

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем


## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка стенду для діагностування обмоток ротора та  
статора асинхронних електродвигунів

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»  
Шифр, назва  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Шифр, назва  
Спеціалізація «Електропобутова техніка»


Шифр МРМА 22.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу  
група ЕТм-21-1

  
Підпис


А. Б. Мельник  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

В. С. Неймак  
Ініціали, прізвище

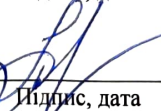
Нормоконтролер

  
Підпис, дата

С. І. Лукінець  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

О. С. Поліщук  
Ініціали, прізвище

\_\_\_\_\_ 2022 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і скаротів, електромеханічних та електричних систем  
Освітній рівень магістерський  
Галузь знань 14 Електрична інженерія  
Шифр і назва  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Шифр і назва  
Спеціалізація Електрообладнання техніки  
Освітня програма \_\_\_\_\_

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

\_\_\_\_\_ 2022р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Мельник Анатолій Горисович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка схеми для діагностування обмоток ротора та статора асинхронних електродвигунів

керівник роботи Гейман В.С., к. т. н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 1 07 2022р. № 83

2. Строк подання студентом роботи на кафедру \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи технічні характеристики асинхронних електродвигунів.

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

1. Аналіз проблеми і постановка задачі дослідження.
2. Математичне моделювання й аналіз сталих режимів роботи асинхронних електродвигунів з короткозамкненими роторами при наявності в них дефектів
3. Розробка конструкції схеми для діагностування обмоток ротора і статора асинхронних електродвигунів.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Кошиходжувальність електродвигунів (А1);
2. Математичне моделювання (А1);
3. Залежності коефіцієнта  $\eta$  від струму (А1);
4. Дослідження АД (А1);
5. Розробити схему дослідження АД (А1);
6. Схеми схеми для проведення експериментальних досліджень АД (А1);
7. Результати експериментальних досліджень АД (А1);
8. Порівняння експериментальних досліджень і математичного моделювання (А1)

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

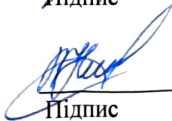
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Аналіз проблеми і постановка задачі досліджень		
2. Математичне моделювання і аналіз станів режимів роботи асинхронних електродвигунів.		
3. Розробка конструкції статора для діючого обмоток ротора і статора асинхронних електродвигунів.		
4. Експериментальні дослідження обмоток ротора і статора асинхронних електродвигунів.		

Студент

  
Підпис

А.Б. Малюк  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

В.С. Гейман  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Мелоник Анастасій Борисович


2. Тема магістерської роботи Розробка ступеню для діагностування області ротора і статора асинхронних електродвигунів.

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 9 арк., сторінок записки 84

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки: \_\_\_\_\_

1. Аналіз проблеми і постановка задачі досліджень
2. Математичне моделювання і аналіз спадних режимів роботи асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором при наявності в них дефектів
3. Розробка конструкції ступеню для діагностування області ротора і статора асинхронних електродвигунів

Підпис студента 

"27" 12 2022 р.


## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол №3 від "29" 12 2022 р.

Оцінка проекту ЕК добре 4,0/5

Рекомендації ЕК врахувати в наступній

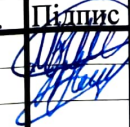



Особливі відмітки \_\_\_\_\_

Технічний секретар 

"29" 12 2022 р.

## ЗМІСТ

	с.
Вступ	6
1. Аналіз проблеми та постановка задач досліджень	9
1.1 Аналіз статистики пошкоджуваності електродвигунів	9
1.2 Існуючі методи й засоби технічної діагностики електродвигунів	14
1.3 Постановка завдання досліджень	23
Висновки до розділу 1	24
2 Математичне моделювання й аналіз сталих режимів роботи асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором при наявності в них дефектів	25
2.1. Ушкодження стрижнів короткозамкненого ротора	25
2.2 Виткові замикання в обмотці статора	27
2.3 Обрив паралельних гілок обмотки статора	39
2.4 Дефекти механічної частини	46
Висновки до розділу 2	53
3 Розробка конструкції стенду для діагностування обмоток ротора та статора асинхронних електродвигунів	54
3.1 Аналіз залежностей діагностичних параметрів при обриві стрижнів короткозамкненого ротора.	54
3.2 Оцінка інформативності діагностичних параметрів з застосуванням теорії планування експерименту	60
3.3 Математична обробка результатів експериментальних досліджень	64
Висновки до розділу 3	71

<b>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</b>							
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата	Літера	Арк.вш	Арк.всш
Виконав		Мельник			М	4	84
Перевір.		Неймак			ХНУ, гр.ЕТМ-21-1		
Н.контр.		Пудило С.І.					
Затвер.		Поліщук			Розробка стенду для діагностування обмоток ротора та статора асинхронних електродвигунів		

4. Дослідження виткових замикань в обмотці статора асинхронного електродвигуна	72
4.1 Дослідження виткових замикань в обмотці статора асинхронного електродвигуна	72
4.2 Порівняння результатів експериментальних досліджень і результатів математичного моделювання сталих режимів роботи асинхронних електродвигунів при наявності в них дефектів	76
Висновки до розділу 4	79
Загальні висновки	80
Перелік джерел посилання	81
Додаток А	

## ВСТУП

Актуальність теми. Завдяки простоті виготовлення та експлуатації асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором (КЗР) є основним видом електроприводу робочих механізмів виробничого обладнання. Сфера застосування АД із захистом від короткого замикання підтверджується тим, що такі електроприводи споживають до 40% електроенергії, що виробляється в усьому світі.

Однак оптимальному використанню таких електродвигунів заважає їх висока пошкоджуваність (щорічно пошкоджується 20-25% від загальної числа встановлених АД КЗР). Це призводить до порушення безперервності технологічних процесів з подальшим браком продукції, витратами на відновлення та ремонт електродвигунів, відновлення нормальних виробничих процесів. Пошкодження допоміжних двигунів (ДД) електростанцій можуть призвести до відключення блоку, що вплине на стабільність роботи електромережі.

Процес автоматизації управління процесом шляхом діагностики технічного стану обладнання, в тому числі електродвигунів, в режимах роботи дозволяє мінімізувати збитки від цих наслідків шляхом раннього виявлення початкових дефектів.

Застосування методів і засобів моніторингу та аналізу поточного технічного стану також дає можливість запровадити технологію обслуговування електродвигунів «за станом», що являє собою значне підвищення конкурентоспроможності підприємства, рентабельності та прибутковості. Цьому сприяє швидкий розвиток мікропроцесорної та обчислювальної техніки.

Суть технології технічного обслуговування «за станом» полягає в тому, що технічне обслуговування та ремонти проводяться залежно від

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

фактичного поточного технічного стану електродвигуна, контрольованого в процесі експлуатації без демонтажу та ревізій, на основі контролю та аналізу відповідних параметрів. При цьому витрати на технічне обслуговування електродвигунів знижуються на 50-75% порівняно з обслуговуванням за нормативами (система профілактичного обслуговування).

Для реалізації технології обслуговування «On Condition» необхідна повна діагностика об'єкта і бажано задовго до відмови виявити всі дефекти, що впливають на ресурс, щоб підготуватися до ремонту.

Таким чином, актуальним є питання розробки та вдосконалення методів і засобів діагностики технічного стану електродвигунів на основі моніторингу параметрів режимів роботи.

Метою роботи є підвищення надійності роботи АД за даними ПЗЗ, удосконалення методів і засобів технічної діагностики на основі моніторингу параметрів режиму роботи електродвигуна та забезпечення вірогідності діагностики.

Завданнями дослідження відповідно до цілі роботи є:

1. Провести аналіз результатів фізико-математичного моделювання постійних режимів роботи АД за захистом від короткого замикання при специфікації різних типів пошкоджень, на підставі якого визначити найбільш значущі діагностичні параметри, що характеризують зміну параметрів стану робочого режиму електродвигуна при дефектах статора і ротору.

2. Розроблено методику автоматизованої діагностики технічного стану АД із захистом від короткого замикання на основі контролю параметрів режиму роботи, для чого необхідно розробити: методику, алгоритми та програмне забезпечення, принципи проектування та структурну схему системи технічної діагностики.

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3. Обґрунтуйте вимоги до точності вимірювання та обробки параметрів режиму роботи електродвигуна.

4. Оцінити технічну ефективність розробленого способу діагностики артеріального тиску після ПЗЗ шляхом проведення експериментальних досліджень з макетом технічної діагностичної системи.

Предметом дослідження є стан та характеристика режиму роботи АД з КЗ при дефектах обмоток статора та ротору.

Предметом дослідження є діагностика технічного стану АД шляхом виявлення джерел несиметрії параметрів робочого стану.

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1 Аналіз статистики пошкоджуваності електродвигунів

Безперебійність технологічної діяльності промислових об'єктів вимагає надійної роботи всього робочого обладнання, що використовується. Для приводу більшості робочих механізмів використовується трифазний АД виробництва КЗР, оскільки виготовлення короткозамкнених роторів значно простіше і дешевше, ніж фазних роторів, а відсутність контактних кілець, ковзних контактів і пускових реостатів знижує загальну розмірів машини, підвищує її надійність і спрощує експлуатацію.

Високовольтні двигуни на промислових підприємствах і електростанціях працюють у важких умовах. На них впливають висока температура, вологість, забруднення навколишнього середовища, загазованість, імпульсні перенапруги тощо, що спричиняє пошкодження двигунів. Пошкодження електродвигунів часто виникають внаслідок неприпустимо тривалої експлуатації без ремонту (зносу), поганого зберігання та обслуговування, порушення режиму роботи, на який вони розраховані.

Розподіл пошкоджень за основними агрегатами АД і синхронними двигунами 6 кВ у.п. трьох ТЕС ВАТ «Хмельницькобленерго» за 1 рік наведено на рисунку 1.1.

Частота поломок залежить від терміну експлуатації двигуна. Початковий період експлуатації характеризується появою пошкоджень двигунів, пов'язаних з прихованими виробничими дефектами. Як правило, після нормального терміну служби 15-20 років спостерігається поступове збільшення відмов. Збільшення можна пояснити зношеністю ізоляційних матеріалів і компонентів.

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Таблиця 1.1 - Пошкоджуваність електродвигунів в.п. електростанцій

Вид ушкодження	%
Механічні ушкодження	
Ушкодження статора	6,5
у тому числі ушкодження:	
сердечника	1,6
пазових клинів	4,9
Ушкодження ротору	43,5
у тому числі ушкодження:	
стержнів клітки	14,5
підшипників	8,1
вентиляторів	3,2
зачіпання ротору об статор	14,5
Усього	50
Електричні ушкодження	
Ушкодження статора	33,9
у тому числі ушкодження:	
пазових частин обмотки	16,2
лобових частин обмотки	11,3
з'єднань обмотки	3,2
виводів	3,2
Ушкодження ротору	11,3
у тому числі ушкодження:	
обмотки	8,1
контактних кілець	3,2
Усього	45,2

Примітка: інші види ушкоджень становлять 4,8 %.

У роботі [3] наводяться дані, згідно з якими середня пошкодженість АД за останні три роки на одній із ТЕС склала 19,8 % при загальній числа двигунів 140, а поломок стержнів нижче – 23,7 %, тобто кожні четверте пошкодження. Основними причинами їх виникнення є часті та складні умови пуску АД, несинусоїдальна напруга живлення, технологічні дефекти тощо.

Як показано в таблиці 1.1, одним з найпоширеніших видів пошкоджень електродвигунів є пошкодження електричної частини статора. 93% пошкоджень обмотки пояснюється короткозамкнутою частиною АМ одного ряду з ослабленими витками, тоді як пошкодження інтерфейсу (5%) та ізоляції щілин (2%) зазвичай викликано короткими замиканнями.

Одна з найбільш гострих проблем в роботі ІМ пов'язана з виникненням нерівномірного повітряного зазору. Це явище викликає абразивне зношування підшипників, деформацію торцевих щитів машин, зсув віддалених фундаментів підшипників і т. д. Оскільки повітряний зазор в ІМ досить малий, ці причини викликають високий ексцентриситет ротору, що призводить до вібрації та прискорює знос підшипників. Згідно з таблицею 1.1, на граничний випадок ексцентриситету (зачеплення ротору зі статором) припадає 14,5 % усіх пошкоджень електродвигунів у.п.

Причиною або наслідком ексцентриситету ротору АД є пошкодження підшипника (з табл. 1.1 - 8,1%). Якщо дефект у підшипнику залишається непоміченим, підшипник зазвичай руйнується через посилення вібрації. Внаслідок цього порушується осьова симетрія обертової машини, ротор деформує активну сталь та ізоляцію обмоток статора, що неминуче призводить до аварії [8].

Аналіз різних видів пошкоджень показав, що практично кожне пошкодження електродвигуна призводить до виникнення магнітної та електричної асиметрії. Так, обрив стрижня обмотки КЗ призводить до

посилення вібрацій, падіння швидкості під навантаженням і пульсацій струму статора послідовно у всіх фазах. Порушення контактів, паяних або зварних з'єднань в АД відповідає прояву обриву витків, прутків обмотки КЗ або фази обмотки в залежності від місця цього з'єднання. Обрив провідників обмотки статора АД викликає несиметрію струмів і швидкий нагрів однієї з фаз. Розплавлення бабіту в підшипниках ковзання і надмірне зношування підшипників кочення призводять до перекосу валів двигуна і механізму і появи ексцентриситету ротору. Посилюється вібрація двигуна, виникають великі односторонні сили притягання. Котушкові ланцюги являють собою несиметричні пошкодження, які призводять до спотворення діаграми струму і напруги в нормальному режимі і пов'язані з падінням моменту двигуна [3].

В несиметричному режимі струми статора електродвигуна можна розкласти на симетричні складові 3П і 3Д. Поле 3П, створюване струмами 3П, що обертаються в протилежному напрямку до обертання ротору, надає теплову і механічну дію на двигун. Тепловий ефект визначається додатковими втратами в роторі, які особливо виражені при номінальній частоті обертання ротору. Механічна дія визначається появою електромагнітного моменту і проявляється підвищеною вібрацією елементів статора і ротору. Найбільші механічні навантаження діють на зварні шви, які зміцнюють активні сталеві клини на фланцях корпусу і торцевих частинах обмотки статора, особливо в місцях їх виходу з пазів.

Таким чином, проведений аналіз дозволив виявити деякі з найпоширеніших короткозамкнених дефектів АД, серед яких короткозамкнені витки, обриви обмоток статора і короткозамкнені стрижні обмотки, дефекти механічної частини (пошкодження підшипників і ексцентриситет). Поява цих пошкоджень призводить до асиметрії параметрів режиму роботи електродвигуна.

## 1.2 Існуючі методи й засоби технічної діагностики електродвигунів

В даний час в енергетиці немає єдиної діагностичної концепції, існують і успішно використовуються окремі методики. В основному вони проводяться на підставі аналізу показань контрольно-вимірювальних приладів під час чергових обходів і за результатами перевірок під час планових і позапланових ремонтів електроустаткування, в тому числі електродвигунів. Відносно великі інтервали випробувань не дозволяють виявити пошкодження на ранній стадії розробки, тобто їх неможливо усунути вчасно.

Порівняльний аналіз різних способів технічного обслуговування обертового обладнання показав, що при технічному обслуговуванні «за правилами» (система планово-попереджувальних ремонтів і випробувань):

- не менше 50% послуг надається без їх фактичної потреби;
- Для більшості машин це не зменшує частоту їх поломок, більш того, часто знижується експлуатаційна надійність після ТО з демонтажем і заміною деталей.

- Заміна вузлів і деталей з великим залишком, не виправданим поточним станом;

- Близько 70% дефектів викликані ремонтними роботами.

Для обслуговування «за умовою»:

- підприємство має об'єктивні дані про поточний технічний стан обладнання;

- нормальна робота механізму не порушується необґрунтованим втручанням людини;

- Технічно достовірно визначені необхідні терміни та обсяги ремонтно-налагоджувальних робіт, якість їх виконання контролюється.

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

При правильній організації дана технологія не тільки знижує експлуатаційні витрати, але й кардинально змінює систему обслуговування обладнання на підприємстві, що дозволяє:

- контроль поточного технічного стану механізмів;
- Контроль якості виготовлення, усунення несправностей та монтаж під час пусконаладжувальних робіт;
- Контроль якості виконаних ремонтно-налагоджувальних робіт;
- технічно обґрунтовано спланувати умови та зміст ремонтно-пошукових робіт;
- Планувати терміни закупівлі запчастин за потреби;
- Зниження потреби в запасних частинах, матеріалах та їх запасах;
- збільшення ресурсу та надійності обладнання,
- Подовження строків капітального ремонту та терміну служби;
- усунення «раптових» відмов механізмів і зупинок виробництва;
- Підвищення загальної культури виробництва та кваліфікації працівників.

Застосовувані при цьому технічні засоби, як правило, дозволяють не тільки контролювати стан механізмів, але й забезпечують вирішення проблем припинення їх функціонування під час експлуатації та ремонту.

Суть технології полягає в тому, що технічне обслуговування та ремонти проводяться залежно від фактичного поточного технічного стану механізму, в процесі експлуатації без демонтажу та контролюються ревізії на основі контролю та аналізу відповідних параметрів.

Економічний вплив переходу на обслуговування «як є» в країнах ЄС:

- Енергетичний сектор (вартість технічного обслуговування): 18 \$ за НР - при роботі до відмови 13 \$ за НР - при обслуговуванні "за специфікацією", 9 \$ за НР - при обслуговуванні "за умовами";

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- хімічні заводи (машини з обертовими елементами): проведено скорочення числа. послуги з 274 по 14;

- Нафтопереробний завод (електродвигуни): зниження витрат на обслуговування на 75%;

– Окупність вкладених коштів: понад 10 разів.

Очевидно, що існує потреба переходу від профілактичних, ремонтних і відновлювальних робіт за часом до технічного обслуговування на основі стану, щоб підвищити надійність ресурсів і обладнання та зменшити витрати, пов'язані з ремонтом і простоем.

Для цього переходу необхідна достатньо чітка система діагностики поточного технічного стану приладів.

Методи виявлення пошкоджень ІД, відрізняючись один від одного способом реалізації, мають спільні недоліки, основна причина яких полягає в тому, що для контролю технічного стану електродвигуна необхідно виводити його з експлуатації та розбирати повністю або повністю. частина. Однак ці методи можна використовувати для точного визначення або точного визначення несправності під час виробництва електродвигуна або після того, як двигун було відхилено системою діагностики в експлуатації.

Спосіб діагностики стану обмоток ротору АМ [7], заснований на порівнянні кожного попереднього значення амплітуди фазного струму з наступним, має обмеження для застосування в експлуатації, оскільки його реалізація можлива лише в режимі пуску. електродвигун.

До недавнього часу найбільш розвиненими за принципами конструкції та застосуванням елементної бази були пристрої РЗА, менш розвиненими – пристрої керування. Прикладом такого захисту є фільтр максимального струму типу МТФЗ [46] для двигунів гірничого електрообладнання розробки Єреванського політехнічного інституту, який реагує на несиметрію фазних струмів статора електродвигуна і видає команди на



обмотки статора. Але, як відомо, при симетричному навантаженні в системі без нейтрального провідника відсутні потрібні гармоніки в струмах, що унеможливує застосування цих методів для діагностики АТ 6-10 кВ.

