

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

тема роботи:

***«Розробка імітаційної моделі двигуна змінного струму з
урахуванням електричних пошкоджень для задач діагностики»***

Виконав студент гр. АКІТ-22	_____ Мінченко М. Ю.
Керівник	_____ Маринич І. А.
Нормоконтроль	_____ Маринич І. А.
Завідувач кафедри	_____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 26 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТ-22 Мінченко Максиму Юрійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Розробка імітаційної моделі двигуна змінного струму з урахуванням електричних пошкоджень для задач діагностики»

затверджено наказом по університету № 171с від 30.03.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2024 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка, презентація у Microsoft PowerPoint в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Маринич І. А.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>01.03.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>05.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>01.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>25.05.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.26</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>05.06.26</i>

6. Дата видачі завдання: 28.01.2026р.

Керівник _____ / Маринич І. А./

7. **Запевнення:** Я, Мінченко Максим Юрійович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Мінченко М. Ю./

АНОТАЦІЯ

Мінченко М. Ю. Розробка імітаційної моделі двигуна змінного струму з урахуванням електричних пошкоджень для задач діагностики: кваліфікаційна робота бакалавра : 151 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. 66 с.

Метою роботи є розробка комп'ютерних моделей для моделювання електричних пошкоджень асинхронних електричних двигунів, з наступною розробкою моделі для визначення несправностей.

У першому розділі проаналізовано і класифіковано типові несправності асинхронних електродвигунів. Визначено, що 88% усіх несправностей припадає на групу електричних, детально розглядається саме дана група пошкоджень. Представлено опис ознак, що дозволяють виявити дефекти і пошкодження асинхронних електричних двигунів з короткозамкненим ротором при візуальному огляді.

У другому розділі представлена методика і схема вимірювання опорів ізоляції, а також дані, за якими виконується контроль рівня опорів. Розроблена модель для моделювання пошкоджень асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором з використанням блоків бібліотеки MATLAB/Simulink. Розроблена модель дозволяє контролювати рівень і наявність електричних пошкоджень асинхронних електричних двигунів без виведення їх з експлуатації, дозволяє забезпечити своєчасне виявлення дефектів і запобігання аварійних ситуацій на підприємствах.

ДВИГУН ЗМІННОГО СТРУМУ, ДІАГНОСТИКА, ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ, ЕЛЕКТРИЧНІ ПОШКОДЖЕННЯ, РІВЕНЬ ОПОРУ, MATLAB/SIMULINK

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	АНОТАЦІЯ			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Мінченко М. Ю.								
Перевір.		Маринич І.А.							3	1
								КНУ АКІТ-22		
Н. Контр.		Маринич І.А.								
Затверд.		Маринич І.А.								

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ.....	9
1.1 Діагностика двигунів змінного струму.....	9
1.2 Аналіз типових несправностей асинхронних силових електродвигунів та методів їх виявлення.....	12
1.3 Несправності асинхронних силових електричних двигунів, викликані порушенням ексцентриситету.....	13
1.4 Несправності асинхронних силових електричних двигунів, викликані порушенням цілісності стрижнів ротора.....	17
1.5 Несправності асинхронних електродвигунів, викликані пошкодженнями підшипників.....	19
1.6 Електричні пошкодження асинхронних електродвигунів.....	20
1.7 Проведення візуального огляду для виявлення пошкоджень асинхронних електричних електродвигунів.....	21
Висновки за розділом:.....	26
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ З МОЖЛИВІСТЮ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОШКОДЖЕНЬ.....	28
2.1 Розробка моделі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.....	28
2.2 Розробка моделі з урахуванням електричних пошкоджень асинхронного електродвигуна.....	39

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Мінченко М. Ю.			ЗМІСТ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Маринич І.А.								4	2
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

Висновки за розділом:.....	56
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	62

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасні електроприводи широко застосовуються в промисловості, енергетиці, транспорті та інших галузях, де необхідне надійне перетворення електричної енергії в механічну. Одним із найпоширеніших елементів таких систем є двигун змінного струму, який відзначається простою конструкцією, високою надійністю та ефективністю роботи. Проте в процесі експлуатації електродвигуни можуть зазнавати різних електричних пошкоджень, що призводять до зниження ефективності, порушення стабільності роботи, збільшення енергоспоживання або повної відмови обладнання.

Силовий електричний двигун є однією з основних обертальних електричних машин, яка перетворює електричну енергію в механічну. Вони застосовуються в різних галузях промисловості, енергетиці, транспорті та в багатьох інших сферах, де необхідно забезпечити надійний і ефективний перетворення енергії. Основною особливістю силових електричних двигунів є здатність створювати високий крутний момент, який передається на привідний механізм через пристрої механічної передачі. Залежно від конструктивних особливостей та принципу роботи, силові електричні двигуни поділяються на три основні типи: синхронні електричні машини (СД), асинхронні електричні машини (АД) та електричні машини постійного струму (ДПС).

Сфери застосування обертальних електричних машин є дуже різноманітними, але найбільше застосування силових електричних двигунів знаходять в електричних приводах різних механізмів. Вони використовуються для живлення підймальних механізмів, конвеєрних ліній, вентиляторів і компресорів, установок для буріння, електричного транспорту, а також в морському і річковому транспорті. Висока надійність, простота конструкції та здатність до тривалої безперебійної роботи є основними перевагами силових.

