цифровий вигляд з можливою подальшою обробкою,

– верхній рівень, на якому знаходиться цифровий обчислювальний пристрій (персональний комп'ютер). На цьому рівні відбувається отримання оброблених на середньому рівні даних, запуск розширених алгоритмів з супутнім аналізом даних, фіксація та відображення результатів або виконання керуючої дія на основі отриманої та обробленої інформації.

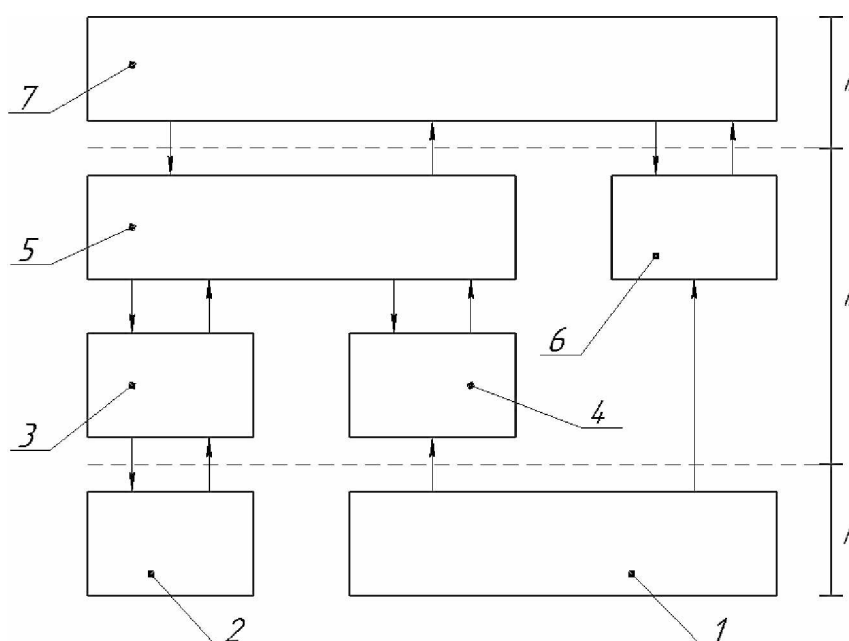


Рисунок 4.8 – Принципова схема роботи автоматизованої апаратної системи контролю стану роботи електричних машин: I – нижній рівень, II – середній рівень, III – верхній рівень; 1 – датчики, 2 – комутаційне обладнання, 3 – контролер, 4 – захисні пристрої, 5 – логічні пристрої (мікроконтролери), 6 – аналого-цифровий перетворювач, 7 – головний обчислювальний пристрій

Робота системи базується на показаннях первинних пристроїв збирання інформації – датчиках. Отримана інформація дозволяє визначити:

– параметри стану – визначається положення та орієнтація параметрів роботи об'єкта в заданому просторі, допомагають відстежувати його рух і зміни,

- стан навколишнього середовища – можуть бути виявлені та виміряні зміни у навколишньому середовищі (температура, вологість, атмосферний тиск та інші), які можуть вплинути на поведінку об'єкта спостереження,

- картину вібрацій, що дозволить виявляти аномалії, зношення або потенційну небезпеку.

Представлена на рис. 4.8 міститься вичерпна інформація функціонування системи моніторингу контролю роботи приводу змінного струму. Вона визначає розташування та функціональні зв'язки між окремими елементами системи.

Датчики на нижньому рівні групують у певні категорії за призначенням:

- група, яка зосереджена на вимірювальні електричних параметрів (датчики струму, напруги, потужності),

- група, що вимірює механічні параметри (крутний момент, вібрація, шум, частота обертання).

Таким чином, ця схема є системою моніторингу та діагностики, яка може виявляти аномалії або проблеми у роботі асинхронного двигуна на основі даних з датчиків струму і напруги.

4.4 Застосування гібридної інтелектуальної системи для поліпшення роботи системи моніторингу

Гібридна інтелектуальна система поєднує в собі переваги нечіткої логіки і штучних нейронних мереж [39].

Принципи нечіткої логіки базуються на «логічних правилах» і базуються на теорії нечітких множин, у основі якої лежить принцип ієрархії об'єктів у заданому наборі.

Система нечіткої логіки містить формулювання заданого вхідного набору та вихідний набір за допомогою нечіткої логіки – процес картографування (процес відображення):

- перший крок полягає у фазифікації чітких вхідних змінних (X і Y), що здійснюється шляхом їх відображення на функції приналежності нечітких змінних. Під функцією приналежності мається на увазі крива лінія, яка визначає відповідні значення нечіткої змінної в певній області відображення належності. ,

- другий крок полягає у застосуванні логічного оператора («І», «АБО», «НІ») та їх комбінації («І-АБО», «І- НІ», «АБО-НІ» та інші).

- третій крок полягає у формуванні висновків.

- четвертий крок є формування наслідків у відповідності до визначених правил,

- п'ятий крок полягає у визначенні загального нечіткого висновку, що є результатом чітких вхідних значень.

Штучна нейронна мережа (ШНМ) – це модель, що імітує поведінку систему на кшталт біологічної нервової системи людини. ШНМ є системою, що навчається, а не запрограмована заздалегідь. ШНМ є результатом взаємозв'язку штучних нейронів через вагові коефіцієнти, які визначають функціональні залежності. ШНМ класифікують на мережі прямого та зворотного зв'язку, після вибору та розробки якої здійснюють її навчання, виходячи з бажаних результатів її роботи на виході [39].

Використовуючи зазначений підхід розробляємо нейронну мережу, яка у якості вхідних параметрів використовує значення виміряних за допомогою датчиків значень, що характеризують параметри роботи асинхронного двигуна. Можливість навчатися ШНМ отримує по заданому набору навчальних даних, у якості яких можуть бути використані статистичні дані режимів роботи двигунів аналогічної серії на різних режимах роботи.