У роботі [9] розглядається система безперервного моніторингу та діагностики синхронних машин, заснована на більш повному контролі параметрів режиму роботи, аналізі отриманої інформації, що дозволяє завчасно діагностувати відмови та видавати рекомендації обслуговуючому персоналу. На основі аналізу зібраної інформації підсистема діагностує несправності в системі охолодження обмоток і сердечника статора, в системі змащення і охолодження підшипників, а також несправності, що викликають посилення вібрацій синхронної машини. Одним з недоліків цієї системи моніторингу та діагностики є те, що вона спрямована в першу чергу на виявлення дефектів механічної частини і, до того ж, використовується лише для синхронних машин.

У роботі [20] розроблено методи та пристрої, які не тільки визначають факт замикання обмоток у робочому режимі АД, але й дозволяють виявити пошкоджену ділянку обмотки статора без пошуку двигуна; Визначити ексцентриситет ротору при працюючому двигуні. Крім того, захист ІМ доповнено блоками, які дозволяють визначати довгий зліт, перекидання і блокування ротору.

Опис багатофункціонального пристрою захисту та оперативної діагностики асинхронних і синхронних електродвигунів можна знайти в [7]. Діапазон функцій захисно-діагностичного пристрою залежить від ступеню відповідальності установки з електродвигуном в технологічному процесі, типу електродвигуна, конструкції обмоток статора і ротору, номінальної потужності і напруги. Так, зокрема, прилад для відповідальних за АТ напругою вище 1 кВ потужністю до 2000 кВт повинен реагувати на короткі замикання в обмотці статора, в тому числі на замикання витків однієї фази,

замикання на заземлення обмотки статора, симетричні і несиметричні перевантаження, зниження опору ізоляції обмотки статора, вихід з ладу ротору і тривалі пуски, заклинювання робочого тиску ротору, старіння ізоляції; Визначити пошкодження підшипників, ексцентриситет ротору, розбіжність осей ротору АД і механізму, розрив з'єднання АД з механізмом. Незважаючи на очевидні переваги описаного пристрою, недоліком, який можна помітити, є те, що для його реалізації необхідно внести структурні зміни в електродвигун.

Блок мікроконтролера захисту та діагностики електродвигуна 6 кВ (Мкзід-6 кВ) призначений для захисту електродвигунів 6 кВ та діагностики вузлів «електродвигун-механізм» [15]. Мкзід-6 кВ контролює та передає на ПК такі параметри: трифазні струми, мережеві напруги, активну та реактивну потужність, рівень несиметрії струму, рівень пульсацій струму електродвигуна, величину теплового імпульсу, частоту мережі, що дозволяє використовувати даний прилад як вимірювальний комплекс для розробки систем діагностики артеріального тиску за КЗР 6-10кВ.

Узагальнення робіт з автоматизації контролю якості та діагностики технологічного процесу асинхронних двигунів здійснено в [5]. Наведено алгоритм діагностування асинхронних двигунів за результатами моніторингу номінальних показників. Діагностика зводиться до визначення сукупності номінальних параметрів АД, за якими зазначений електродвигун не відповідає вимогам стандартів. Шлюбні ознаки порівнюють за обраним набором характеристик номінального АТ. З урахуванням залежності між ознаками шлюбу та технологічними причинами їх появи прогнозуються можливі причини браку.

У роботі [4] проведено аналіз методів діагностики артеріального тиску за ПЗЗ, на підставі якого вони класифіковані за такими критеріями: за типом напруги живлення, за типом вихідної інформації, за необхідні за

методикою значення параметрів еквівалентної схеми артеріального тиску за способом отримання кінцевого результату, за повнотою визначення бажаних параметрів. На підставі аналізу в роботі наступні основні зроблені висновки: неефективність методів демонтажу машини; Одним із основних напрямків розробки електроприводу є автоматизація процесу випробувань; Необхідно більше уваги приділяти діагностиці артеріального тиску з урахуванням його можливої асиметрії.

Зарубіжні вчені активно розробляють методи та засоби діагностики АД при ІХС.

У роботі [8] розглядається діагностика зламаних стержнів трифазного АД за допомогою динамічної асоціативної пам'яті неупорядкованої нейронної мережі. Асоціативна пам'ять використовується в поєднанні з неупорядкованими нейронними моделями, які пов'язані між собою загальноприйнятою автоасоціативною матрицею синаптичних ваг. Динамічну асоціативну пам'ять і основні характеристики неупорядкованої нейронної мережі оцінюють з точки зору аперіодичного розладу, неупорядкованого потягу та початкових умов.

Застосування методу вектора струму в синхронній паркувальній системі координат для діагностики пошкоджень, що виникають у роторній клітці трифазного режиму роботи АМ, розглянуто в [12]. Описано теоретичні основи, безпосередньо пов'язані із застосуванням діагностичного методу, а також важливість таких параметрів, як струм холостого ходу двигуна, інерція системи двигун-навантаження, номінальні характеристики двигуна та навантаження для цього рівня процесу. підкреслено. Результати як моделювання, так і лабораторних випробувань демонструють ефективність нового підходу в діагностиці наявності уражень роторної клітки. Повідомляється про розробку індексу інтенсивності для оцінки прогресування пошкодження та показано, що цей

індекс майже не залежить від таких параметрів, як струм холостого ходу, потужність двигуна та інерція системи двигун-навантаження.

У роботі [13] запропоновано метод моніторингу поломки стержнів ротору асинхронної машини з застосуванням розширеного фільтра Калмана для оцінки опору ротору. Схема багатообмоткового ротору використовується для моделювання асинхронної машини при обробці несправностей, а фільтр Калмана на основі моделі асинхронної машини п'ятого порядку використовується для оцінки еквівалентного опору ротору.

Аномальні режими АД, викликані короткими замиканнями в обмотці статора, проаналізовано в [17]. Асиметричний автомобіль моделюється за допомогою підходу просторового вектора. Режим пошкодженої асинхронної машини аналізують, приймаючи за діагностичні коефіцієнти амплітуди складових зворотної послідовності при живленні кутовою частотою та домінуючу (переважаючу) складову щілинних гармонік. Останні порівнюються для різного ступеню пошкодження.

Інститут електроенергетики США розробив пристрій, який дозволяє виявити один зламаний стержень ротору під час роботи ІМ з повним навантаженням. Пристрій здатний відрізнити структурну асиметрію машини від реальних пошкоджень. Розроблений пристрій, що включає комп'ютер, виконує дві функції: обробку сигналу та рішення алгоритму передачі інформації про стан ротору оператору. Обробка сигналу перетворює зовнішні сигнали витoku потоку та струми в частотну область. Потім спектр досліджується відповідно до заданого алгоритму на гармоніки, які характеризують дефект.

Існує віденський метод моніторингу, який базується на двох підходах до моделювання. Для ідеально симетричної машини обидві моделі забезпечать однакові результати для розрахунку параметрів стану машини. Якщо на роторі є одна або більше пошкоджених шин, напруга та струм

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

мережі будуть спотворені. Крім того, крутний момент на валу та швидкість ротору демонструють подвійну модуляцію ковзання у часовій області. За допомогою просторової векторної моделі виражаються різні вхідні змінні та обчислюються різні змінні стану, в яких ці модуляції також відбуваються. Залежно від розподілу просторового потоку додатково використовуються деякі відмінності в моменті машини. Щоб виявити пошкоджений ротор за допомогою методу моніторингу Vienna, необхідно виміряти мережеві напруги, струми та положення ротору. Це завдання виконується за допомогою портативної вимірювальної системи з додатковими платами АЦП. Модель просторового вектора обчислюється в автономному режимі після вибірки зареєстрованих даних.

Останніми роками в багатьох країнах світу все частіше використовуються новітні інформаційні технології з застосуванням інтелектуальних систем. До таких систем також відносяться експертні системи, які являють собою програмні комплекси, які дають можливість отримати знання кваліфікованих спеціалістів – експертів у певній проблемній області – і використовувати ці знання для оцінки складних ситуацій і розробки рекомендацій щодо найкращого виходу. Вихідними параметрами централізованої системи управління є вхідні параметри експертної системи, які використовуються при оцінці робочого стану об'єкта. Вихідні дані розробленої системи технічної діагностики можуть слугувати вхідними параметрами для відповідної експертної системи.

### 1.3 Постановка проблеми дослідження

Для оптимальної продуктивності на промислових підприємствах необхідна подальша автоматизація управління процесом. Це зменшує споживання електроенергії та збільшує виробництво електроенергії на

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

електростанціях. Одним із завдань автоматизації є діагностика, тобто раннє виявлення початкових пошкоджень в елементах системи енергопостачання.

Проведення повноцінної діагностики електродвигунів в робочому режимі (під робочою напругою) можливе лише при контролі набору режимних параметрів, зміна яких повністю відповідає всім можливим видам пошкоджень, тобто можна сказати, що всі можливі пошкодження спостерігаються в діапазоні зміни робочих параметрів. Вирішення цієї проблеми ускладнюється, оскільки однією з умов її вирішення є відсутність нових датчиків (наприклад, вібрації тощо). З набору параметрів режиму вибирається оптимальна кількість і підключення, що дасть можливість достовірно виявити відповідне пошкодження.

Метою роботи є підвищення надійності роботи АД шляхом захисту від короткого замикання шляхом удосконалення методів і засобів технічної діагностики на основі виявлення причин несиметрії параметрів режиму роботи електродвигуна та підвищення точності вимірювань. визначення симетричних складових струмів і напруг.

Фокус дослідження:

1. Провести аналіз результатів фізико-математичного моделювання стаціонарних режимів роботи АД із захистом від короткого замикання при заданні різного роду несправностей в обмотках статора і ротору, на підставі якого можна визначити Найбільш значимі діагностичні параметри, що впливають на зміну, характеризують параметри стану режиму роботи електродвигуна при виникненні цих помилок.

2. Розробка процедури автоматизованої діагностики технічного стану АД з ПЗЗ на основі виявлення джерел несиметрії параметрів режиму роботи, для чого розроблено методичку, алгоритми та програмне забезпечення, принципи побудови та структурну схему розробляються системи технічної діагностики.

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3. Обґрунтуйте вимоги до точності вимірювання та обробки параметрів режиму роботи електродвигуна.

4. Оцінити технічну ефективність розробленого способу діагностики артеріального тиску після ПЗЗ шляхом проведення експериментальних досліджень з макетом технічної діагностичної системи.

Розроблена діагностична система повинна відповідати наступним вимогам:

- безперервний або періодичний контроль технічного стану ліній ІМ із захистом від КЗ з режимом роботи S1-S3;
- оцінити допустимість роботи даного електродвигуна;
- по можливості використовувати тільки наявні датчики (ТС і НР);
- передбачити можливість впровадження та застосування в діагностиці результатів експлуатаційних і профілактичних випробувань електродвигунів;
- виконувати автоматичне осцилографування пуску електродвигунів або короткого замикання.

### Висновки до розділу 1

1. Аналіз експлуатаційної надійності електродвигунів промислових установок дав змогу уточнити деякі положення теорії побудови засобів діагностики, які полягають у можливості підвищення експлуатаційної надійності двигунів при реалізації функцій їх діагностики АСТД, охоплює лише найпоширеніші дефекти. Така система не вимагає установки додаткових високовольтних пристроїв і відключення двигунів для їх діагностики.

2. Аналіз різних видів пошкоджень показав, що практично кожне пошкодження електродвигуна призводить до виникнення магнітної та

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

електричної асиметрії. В несиметричному режимі струми статора електродвигуна можна розкласти на симетричні складові ПП і ЗД. Таким чином, симетричні складові струму статора можна використовувати для виявлення різноманітних несправностей двигуна.

3. Аналіз існуючих методів технічної діагностики електродвигунів показує наявність двох напрямів розвитку. Перший напрямок включає методи, які проводяться при профілактичних випробуваннях і ремонтах (наприклад, на непрацюючих електродвигунах) і дозволяють виявити практично всі можливі види пошкоджень. До другого напряму відносяться експрес-методи, що застосовуються при експлуатації електродвигунів, але спрямовані на виявлення конкретного виду поломки.

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ Й АНАЛІЗ СТАЛИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ПРИ НАЯВНОСТІ В НИХ ДЕФЕКТІВ

Деякі методи діагностичного контролю технічного стану, визначення працездатності та усунення несправностей електричних машин виявляються неефективними для застосування на працюючій машині і не можуть запобігти виникненню несправностей.

Основні труднощі у вирішенні цієї проблеми полягають у тому, що окремі несправності електричних машин ще недостатньо вивчені для отримання діагностичної інформації та спеціальних інформативних параметрів або ознак (діагностичних параметрів), що характеризують зміну величин і властивостей електромагнітних коливань і акустичних процесів їх функції не були визначені з відповідними розладами [19].

Метою цього розділу є математичне моделювання усталених режимів роботи АД із захистом від короткого замикання за наявності різного роду несправностей (обмоток статора і ротору, а також механічної частини) та визначення залежностей діагностичні показники за ступенем розвитку розглянутих вад.

### 2.1 Пошкодження стержнів ротору

Для дослідження постійних режимів роботи АД з пошкодженими стрижнями КСК використовується математична модель [55] для розрахунку миттєвих значень струмів і напруг, встановлених на основі повних диференціальних рівнянь у фазових координатах статора (a, b, c) і в фазових координатах ротору (1, 2, ..., n), враховуючи, що глибокощілинний

ротор представляється як еквівалентний двоелементний ротор. У цьому випадку число фаз в обмотці ротору дорівнює числу короткозамкнених стержнів ротору. Відмінною особливістю даної моделі є те, що вона застосовна для глибокощілинних АМ з урахуванням явища зміщення струму в роторі. При розробці математичної моделі були зроблені наступні припущення:

- не враховується насичення магнітопроводу;
- Втрати сталі не враховуються;
- Передбачається, що фази обмоток однакові.

Вихідними даними для застосування математичної моделі є параметри двоконтурної схеми заміщення АД, розрахунок яких здійснюється за даними АД, отриманими за результатами експлуатації та випробувань за методикою, наведеною в [77]. Дані каталогу ІМ були використані для розрахунків оцінки в математичному моделюванні.

На основі аналізу пошкоджень електродвигунів (див. п. 1.1) висунуто гіпотезу про універсальність застосування як діагностичного параметра для виявлення різного роду несправностей АД струму постійного струму.

Для відстроювання від конструктивної несиметрії АД (струм зарядного пристрою двигуна без явних дефектів в обмотці ротору), несиметрії напруги живлення, а також коефіцієнту завантаження електродвигуна як діагностичного параметра більше зручно використовувати відносну частку постійного струму в струмі статора АД - коефіцієнти постійного струму  $k_{2i}$ , визначені за формулою:

$$k_{2i} = \frac{I_2}{I_1} 100\%, \quad (2.1)$$

де  $I_1, I_2$  – діючі або амплітудні значення складові токи відповідно ПП і ЗП.

Крім того, наведений вище критерій (2.1) необхідно доповнити ще одним критерієм - критерієм крутизни  $k_p$ -характеристики, що характеризує крутизна АМ-механічної характеристики в робочому діапазоні ковзання. При зламаних стрижнях SSC, оскільки ковзання sBP збільшується для того самого значення навантаження, вказане співвідношення зменшується порівняно зі значенням для працюючого двигуна. Такий же характер зміни нахилу зазначеної характеристичної кривої має місце і при зниженні напруги. Тому введено корекцію запропонованого критерію з урахуванням квадрата відношення номінальної напруги до напруги статора в експерименті. У відносних одиницях вираз для характерного критерію нахилу має вигляд

$$k_p = \frac{P/P_{ном}}{s/s_{ном}} \cdot \left(\frac{U_{ном}}{U}\right)^2, \quad (2.2)$$

де  $P_{ном}, s_{ном}, U_{ном}$  – номінальні значення відповідно до споживане АД активній потужності, ковзання й напруги статора АД;

$P, s, U$  – визначені за результатами контролю параметрів робочого режиму відповідно споживана АД активна потужність, ковзання й напруга статора АД.

Запропоновано також для діагностування дефектів КЗР використовувати узагальнений параметр діагностування АД із КЗР - коефіцієнт його справного стану, визначений як

$$k_{\partial} = \frac{c_i k_i + c_p k_p}{c_i + c_p}, \quad (2.3)$$

де  $k_i = \frac{I_1 - I_2}{I_1} = 1 - k_{2i}$  - коефіцієнт несиметрії струмів;

$c_i, c_p$  – вагові коефіцієнти, рівні  $1 \div 3$ , які надалі можуть бути уточнені на основі досвіду експлуатації електродвигуна.

Для справного двигуна  $k_\partial=1$ . Відхилення даного параметра в бік зниження від одиниці свідчить про наявність дефектів КЗР.

Шляхом математичного моделювання проведена оцінка інформативності діагностичних параметрів (коефіцієнту ЗП по струму  $k_{2i}$ , критеріїв  $k_p$  і  $k_\partial$ ) і розраховані залежності цих параметрів для різних видів АД 6-10 кВ із КЗР. На рисунках 2.1-2.3 приведені залежності діагностичних параметрів від числа обірваних стержнів КЗР, отримані для АД типу ДАЗО-13-67-6МУ1.

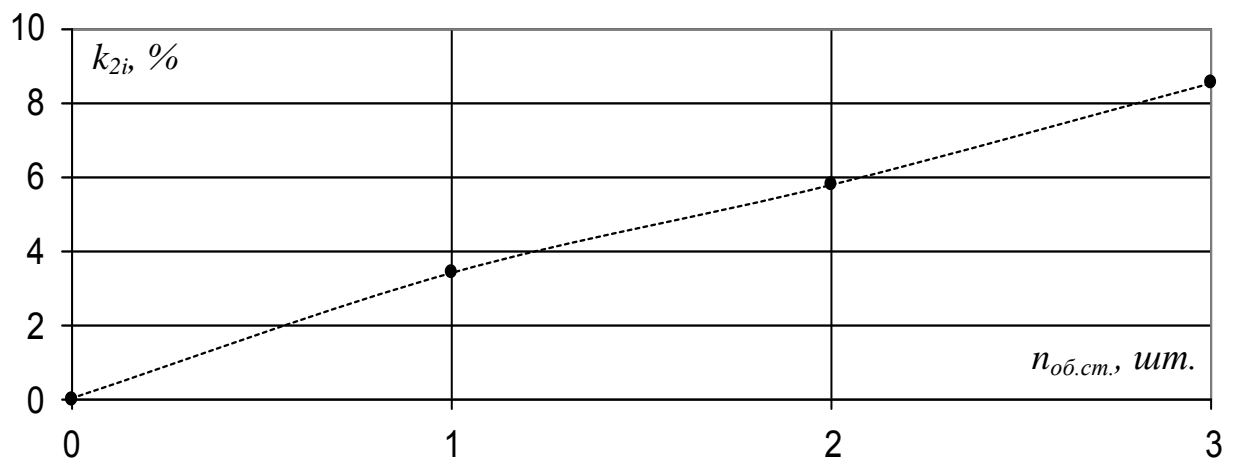


Рисунок 2.1 – Залежності коефіцієнту ЗП по струму  $k_{2i}$  від числа обірваних стержнів КЗР  $n_{об.ст.}$  у робочому режимі АД типу ДАЗО-13-67-6МУ1

Досліджуваний АД має наступні каталожні дані [82]:  $P_{ном} = 630$  кВт;  
 $U_{ном} = 6$  кВ;  $I_{ном} = 74$  А;  $S_{ном} = 0,015$ ;  $n_{ном} = 985$  про./мін.;  $\eta = 0,925$ ;  $\cos \varphi_{ном} = 0,89$ ;  $K_{пуск} = 6,1$ ;  $M_{пуск} = 1,0$ ;  $M_{макс} = 2,6$ ; кількість стержнів КЗР – 86.