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП			Лім.	Арк.	Аркушів	
Розроб.		Мінченко М. Ю.									
Перевір.		Маринич І.А.								6	3
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

електричних двигунів, що робить їх незамінними в промислових системах.

Особливістю асинхронних електричних двигунів є їхня простота у виготовленні та експлуатації, що зробило їх найбільш поширеними серед всіх типів силових електричних двигунів. Вони не потребують складних систем для пуску та регулювання, що значно знижує їх вартість і робить їх ідеальним вибором для широкого застосування в промислових умовах.

Водночас, будь-які силові електричні двигуни, включаючи асинхронні, піддаються різноманітним впливам під час своєї експлуатації, що може призводити до зниження їх ефективності або виходу з ладу. Ці впливи можна класифікувати на теплові, електричні, магнітні та механічні. Теплові впливи, як правило, спричиняються підвищеною температурою в обмотках двигуна, електричні - внаслідок коротких замикань або перерв у провідниках, магнітні - через пошкодження магнітопроводів статора, а механічні - через зношення підшипників чи ексцентриситет ротора. Усі ці фактори можуть призвести до серйозних пошкоджень електричних машин, якщо вони не будуть виявлені та усунені своєчасно.

Виявлення та усунення таких несправностей є важливою складовою технічного обслуговування електричних машин. Сучасні методи діагностики дозволяють здійснювати моніторинг технічного стану двигунів без виведення їх з експлуатації. Однак, незважаючи на це, існує потреба в подальшому вдосконаленні методів діагностики, особливо для виявлення ранніх стадій несправностей, що можуть призвести до серйозних поломок або аварійних ситуацій. Одним із перспективних напрямів розвитку діагностики є застосування комп'ютерних моделей, що дозволяють імітувати різні види пошкоджень та прогнозувати їхній вплив на роботу двигунів.

Актуальність цієї роботи полягає в необхідності розробки ефективних методів для раннього виявлення несправностей асинхронних електричних двигунів, зокрема через створення імітаційних моделей, які зможуть моделювати електричні пошкодження, теплові перевантаження та інші види дефектів. Це дозволить своєчасно виявляти потенційні проблеми та знижувати

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ризик аварійних ситуацій, що сприятиме підвищенню надійності та довговічності електричних приводів.

Метою цієї роботи є розробка комп'ютерних моделей для моделювання електричних пошкоджень асинхронних електричних двигунів, з наступною розробкою моделі для визначення несправностей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– Проаналізувати типові несправності асинхронних електричних двигунів і існуючі методи їх діагностики.

– Вивчити програмні продукти та методи, що застосовуються для реалізації модельно-орієнтованого підходу в розробці мікропроцесорних пристроїв для діагностики.

– Розробити комп'ютерну модель асинхронного електричного двигуна, яка дозволить моделювати різноманітні пошкодження.

– Розробити та верифікувати комп'ютерний алгоритм для виявлення несправностей асинхронного електричного двигуна.

Об'єктом дослідження є асинхронний силовий електричний двигун, а предметом - створення та верифікація комп'ютерних моделей для діагностики несправностей.

Практичне значення роботи полягає в розробці нових підходів до діагностики електричних пошкоджень двигунів без виведення їх з експлуатації, що дозволить забезпечити своєчасне виявлення дефектів і запобігання аварійних ситуацій на підприємствах.

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Діагностика двигунів змінного струму

Силовий електродвигун (силовий електричний двигун або силова електрична машина) - це обертова електрична машина, в якій виконується перетворення електричної енергії в механічну. При цьому силові електричні двигуни мають різну конструкцію. Розрізняють наступні основні типи силових електричних двигунів [10, 11]:

- синхронні електричні двигуни (СД);
- асинхронні електричні двигуни (АД);
- двигуни постійного струму (ДПС).

Сфери застосування обертових електричних машин різноманітні, проте до основної сфери застосування саме силових електричних двигунів належить електричний привод. Силові електричні двигуни застосовуються як приводи підймальних механізмів, конвеєрів, вентиляторів і компресорів, установок для буріння, електричного транспорту, морського та річкового транспорту, центрифуг тощо. Головною особливістю саме силового електричного двигуна є створення високого крутного моменту та його передача, через пристрої механічної передачі, на привідний механізм.

Можливість створення і підтримання в процесі роботи електричним двигуном високого крутного моменту визначається кількістю пар полюсів: більша кількість пар полюсів силового електричного двигуна визначає більший крутний момент.

Розглядаючи різні типи електричних двигунів, можна зазначити, що асинхронні електричні двигуни є більш простими та надійними, оскільки пуск

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 1			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Мінченко М. Ю.								
Перевір.		Маринич І.А.							9	18
								КНУ АКІТ-22		
Н. Контр.		Маринич І.А.								
Затверд.		Маринич І.А.								

. таких електричних двигунів може бути реалізований без додаткових пристроїв. Розглядаючи конструкції асинхронних силових електричних двигунів, можна виділити [14]:

- асинхронні електричні машини з короткозамкненим ротором;
- асинхронні електричні машини з фазним ротором.