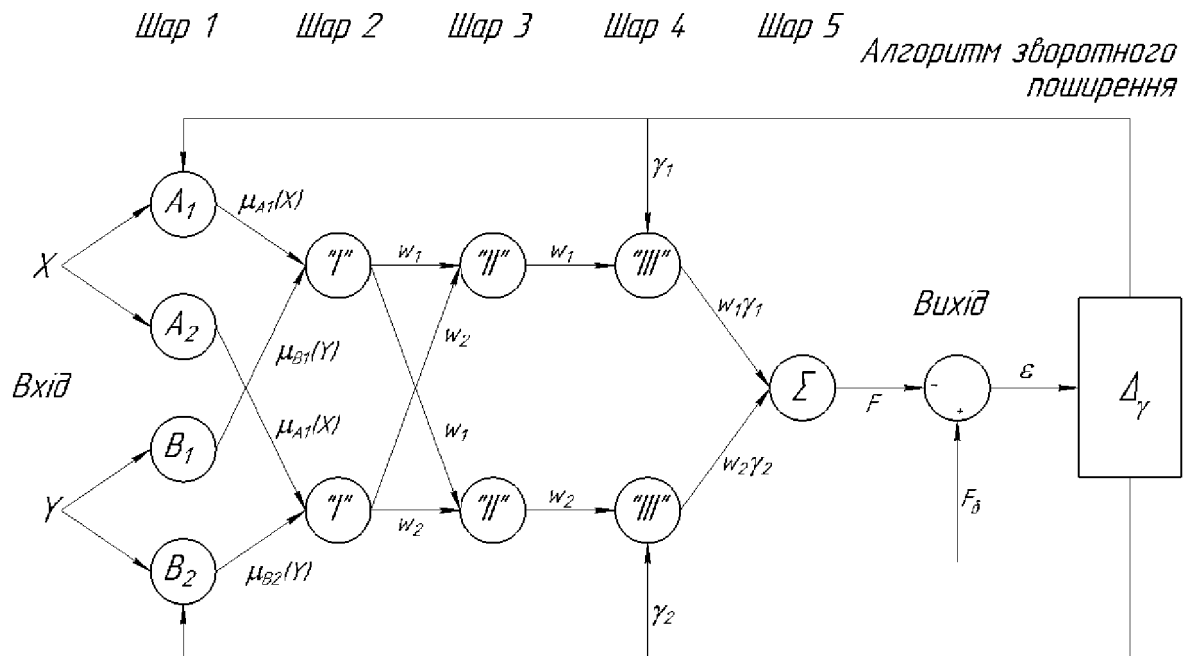


Рисунок 4.9 – Структура штучної нейронної мережі з використанням методу нечіткої логіки

Схема (рис. 4.9) являє собою функціональну модель штучної нейронної мережі, основними складовими якої є:

Мережа приймає два вхідні сигнали: « X » та « Y ». Ці сигнали можуть відображати будь-яку вхідну інформацію (наприклад, значення узагальненого вектору струму, крутний момент і т.п).

На першому етапі («Шар 1») маємо два нейрони « A_1 » і « A_2 », через які пропускають вхідний сигнал « X », де він модифікується за допомогою вагових коефіцієнтів $\mu_1(X)$ та $\lambda_1(X)$ відповідно. Аналогічно, сигнал « Y » пропускається через нейрони « B_1 » і « B_2 », де він також модифікується за допомогою вагових коефіцієнтів $\mu_2(Y)$ та $\lambda_2(Y)$.

На другому етапі («Шар 2») вихідні сигнали з нейронів « A_1 », « A_2 », « B_1 » та « B_2 » передаються до активаційних функцій « f », які вводять нелінійність у роботу мережі. Ця нелінійність допомагає мережі навчатися на більш складних даних та використовувати більш складні залежності.

На третьому етапі («Шар 3») після активації, вихідні сигнали знову зважуються за допомогою вагових коефіцієнтів w_1 та w_2 . Ці ваги можуть

враховувати важливість певних ознак або скоригувати вихідний сигнал на цьому етапі.

На четвертому етапі («Шар 4») нейрони "I" та "II" сигнали проходять додаткову обробку і тут може бути застосована додаткова активаційна функція чи будь-яка інша операція: корекція або зсув сигналу. Метою цього може бути корекція помилок або модифікація сигналу з метою покращення результатів на наступних етапах.

На п'ятому етапі «Шар 5» міститься суматор « Σ », який комбінує сигнали з попередніх етапів, з отриманням одного вихідного сигналу. Функція « F » може вводити нелінійність, що викликається зовнішніми впливами. На виході отримуємо кінцевий результат обробки вхідних даних. Цей сигнал може представляти прогноз, класифікацію, оцінку або будь-яку іншу інформацію, яку мережа намагалася знайти або вивчити.

У підсумку: наведена нейронна мережа являє собою послідовність операцій, що перетворює вхідні сигнали через ряд ваг, активаційних функцій та інших операцій для отримання кінцевого вихідного результату.

Процес навчання регулюється за допомогою алгоритмів зворотного поширення до тих пір, поки вихідні дані не будуть збігатися з встановленими цілями. Навчання ШНМ продовжується або до тих пір, поки помилка ε не зрівняється із заданою помилкою або доки не буде досягнута визначена кількість епох, залежно від того, що настане раніше. Одна епоха визначає один крок навчання – за один цикл навчання ШНМ пропускає всі пари навчальних даних через завантажену в нього архітектуру і налаштовує параметри ваг. Другий прохід тренувальних даних відноситься до другої епохи і так далі. Дані перевірки зазвичай використовуються для порівняння навченого вихідного значення з парами вхідних і вихідних даних, які визначають наявність несправності. Наявні дані використовуються як для перевірки, так і для тестування, можливостей адаптуватися до заданих даних, розпізнавання будь-яких типів вхідних даних.

Навчання вважається закінченим, коли наявна здатність узагальнювати свою відповідь для всіх типів вхідних даних.

Результат роботи ШНМ при визначенні ушкодження стрижнів короткозамкненого ротора асинхронного двигуна шляхом аналізу частоти обертання ротора наведено на рис. 4.10.