За каталожним даними розраховані параметри двоконтурної схеми заміщення АД:  $X_m = 2,7$  о.е.;  $X_{os} = 0,055$  о.е.;  $R_{r1} = 0,016$  о.е.;  $R_{r2} = 0,125$  о.е.;  $X_{\sigma r1} = 0,178$  о.е.;  $X_{\sigma r2} = 0,274$  о.е.

Частота струму ЗП  $f_2$ , викликаного обривом стержнів КЗР АД, є функцією ковзання  $s$ , та визначається за формулою [7]:

$$f_2 = f_1(1 - 2s), \quad (2.4)$$

де  $f_1$  – частота живлячої напруги.

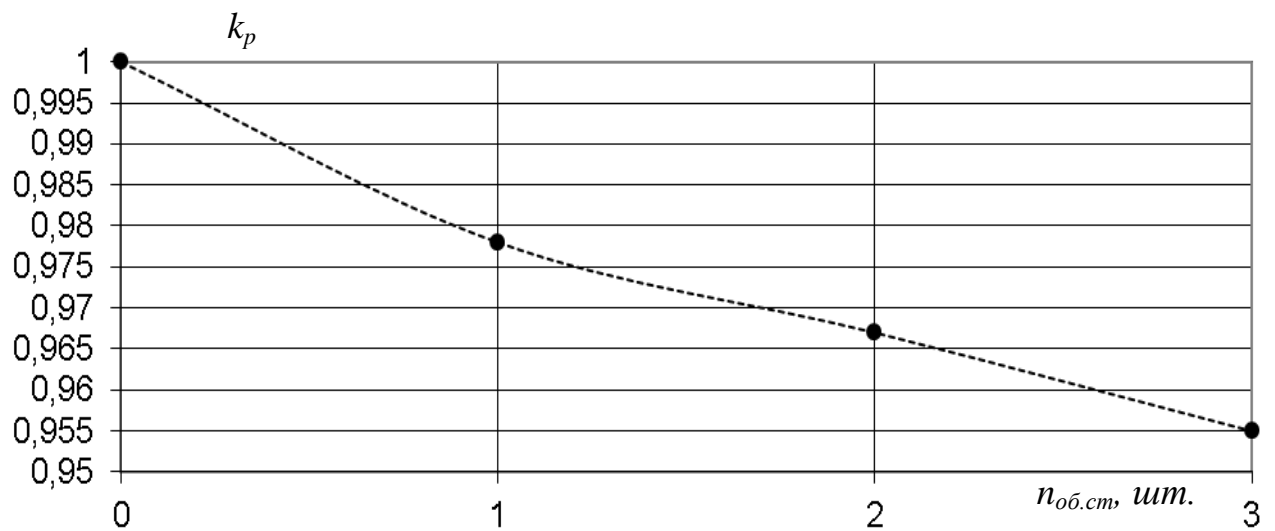


Рисунок 2.2 – Залежності критерію  $k_p$  від числа обірваних стержнів КЗР  $n_{об.ст.}$  у робочому режимі АД типу ДАЗО-13-67-6МУ1

Аналіз результатів математичного моделювання показав, що величина критерія кута нахилу механічної характеристики  $k_p$  в області робочих ковзань та не залежить від коефіцієнту завантаження АД  $k_{загр}$  і залежить лише від стану КЗР (рисунок 2.2).





$$k_p = \frac{P/P_{ном}}{S/S_{ном}} \cdot \frac{(z_2-1)}{(z_2+1)}, \quad (2.5)$$

$z_2$  – число пазів КЗР АД, шт.

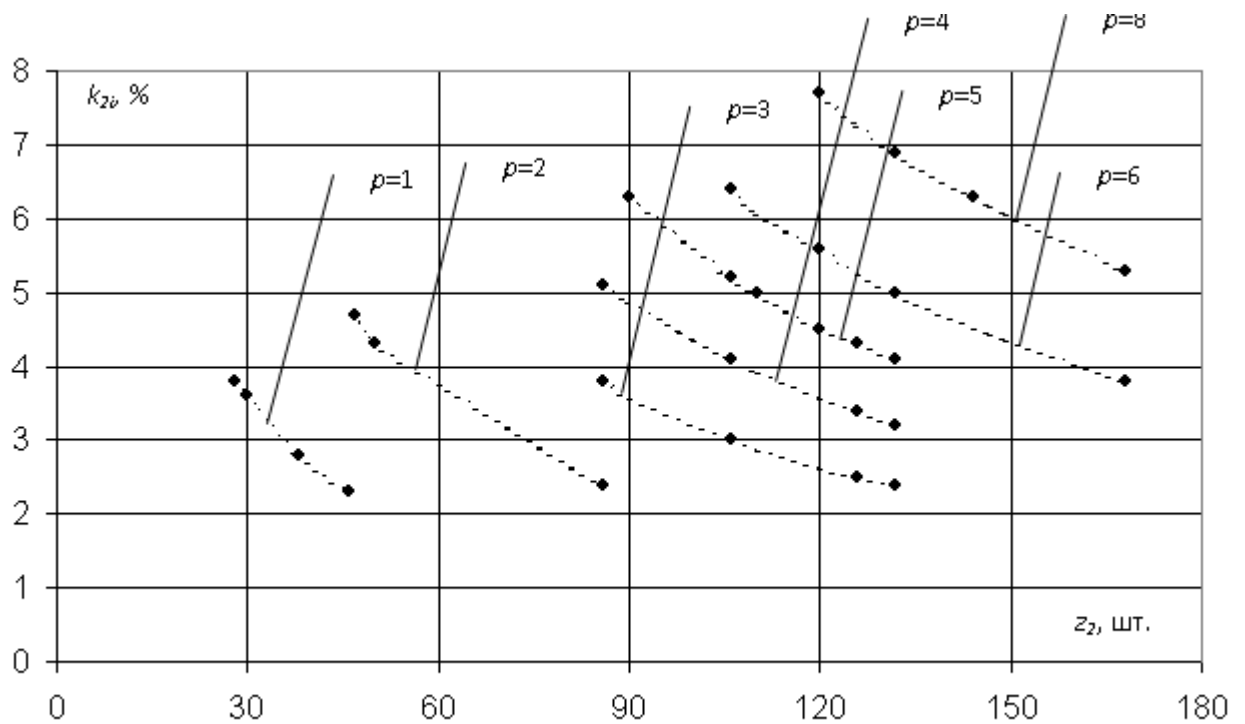


Рисунок 2.4 – Узагальнені залежності коефіцієнту ЗП по струму  $k_{z_i}$  при обривові одного стрижня від числа пазів КЗР  $z_2$  для АД з різним числом пар полюсів  $p$

На підставі наведених вище узагальнених залежностей коефіцієнту ЗП по струму  $k_{z_i}$  (див. рисунку 2.4) і формули (2.5) для визначення критерію  $k_p$  при обривові одного стрижня від числа пазів КЗР отримані узагальнені залежності критерію справності  $k_d$  при обривові одного стрижня від числа пазів КЗР для АД з різним числом пар полюсів  $p$  (рисунок 2.5).

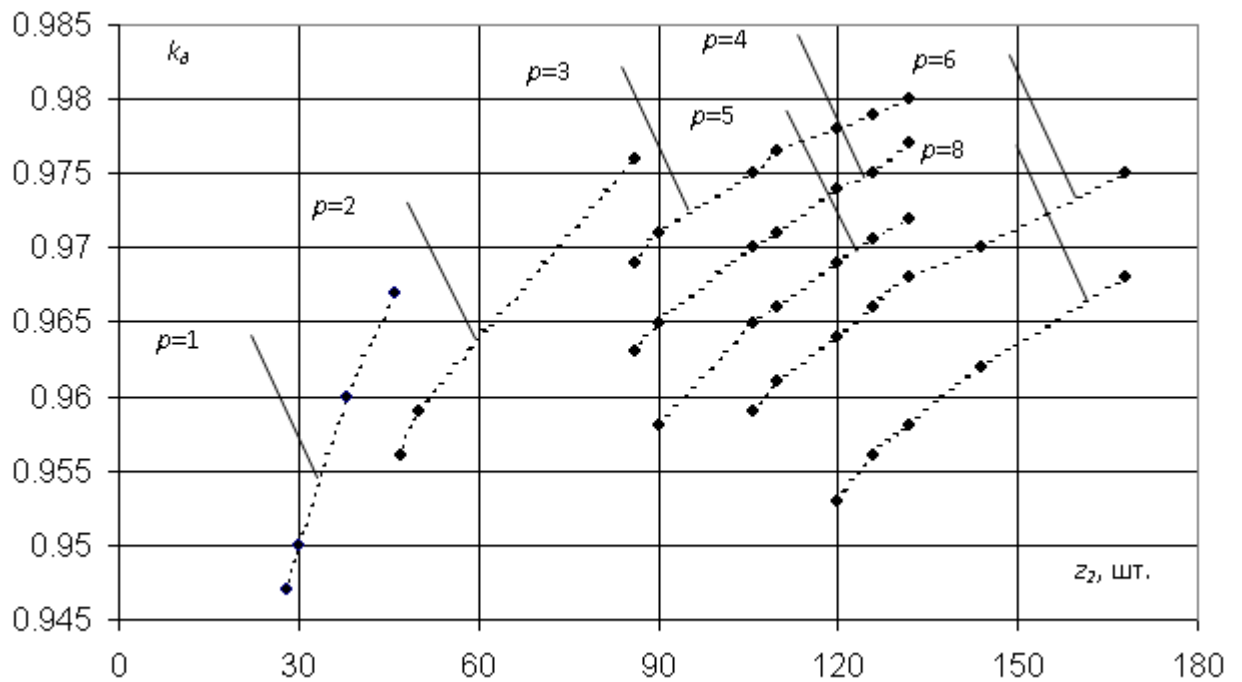


Рисунок 2.5 – Узагальнені залежності критерію справності КЗР АД  $k_d$  при обривові одного стрижня від числа пазів КЗР  $z_2$  для АД з різним числом пар полюсів  $p$  ( $c_i = c_p = 1$ )

Результати розрахунку величини критеріїв  $k_{2i}$ ,  $k_p$  і  $k_d$  для різних типів АД 6 кВ із КЗР приведені в додатку В.

Таким чином, проведені дослідження показали, що коефіцієнт ЗП по струму  $k_{2i}$ , критерій кута нахилу механічної характеристики АД із КЗР  $k_p$  і узагальнений критерій справності  $k_d$  мають гарну інформативність при діагностуванні технічного стану КЗР.

Отримані узагальнені залежності коефіцієнту ЗП по струму  $k_{2i}$  і критерії справності  $k_d$  при обривові одного стрижня від числа пазів КЗР при різному числі пар полюсів АД й виразу для розрахунку критерію кута нахилу механічної характеристики  $k_p$  при обривові одного стрижня КЗР використовуються для визначення їхніх граничних значень при діагностуванні електродвигунів.

## 2.2 Виткові замикання в обмотці статора

Для дослідження залежності діагностичних параметрів у режимі роботи АД при виткових замиканнях в обмотці статора використано методику, наведену в [44]. Технологія заснована на визначенні власних і взаємних індуктивностей ланцюгів обмотки статора. Це пояснюється тим, що при малій кількості витків обидві частини обмотки статора знаходяться в одних пазах, тому їх взаємна індуктивність велика. Індуктивність замкнутих витків мала, і при відносно малому струмі в іншій частині обмотки струм в пошкоджених витках може досягати великих значень.

Для визначення залежності параметрів робочого режиму АД від числа котушок, що замкнули, обмотки *статора*  $q_k$  проведені розрахунки для АД, параметри якого приведені в [44]: *потужність*  $P_{ном} = 500$  кВт; *напруга*  $U_{ном} = 6000$  В; *номінальний струм*  $I_{ном} = 54$  А; *число полюсів*  $p = 4$ ; *індуктивність холостого ходу*  $X_0 = 150$  Ом; *індуктивність короткого замикання*  $X_k = 10,5$  Ом; *індуктивність розсіювання*  $X_R = 5,3$  Ом; *число котушок у фазі*  $= 20$ ; *число пазів статора*  $= 60$ ; *число пазів на полюс і фазу*  $q = 5$ ; *скорочення кроку обмотки*  $\beta = 0,735$ ;  $h_1 = 63,5$  мм;  $h_2 = 9,0$  мм;  $h_3 = 8,0$  мм;  $b_n = 16,0$  мм.

При розрахунках зроблене припущення, що струм ЗП у випадку відсутності замкнутих витків дорівнює нулю. Прийнято, що двигун працює в номінальному режимі, тобто  $i_0 = I_{ном}$ .

На рисунку 2.6 приведені залежності струмів АД від числа замкнутих витків обмотки статора.

Аналіз отриманих залежностей показав, що накопичувальний струм вже має добру інформативність при короткому замиканні на декілька відсотків витків обмотки статора АД. Так, при роботі АД в номінальному режимі і замкнутих 5% витків статора обмотки статора струм СП становить 1,46 А. При цьому сила струму в пошкодженій фазі становить 60 А,

мінімальне значення при якій спрацює релейний захист, щоб вимкнути АД (струм захисного відключення через перевантаження  $I_{с.з.}=1,1I_{ном}$  [2]). При меншому коефіцієнті завантаження АД релейний захист зреагує на замикання ще більшого числа витків, що може привести до розвитку ушкодження й збільшенню обсягів ремонтних робіт.

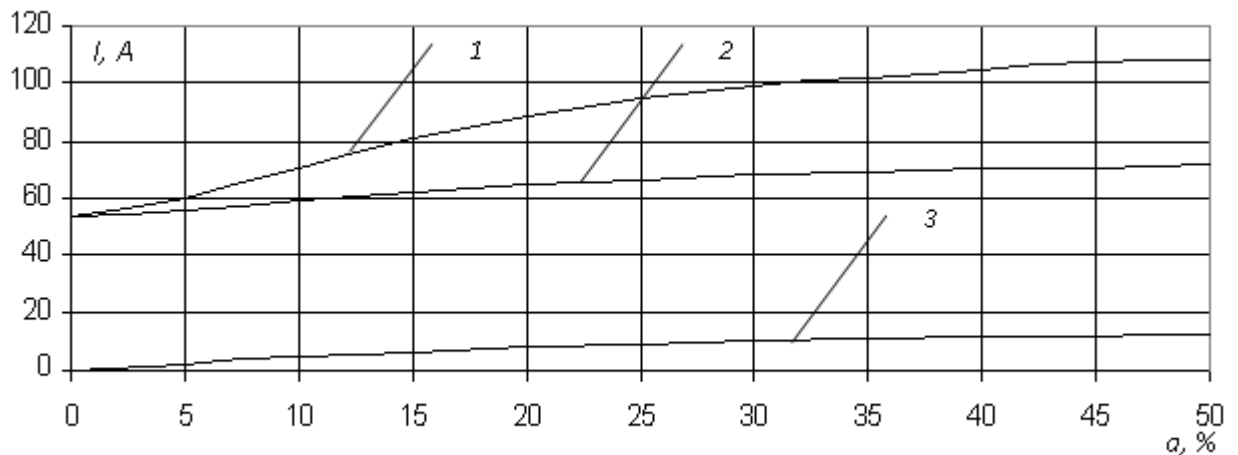


Рисунок 2.6 – Залежності струмів АД від числа замкнутих витків обмотки статора: 1 - струм в ушкодженій фазі; 2 - струм в «здорових» фазах; 3 - струм ЗП

Несправності котушки - це несиметричні несправності, які призводять до спотворення діаграми струму і напруги в нормальному режимі і пов'язані з падінням моменту двигуна. Ступінь зниження залежить від таких факторів, як співвідношення потужності (опору) пошкодженого двигуна і живильної мережі, відносно числа замкнутих витків, наявність короткого замикання на ділянці. Контактний опір і т.д. Зменшення крутного моменту двигуна в разі несправності котушки і спотворення лінійних струмів характеризується коефіцієнтом поточного навантаження  $k_{2i}$  (2.1).

Для конкретного типу АД й при відомій числа замкнутих витків  $k_{2i}$  можна визначити по формулі [23]



Таким чином, якщо значення критерію працездатності  $k_d$  падає нижче одиниці і при цьому зростають фазні струми АД, то робиться висновок про виткове замикання в обмотці статора. При цьому сила струму в пошкодженій фазі зростає набагато більше, ніж в «здорових» фазах, а частота струму зарядного пристрою дорівнює частоті напруги живлення.

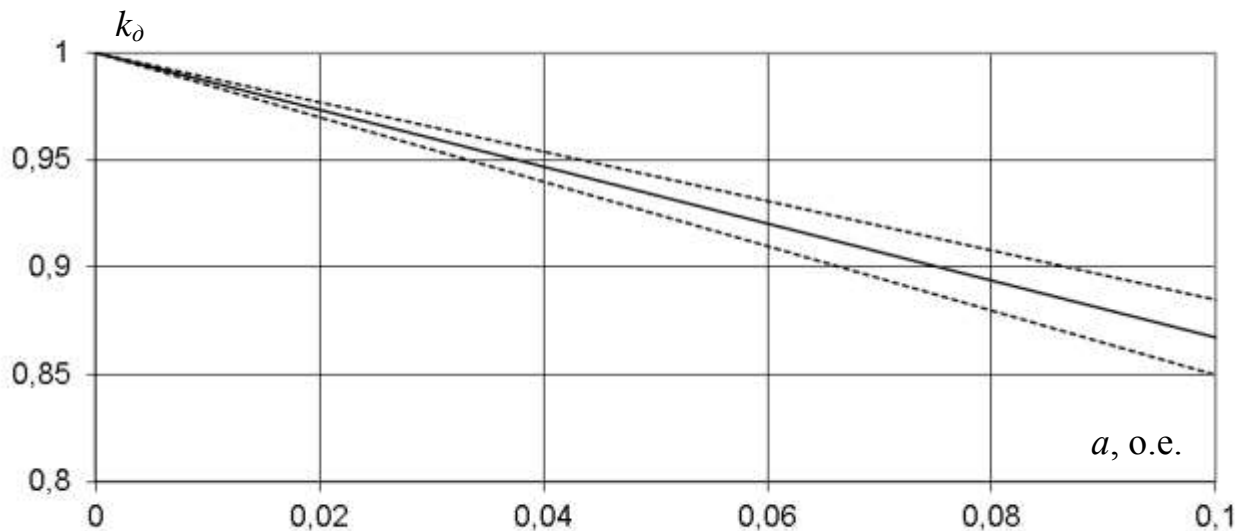


Рисунок 2.8 - Залежність величини критерію справності електродвигуна  $k_d$  від числа замкнутих витків  $a$

### 2.3 Обрив паралельних віток обмотки статора

Котушки групи обмоток статора двигунів змінного струму часто з'єднують паралельно для підвищення надійності та зменшення діаметру дроту. Під час їх роботи нерідкі випадки обриву однієї або кількох паралельних віток, що призводить до виникнення несиметрій струму. Нагрівання окремих вузлів машини в цьому режимі роботи може бути досить значним і призвести до різкого скорочення терміну служби ізоляційних матеріалів обмоток двигуна.