На відміну від асинхронних силових електричних двигунів, синхронні електричні двигуни вимагають додаткового обладнання для їхнього пуску та роботи - системи збудження або зовнішнього привідного двигуна. Особливість роботи та пуску синхронного електричного двигуна визначається принципом його роботи. Оскільки в синхронному електричному двигуні забезпечується рівність частоти обертання вала та обертового магнітного поля статора, то при прямому пуску СД відбувається занадто часта зміна полюсів обертового магнітного поля, викликана інерцією ротора, і тому його розгін до синхронної швидкості неможливий. Проте синхронні двигуни мають переваги, пов'язані з високим коефіцієнтом корисної дії, який може досягати 95%, високими значеннями перевантажувальної здатності, високими крутними моментами. Тому застосування синхронних двигунів визначається вимогами до приводу в конкретних випадках.

Будь-який із силових електричних двигунів у процесі своєї роботи піддається різним впливам, які за своєю природою можна класифікувати як:

- теплові впливи;
- електричні впливи;
- магнітні впливи;
- механічні впливи.

Усі зазначені впливи з часом призводять до зміни властивостей матеріалів і конструктивних деталей та частин електричної машини, що і викликає пошкодження та вихід із ладу силового електричного двигуна.

Питанням визначення та виявлення несправності обертових електричних машин присвячено велику кількість наукових та науково-дослідних робіт.

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Однією з перших робіт, у якій описуються несправності асинхронного електричного двигуна, є робота Williamson S. та Mirzoian K. [25].

Серед несправностей силових електричних двигунів виділяють три основні групи:

- механічні несправності, наприклад ексцентриситет ротора АД, вихід із ладу або зношення підшипників, порушення роботи муфт тощо;
- електричні несправності, наприклад обрив провідників в обмотці статора, замикання між фазних провідників в обмотці статора, замикання провідників між витками однієї фази, замикання провідників обмотки статора на корпус асинхронного електричного двигуна;
- магнітні несправності, наприклад розшарування магнітопроводу статора, замикання між листами магнітопроводу статора.

На сьогодні у практиці діагностики та оцінки технічного стану введено ряд стандартів [18], [21], [19], [20], які є аналогічними до міжнародних стандартів. Крім того, організація «IEEE Power Engineering Society» (Інститут інженерів електротехніки та електроніки. Товариство енергетичного машинобудування) підготувала методичні рекомендації [4] щодо контролю технічного стану та визначення несправності асинхронних електричних двигунів.

Для діагностики та виявлення несправності асинхронних силових електричних двигунів без виведення їх із роботи, згідно із зазначеними стандартами, застосовуються наступні методи неруйнівного контролю [6]:

- метод моніторингу та аналізу вібрацій асинхронного силового електричного двигуна;
- метод моніторингу та аналізу теплового стану конструктивних частин асинхронного силового електричного двигуна;
- метод акустичної емісії;
- метод моніторингу та аналізу спектральних характеристик струму статора асинхронного силового електричного двигуна.

Найбільш розповсюдженим і простим, з точки зору обладнання, що застосовується, є метод моніторингу та аналізу спектральних характеристик струму статора асинхронного силового електричного двигуна. Проте використання всіх зазначених методів неруйнівного контролю має забезпечувати раннє виявлення дефектів, що дозволяє вчасно реагувати та запобігати аварійним ситуаціям, викликаним виходом із ладу асинхронного силового електричного двигуна.

1.2 Аналіз типових несправностей асинхронних силових електродвигунів та методів їх виявлення

Серед несправностей асинхронних силових електричних двигунів виділяють механічні, електричні та магнітні несправності [24].

Статистичні оцінки несправностей асинхронних електричних двигунів на основі джерел представлені на рисунку 1.1.

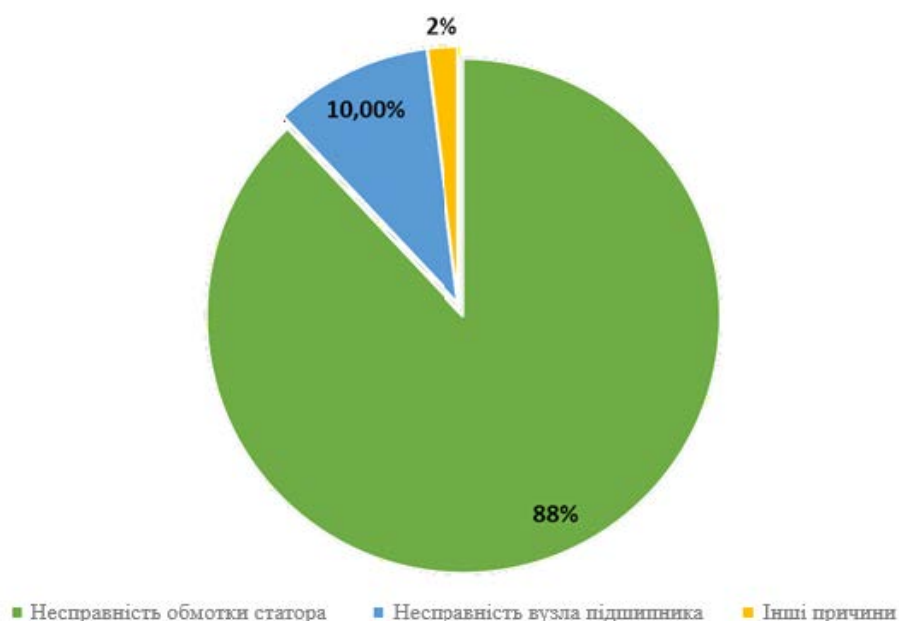


Рисунок 1.1 — Статистичні дані розподілу причин пошкоджень асинхронних силових електричних двигунів