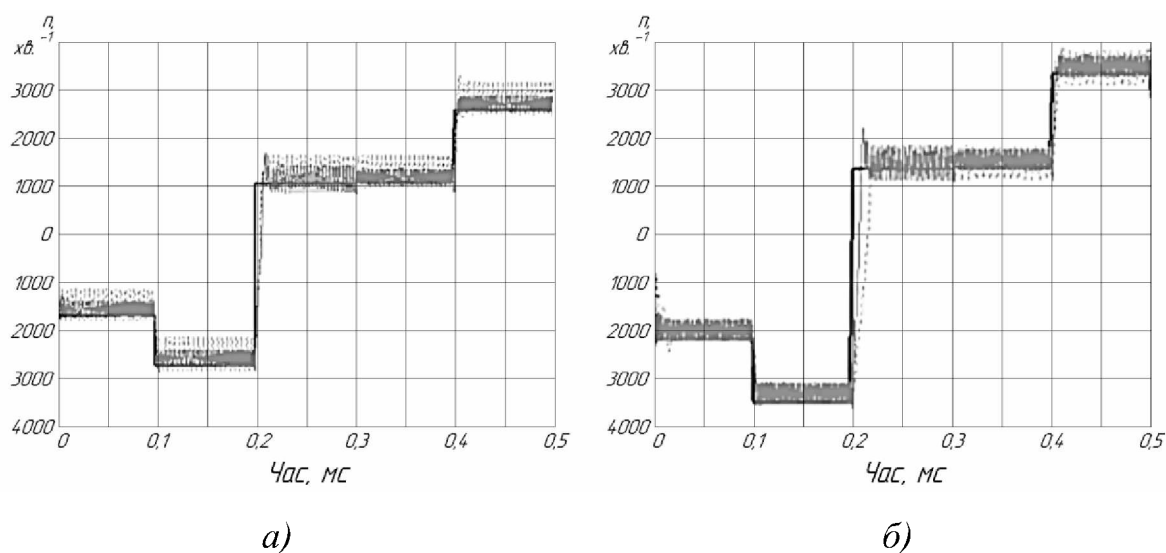


Рисунок 4.10 – Результат роботи ШНМ при визначенні ушкодження стрижнів короткозамкненого ротора асинхронного двигуна: а) робота двигуна без ушкодження, б) робота двигуна при наявності ушкоджень

На отриманих графіках відображено результати роботи штучної нейронної мережі, що досліджує роботу асинхронного двигуна. Результати були отримані для двох різних умов роботи двигуна – без навантаження (—) та під навантаженням (— — —), що дозволяє здійснити порівняльний аналіз поведінки асинхронного двигуна. Наявність ушкоджених стрижнів впливає на стабільність роботи двигуна, призводячи до непередбачуваної поведінки або відхилень від норми. Обидва графіки надають важливу інформацію про роботу асинхронного двигуна в різних умовах.

Графік (рис. 4.11а) показує стабільність і нормальну роботу двигуна без ушкоджень, а графік (рис. 4.11б) відображає вплив пошкоджень на

зміну частоти обертання двигуна. ШНМ використовує для покращення своєї роботи зворотне поширення.

У дослідженнях вважали, що розподіл показників відповідає нормальному розподілу, що мінімізує ризик прийняття помилкових рішень.

Для трансформації вхідного сигналу через монотонно-зростаючу функцію і отримання вихідного сигналу у можемо визначити граничне значення цієї функції.

Використовуючи нейронну мережу в моделюванні, ми можемо отримати вихідний сигнал, який слугує як для навчання мережі, так і для аналізу функції розподілу ймовірностей появи дефектів.

Застосування методики з динамічною структурою нейронної мережі для виявлення дефектів у асинхронному двигуні дало можливість розробити точну модель. Успішні тестування підтвердили важливість та продуктивність застосування нейронних мереж у створенні систем діагностики.

ВИСНОВКИ

Розробка інтелектуальної системи діагностики роботи асинхронного двигуна у приводі технологічного обладнання займає ключове місце у забезпеченні надійності та безперебійної роботи промислового устаткування. Асинхронні двигуни є складовими багатьох технологічних процесів, тому їхнє своєчасне діагностування може вплинути на загальну продуктивність виробництва.

Дослідження показують, що велика частина відмов у електричних машинах різного типу припадає на електричні компоненти, у меншому ступені – на механічні. Це підкреслює важливість розробки системи, здатної виявляти подібні несправності на ранніх стадіях.

В основі діагностичної системи лежить аналітичне прогнозування стану технічних об'єктів. Сутність цього прогнозування – відстеження тенденцій зміни параметрів стану чи діагностичних сигналів. Такий підхід забезпечує своєчасне виявлення відхилень та дозволяє запобігти можливим відмовам.

Створення математичних моделей є невід'ємною частиною розробки діагностичної системи. Вони базуються на даних теорії ймовірностей та математичної статистики. Завдяки такому підходу можна аналізувати та прогнозувати роботу об'єктів з урахуванням різних факторів та параметрів.

Згідно проведених досліджень, специфічні порушення у формі коливального перехідного процесу свідчать про несправності асинхронного двигуна. Досить важливо при здійсненні таких досліджень вибрати оптимальний баланс між точністю моделі та часом її обчислення.

Розробка інтелектуальної системи діагностики для асинхронних двигунів є перспективним напрямком, що може забезпечити стабільність роботи технологічного обладнання та підвищити його ефективність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Яцун М. А. Електричні машини. Львів: Ви-во Львів. політех., 2011. – 464 с.
2. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Електричні машини: Навч. посіб. – К.: НУХТ, 2010. – 366 с.
3. Яцун М.А. Експлуатація та діагностування електричних машин і апаратів / М.А. Яцун, А.М. Яцун. – Львів.: «Львівська політехніка», 2010. – 228 с.
4. [Електронний ресурс] URL: <http://surl.li/lyvvi>
5. [Електронний ресурс] URL: <http://surl.li/lyvvr>
6. [Електронний ресурс] URL: <https://elektrik.info/main/school/1644-teplovoe-deystvie-toka-i-nagrev-provodnikov.html>
7. [Електронний ресурс] URL: <http://medus.com.ua/index.php?categoryid=331>
8. [Електронний ресурс] URL: <https://www.fluke.com>
9. Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П., Воробейчик О.С. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 246 с.
10. Про затвердження Порядку проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки. Постанова Кабінету міністрів України №687 від 26.05.2004 р.
11. P. Tavner, L. Ran, J. Penmann, H. Sedding. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. The Institution of Engineering and Technology. London, UK, 2008.
12. Черный А.П. Особенности организации и технического обеспечения мониторинга двигателей промышленных электроприводов // Вестник Харьковского государственного политехнического университета.