Вихідна схема для розрахунку обриву паралельних віток обмотки статора електродвигуна наведена на рисунку 2.9.

Вихідними даними для розрахунку є опори всіх паралельних віток обмотки статора двигуна  $X$  і система живлячих напруг  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ .

$$\bar{U}_{AB} = U_{\text{Л}} e^{j30^\circ}; \bar{U}_{BC} = U_{\text{Л}} e^{-j90^\circ}; \bar{U}_{CA} = U_{\text{Л}} e^{j150^\circ};$$

де  $U_{\text{Л}}$  – величина амплітуди лінійної напруги.

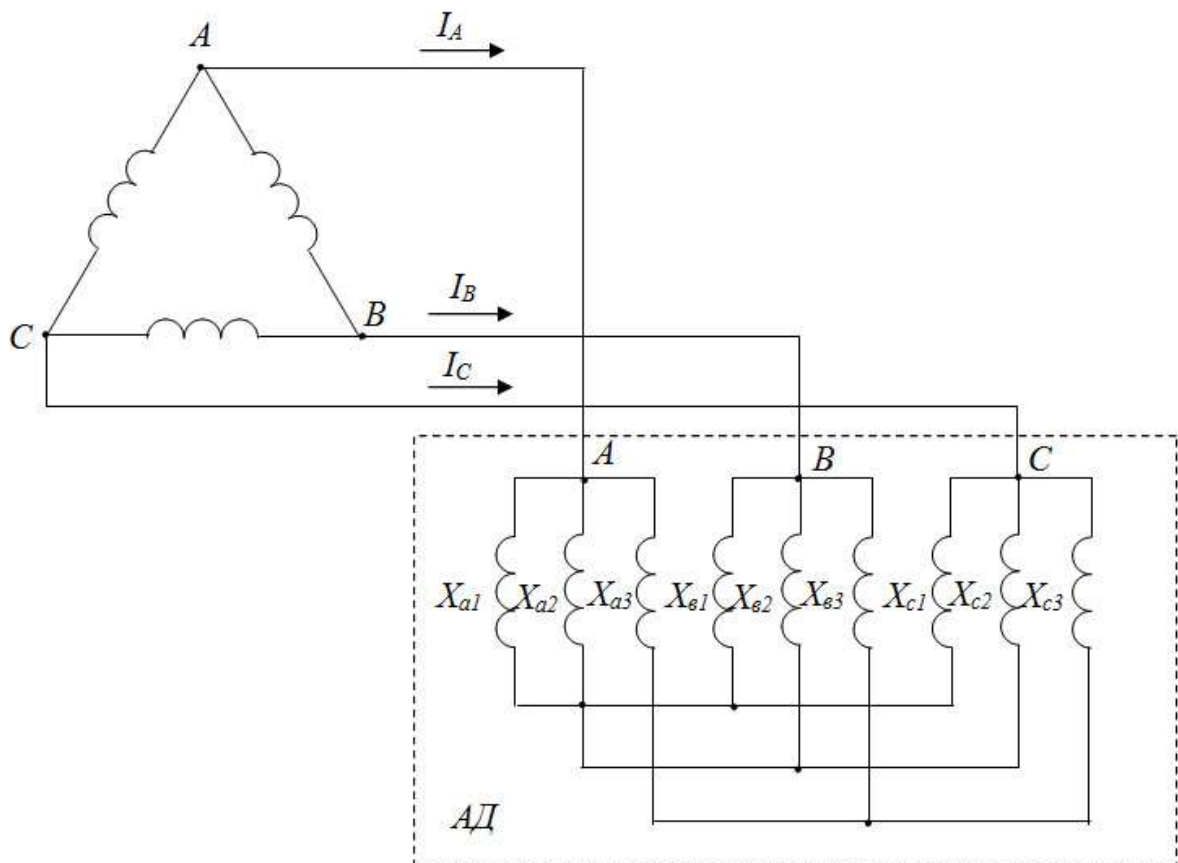


Рисунок 2.9 - Вихідна схема для розрахунку обриву паралельних віток обмотки статора електродвигуна

Згідно першого закону Кирхгофа

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0. \quad (2.7)$$

З векторної діаграми живлячих напруг

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B; \bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C; \bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A \quad (2.8)$$

Згідно другого закону Кирхгофа

$$\bar{I} = \bar{U} \Sigma Y, \quad (2.9)$$

де  $Y = 1/X$  – провідність вітки.

Згідно (2.7) і (2.9) маємо:

$$\bar{U}_A Y_A + \bar{U}_B Y_B + \bar{U}_C Y_C = 0, \quad (2.10)$$

де  $Y_A = (m - n_a)Y$  – провідність фази  $A$  обмотки статора;

$Y_B = (m - n_b)Y$  – провідність фази  $B$  обмотки статора;

$Y_C = (m - n_c)Y$  – провідність фази  $C$  обмотки статора;

$m$  – кількість паралельних віток обмотки статора;

$n_a, n_b, n_c$  – кількість обірваних віток відповідно у фазах  $A, Y$  и  $C$ .

З (2.8) маємо:

$$\bar{U}_A = \bar{U}_{AB} + \bar{U}_B; \quad (2.11)$$

$$\bar{U}_A = \bar{U}_C - \bar{U}_{CA}; \quad (2.12)$$

$$\bar{U}_B = \bar{U}_A - \bar{U}_{AB}; \quad (2.13)$$

$$\bar{U}_B = \bar{U}_{BC} + \bar{U}_C; \quad (2.14)$$

$$\bar{U}_C = \bar{U}_{CA} + \bar{U}_A; \quad (2.15)$$

$$\bar{U}_C = \bar{U}_B - \bar{U}_{BC}. \quad (2.16)$$

Знаходимо фазні напруги  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  із виразу (2.10) шляхом підстановки в нього виразів (2.13) і (2.15), (2.11) і (2.16), (2.12) і (2.14) відповідно:

$$\bar{U}_A = \frac{\bar{U}_{AB}Y_B - \bar{U}_{CA}Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}. \quad (2.17)$$

$$\bar{U}_B = \frac{\bar{U}_{BC}Y_C - \bar{U}_{AB}Y_A}{Y_A + Y_B + Y_C}. \quad (2.18)$$

$$\bar{U}_C = \frac{\bar{U}_{CA}Y_A - \bar{U}_{BC}Y_B}{Y_A + Y_B + Y_C}. \quad (2.19)$$

З урахуванням прийнятих допущень вирази для фазних напруг можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{U}_A = & L \frac{d i_{a1}}{dt} + M_1 \frac{d i_{a2}}{dt} + M_1 \frac{d i_{a3}}{dt} + M_2 \frac{d i_{b1}}{dt} + M_2 \frac{d i_{b2}}{dt} + M_2 \frac{d i_{b3}}{dt} + M_2 \frac{d i_{c1}}{dt} + \\ & + M_2 \frac{d i_{c2}}{dt} + M_2 \frac{d i_{c3}}{dt} + L \frac{d i_{a2}}{dt} + M_1 \frac{d i_{a1}}{dt} + M_1 \frac{d i_{a3}}{dt} + M_2 \frac{d i_{b1}}{dt} + M_2 \frac{d i_{b2}}{dt} + M_2 \frac{d i_{b3}}{dt} + \\ & + M_2 \frac{d i_{c1}}{dt} + M_2 \frac{d i_{c2}}{dt} + M_2 \frac{d i_{c3}}{dt} + L \frac{d i_{a3}}{dt} + M_1 \frac{d i_{a1}}{dt} + M_1 \frac{d i_{a2}}{dt} + M_2 \frac{d i_{b1}}{dt} + M_2 \frac{d i_{b2}}{dt} + \\ & + M_2 \frac{d i_{b3}}{dt} + M_2 \frac{d i_{c1}}{dt} + M_2 \frac{d i_{c2}}{dt} + M_2 \frac{d i_{c3}}{dt}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_B = & L \frac{di_{b1}}{dt} + M_1 \frac{di_{b2}}{dt} + M_1 \frac{di_{b3}}{dt} + M_2 \frac{di_{a1}}{dt} + M_2 \frac{di_{a2}}{dt} + M_2 \frac{di_{a3}}{dt} + M_2 \frac{di_{c1}}{dt} + \\ & + M_2 \frac{di_{c2}}{dt} + M_2 \frac{di_{c3}}{dt} + L \frac{di_{b2}}{dt} + M_1 \frac{di_{b1}}{dt} + M_1 \frac{di_{b3}}{dt} + M_2 \frac{di_{a1}}{dt} + M_2 \frac{di_{a2}}{dt} + M_2 \frac{di_{a3}}{dt} + \\ & + M_2 \frac{di_{c1}}{dt} + M_2 \frac{di_{c2}}{dt} + M_2 \frac{di_{c3}}{dt} + L \frac{di_{b3}}{dt} + M_1 \frac{di_{b1}}{dt} + M_1 \frac{di_{b2}}{dt} + M_2 \frac{di_{a1}}{dt} + M_2 \frac{di_{a2}}{dt} + \\ & + M_2 \frac{di_{a3}}{dt} + M_2 \frac{di_{c1}}{dt} + M_2 \frac{di_{c2}}{dt} + M_2 \frac{di_{c3}}{dt}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_C = & L \frac{di_{c1}}{dt} + M_1 \frac{di_{c2}}{dt} + M_1 \frac{di_{c3}}{dt} + M_2 \frac{di_{b1}}{dt} + M_2 \frac{di_{b2}}{dt} + M_2 \frac{di_{b3}}{dt} + M_2 \frac{di_{a1}}{dt} + \\ & + M_2 \frac{di_{a2}}{dt} + M_2 \frac{di_{a3}}{dt} + L \frac{di_{c2}}{dt} + M_1 \frac{di_{c1}}{dt} + M_1 \frac{di_{c3}}{dt} + M_2 \frac{di_{b1}}{dt} + M_2 \frac{di_{b2}}{dt} + M_2 \frac{di_{b3}}{dt} + \\ & + M_2 \frac{di_{a1}}{dt} + M_2 \frac{di_{a2}}{dt} + M_2 \frac{di_{a3}}{dt} + L \frac{di_{c3}}{dt} + M_1 \frac{di_{c1}}{dt} + M_1 \frac{di_{c2}}{dt} + M_2 \frac{di_{b1}}{dt} + M_2 \frac{di_{b2}}{dt} + \\ & + M_2 \frac{di_{b3}}{dt} + M_2 \frac{di_{a1}}{dt} + M_2 \frac{di_{a2}}{dt} + M_2 \frac{di_{a3}}{dt}. \end{aligned}$$

Тому що струм синусоїдальний, то можемо перейти від похідних  $\frac{di}{dt}$

до комплексних величин  $j\omega I$ . Тоді після нескладних перетворень маємо:

$$\bar{U}_A = j\omega(L + M_1)(m - n_a)\bar{I}_{1A} + 3j\omega M_2(m - n_b)\bar{I}_{1B} + 3j\omega M_2(m - n_c)\bar{I}_{1C};$$

$$\bar{U}_B = j\omega(L + M_1)(m - n_b)\bar{I}_{1B} + 3j\omega M_2(m - n_a)\bar{I}_{1A} + 3j\omega M_2(m - n_c)\bar{I}_{1C};$$

$$\bar{U}_C = j\omega(L + M_1)(m - n_c)\bar{I}_{1C} + 3j\omega M_2(m - n_a)\bar{I}_{1A} + 3j\omega M_2(m - n_b)\bar{I}_{1B}.$$

Дорівнявши ці формули для фазних напруг до виразів (2.17-2.19), одержуємо систему із трьох рівнянь, де невідомими є струми в паралельних вітках фаз  $\bar{I}_{1A}$ ,  $\bar{I}_{1B}$ ,  $\bar{I}_{1C}$ :

$$\begin{aligned}
\frac{\bar{U}_{AB}Y_B - \bar{U}_{CA}Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} &= j\omega(L + M_1)(m - n_a)\bar{I}_{1A} + \\
&+ 3j\omega M_2(m - n_b)\bar{I}_{1B} + 3j\omega M_2(m - n_c)\bar{I}_{1C}; \\
\frac{\bar{U}_{BC}Y_C - \bar{U}_{AB}Y_A}{Y_A + Y_B + Y_C} &= j\omega(L + M_1)(m - n_b)\bar{I}_{1B} + \\
&+ 3j\omega M_2(m - n_a)\bar{I}_{1A} + 3j\omega M_2(m - n_c)\bar{I}_{1C}; \\
\frac{\bar{U}_{CA}Y_A - \bar{U}_{BC}Y_B}{Y_A + Y_B + Y_C} &= j\omega(L + M_1)(m - n_c)\bar{I}_{1C} + \\
&+ 3j\omega M_2(m - n_a)\bar{I}_{1A} + 3j\omega M_2(m - n_b)\bar{I}_{1B}.
\end{aligned} \tag{2.20}$$

У таблиці 2.2 приведені значення відносних фазних струмів, а також струму ПП  $I_1$ , струму ЗП  $I_2$  і коефіцієнти ЗП  $k_{2i}$ , що отримані шляхом рішення системи рівнянь (2.20) для випадків обриву різного числа паралельних віток фаз статора двигуна.

Приведені результати показують, що по величині струму ЗП можна з великою точністю виявляти обрив паралельних віток статорних обмоток електродвигунів. Частота струму ЗП при цьому дорівнює частоті живлячої напруги  $f_2=f_1$ . Ушкоджена фаза знаходиться шляхом порівняння величини струму у всіх трьох фазах АД. Величина струму в ушкодженій фазі менше, ніж в «здорових» фазах.

На рисунку 2.10 приведені залежності критерію справності електродвигуна  $k_d$  від числа обірваних віток обмотки статора АД, а на рисунку 2.11 - залежності струмів в ушкодженій  $I_{новр}$  і «здорових»  $I_{зд}$  фазах при обривові однієї паралельної вітки обмотки статора.

Ушкоджений двигун необхідно якнайшвидше вивести в ремонт, тому що несиметрія струмів викликає додаткове нагрівання ротору й може привести до розвитку інших ушкоджень.

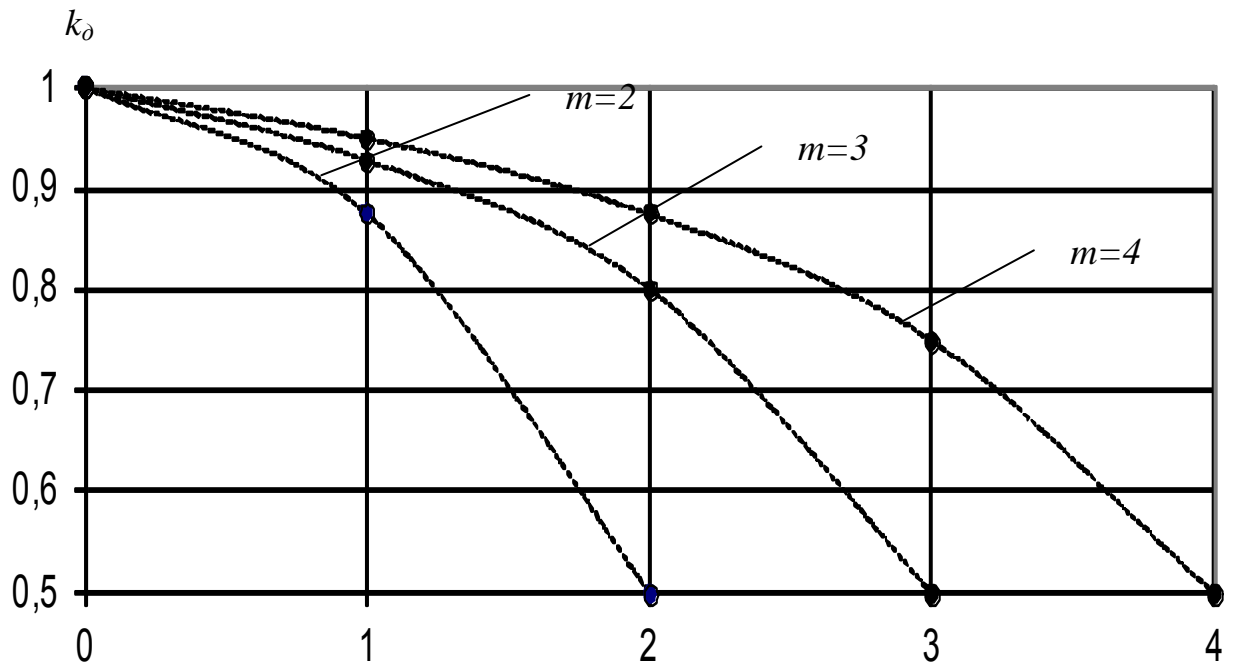


Рисунок 2.10 – Кількість обірваних паралельних віток обмотки, шт

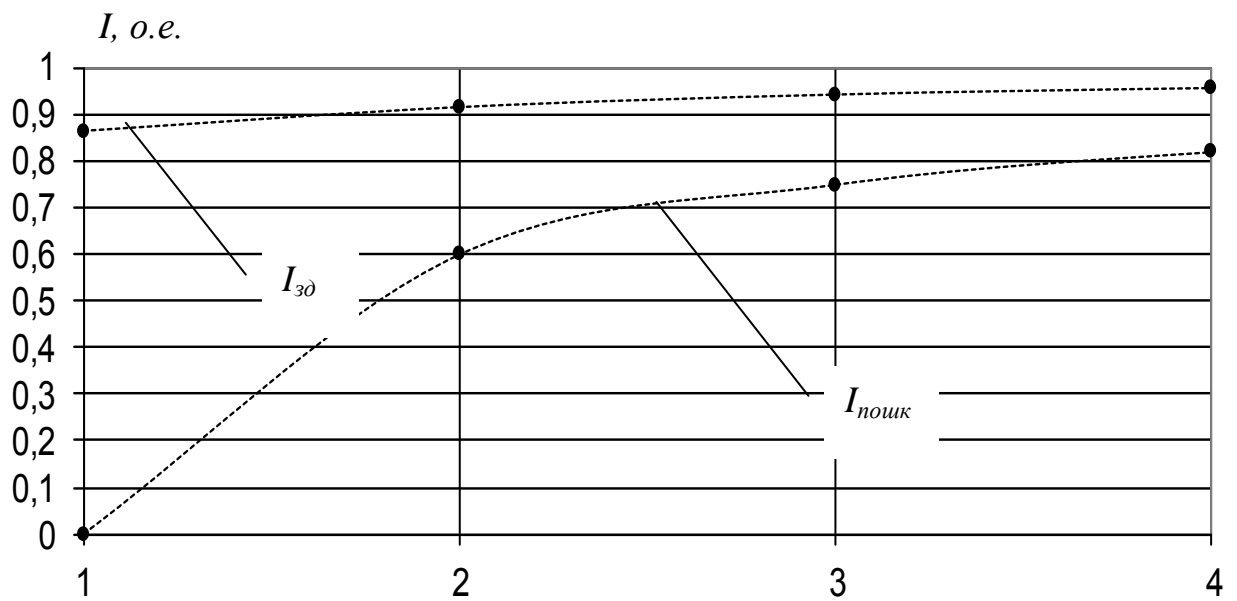


Рисунок 2.11 - Кількість паралельних віток обмотки статора, шт



механічних дефектів у методиці встановлена з застосуванням загальноприйнятої еквівалентної схеми заміщення АД.