За даними, представленими на рисунку 1.1, видно, що найчастіше вихід з ладу асинхронного електричного двигуна викликаний несправності обмотки

статора. При цьому несправність обмотки статора може бути викликана різними факторами. Аналіз джерел дозволив побудувати діаграму (рисунок 1.2), що відображає статистичний розподіл видів пошкоджень статора асинхронного електричного двигуна.

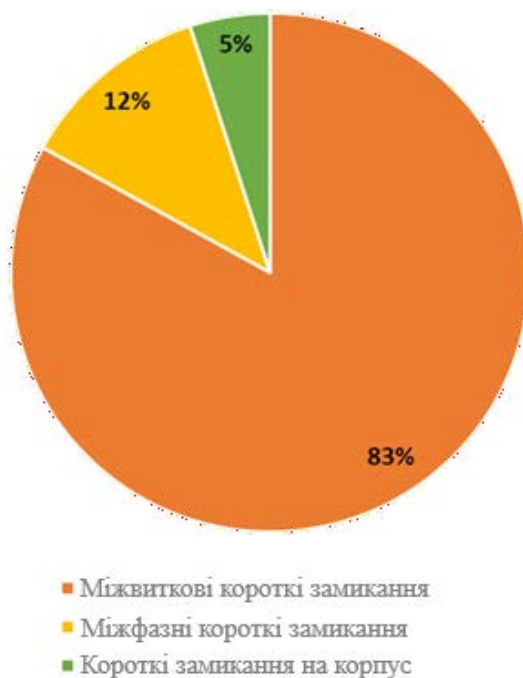


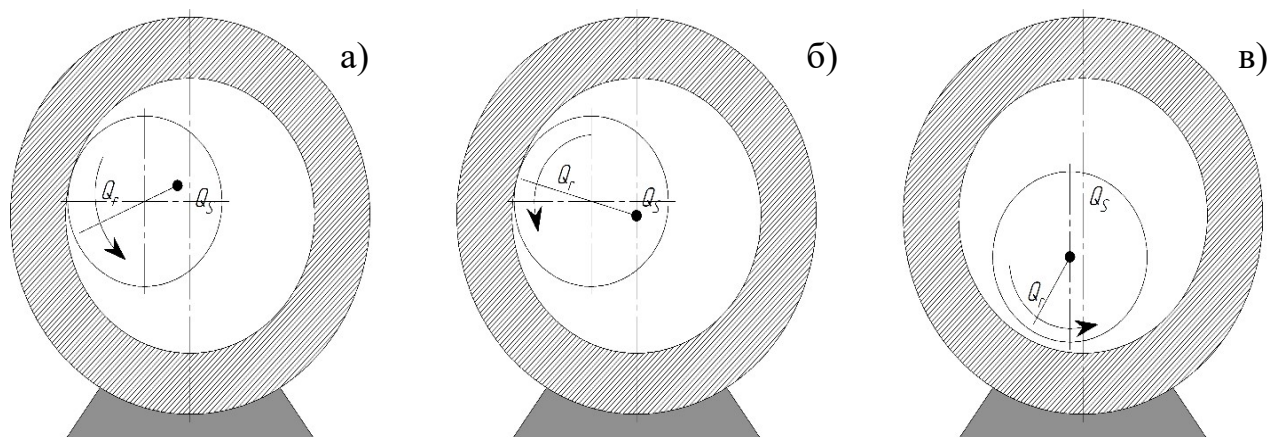
Рисунок 1.2 — Статистичні дані розподілу причин пошкоджень статора асинхронних силових електричних двигунів

За даними, представленими на рисунку 1.2, можна зробити висновок про те, що найчастіше пошкодження в обмотках статора викликані між витковими короткими замиканнями.

1.3 Несправності асинхронних силових електричних двигунів, викликані порушенням ексцентриситету

До механічних несправностей відносять насамперед порушення ексцентриситету ротора та вихід з ладу підшипників [8]. На рисунку 1.3 показані спрощені поперечні перерізи асинхронного електричного двигуна з різними типами ексцентриситетів.

Змішаний ексцентриситет (рисунок 1.3, а) характеризується зміщенням осі обертання ротора відносно осі симетрії як самого ротора (Qr), так і відносно осі симетрії статора (QS).



а – змішаний ексцентриситет ротора, б – динамічний ексцентриситет ротора, в – статичний ексцентриситет ротора, Qr – вісь симетрії ротора, QS – вісь симетрії статора.