«Проблемы электропривода. Теория и практика». – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Спец. вып. – С. 353-358.

13. Шавкун В.М. До питання підвищення надійності тягових електричних двигунів та ресурсозбереження на рухомому складі міського електричного транспорту: Наук.-техн. зб. /В.М. Шавкун //Комунальне господарство міст, серія : технічні науки і архітектура. ХНАМГ. — 2010. - Вип. 97. – с. 272-278.

14. Єрмолаєв Є.О. Експлуатація і ремонт електрообладнання та засобів автоматизації. Є.О. Єрмолаєв, В.Ф. Яковлев. – К.: Урожай, 1996 – 336 с.

15. Навчальний посібник «Монтаж та випробування електричних машин» по дисципліні «Монтаж та випробування електричних машин» для студентів денної форми навчання. – Укл.: М. Г. Анпілогов, О. М. Давидов, М. О. Реуцький. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 106 с.

16. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis / A. M. Law, W.D. Kelton. - New York : McGraw-Hill Publishing Co, 2000. – 3-rd edit. – 560 p.

17. Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація): навч. посіб. Б.О. Пальчевський. – Львів: Світ, 2001. – 232 с.

18. R. Isermann. P. Balle. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes / Control Engineering Practice Volume 5, Issue 5, May 1997, p. 709-719.

19. M. Arkan, D. Kostic-Perovic, P.J. Unsworth. Modelling and simulation of induction motors with inter-turn faults for diagnostics / Electric Power Systems Research, Elsevier. 2005, p. 57-66.

20. M. Sahraoui, A. Ghoggal, S. E. Zouzou A. Aboubou, H. Razik. Modelling and Detection of Inter-Turn Short Circuits in Stator Windings of Induction Motor, IEEE Trans. Energy Convers. vol. 1, issue 1, 2006, pp. 4981-4986.

21. S. Bachir, S. Tnani, J. C. Trigeassou, and G. Champenois. Diagnosis by Parameter Estimation of Stator and Rotor Faults Occurring in Induction Machines, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, issue 3, 2006, pp. 963-973.
22. Smail Bachir, Slim Tnani, Gérard Champenois, Jean-Claude Trigeassou. Diagnosis of induction machines by parameter estimation. ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc. *Control Methods for Electrical Machines*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc, 2009, pp.249-273.
23. G.G. Yen; Kuo-Chung Lin. Conditional health monitoring using vibration signatures, *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*, 1999, pp. 963-973.
24. K. Kim, A. G. Parlos. Model-based fault diagnosis of induction motors using non-stationary signal segmentation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 16, Issues 2-3, March 2002, pp. 223–253.
25. H. Douglas, P. Pillay, and A.K Ziarani. Detection of broken rotor bars in induction motors using wavelet analysis. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2003.
26. J-H Jung, J-J Lee, and B-H Kwon, “Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 6, 2006, pp. 1842-1852.
27. Kechida, R., Menacer, A., Cherif, H. Broken Rotor Bars Fault Detection in Induction Motors using FFT: Simulation and Experimentally Study. *Algerian Journal of Engineering and Technology*, 2019.
28. Martín Riera-Guasp, Javier Martínez-Román, Rubén Puche-Panadero, Jordi Burriel Valencia, Angel Sapena Bañó, Juan Pérez-Cruz, Manuel Pineda-Sánchez. *Fault Diagnosis of Induction Motors*. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 2022.
29. Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C. and Vas, P. AI Techniques in Induction Machines Diagnosis Including the Speed Ripple Effect. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34, 1998, pp. 98-108.

30. M. A. Awadallah, and M. M. Morcos. ANFIS-Based Diagnosis and Location of Stator Inter-turn Faults in PM Brushless DC Motors, IEEE Trans. Energy Conv., vol. 19, no. 4, 2004, pp. 795-796.

31. W. W. Tan, H. Huo. A Generic Neuro-Fuzzy Model-Based Approach for Detecting Faults in Induction Motors. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 5, 2005, pp. 1420-1427.

32. M. S. Ballal, Z. J. Khan, H. M. Suryawanshi & R. L. Sonolikar. Induction Motor: Fuzzy System for the Detection of Winding Insulation Condition and Bearing Wear. Electric Power Components and Systems, Volume 34, 2006, pp. 159-171.

33. Faiz J, Moosavi M. Eccentricity fault detection – From induction machines to DFIG-A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016; 55: pp. 169–179.

34. Monia Ben Khader Bouzid, Gérard Champenois, Najiba Mrabet Bellaaj, Laurent Signac, Khaled Jelassi. An effective neural approach for the automatic location of stator interturn faults in induction motor. IEEE transactions on industrial electronics, 2008, pp. 4277-4289.

35. Електропривод: Підручник / Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко, О. Ю. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. П. Лисенко; За ред. Ю. М. Лавріненка. Видавництво «Ліра-К». – К., 2009. – 504 с.