Як видно з використовуваної методики, струм статора при механічних ушкодженнях АД містить складові із частотами, рівними частоті джерела живлення  $\omega_1$ , різниці частот джерела живлення й обертання ротору  $\beta = \omega_1 - \alpha$  і сумі цих частот  $\gamma = \omega_1 + \alpha$ .

Якщо машина має  $p$  пар полюсів, то частоти складових можна розрахувати по формулах [8]:

$$\beta' = \frac{\beta}{2\pi} = \frac{\omega_1}{2\pi} \left(1 + \frac{s-1}{p}\right); \quad \gamma' = \frac{\gamma}{2\pi} = \frac{\omega_1}{2\pi} \left(1 + \frac{1-s}{p}\right). \quad (2.21)$$

Прийнявши  $s=s_0$  і частоту живильної мережі рівною 50 Гц, можна оцінити діапазон зміни  $\beta'$  і  $\gamma'$ . Обмежившись режимами роботи АД, при яких ковзання може змінюватися від 0,001 до 0,1, отримані діапазони зміни частот  $\beta'$  і  $\gamma'$  при різному числі пар полюсів АД, приведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Діапазон частот складові токи статора, що виникають при наявності дефектів механічної частини АД

Число пар полюсів	$\beta'$ , Гц	$\gamma'$ , Гц
1	0,5÷5	99,5÷95
2	25,025÷27,5	74,975÷72,5
3	33,35÷35	66,65÷65
4	37,5÷38,75	62,5÷61,25
5	40,01÷41	59,99÷59
6	41,75÷42,5	58,25÷57,5
8	43,75÷44,375	56,25÷55,625

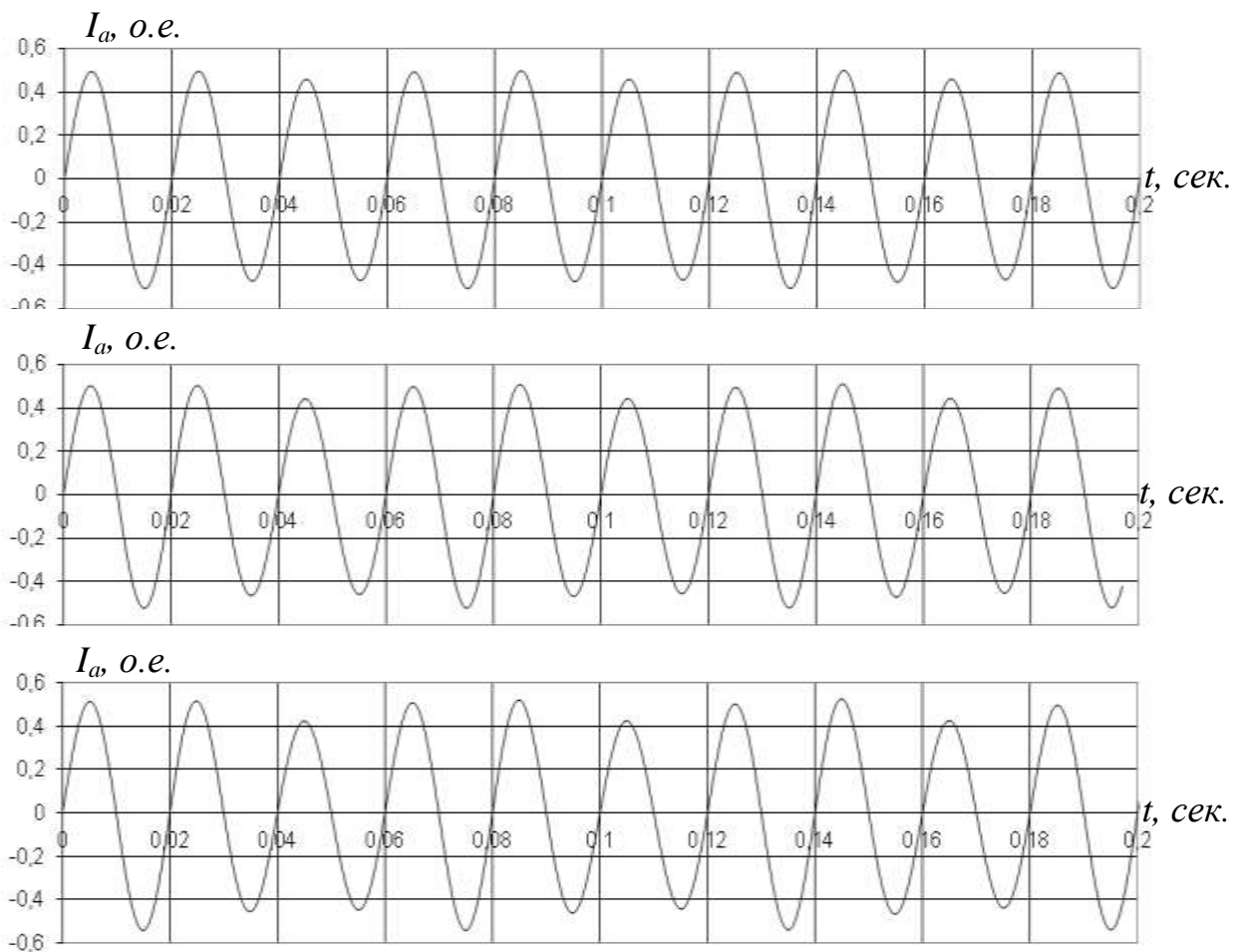


Рисунок 2.12 – Осцилограми фазного струму АД при наявності дефектів механічної частини: а)  $s_a/s_0 = \frac{1}{5}$ ; б)  $s_a/s_0 = \frac{1}{3}$ ; в)  $s_a/s_0 = \frac{1}{2}$

Проведено математичне моделювання режимів роботи при наявності дефектів механічної частини АД типу ДАЗО- 13-67-6МУ1, що має наступні каталожні дані [82]:  $P_{ном} = 630$  кВт;  $U_{ном} = 6$  кВ;  $I_{ном} = 74$  А;  $S_{ном} = 0,015$ ;  $n_{ном} = 985$  про./мін.;  $\eta = 0,925$ ;  $\cos \varphi_{ном} = 0,89$ ;  $K_{пуск} = 6,1$ ;  $M_{пуск} = 1,0$ ;  $M_{макс} = 2,6$ ;  $GD^2 = 0,415$  т\*м<sup>2</sup>.

Проведені дослідження показали, що зі збільшенням ступеню дефекту механічної частини АД (збільшенням відношення  $s_a/s_0$ ) зростає

величина пульсацій фазних струмів статора АД й величина складових струмів статора АД із частотами  $\beta'$  і  $\gamma'$  (рисунок 2.12-2.13).

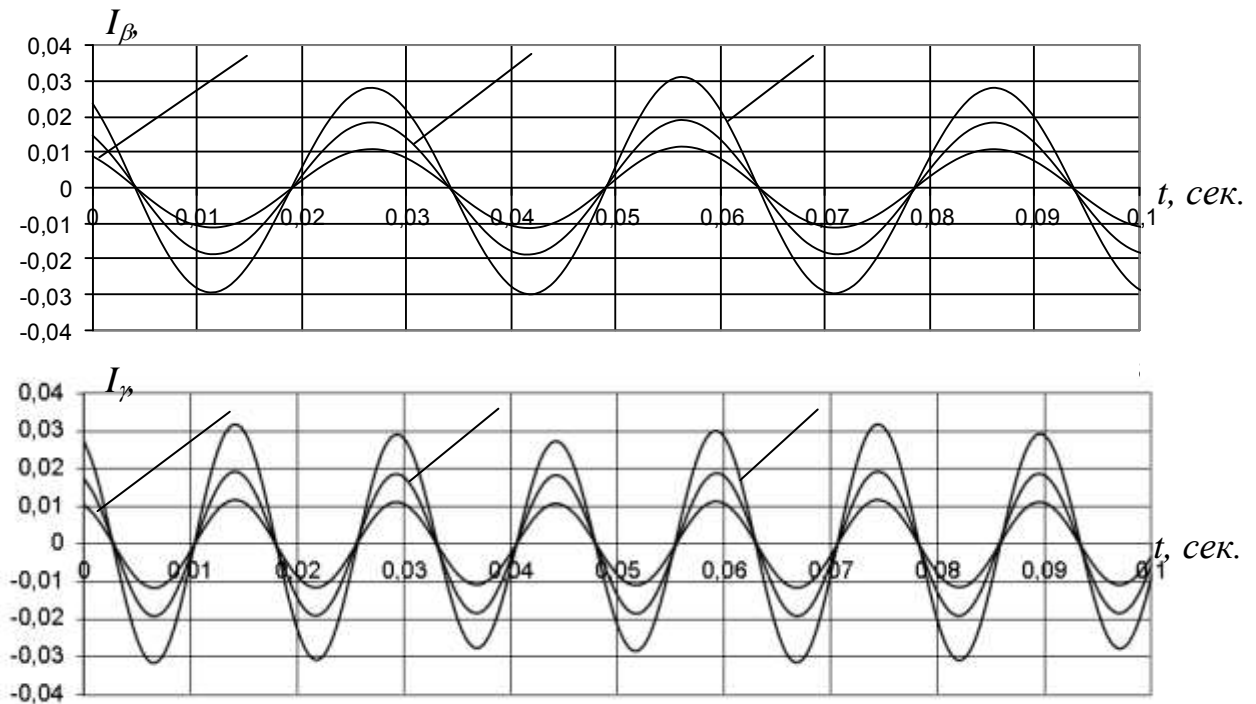


Рисунок 2.13 – Осцилограми складового струму статора АД  $I_\beta$  (а) і  $I_\gamma$

(б) при наявності дефектів механічної частини: 1 -  $\frac{s_a}{s_0} = \frac{1}{5}$ ; 2 -  $\frac{s_a}{s_0} = \frac{1}{3}$ ; 3 -

$$\frac{s_a}{s_0} = \frac{1}{2}$$

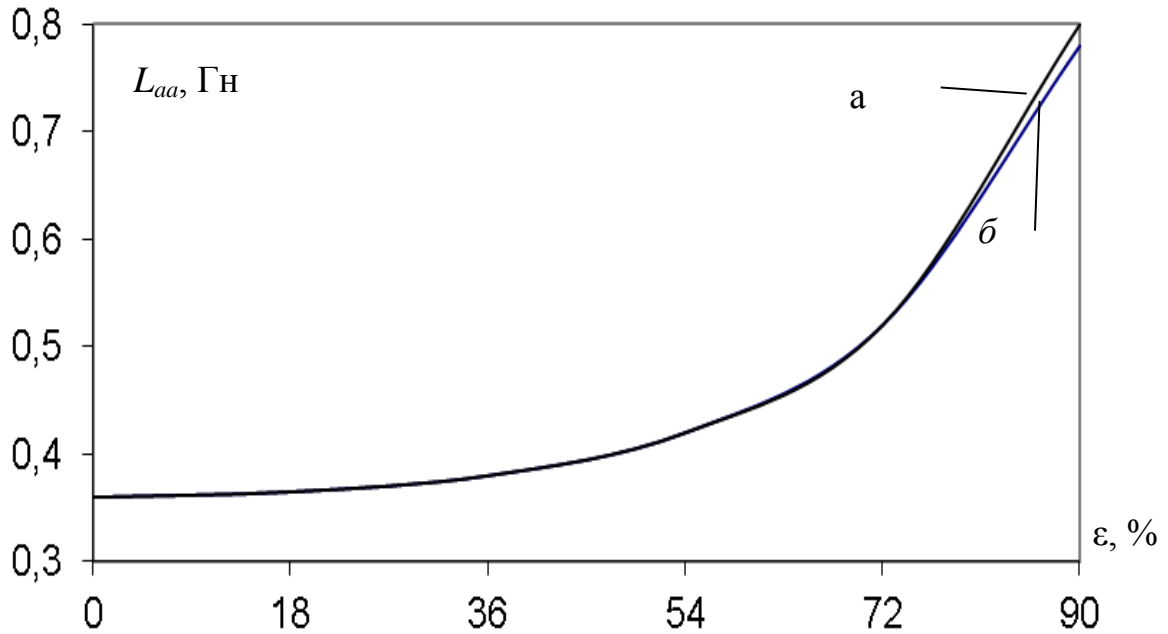
Як діагностичний параметр для визначення технічного стану механічної частини АД можна використовувати також струм ЗП. У таблиці 2.4 приведені залежності коефіцієнту несиметрії по струму  $k_{2i}$  від ступеню розвитку дефекту механічної частини при різному числі пар полюсів АД  $p$ .

Проведені на математичній моделі дослідження показали, чим більше полюсів має машина, тим менш проявляються дефекти механічної частини при використанні як діагностичний параметр струму ЗП.





коефіцієнт потужності працюючого двигуна на холостому ході нижче, ніж у двигуна з ексцентриковим ротором.



а – динамічний ексцентриситет; б – статичний ексцентриситет

Рисунок 2.15 – Зміна  $L_{aa}$  у функції рівня ексцентриситету  $\epsilon$ , %:

Таблиця 2.5 - Розрахунковий і обмірюваний коефіцієнт потужності

	Моделювання		Експеримент	
	Холостий хід	Повне навантаження	Холостий хід	Повне навантаження
Випадок 1	0,32	0,836	0,263	0,85
Випадок 2	0,483	0,864	0,493	0,845

## Висновки до розділу 2

1. Запропоновано новий комплексний критерій діагностування обмоток статора й ротору АД із КЗР - критерій справності, заснований на використанні відношення симетричних складові токи статора ЗП і ПП і кута нахилу механічної характеристики АД із КЗР (відношення величини споживаної АД активної потужності до ковзання) в області робочих ковзань.

2. Аналіз результатів математичного моделювання сталих режимів роботи АД із КЗР при наявності різних видів дефектів (Виткові замикання, обрив паралельних віток обмотки статора й стержнів КЗР, дефекти механічної частини) підтвердив ефективність застосування як діагностичні параметри симетричних складових ПП і ЗП струму статора, кута нахилу механічної характеристики АД й формованого на основі цих параметрів комплексного критерію справності.

3. Уперше запропоновані узагальнені залежності комплексного критерію справності електродвигуна для АД із КЗР різних типів при різних видах дефектів обмоток статора й ротору: при витковому замиканні у фазі статора, при обривові паралельних віток обмотки статора, при обривові одного стрижня КЗР.

4. Крім діагностування дефектів обмоток статора й ротору АД із КЗР на підставі контролю миттєвих значень фазних струмів і напруг з застосуванням відомих методів можна виявляти дефекти механічної частини електродвигуна.

### 3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІІ СТЕНДУ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК РОТОРУ ТА СТАТОРА АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

3.1 Аналіз залежностей діагностичних параметрів при обривові стержнів короткозамкненого ротору.

Для експериментальних досліджень режимів роботи АД використовувався спеціальний стенд. Схема стенду та його опис наведені в розробленій програмі експериментальних досліджень стаціонарних режимів роботи експериментального АД та його діагностичної системи (Додаток А).

Для дослідження роботи АД у разі обриву стержнів короткого замикання використовувався експериментальний АД 0,4 кВ, ротор якого модернізовано з можливістю імітації обривів стержнів обмотки. Для цього збоку зрізали короткозамкнені кільця і насадили на знятий ротор, а в усіх стрижнях з обох сторін просвердлили різьбові отвори. Проведена модернізація дозволяє імітувати обриви короткозамкнених стержнів обмотки ротора. Для цього за допомогою викрутки через отвори в бічних кришках відкручуємо гвинти, які з'єднують шток з короткозамкненими кільцями.

Запропонований метод моделювання переломів стрижня є сприятливим для дослідження, але має наступні недоліки [55]:

- з'єднання штока з КЗР, виконане круглим болтом, не повністю відповідає формі канавки двигуна;
- металеві болти з феромагнітного матеріалу змінюють магнітне поле ротора;

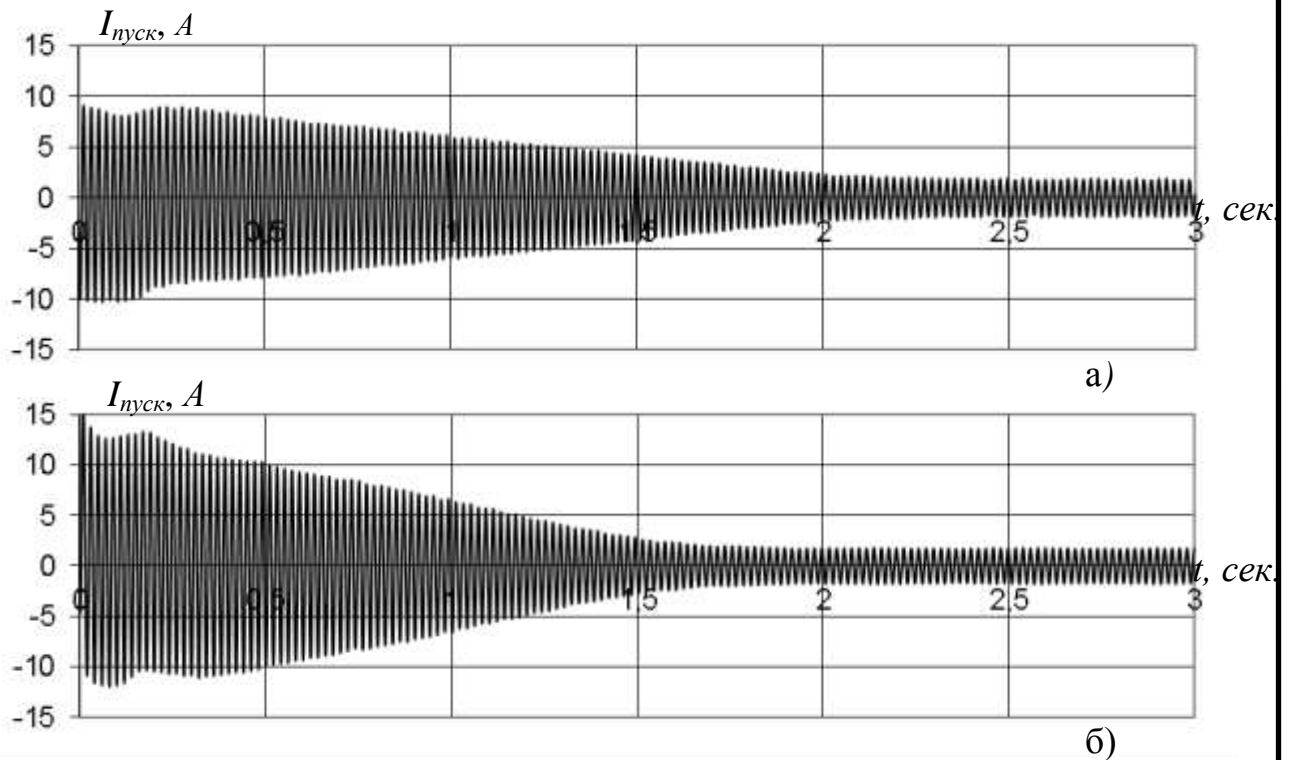
- Неоднорідність матеріалу болтів і стержнів призводить до зміни електричного опору обмоток.