Рисунок 1.3 — Види ексцентриситету ротора асинхронного електричного двигуна

Динамічний ексцентриситет (рисунок 1.3, б) характеризується зміщенням осі обертання ротора відносно осі його симетрії (Qr), зі збігом з віссю симетрії статора (QS).

Статичний ексцентриситет (рисунок 1.3, в) характеризується збігом осі обертання ротора з власною віссю симетрії (Qr), але не збігом з віссю симетрії статора (QS).

Ексцентриситет ротора силового асинхронного електричного двигуна характеризується відносною величиною ε , яка визначається виразом:

$$\varepsilon = \frac{\delta_e - \delta_{min}}{\delta_e} \quad (1.1)$$

де δ_e – величина повітряного зазору за наявності ексцентриситету ротора, м;
 δ_{min} – мінімально допустима величина повітряного зазору для даного асинхронного силового електричного двигуна, м.

При використанні виразу (1.1) отримане значення ексцентриситету (ε) повинно порівнюватися з допустимим, тобто $\varepsilon \in (0, 1)$.

Наявність у працюючому асинхронному електричному двигуні ексцентриситету ротора будь-якого з трьох видів призводить до:

- одностороннього магнітного тяжіння та підвищеного зносу підшипників ротора (механічний тип пошкодження асинхронного силового електричного двигуна);
- місцевого перегріву магнітопроводу статора і пробую ізоляції статора (електричний тип пошкодження асинхронного силового електричного двигуна);
- виходу з ладу підшипникового вузла (механічний тип пошкодження асинхронного силового електричного двигуна).

Усі перераховані пошкодження асинхронного силового електричного двигуна, викликані збільшеним ексцентриситетом ротора, можуть бути продіагностовані на ранній стадії наступними методами:

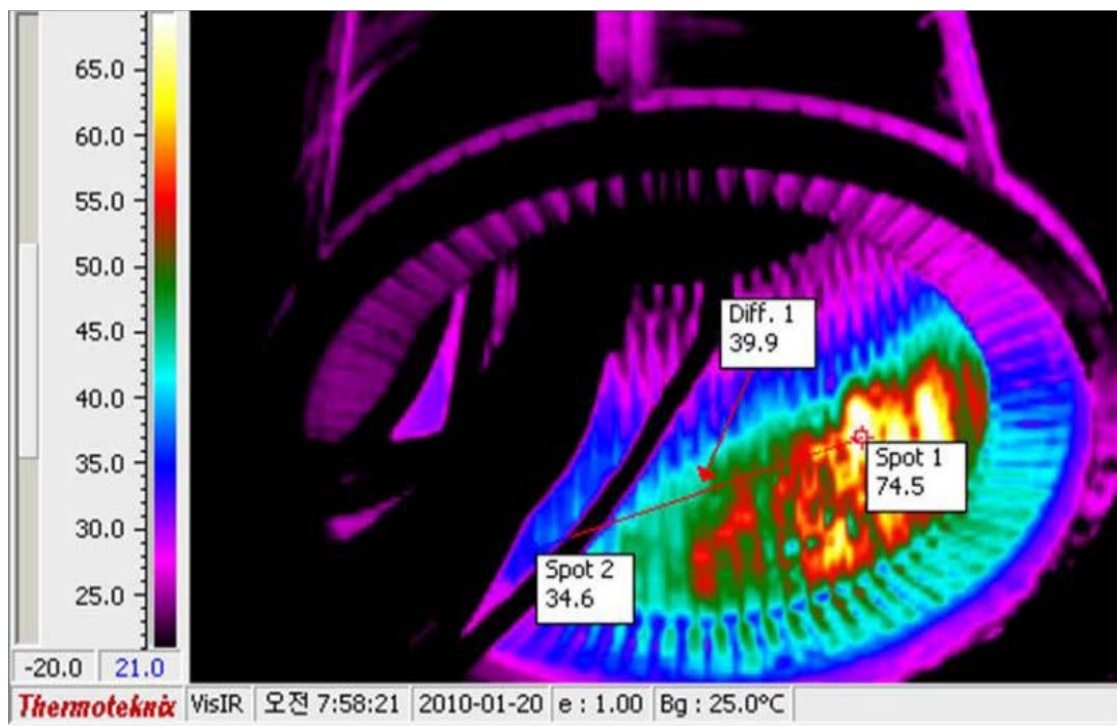
- моніторингом і аналізом вібрацій;
- моніторингом і аналізом теплового стану;
- моніторингом і аналізом спектральних характеристик струму статора.

Метод аналізу вібрацій і метод аналізу спектральних характеристик струму статора є переважними при виявленні ексцентриситету ротора. Метод, пов'язаний з аналізом теплового стану, не дозволяє визначити пошкодження, що виникає, на ранній стадії, оскільки постійне використання тепловізійного контролю (за допомогою тепловізора) є складним, так само як і розміщення температурних датчиків усередині статора асинхронного силового електричного двигуна.

На рисунку 1.4 зображені пошкодження асинхронного силового електричного двигуна, викликані наявністю ексцентриситету ротора.

Проведений аналіз пошкоджень асинхронного силового електричного двигуна дозволив визначити переважні методи його виявлення, а також типи пошкоджень, що викликаються в асинхронному електричному двигуні.