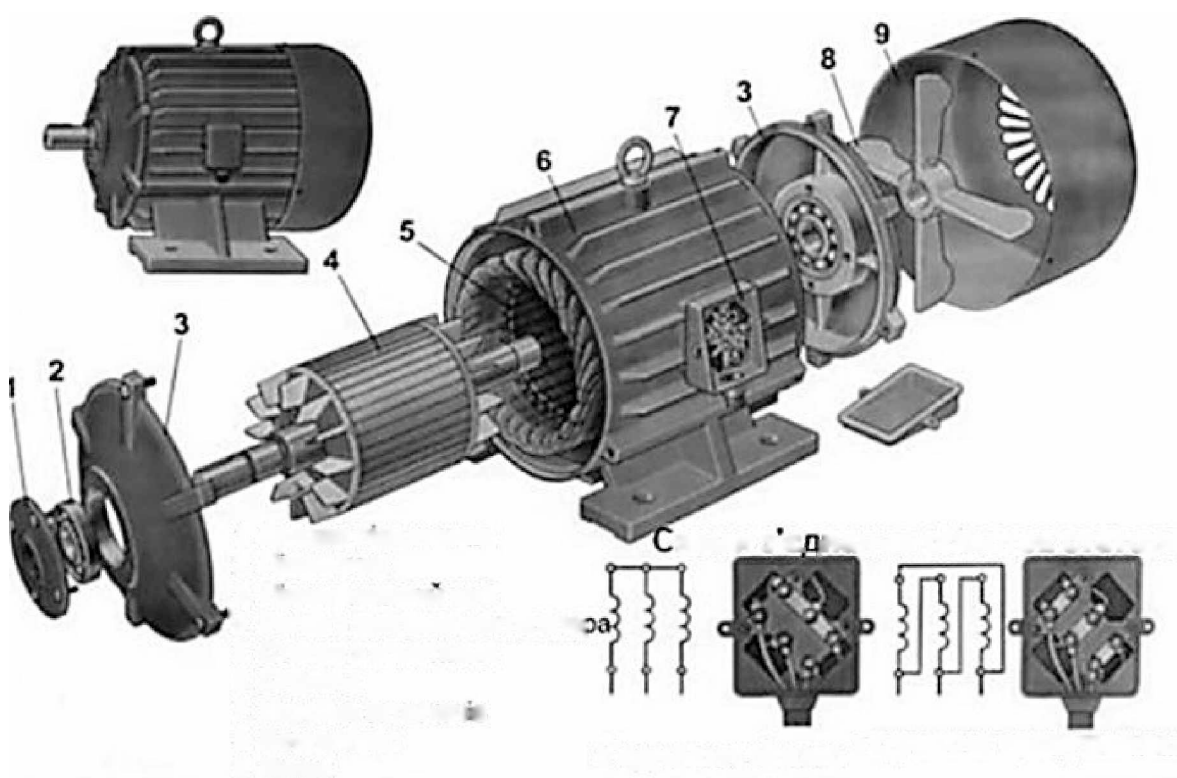
36. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлєв та ін. – К.: Аграрна освіта, 2011. – 449 с.

37. Монтаж та налагоджування електромеханічних пристроїв: навч. посібник / Грабко В. В., Бабій С. М., Мошноріз М. М. та ін. Вінниця: ВНТУ, 2011. – 137 с.

38. Моделювання електромеханічних систем: підруч. / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Г. Ю. Сисюк, О. В. Садовой. – Кременчук, 2001. – 410 с.

39. Кононюк А.Ю. Нейроні мережі і генетичні алгоритми / А.Ю.Кононюк. – К.: Корнійчук. 2008. – 446 с.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



Будова асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором



Фото зношеного і деформованого короткозамкненого ротора асинхронного двигуна



Фото частини валиків кочення підшипника
асинхронного двигуна



Фото пошкоджених колекторних контактних пластин
фазного ротора асинхронного двигуна



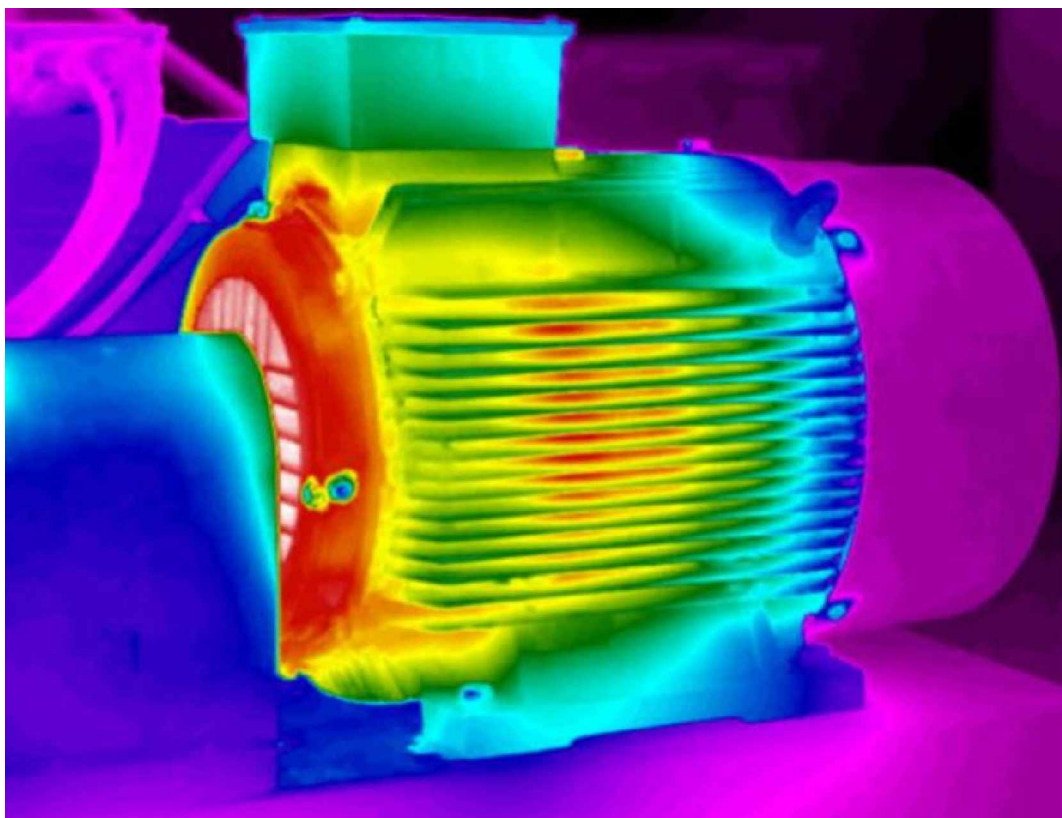
Фото поверхні магнітопроводу короткозамкненого ротора асинхронного двигуна