Очевидно, що вплив цих факторів на зміну режиму роботи двигуна після модернізації його ротора можна мінімізувати або знехтувати, якщо модернізувати лише 1-2 стрижня. Однак в експериментальному двигуні було зроблено повний розріз закорочених кілець з обох боків ротора, а в кожен стрижень було встановлено по два болти. Таким чином, загальна кількість гвинтів склала 84 штуки, що призвело до суттєвої зміни параметрів ротора та режиму АД.

Змінивши матеріал з'єднувальних болтів з феромагнітного (сталь) на неферомагнітний (мідь), вдалося повністю усунути другий недолік і частково усунути третій. Експериментальними дослідженнями встановлено, що при моделюванні обриву стрижня мідними болтами розподіл магнітного потоку в повітряному зазорі та корпусі ротора наближається до реального, що підтверджується порівнянням режимів пуску двигуна сталевими та мідними болтами із з'єднанням у точках розриву<sup>1</sup>. Час пуску та значення пускового струму дослідного АД при використанні мідних болтів приблизно такі ж, як і до модернізації двигуна. Так, кратність пускового струму АД типу 4А132М6В3 становить 7, що дорівнює кратності пускового струму модернізованого АД після заміни сталевих шпилек на мідні.

У ході експериментальних досліджень стаціонарних режимів роботи АД при руйнуванні стержнів КСЗ змінювалася величина навантаження на вал АД, а також кількість зламаних стержнів. Цифрове осцилографування фазних струмів і напруг експериментального електродвигуна проводили за допомогою 8-канального УРПР з 10-розрядними АЦП F-7077/1. Одночасно для вимірювання величини проковзування було проведено осцилографування швидкості АД шляхом підключення датчика швидкості

типу БЕ-178 до спеціального входу УРПР. Частота дискретизації становила 1000 Гц.



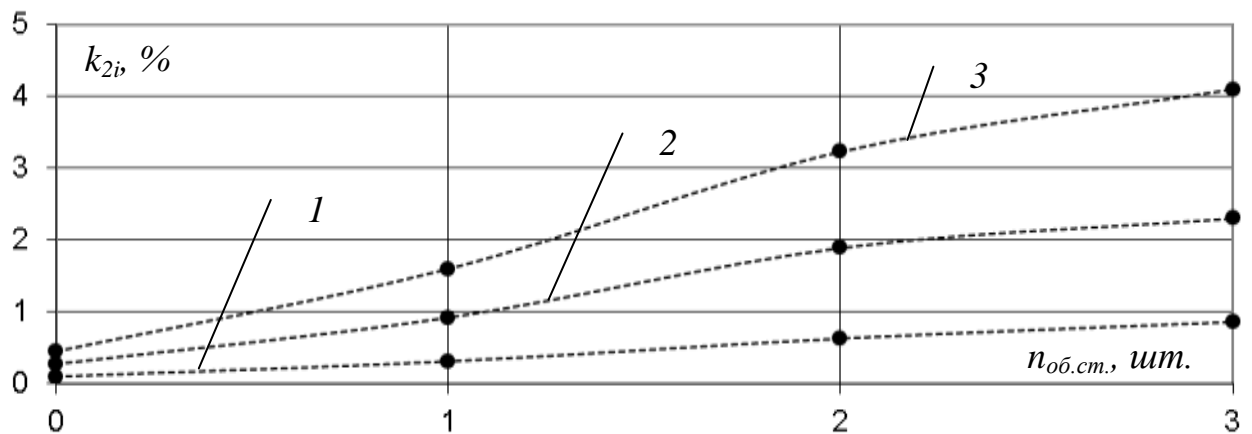
а) з болтами з ферромагнітного матеріалу; б) з болтами з  
неферромагнітного матеріалу

Рисунок 3.1 - Пуск дослідного АД:

Однією з вимог до розробленої діагностичної системи є використання датчиків, які вже є на роз'ємах електродвигунів (РТ і VT). Тому діагностичні параметри були обрані з тих, які можна виміряти або розрахувати за допомогою цих датчиків. Зазвичай ТП встановлюються двофазними на затискачах електродвигунів (ТЗ встановлюються по три фази тільки на вході та затискачах потужних електродвигунів), тому є можливість контролювати струми двох фаз. (звичайно  $i_a$  і  $i_c$ ). ТН встановлені на секції 6-10 кВ і дозволяють контролювати лінійні або фазні напруги.

У ході обробки експериментальних даних розраховані як уже відомі діагностичні параметри, що характеризують роботу АД при обривах стержнів КЗР, так і нові діагностичні параметри. Визначено наступні діагностичні параметри: коефіцієнт ЗП по струму  $k_{2i}$ , критерій нахилу механічної характеристики АД  $k_p$ , коефіцієнт пульсацій результуючого вектора струму статора  $\gamma_i$ .

На рисунку 3.2 приведені залежності коефіцієнту ЗП по струму  $k_{2i}$  від числа обірваних стержнів ротору  $n_{об.ст.}$  при різній величині навантаження на валу  $P_{навант.}$ .



1 -  $P_{навант}=0$ ; 2 -  $P_{навант}=0,5 P_{ном}$ ; 3 -  $P_{навант}=P_{ном}$

Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнту ЗП по струму  $k_{2i}$  від числа обірваних стержнів ротору  $n_{об.ст.}$  при різній величині навантаження на валу  $P_{навант.}$ :

Отримані залежності дозволяють зробити висновок, що якщо прийняти розрахункову несиметрію дослідного двигуна при номінальному навантаженні рівним 0,5 % і коефіцієнт надійності відстроювання рівним 2, то поломку стрижня можна достовірно виявити за збільшення струму ЗП лише за умови, що навантаження двигуна становить не менше 50% від номінального навантаження. При відсутності навантаження за цим

параметром можна визначити поломку як мінімум трьох стержнів. У зв'язку з цим, для використання в якості діагностичного параметра в системі діагностики значення струму ГФ його критичне значення повинно автоматично змінюватися в залежності від значення повного струму. Аналіз результатів розрахунків для різних коефіцієнтів навантаження ( $0,5 \div 1,0$ ) показав, що величина фактичного коефіцієнта навантаження  $k_{2i}$  приблизно прямо пропорційна коефіцієнту навантаження AM kload.

Величина струму зарядного пристрою також залежить від величини несиметрії напруги живлення і несиметрії опору фази. Зв'язок між несиметрією струмів і напруг не єдиний, він залежить від параметрів мережі і двигуна, від характеру несиметрії їх фазних опорів [22].

Частота зарядного струму  $f_2$ , спричиненого розривом шин SSC IM, є функцією ковзання  $s$  і визначається за формулою (2.4).

Залежність критерію нахилу властивості  $k_r$  від кількості зламаних брусків показано на рисунку 3.3. Знижуючи значення цього критерію, ймовірно, можна виявити появу дефекту в одному або кількох стрижнях обмотки ротора, незалежно від навантаження двигуна. При цьому величина  $k_r$  у полі робочих листів практично не залежить від коефіцієнта завантаження АД. Необхідність безпосереднього вимірювання або розрахунку ковзання двигуна дещо ускладнює використання цього параметра.

Результати порівняння значення коефіцієнта СП для струму  $k_{2i}$  і коефіцієнтів пульсації узагальненого вектора струму статора  $\gamma_i$ , отриманих при різних значеннях навантаження АД і різній кількості обірваних стержнів КП, показують, що струм СП Коефіцієнт  $k$  має найкращу інформативність при діагностиці технічного стану штатів ССК.

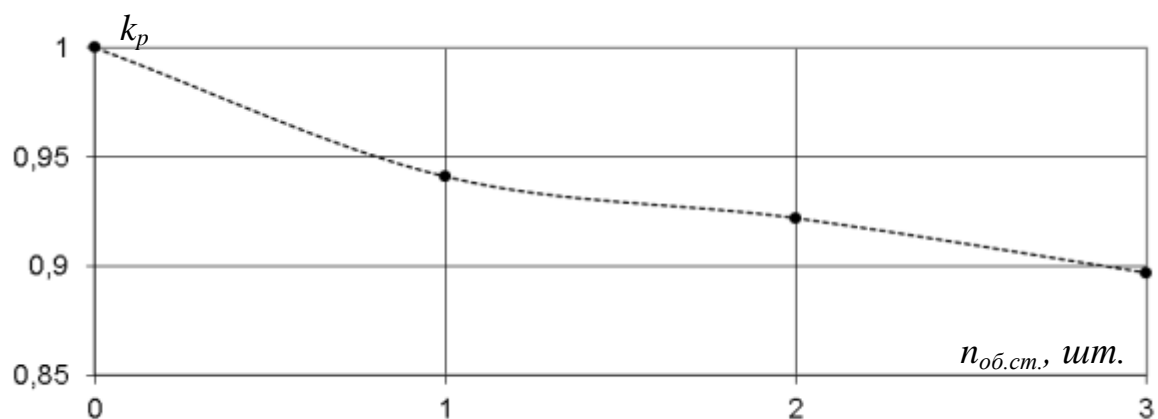


Рисунок 3.3 – Залежність критерію нахилу механічної характеристики  $k_p$  від числа обірваних стержнів ротору  $n_{об.ст.}$

Таблиця 3.1 – Порівняння величини коефіцієнту ЗП по струму  $k_{2i}$  і коефіцієнти пульсацій результуючого вектора струму статора  $\gamma_i$  при обривові стержнів КЗР

Число обірваних стержнів КЗР, шт.	$R_{навант}$ , о.е.	$k_{2i}$ , %	$\gamma_i$ , %
1	0	0,31	0,22
	0,5	0,92	0,65
	1,0	1,60	1,13
2	0	0,63	0,45
	0,5	1,89	1,34
	1,0	3,23	2,28
3	0	0,86	0,61
	0,5	2,3	1,63
	1,0	4,1	2,90

Протокол експериментальних досліджень сталих режимів роботи дослідного АД і його системи діагностики наведений у додатку Б.

### 3.2 Оцінка інформативності діагностичних параметрів з застосуванням теорії планування експерименту

Метою проведення досліджень була перевірка інформативності й виявлення залежності діагностичних параметрів від числа обірваних стержнів, величини навантаження й величини несиметрії живлячої напруги. Цими діагностичними параметрами є:

- коефіцієнт ЗП по струму  $k_{2i}$ , %;
- критерій нахилу механічної характеристики АД  $k_p$ .

Для правильної організації експериментальних досліджень використовувалася теорія планування експерименту.

Як функція цілі  $Y$  обрані досліджувані діагностичні параметри  $k_{2i}$  і  $k_p$ , які можна виразити в кількісній формі. Завданням експериментальних досліджень було визначення залежності цих параметрів від основних факторів, що впливають на параметри режиму роботи АД. Як цих факторів обрана: кількість обірваних стержнів обмотки КЗР  $n_{ст}$ , величина навантаження на валу АД  $P_{нагр}$  і величина несиметрії живлячої напруги

$$k_{2u} = U_2 / U_{ном},$$

де  $U_2$  - величина напруги ОП;

$U_{ном}$  - номінальна напруга живильної мережі.

При проведенні натурних експериментів навантаження на валу АД регулювалося в діапазоні від 0 (холостий хід) до номінального значення ( $P_{ном}$ ). Кількість обірваних стержнів обмотки КЗР АД змінювалася від 0 до 2. Величину несиметрії живлячої напруги змінювали від 0 (симетрична напруга) до несиметрії 2 % - припустимої величини несиметрії в тривалому

режимі в будь-яких трифазних мережах приймачів [26]. При таких діапазонах зміни фактори задовольняють всім трьом пропонованим до них умовам [41]:

- застосування як факторів незалежних змінних, тобто таких, кожен з яких можна міняти в деяких межах, не зачіпаючи інші;
- фактори повинні бути вимірюваними, причому результати вимірів повинні мати чисельне вираження;
- сумісність факторів, тобто будь-яке сполучення факторів в обраному діапазоні реалізоване й не приводить до абсурду.

Виконано операцію кодування прийнятих факторів, що представляє собою лінійне перетворення факторного простору. Для здійснення операції кодування, насамперед, обрана вихідна область експериментування, тобто задані верхні й нижні межі зміни кожного фактора в ході експерименту  $X_{i\max}$ ,  $X_{i\min}$ . Середні й граничні рівні дійсних і відповідних їм кодованих факторів для дослідження залежностей діагностичних параметрів приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Рівні дійсних і кодованих факторів для дослідження залежності діагностичних параметрів

Дійсні фактори	$R_{навант}$ , о.е.	$n_{ст}$ , шт.	$k_{2и}$ , %
Кодовані фактори	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Верхній рівень (+1)	1	2	2
Середній рівень (0)	0,5	1	1
Нижній рівень (-1)	0	0	0

Функцію цілі при використанні кодованих факторів можна представити у вигляді [41]:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2.$$

Коефіцієнти  $b_i$  визначаються по формулі [41]:

$$b_i = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in} y_n}{\sum_{n=1}^N x_{in}^2}. \quad (3.1)$$

Для знаходження залежності  $Y$  від  $X_1$ ,  $X_2$  і  $X_3$  проведені три серії експериментів по чотирьох досвіду в кожній. Матриця планування для ортогонального плану другого порядку наведена в таблиці 3.3.

Значення  $x_{4-9}$  у таблиці 3.3 визначаються в такий спосіб [41]:

$$x_4 = x_1^2 - \bar{x}_1^2; \quad x_5 = x_2^2 - \bar{x}_2^2; \quad x_6 = x_3^2 - \bar{x}_3^2; \quad x_7 = x_1 x_2; \quad x_8 = x_1 x_3; \quad x_9 = x_2 x_3,$$

де

$$\bar{x}_1^2 = \frac{\sum_{u=1}^{15} x_{u1}^2}{15} = \frac{(-1)^2 + 1^2 + (-1)^2 + (-1)^2 + 1^2 + 1^2 + (-1)^2 + 1^2 + (-1)^2 + 1^2}{15} = \frac{2}{3};$$

$$\bar{x}_2^2 = \frac{\sum_{u=1}^{15} x_{u2}^2}{15} = \frac{(-1)^2 + (-1)^2 + 1^2 + (-1)^2 + 1^2 + (-1)^2 + 1^2 + 1^2 + (-1)^2 + 1^2}{15} = \frac{2}{3};$$

$$\bar{x}_3^2 = \frac{\sum_{u=1}^{15} x_{u3}^2}{15} = \frac{(-1)^2 + (-1)^2 + (-1)^2 + 1^2 + (-1)^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + (-1)^2 + 1^2}{15} = \frac{2}{3}.$$



У серії випробувань № 2, 5, 7, 8, 10 номінальне навантаження на вал АД Rном встановлюється реостатами в схемі ГПТ. У серії випробувань № 11-15 на вал АД таким же чином встановлюється навантаження 0,5 Rном.

У серіях випробувань №№ 3, 5, 7, 8, 12 руйнування двох досліджуваних стрижнів АД моделюється відкручуванням двох болтів. У серіях випробувань № 9-10, 13-15 моделюється злам стрижня при відкручуванні гвинта.

У серії експериментів № 4, 6-8, 14 з використанням трифазного автотрансформатора, що дозволяє регулювати напругу, виявлено розбаланс напруги живлення 2%, а в дослідах № 9-12 15 - 1%. Дисбаланс напруги живлення створюється зміною значення однієї з фазних напруг.

### 3.3 Математична обробка результатів експериментальних досліджень.

Для кожного досліду, проведеного згідно таблиці 3.2 і таблиці 3.3, за формулою (2.1) визначається коефіцієнт ЗП по струму  $k_{2i}$ . Результати розрахунків приведені в таблиці 3.4.

По отриманим експериментальним даним, згідно (3.1), розраховані коефіцієнти полінома:

$$\begin{array}{lll} b_0 = 2,041; & b_{11} = 0,158; & b_{12} = 0,561; \\ b_1 = 0,825; & b_{22} = 0,078; & b_{13} = - 0,001; \\ b_2 = 0,720; & b_{33} = 0,066; & b_{23} \approx 0. \\ b_3 = 0,993; & & \end{array}$$

Отриманий поліном має вигляд:

$$Y = 2,041 + 0,825X_1 + 0,720X_2 + 0,993X_3 + 0,158(X_1^2 - 2/3) + 0,078(X_2^2 - 2/3) + 0,066(X_3^2 - 2/3) + 0,561X_1X_2 - 0,001X_1X_3.$$

Таблиця 3.4 - Результати експериментів

№ дослід у	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$\bar{Y}_{cp}$	$S_{\bar{Y}_{cp}}^2$	$Y$
1	+1	-1	-1	-1	0,093	0,093	0,096	0,094	0,000003	0,164
2	+1	+1	-1	-1	0,633	0,631	0,632	0,632	0,000001	0,694
3	+1	-1	+1	-1	0,450	0,448	0,455	0,451	0,000013	0,481
4	+1	-1	-1	+1	2,083	2,083	2,077	2,081	0,000012	2,152
5	+1	+1	+1	-1	3,237	3,239	3,236	3,237	0,000001	3,256
6	+1	+1	-1	+1	2,617	2,622	2,618	2,619	0,000007	2,677
7	+1	-1	+1	+1	2,440	2,440	2,446	2,442	0,000012	2,470
8	+1	+1	+1	+1	5,220	5,222	5,215	5,219	0,000013	5,240
9	+1	-1	0	0	1,275	1,278	1,272	1,275	0,000009	1,173
10	+1	+1	0	0	2,888	2,888	2,894	2,890	0,000012	2,823
11	+1	0	-1	0	1,313	1,310	1,310	1,311	0,000003	1,198
12	+1	0	+1	0	2,584	2,588	2,589	2,587	0,000007	2,638
13	+1	0	0	-1	0,937	0,936	0,944	0,939	0,000019	0,913
14	+1	0	0	+1	2,920	2,919	2,915	2,918	0,000007	2,899
15	+1	0	0	0	1,926	1,925	1,921	1,924	0,000007	1,840

Згідно таблиці 3.2 після розкриття дужок можна записати:

$$k_{2i} = 1,840 + 0,825P_{навант} + 0,720 n_{об.см.} + 0,993k_{2u} + 0,158P_{навант}^2 + 0,078 n_{об.см.}^2 + 0,066k_{2u}^2 + 0,561P_{навант} n_{об.см.} - 0,001P_{навант}k_{2u}.$$

Оцінено відтворюваність експериментів. Якщо кожен експеримент повторювати багато разів, значення  $Y$  не буде точно відтворюватися

щоразу. Різниця значень в кожному досліді визначається похибками досвіду. Ми припускаємо, що ці похибки не пов'язані з неточністю встановлення факторів в експерименті, або, іншими словами, вважаємо, що точність встановлення факторів у досліді значно вища за точність визначення  $Y$ . Ця умова виконується, коли використовується теорія планування експерименту. Далі припустимо, що в досліді немає систематичних похибок (похибок, які залишаються постійними протягом серії вимірювань). Таке припущення допускає специфіку задач, що зустрічаються в електромеханіці [41]. Систематичні похибки, що виникають внаслідок неконтрольованого впливу зовнішніх умов, усуваються шляхом застосування часової рандомізації експериментів, тобто шляхом розміщення експериментів, запропонованих планом експерименту, у випадковому порядку.