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15



а)



б)

а – пробій ізоляції статора, викликаний перегрівом магнітопроводу, б – наслідки зіткнення ротора і статора асинхронного силового електричного двигуна при перевищенні допустимої величини ексцентриситету.

Рисунок 1.4 — Наслідки перевищення допустимої величини ексцентриситету ротора

1.4 Несправності асинхронних силових електричних двигунів, викликані порушенням цілісності стрижнів ротора

Одним із найбільш навантажених конструктивних елементів асинхронного силового електродвигуна є ротор. У процесі експлуатації асинхронного силового електричного двигуна ротор піддається впливу відцентрових сил, тепловому розширенню, ударним струмовим навантаженням та електродинамічним зусиллям [4], що в підсумку призводить до порушення цілісності стрижнів ротора.

Порушення цілісності стрижнів ротора асинхронного електричного двигуна може відбуватися як по всій довжині стрижня, так і в місці контакту стрижня з короткозамкненим кільцем.

При пошкодженні цілісності стрижнів ротора знижується середній електромагнітний момент і зростає амплітуда коливань крутного моменту, створюваного електричним двигуном. Зростання амплітуди коливань крутного моменту безпосередньо викликає коливання в частоті обертання ротора. Також при порушенні цілісності стрижнів ротора зростає ковзання асинхронного електричного двигуна, і його зростання залежить від кількості стрижнів із порушеною цілісністю.

Наслідки пошкодження цілісності стрижнів ротора є джерелами додаткового зростання амплітуди механічних коливань, що призводять до виходу асинхронного електричного двигуна з ладу.

На рисунку 1.5 представлені зображення пошкоджень ротора асинхронних силових електричних двигунів [4].

Для діагностики пошкоджень ротора, пов'язаних із порушенням цілісності стрижнів, застосовуються:

- моніторинг і аналіз вібрацій;
- методи акустичної емісії;
- моніторинг і аналіз теплового стану;
- моніторинг і аналіз спектральних характеристик струму і напруги статора.



а)



б)



в)



г)

а – вихід стрижня з паза ротора з подальшим коротким замиканням обмотки статора асинхронного двигуна типу АДЧР, б – вихід стрижня з паза ротора асинхронного електродвигуна типу ДАЗО, в – вихід стрижня з паза ротора асинхронного електричного двигуна типу АНЗ, г – пошкодження обмотки статора, викликане виходом стрижня з паза ротора асинхронного електричного двигуна типу АНЗ.

Рисунок 1.5 - Зображення пошкоджень ротора асинхронного електричного двигуна

При цьому слід зазначити, що застосування методу, пов'язаного з моніторингом і аналізом спектральних характеристик струму і напруги статора, є досить перспективним, оскільки він не вимагає застосування додаткових дорогих датчиків і приладів на відміну від інших методів.

1.5 Несправності асинхронних електродвигунів, викликані пошкодженнями підшипників

Несправності, пов'язані з пошкодженнями підшипників, є поширеними пошкодженнями асинхронних електродвигунів.

На рисунку 1.6 показані типові пошкодження підшипників асинхронних електродвигунів.



а)



б)



в)



г)

а – пошкодження внутрішньої обойми підшипника; б – пошкодження зовнішньої обойми підшипника; в – пошкодження стакана підшипника; г – пошкодження кульки підшипника

Рисунок 1.6 — Зображення пошкоджень підшипників асинхронного електричного двигуна

Причинами виходу з ладу підшипників асинхронних електродвигунів є:

- забруднення мастила підшипника;
- перевищення допустимого навантаження на підшипники;
- присутність підшипникових струмів.

При виникненні несправності асинхронного електродвигуна виникають підвищені вібрації ротора, а також самого електродвигуна, а також підвищений шум при роботі асинхронного електродвигуна. При цьому виявлення несправності, викликаних пошкодженням підшипника, досить проблематичне. Даний вид пошкоджень погано діагностується методами спектрального аналізу струму статора.

Найбільш дієвим методом виявлення даного типу пошкоджень є застосування систем вимірювання вібрацій і шуму. Інші методи дають недостатньо точні результати.

Варто зазначити, що пошкодження підшипників, згідно з проведеним аналізом типових пошкоджень (рисунок 1.1), стоять на другому місці серед пошкоджень асинхронних електродвигунів. Однак електричні пошкодження асинхронних електродвигунів є більш поширеними.

1.6 Електричні пошкодження асинхронних електродвигунів

До електричних пошкоджень асинхронних електродвигунів належать такі види пошкоджень:

- короткі замикання між фазами обмотки статора;
- короткі замикання між витками обмотки статора;
- коротке замикання між фазою обмотки на корпус статора асинхронного електродвигуна.

На рисунку 1.7 показано зображення електричного пошкодження асинхронного електричного двигуна.

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20



Рисунок 1.7 - Зображення пошкодження, викликаного коротким замиканням

При виникненні електричного пошкодження асинхронного електродвигуна двигун може продовжувати роботу, при цьому робочі характеристики двигуна погіршуються [5]. Для виявлення пошкоджень можуть бути використані методи спектрального аналізу.