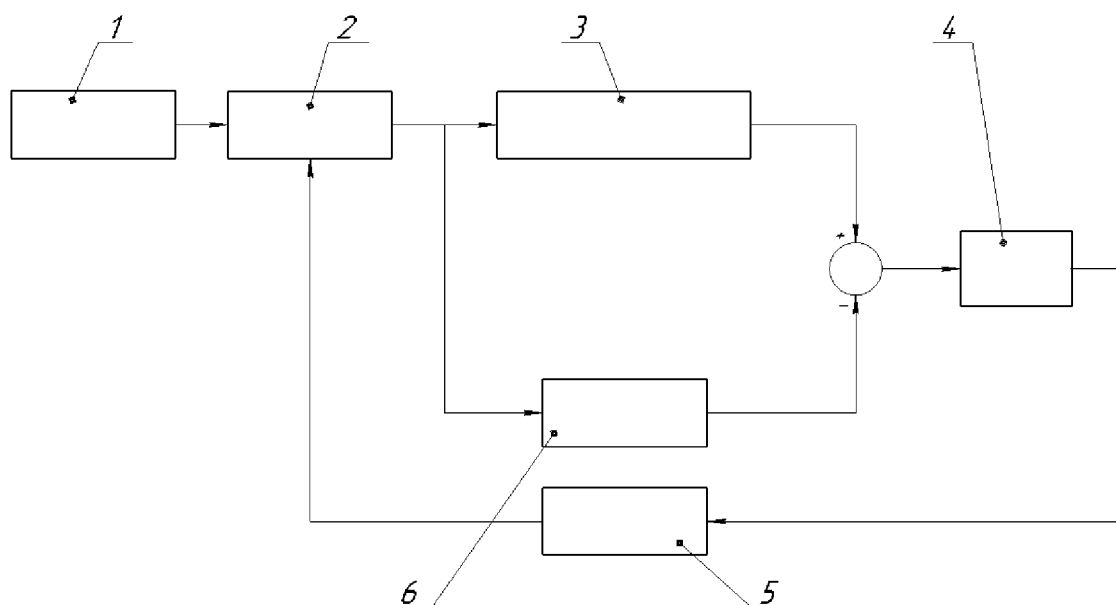
Фото згорілих статорних обмоток асинхронного електродвигуна



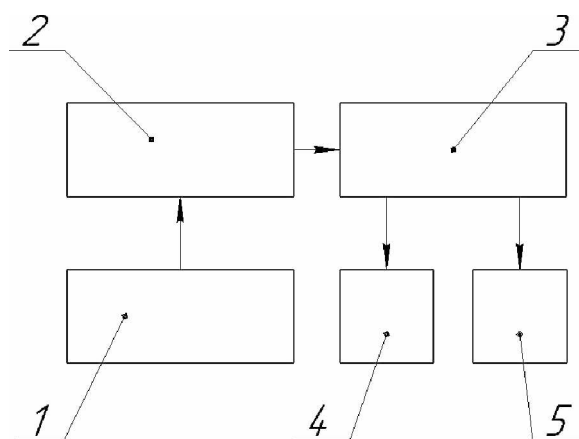
Фото міжвиткових коротких замикань у статорній обмотці асинхронного двигуна



Тепловізійна картина нагріву частин асинхронного двигуна



Алгоритм для складання моделі моніторингу стану асинхронного двигуна: 1 – асинхронний двигун, 2 – блок контролю параметрів, 3 – блок обчислення параметрів роботи, 4 – блок порівняння, 5 – блок прийняття рішення, 6 – блок алгоритмізації



Алгоритм для визначення несправностей шляхом порівняння: 1 – асинхронний двигун, 2 – блок порівняння параметрів, 3 – блок діагностики несправності, 4 – блок індикації несправності, 5 – блок ідентифікації несправності