З огляду на вищесказане, припускаємо, що різниця значень  $Y$  в кожному експерименті визначається випадковими факторами (експериментальні помилки є випадковими). Тоді величини  $Y$  самі є випадковими величинами, і для роботи з ними застосовні засоби теорії ймовірностей і математичної статистики [41].

Кожна випадкова величина характеризується законом розподілу ймовірностей. Припускаємо, що для будь-якого фіксованого набору факторів  $X_1, X_2, X_3$  значення  $Y$  в наших експериментах розподіляються за нормальним законом, що дозволяє повністю характеризувати  $Y$  двома величинами - математичним очікуванням (середнім) і дисперсією.

Середнє значення  $\bar{Y}_{cp}$  визначаємо за формулою [41]:

$$\bar{Y}_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^k Y_j}{k} \quad (3.2)$$

де  $k$  - число повторень даного дослідю;

$j$  - номер повторення;

$Y_j$  - значення  $Y$  при  $j$ -м повторенні дослідю.

Вибіркова дисперсія оцінює розкид значень  $Y$  у досвіді щодо середнього  $\bar{Y}_{cp}$ , кількісно характеризує помилку відтворюваності експериментів [41]:

$$s^2(Y) = \frac{\sum_{j=1}^k (Y_j - \bar{Y})^2}{k-1}. \quad (3.3)$$

Для оцінки відтворюваності експериментів зроблений розрахунок середніх значень  $\bar{Y}_{cp}$  за формулою (3.2) і вибіркової дисперсії  $S_{\bar{Y}_{cp}}^2$  за формулою (3.3). Результати розрахунку зведені в таблиці 3.4.

Знаходимо дисперсію  $S_y^2$  [41]:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n S_{\bar{Y}_{cp}}^2}{n},$$

де  $n$  – кількість серій експериментів.

$$S_y^2 = \frac{(3+1+13+12+1+7+12+13+9+12+3+7+19+7+7) \cdot 10^{-6}}{15} = 8,4 \cdot 10^{-6}$$

Визначаємо вибірку дисперсію для кожного коефіцієнту  $b_i$  за формулою [41]:

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N X_{iu}^2}$$

$$S_{b_0}^2 = \frac{8,4 \cdot 10^{-6}}{15} = 5,6 \cdot 10^{-7};$$

$$S_{b_{12}}^2 = S_{b_{13}}^2 = S_{b_{23}}^2 = \frac{8,4 \cdot 10^{-6}}{8} = 1,05 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{b_1}^2 = S_{b_2}^2 = S_{b_3}^2 = \frac{8,4 \cdot 10^{-6}}{10} = 8,4 \cdot 10^{-7}; \quad S_{b_{11}}^2 = S_{b_{22}}^2 = S_{b_{33}}^2 = \frac{8,4 \cdot 10^{-6}}{3,333} = 2,52 \cdot 10^{-6}.$$

Знаходимо довірчі інтервали  $\Delta B_i$  при заданій імовірності за допомогою коефіцієнтів Стьюдента [41]:

$$\Delta B_i = t \cdot S_{b_i},$$

де  $t$  – коефіцієнт Стьюдента.

Для ймовірності 0,95 коефіцієнт Стьюдента дорівнює  $t = 4,3$  [37].

$$\Delta B_0 = 4,3 \cdot \sqrt{5,6 \cdot 10^{-7}} = 0,003;$$

$$\Delta B_1 = \Delta B_2 = \Delta B_3 = 4,3 \cdot \sqrt{8,4 \cdot 10^{-7}} = 0,004;$$

$$\Delta B_{12} = \Delta B_{13} = \Delta B_{23} = 4,3 \cdot \sqrt{1,05 \cdot 10^{-6}} = 0,004;$$

$$\Delta B_{11} = \Delta B_{22} = \Delta B_{33} = 4,3 \cdot \sqrt{2,52 \cdot 10^{-6}} = 0,007.$$

У такий спосіб при  $P=0,95$  маємо:

$$b_0 = 2,041 \pm 0,003, P=0,95;$$

$$b_{13} = 0,001 \pm 0,004, P=0,95;$$

$$b_1 = 0,825 \pm 0,004, P=0,95;$$

$$b_{23} = 0 \pm 0,004, P=0,95;$$

$$b_2 = 0,720 \pm 0,004, P=0,95;$$

$$b_{11} = 0,158 \pm 0,007, P=0,95;$$

$$b_3 = 0,993 \pm 0,004, P=0,95;$$

$$b_{22} = 0,078 \pm 0,007, P=0,95;$$

$$b_{12} = 0,561 \pm 0,004, P=0,95;$$

$$b_{33} = 0,066 \pm 0,007, P=0,95.$$

Аналіз отриманої залежності показує, що коефіцієнт ЗП по струму  $DO_{2I}$  дозволяє досить надійно виявляти ушкодження стержнів КЗР АД. Для застосування в системі діагностики як діагностичний параметр величини струму ЗП та її критичне значення необхідно автоматично змінювати залежно від величини повного струму, що досить таки просто виконати, контролюючи величину фазних струмів або визначаючи величину струму ПП.

Аналогічно проведено обробка результатів розрахунку критерію нахилу механічної характеристики АД  $k_p$ , виконаних на підставі експериментальних даних. Для кожного дослідження, проведеного згідно таблиці 3.2 і таблиці 3.3, визначалася величина  $k_p$  за формулою (2.2). Результати розрахунків приведені в таблиці 3.5.

Розрахунки, проведені відповідно до вище наведеної методики, дозволили одержати аналітичний вираз, що пов'язує величину критерію нахилу механічної характеристики АД із КЗР зі ступенем розвитку дефекту КЗР, величиною завантаження АД і якістю живлячої напруги

$$\begin{aligned} k_p = & 0,954 + 0,0006P_{\text{навант}} - 0,035n_{\text{об.ст.}} - 0,001k_{2u} + 0,0036 P_{\text{навант}}^2 \\ & + \\ & + 0,0057 n_{\text{об.ст.}}^2 + 0,0024k_{2u}^2 - 0,0004P_{\text{навант}} n_{\text{об.ст.}} - 0,0004P_{\text{навант}}k_{2u} \\ & - 0,0001n_{\text{об.ст.}}k_{2u}. \end{aligned}$$

При цьому

$$b_0 = 0,962 \pm 0,0011, P=0,95;$$

$$b_{13} = -0,0004 \pm 0,0015, P=0,95;$$



### Висновки до розділу 3

1. Поломка штока SSC є звичайним явищем під час експлуатації АД. Були проведені лабораторні дослідження для оцінки можливості виявлення цієї помилки в оперативному режимі. Результати показують, що цю шкоду доцільно компенсувати появою струму замикання у фазних струмах та зменшенням відношення споживаної АД активної потужності до величини його ковзання (критерій крутизни ІМ механічні властивості).

2. Керуючи струмом GD і його частотою, у багатьох випадках можливо виявити замикання котушки в обмотці статора ІМ. Цим можна запобігти подальшому розвитку пошкоджень, але для цього необхідна висока швидкість роботи діагностичної системи і навіть реалізація функцій релейного захисту (відключення пошкодженого з'єднання).

3. Отримано аналітичні залежності коефіцієнта струму та критерію крутизни механічних властивостей АД, зв'язавши їх із навантаженням АД, кількістю пошкоджених стрижнів КСЗ (один або два) та коефіцієнтом, що зв'язує несиметрію електричної мережі щодо характеризується напругою.

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ В ОБМОТЦІ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

### 4.1 Дослідження виткових замикань в обмотці статора асинхронного електродвигуна

Дослідження виткових замикань в обмотці статора проведено на дослідному АД 0,4 кВ типу 4А112М4В3 потужністю 5,5 кВт із виведеними у фазі А відпайками (рисунок 4.1), що дозволяє імітувати замикання витків.

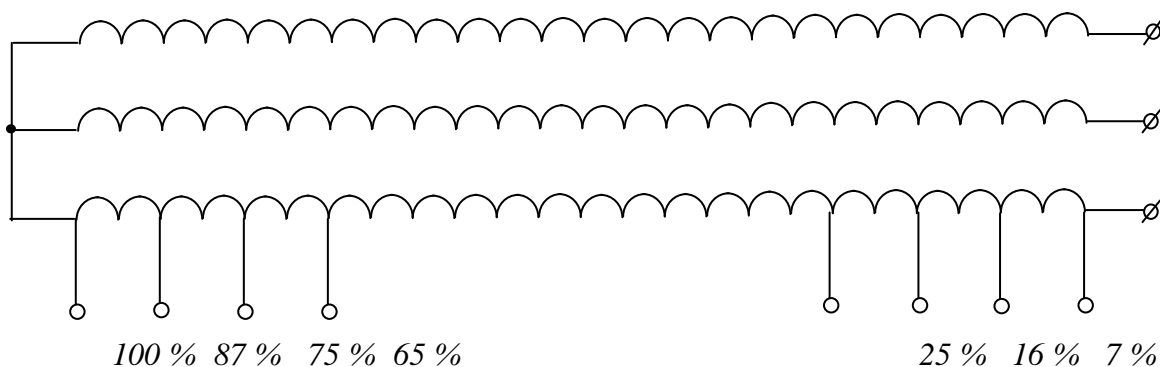


Рисунок 4.1 – Виконання статорної обмотки дослідного АД

На рисунку 4.2 показана установка стенду для експериментального дослідження виткових замикань в обмотці статора експериментального АД.

При проведенні експериментальних досліджень з використанням УРПР на основі 10-розрядних АЦП F-7077/1 осцилографовано трифазні струми експериментального АД, трифазні напруги, а також струм у замкнутих витках фази обмотки статора. Частота дискретизації становила 1000 Гц.

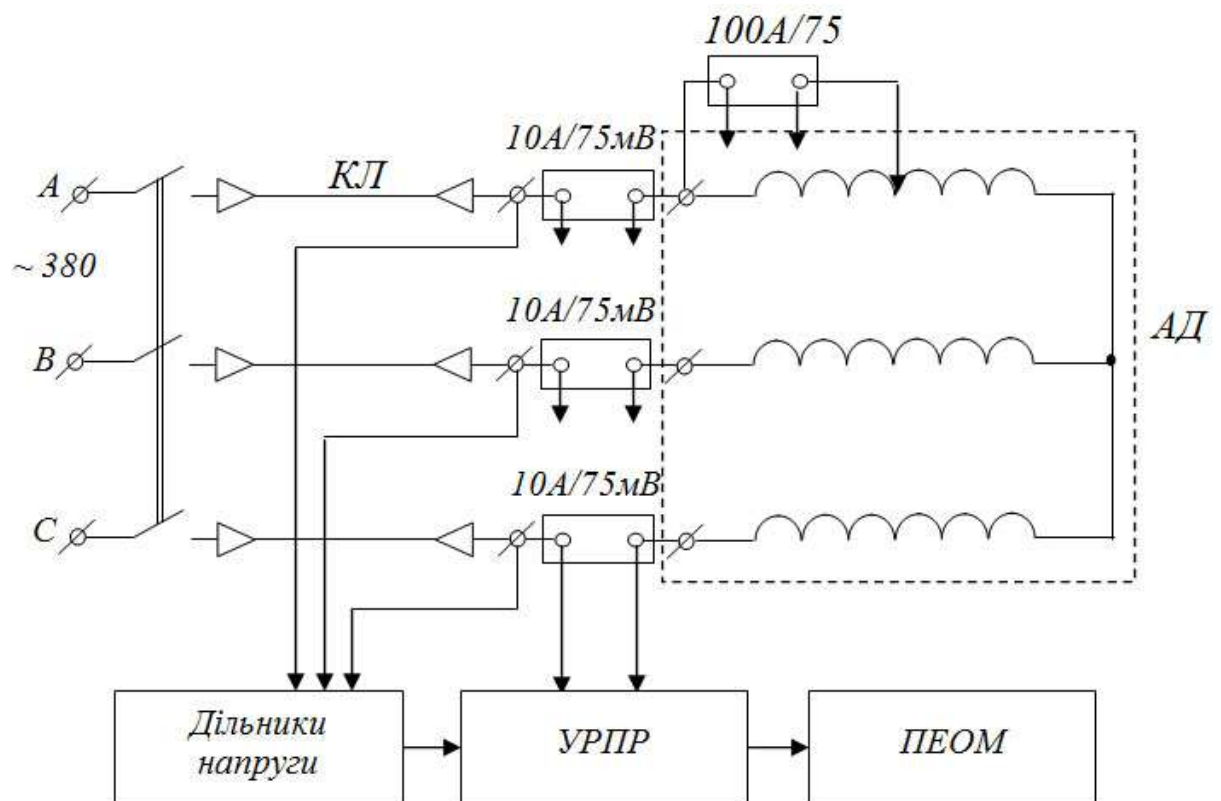


Рисунок 4.2 – Схема стенда для проведення експериментальних досліджень виткових замикань в обмотці статора дослідного АД

На рисунку 4.3 наведено залежності струму пошкоджені фази  $I_a$ , струму пошкодження  $I_{zam}$  і струму СП  $I_2$  від кількості замкнутих витків обмотки статора при простій АД.

Замикання невеликої кількості витків призводить до незначного збільшення струму в пошкодженій фазі. Однак в цьому випадку струм, що протікає в замкнутих витках, має велике значення. Наприклад, якщо замкнути 7% витків, то сила струму в пошкодженій фазі збільшиться на 1,2 А, а струм замикання складе 114,8 А. У цьому випадку струм ЗП складе 1,2 А. Релейний захист не чутливий до такої незначної зміни фазного струму АД, особливо коли АД працює з навантаженням, значно нижчим за номінальне.

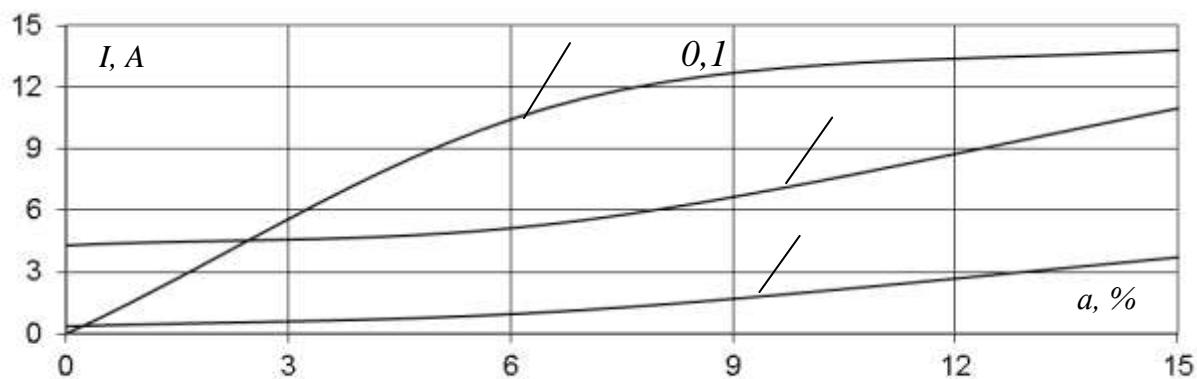


Рисунок 4.3 - Залежності струму ушкодженої фази  $I_a$ , струму замикання  $I_{зам}$  і струму ЗП  $I_2$  від числа замкнутих витків обмотки статора при роботі АД на холостому ході