1.7 Проведення візуального огляду для виявлення пошкоджень асинхронних електричних електродвигунів

При прояві пошкодження асинхронного двигуна відбувається зміна його характеристик роботи. При цьому можливе визначення типу пошкодження за результатами візуального огляду. Для виявлення даних пошкоджень може застосовуватися таблиця несправності [15].

При візуальному огляді та виявленні несправності орієнтуються на такі характерні ознаки:

- асинхронний електродвигун не вмикається;
- спостерігається ускладнений запуск асинхронного електродвигуна;

- при запуску асинхронного електродвигуна спостерігається підвищене гудіння;
- при роботі асинхронного двигуна спостерігається підвищене гудіння;
- при роботі асинхронного електродвигуна без навантаження спостерігається сильний нагрів;
- при роботі асинхронного електродвигуна під навантаженням спостерігається сильний нагрів;
- при роботі асинхронного електродвигуна проявляється сильний нагрів частин обмотки статора електродвигуна.

Перераховані ознаки дозволяють виділити такі несправності:

- перевантаження електродвигуна;
- обрив фазного живильного проводу;
- знижена живильна напруга мережі;
- знижена частота живильної напруги в мережі;
- підвищена живильна напруга в мережі;
- підвищена частота напруги в живильній мережі;
- невірна схема підключення асинхронного електродвигуна;
- міжвиткове замикання в статорній обмотці асинхронного електродвигуна;
- між фазне замикання в статорній обмотці асинхронного електродвигуна;
- неправильна установка осьових вентиляторів охолодження асинхронного електродвигуна.

Додатково для трифазних асинхронних електродвигунів з короткозамкненими роторами можуть діагностуватися додаткові пошкодження за наявністю таких ознак:

- при вмиканні асинхронного електродвигуна не відбувається розгін двигуна;

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

- при вмиканні асинхронного електродвигуна не відбувається розгін двигуна, однак після повертання вала двигун розганяється. При цьому обертання асинхронного електродвигуна супроводжується сильними поштовхами і підвищеним гудінням;
- при вмиканні асинхронного електродвигуна без навантаження двигун обертається, однак при підключенні навантаження двигун зупиняється;
- при вмиканні асинхронного електродвигуна спостерігається підвищене гудіння, при цьому швидкість обертання ротора низька, а при вимірюванні струмів спостерігається різниця в значеннях фазних струмів, а при підключенні двигуна без навантаження фазні струми перевищують номінальні значення;
- при номінальному навантаженні суттєво збільшується нагрів конструктивних частин;
- при проведенні вимірювань опору ізоляції асинхронного електродвигуна реєструються низькі значення;
- при роботі асинхронного електродвигуна спостерігається підвищена вібрація, яка зберігається при відключенні від мережі;
- висока вібрація при роботі асинхронного електродвигуна, при цьому спостерігається велика різниця в значеннях фазних струмів, а робота двигуна супроводжується швидким нагрівом частини статора.

Додаткові ознаки, при візуальному огляді, дозволяють діагностувати такі пошкодження:

- обрив живильного проводу, в тому числі через перегорання плавкої вставки захисного запобіжника або відключення однієї з фаз автоматичного вимикача, за відсутності механічного зв'язку в конструкції автоматичного вимикача;
- внутрішні обриви у фазній статорній обмотці асинхронного електродвигуна;
- знижена напруга в живильній мережі;
- невірна збірка схеми роботи електродвигуна;

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- обрив стрижнів ротора;
- виткові замикання в статорній обмотці;
- забруднення вентиляційних каналів двигуна і викликаний цим підвищений нагрів;
- старіння ізоляції асинхронного електродвигуна;
- зволоження ізоляції асинхронного електродвигуна;
- дисбаланс ротора;
- порушення співвісності валів електродвигунів і робочого механізму;
- коротке замикання обмотки статора.

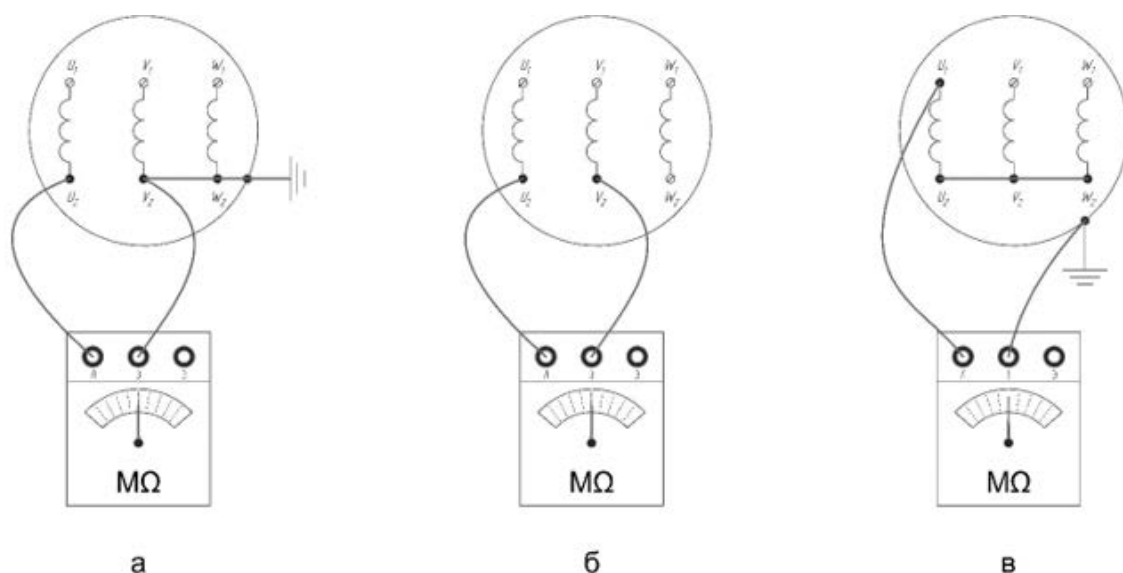
Як видно з представлених основних і додаткових ознак, може бути виявлено велику кількість різних пошкоджень. При цьому частина пошкоджень визначається за допомогою додаткових вимірювань, таких як вимірювання температури статора, вимірювання опору ізоляції, а також вимірювання фазних струмів.