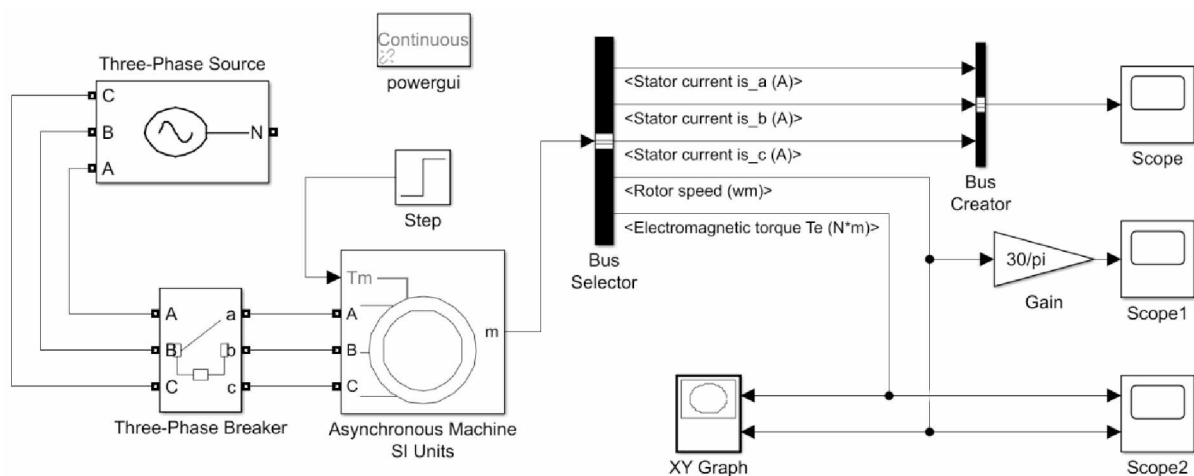
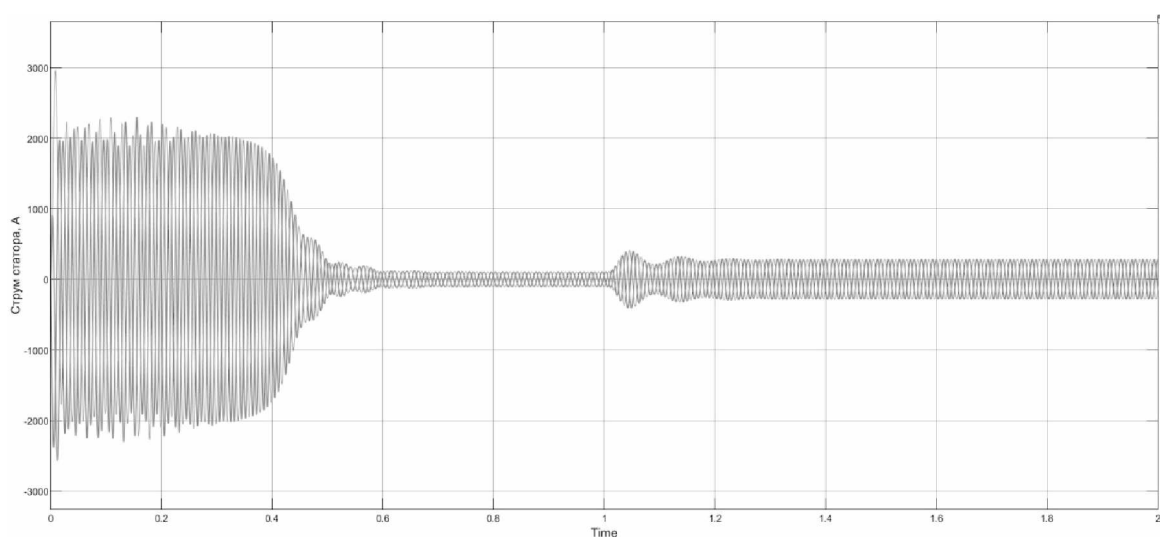
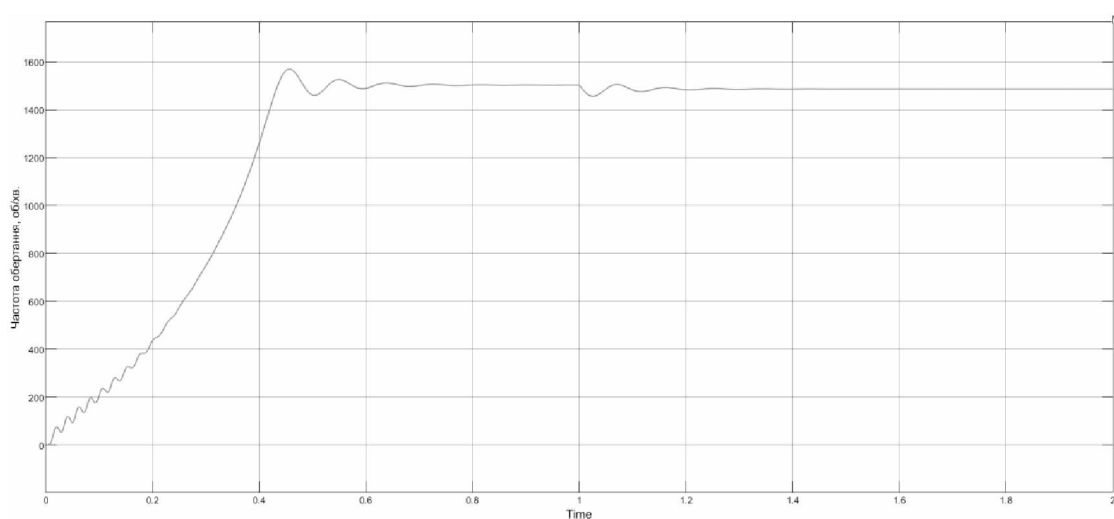


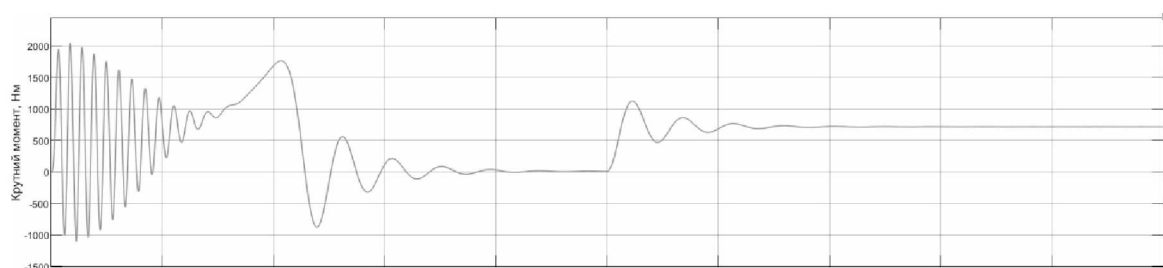
Схема прямого пуску асинхронного двигуна у програмі Matlab/Simulink



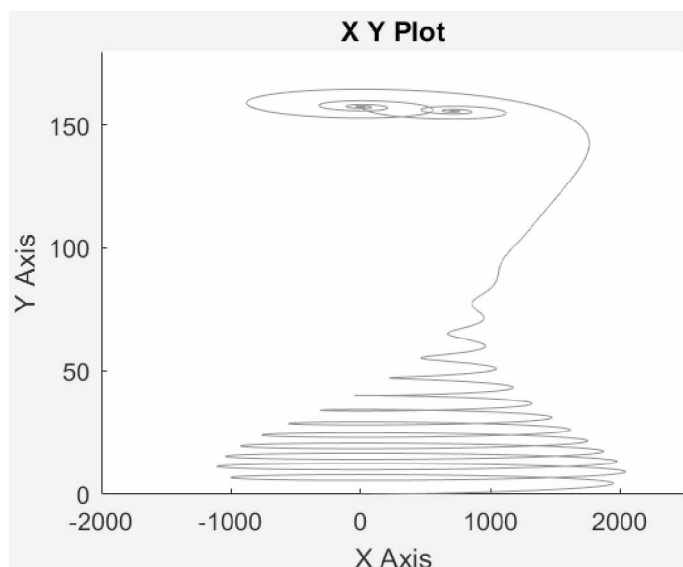
Характер зміни значення узагальненого вектора струму в фазах статорних обмоток