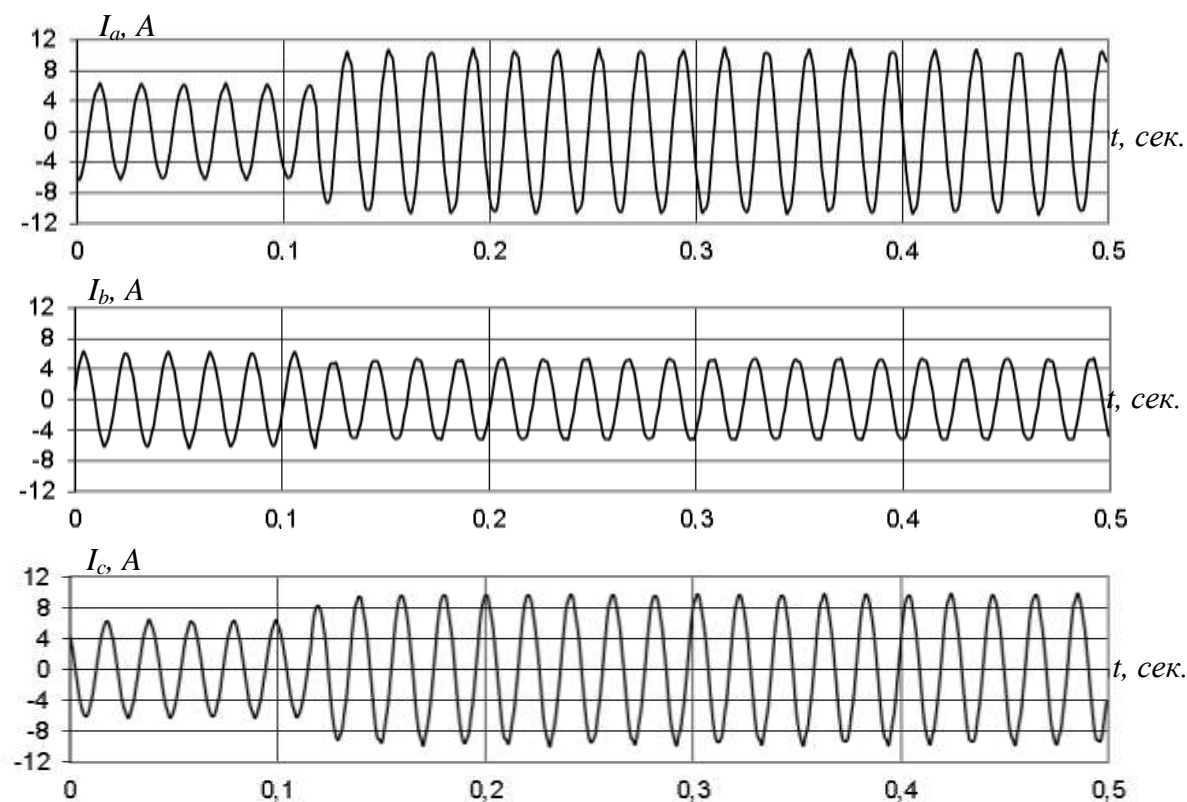
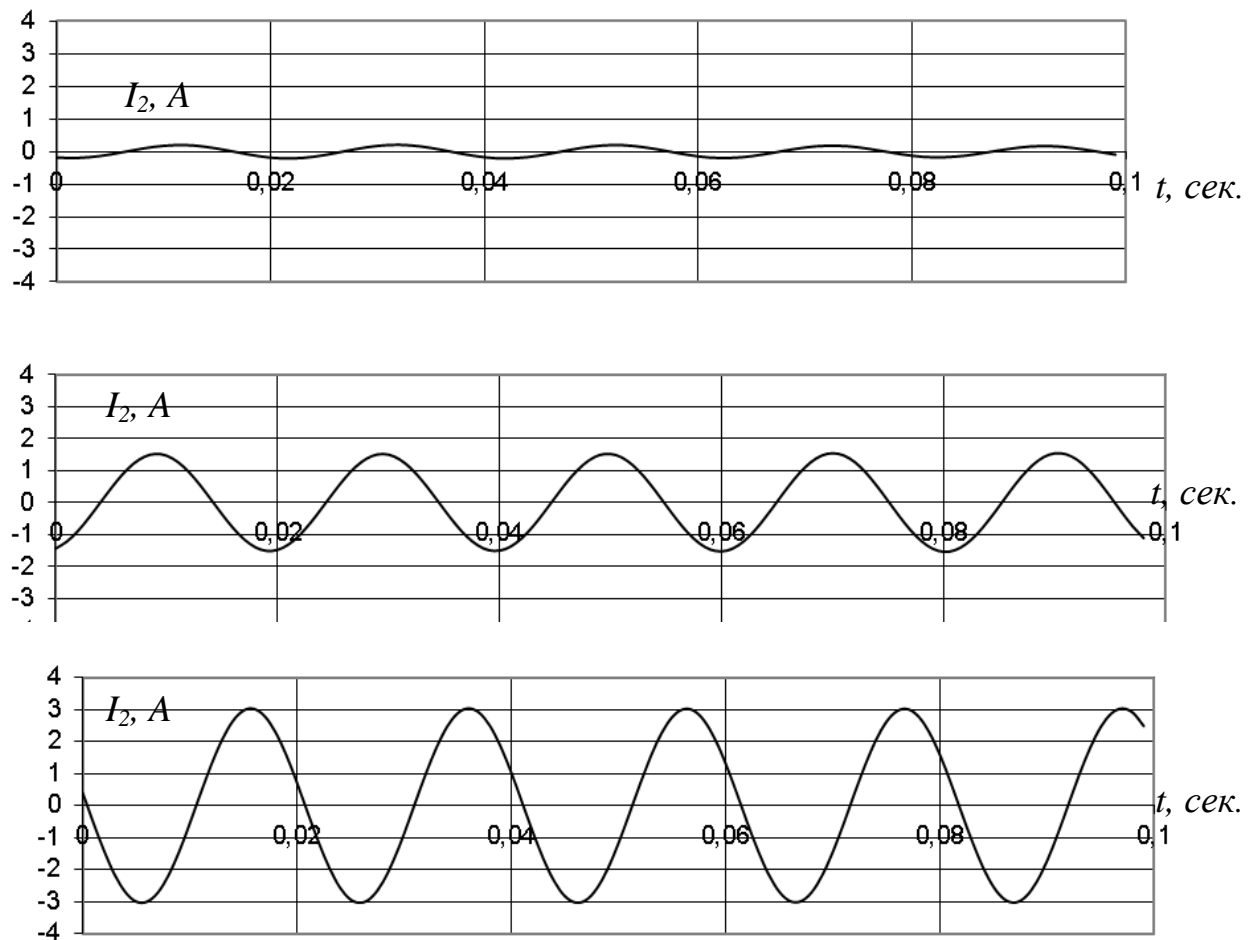


Рисунок 4.4 - Осцилограми фазних струмів  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  дослідного АД при виникненні замикання 10 % витків при роботі АД на холостому ході

На рисунку 4.4 приведені осцилограми фазних струмів  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  дослідного АД при виникненні замикання 10 % витків при роботі АД на холостому ході.

З наведених осцилограмм фазних струмів видно, що при роботі АД на холостому ходу струм в ушкодженій фазі при виникненні замикання 10 % витків став приблизно рівним номінальному струму АД ( $I_{ном} = 11$  А). Таким чином, релейний захист при роботі АД на холостому ходу спрацює лише при замиканні більше 10 % витків обмотки статора.



а) без виткового замикання; б) при замиканні 7 % витків; в) при замиканні 10 % витків

Рисунок 4.5 - Осцилограми струму ЗП  $I_2$  дослідного АД:

На рис.4.5 наведено осцилограми струму ЗП при різній кількості замкнутих витків фази А обмотки статора дослідного АД. Зазначені осцилограми отримано після цифрової фільтрації фазних струмів статора АД, що дозволяє усунути вплив шумів.

Проведені розрахунки показали, що частота струму зарядного пристрою при реверсивному ланцюзі дорівнює частоті напруги живлення  $f_1$ .

Наявність зарядного струму за відсутності витка в обмотці статора АД визначається певною несиметрією фазних опорів, викликаною відводами у фазі А, а також несиметрією напруги живлення.

Дослідження показали, що величина струму заряду залежить від положення закорочених витків. Найбільше їх значення спостерігається, коли замикання відбувається ближче до нульових висновків обмотки статора, а найменше - при короткому замиканні ближче до висновків АД.

Аналіз результатів експериментальних досліджень виткових замикань в обмотці статора показує, що за величиною струму ФЗ можна достовірно виявити виткові замикання в обмотці статора АД не менше ніж з 3-5% замкнутих витків. Цим можна запобігти подальшому розвитку пошкоджень, але для цього необхідна висока швидкість роботи діагностичної системи і навіть реалізація функцій релейного захисту (відключення пошкодженого з'єднання).

4.2 Порівняння результатів експериментальних досліджень і результатів математичного моделювання сталих режимів роботи асинхронних електродвигунів при наявності в них дефектів

З метою перевірки адекватності використаної математичної моделі для визначення меж діагностичних параметрів при пошкодженні стрижнів КСБ використано результати експериментальних досліджень на спеціальному двигуні типу 4A132M6B3 та результати математичного моделювання постійних режимів роботи. цього ІМ були порівняні. Структурна асиметрія АД і результуюча розстрочка приймаються за величину несиметрії при

експлуатації АД без зламаних стрижнів ССК. Порівняння отриманих результатів наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння результатів експериментальних досліджень і результатів математичного моделювання АД із КЗР

Діагностичний параметр	Число обірваних стрижнів	Розрахункове значення	Експериментальне значення	Відхилення, %
$k_{2i}, \%$	0	0	0	0
	1	1,388	1,272	9,1
	2	2,852	2,605	9,5
	3	4,174	3,816	9,4
$k_p$	0	1,0	1,0	0
	1	0,953	0,941	1,28
	2	0,931	0,922	0,98
	3	0,91	0,897	1,45

Як показало порівняння результатів експериментальних досліджень і математичного моделювання відхилення величини коефіцієнту ЗП по струму  $k_{2i}$  не перевищує 9,5 %, а критерію нахилу механічної характеристики АД – 1,5 %.

Також проведене порівняння результатів експериментальних досліджень міжвиткових замикань в обмотці статора АД й результатів математичного моделювання цього виду ушкодження (рисунок 4.6).

Відхилення результатів розрахунку величини струму ЗП  $I_2$ , отриманих при експериментальних дослідженнях і шляхом математичного моделювання міжвиткових замикань в обмотці статора, не перевищує 10 %.

Правильність розрахунків, отриманих шляхом математичного моделювання обривовів паралельних віток обмотки статора

електродвигуна, підтверджується даними досліджень, наведеними в роботі [88].

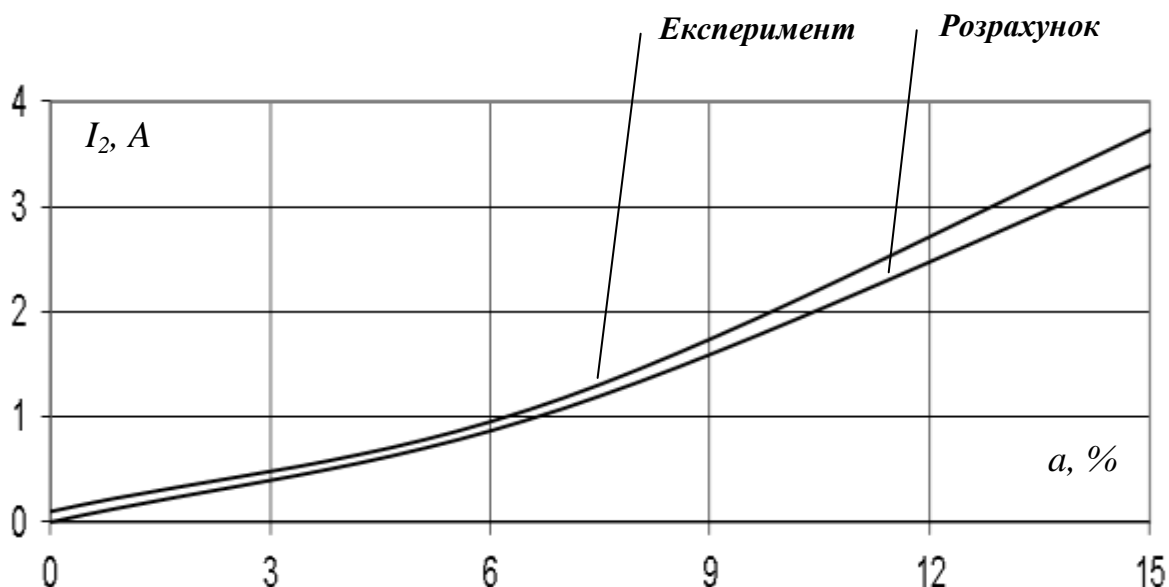


Рисунок 4.6 - Порівняння результатів експериментальних досліджень і результатів математичного моделювання АД із КЗР

Середні величини коефіцієнту потужності, отримані при моделюванні, а також експериментальні результати для справної машини й при статичному ексцентриситетові (приблизно 70 %) при роботі на холостому ході й при повнім навантаженні, показані в таблиці 2.5 [14]. Незважаючи на деяке розходження між результатами моделювання й виміру, вони підтверджують один одного.

Отримані результати підтверджують вірогідність використовуваних математичних моделей, а також можливість побудови принципів АСТД із їхнім застосуванням.

#### Висновки до розділу 4

Адекватність використовуваних математичних моделей, а також можливість побудови принципів діагностики з їхнім застосуванням підтверджені задовільним збігом результатів експериментальних досліджень та математичного моделювання. Як показали порівняння результатів експериментальних досліджень і математичного моделювання сталих режимів роботи АД при наявності обірваного стержня КЗР відхилення величини коефіцієнту ЗП по струму  $k_{2i}$  не перевищує 9,5 %, а критерію нахилу механічної характеристики  $k - 1,5$  %. Відхилення результатів розрахунку величини струму ЗП  $I_2$ , що отримані при експериментальних дослідженнях і шляхом математичного моделювання міжвиткових замикань в обмотці статора, не перевищує 10 %.

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						78
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено методику діагностування обмоток статора і ротора АД 6-10 кВ із захистом від короткого замикання, засновану на моніторингу миттєвих значень фазних струмів і напруг електродвигуна. За даними вимірювань за розробленим алгоритмом визначаються симетричні складові ПП і накопичувача, споживана активна потужність, ковзання АД і формується комплексний діагностичний критерій. За значенням цього критерію, а також аналізуючи характер зміни параметрів режиму роботи АД (фазних струмів, частоти струму зарядного пристрою), оцінюють технічний стан електродвигуна (наявність і характер дефекту, ступінь його розвитку).

2. Математичне моделювання постійних режимів роботи АД із захистом від КЗ за наявності різного роду замикань (реверсивні КЗ у фазі обмотки статора, розриви в паралельних гілках обмотки статора та КЗ). електричні шини, несправності в механічній частині). Проведений аналіз дав змогу встановити, що інформативні діагностичні параметри, що характеризують виникнення розглянутих типів несправностей, відносний вміст струму КЗ у струмі статора електродвигуна та кут нахилу механічних властивостей АД після короткочасної схеми захисту знаходяться в діапазоні робочих ковзань і на основі цих параметрів формується комплексний критерій працездатності.

3. За результатами математичного моделювання узагальнено залежності комплексного критерію працездатності від ступеня розвитку несправності при витковому замиканні у фазі обмотки статора, розімкнених паралельних плечах обмотки статора та стрижні ССК для різних типів АД. з SSC, за якими можна розрахувати значення граничного критерію

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						79
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Автоматизация электроэнергетических систем /О.П. Алексеев, В.А. Козис, В.В. Кривенков и др./ Под ред. В. П. Морозкина и Д. Энгелаге. - М.: Энергоатомиздат, 1994. - 448 с.
2. Байтер И.И. Защита и АВР электродвигателей собственных нужд. - М.: Энергия, 1980. -104 с.
3. Барков А.В., Баркова Н.А. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации // Труды Петербургского энергетического института повышения квалификации Минтопэнерго Российской Федерации и Института вибрации США (Vibration Institute, USA), Выпуск 9. - Санкт-Петербург. - 1999.
4. Барков А.В. Возможности нового поколения систем мониторинга и диагностики // Metallurg. – 1998. - № 11.
5. Биргер И.А. Техническая диагностика. - М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
6. Богуславский И.З. Особенности полей асинхронного двигателя с несимметричной клеткой при несинусоидальном питании // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1990. - № 2. - С. 77-87.
7. Брюханов Г.А., Князев С.А. Метод и устройство для диагностики состояния роторных обмоток асинхронных электродвигателей // Электрические станции. – 1986. - № 2. – С. 44-45.
8. Булычев А.В., Ванин В.К. Метод контроля состояния механической части асинхронного электродвигателя // Электротехника. – 1997. - № 10. – С.5-9.
9. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 839 с.

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						80
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

10. Вольпов К.Д., Белый Ю.В. О повреждаемости изоляции электродвигателей собственных нужд электростанций // Электрические станции. – 1976. - № 11. – С. 34-35.

11. Гарет П. Аналоговые устройства для микропроцессоров и мини-ЭВМ. – М.: Мир, 1981. – 268 с.

12. Гармаш В.С. Метод контроля исправности стержней ротору короткозамкнутого асинхронного двигателя // Энергетика. - 1990. - № 10. - С. 50-52.

13. Гашимов М.А., Аскеров Н.А. Выявление неисправности стержней ротору асинхронных электродвигателей // Электрические станции. – 1984. - № 8. - С. 60-66.

14. Гашимов М.А., Гаджиев Г.А. Диагностирование технического состояния электрических машин // Электрические станции. – 2000. - № 9. - С. 41-47.

15. Гашимов М.А., Гаджиев Г.А., Мирзоева С.М. Диагностирование неисправностей обмотки статора электрических машин // Электрические станции. – 1998. - № 11. - С. 30-35.

16. Гашимов М.А., Гаджиев Г.А., Мирзоева С.М. Диагностирование эксцентриситета и обрыва стержней ротору в асинхронных электродвигателях без их отключения // Электротехника. – 1998. - № 10. – С. 46-51.

17. Гашимов М.А., Гусейнов А.М. Диагностирование неисправностей электроэнергетических машин при межфазных замыканиях в обмотке статора // Электричество. - 1987. - № 4. - С. 47-49.

18. Гашимов М.А. Диагностическое исследование межвиткового замыкания в асинхронных электродвигателях // Электрические станции. – 1986. - № 11. - С. 47-49.

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						81
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

19. Гашимов М.А. Логические методы диагностики технического состояния электрических машин // Электричество. – 1999. - № 7. – 20-26.

20. Гашимов М.А. Основы теории и методы диагностики электрических машин энергетических систем по параметрам процессов функционирования: Автореф. дис... докт.техн.наук. Баку, 1994.

21. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин/ Под ред. Р.Б. Уманцева. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 336 с.

22. Гимоян Г.Г. Релейная защита горных электроустановок. – М.: Недра, 1978. - 349 с.

23. Гимоян Г.Г., Лейбов Р.М. Релейная защита подземного электрооборудования и сетей. – М.: Недра, 1970. – 281 с.

24. Глебов И.А., Мамиконянц Л.Г. Электрические машины. "Обзор докладов международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ)". - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 104 с.

25. Гольдберг О.Д., Абдулаев И.М., Абиев А.Н. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 160 с.

26. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Издательство стандартов, 1997.

27. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Автоматизация диагностирования технического состояния собственных нужд электрических станций // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 2. – Донецк: ДонГТУ. – 1998. – С. 30-33.

28. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Математическая обработка результатов обследования электродвигателей собственных нужд ТЭС // Вісник національного університету “Львівська політехніка”.

Електроенергетичні та електромеханічні системи, № 403 – Львів. – 2000. – С. 28-33.

29. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В., Нуайми Абделали. Программное восстановление первичного тока электромагнитных трансформаторов тока // Технічна електродинаміка. Спеціальний випуск. – Київ. –1998. - С. 123-126.

30. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В., Нури Абделбассет. Автоматизированная система технической диагностики электрооборудования тепловых электростанций // Сборник научных трудов энергетического факультета. Донецк. – 1996. - С. 151-153.

31. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Обеспечение достоверности оценки технического состояния при диагностировании асинхронных электродвигателей // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 21. - Донецк: ДонГТУ. – 2000. – С. 153-157.

32. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Определение диагностических параметров для системы диагностики повреждений роторов асинхронных двигателей // Книга за матеріалами п'ятої міжнародної науково-технічної конференції «Контроль и управління в складних системах» (КУСС-99). - У 3-х томах. Том 3. - Вінниця: “УНІВЕРСУМ-Вінниця”. – 1999. - С. 243-247.

33. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Определение симметричных составляющих параметров рабочего режима для диагностики электродвигателей // Збірник наукових праць IV Міжнародної наукової конференції “Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств”. – Мариуполь. – 2000. – С. 183-186.

34. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Принципы автоматической диагностики состояния изоляции системы собственных

нужд электрических станций // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 2. – Донецк: ДонГТУ. – 1998. – С. 24-29.

35. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Экспериментальные исследования установившихся режимов работы асинхронных электродвигателей при наличии в них дефектов // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 17. – Донецк: ДонГТУ. – 2000. – С. 110-114.

36. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1990. – 192 с.

37. Деденко Л.Г., Керженцев В.В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. - 112 с.

38. Деро А.Р. Неполадки в работе асинхронного двигателя. Л.: Энергия, 1976. - 96 с.

					МРМА 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						84
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Додаток А

					MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
						85
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		