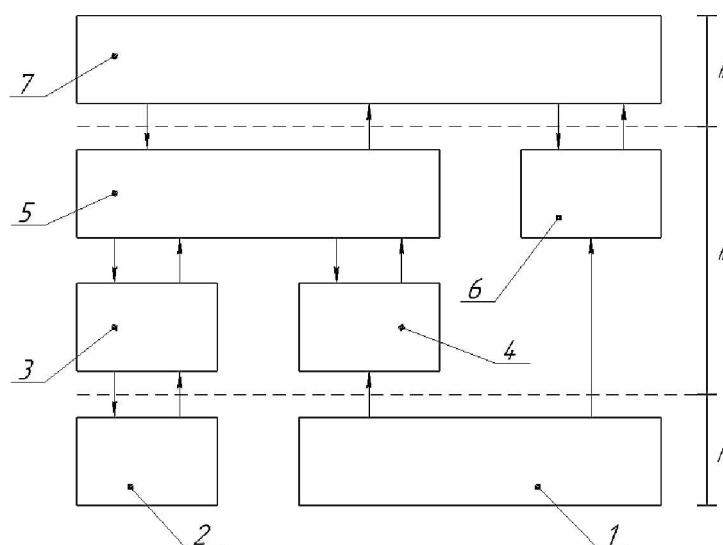
Характер зміни частоти обертання ротора асинхронного двигуна



Характер зміни електромагнітного крутного моменту на валу асинхронного двигуна

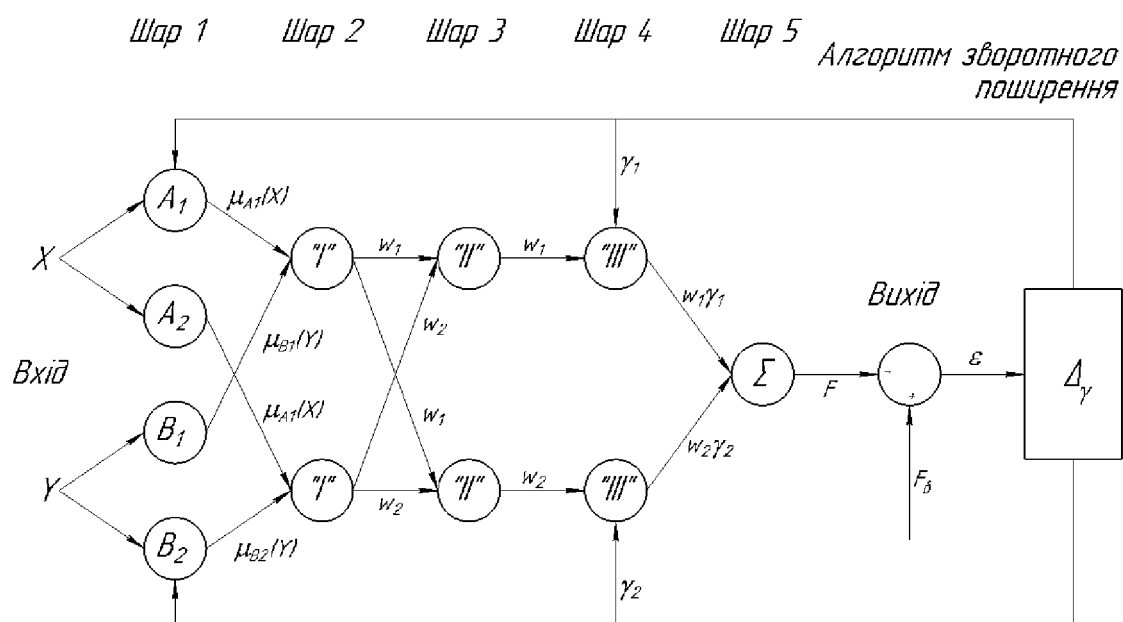


Зображення залежності електромагнітного крутного моменту на валу асинхронного двигуна від частоти обертання ротора

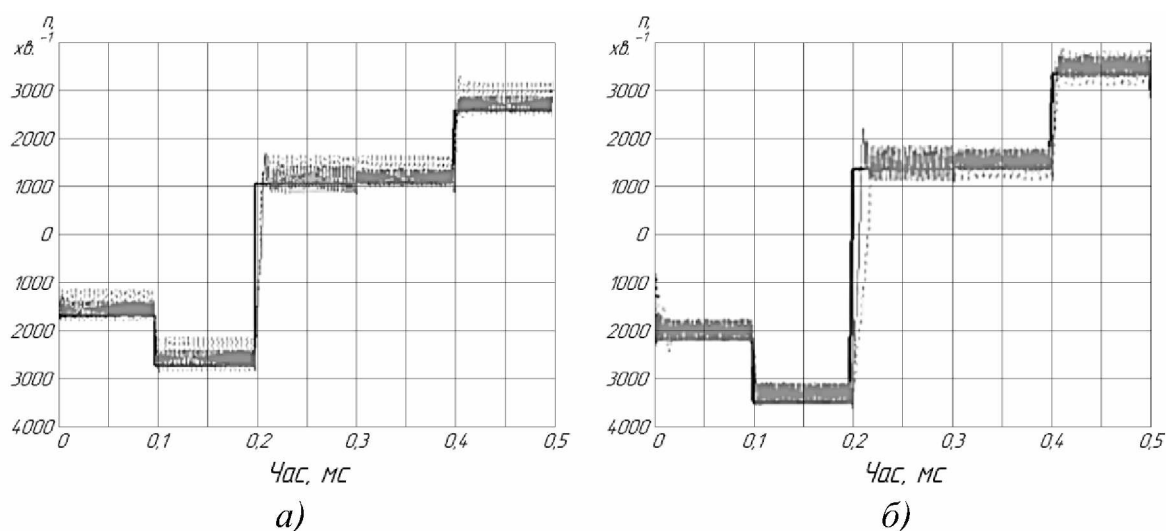


Принципова схема роботи автоматизованої апаратної системи контролю стану роботи електричних машин: I – нижній рівень, II – середній рівень, III – верхній рівень;

1 – датчики, 2 – комутаційне обладнання, 3 – контролер, 4 – захисні пристрої, 5 – логічні пристрої (мікроконтролери), 6 – аналого-цифровий перетворювач, 7 – головний обчислювальний пристрій



Структура штучної нейронної мережі з використанням методу нечіткої логіки



Результат роботи ШНМ при визначенні ушкодження стрижнів короткозамкненого ротора асинхронного двигуна: а) робота двигуна без ушкодження, б) робота двигуна при наявності ушкоджень

ДОДАТОК Б

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____