Для проведення вимірювань температури статора асинхронного електричного двигуна, а також для виявлення нерівномірного нагріву використовуються тепловізори. Вимірювання фазних струмів може бути виконано за допомогою підключення вимірювальних кліщів у момент роботи асинхронного електродвигуна, а вимірювання опору ізоляції виконується за допомогою мегомметрів.

Схема проведення вимірювань опору ізоляції для трифазних асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором представлена на рисунку 1.8.

На рисунку 1.8 показані схеми:

- вимірювання опору ізоляції фазної обмотки статора відносно статора та інших обмоток (рисунок 1.8, а), вимірювання опору фази А, виводи обмоток U_2 відносно корпусу, фази В і фази С;
- вимірювання опору міжфазної ізоляції обмотки статора (рисунок 1.8, б), вимірювання опору між фазами А і В, виводи обмоток $U_2 - V_2$;



а – схема вимірювання опору фазної обмотки відносно статора та інших фазних обмоток; б – схема вимірювання опору між фазними обмотками; в – схема вимірювання опору фазної обмотки відносно статора

Рисунок 1.8 — Схема вимірювання опору ізоляції трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором

– вимірювання опору ізоляції обмотки статора відносно корпусу асинхронного електродвигуна (рисунок 1.8, в).

При проведенні вимірювань опору ізоляції можуть застосовуватися різні моделі мегомметрів: як цифрові, так і аналогові.

При використанні аналогових мегомметрів необхідно виконувати умову – вимірювання опору протягом мінімум 60 с. Дане значення часу дозволяє досягти сталого значення опору ізоляції (R_{60}). На практиці також вимірювання опору ізоляції може застосовуватися для визначення ступеня зволоження ізоляції. Для цього опір вимірюють протягом 15 с (R_{15}).

Ступінь зволоження визначають за розрахунковим коефіцієнтом:

$$K_{abc} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (1.2)$$

де R_{60} – значення опору ізоляції, виміряне мегомметром протягом 60 с і зведене до нормальних умов, МОм; R_{15} – значення опору ізоляції, виміряне мегомметром протягом 15 с і зведене до нормальних умов, МОм.

Таблиця 1.1 — Регламентовані значення опору ізоляції

Напруга асинхронного електродвигуна, кВ	0,4	3	6	10
Опір ізоляції, зведений до нор. умов R_{60} , МОм	10	30	60	100

Для зволоженої ізоляції розрахунковий коефіцієнт (1.2) $K_{abc} = 1$. Для сухої ізоляції $K_{abc} = 1,3$.

Висновки за розділом:

У роботі виконано аналіз несправності силових асинхронних електричних двигунів. Серед несправностей розглянуто несправності, викликані порушенням ексцентриситету ротора, порушенням цілісності стрижнів ротора, пошкодженнями підшипників; короткими замиканнями в обмотці статора.

Для кожного розглянутого типу пошкоджень визначено методи, що є найбільш перспективними для їх виявлення.

Для розглянутих несправностей найбільш перспективним методом їх діагностики є метод, пов'язаний з моніторингом і аналізом спектральних характеристик струму і напруги статора асинхронного електричного двигуна.

Проведений аналіз пошкоджень асинхронних електродвигунів дозволив виявити, що електричні пошкодження асинхронних електродвигунів є найбільш поширеним типом пошкоджень, і на їх частку припадає близько 88% від усіх пошкоджень. Виходячи з результатів проведеного аналізу, необхідно розглядати електричні пошкодження та методи їх визначення.

Представлено ознаки, що дозволяють при візуальному огляді виявити пошкодження асинхронних електродвигунів.

Також детально описано додаткові ознаки, що дозволяють виявити пошкодження конкретно асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором, а також пошкодження, що виявляються за додатковими ознаками.

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Як видно з перерахованих несправностей, частина з них відноситься до проблем, викликаних якістю електричної енергії живильної мережі, а частина відноситься до помилок підключення або вибору асинхронних електричних двигунів. При цьому візуальний огляд дозволяє виявити наявність електричних пошкоджень асинхронних електричних двигунів, а саме міжвиткові короткі замикання в статорній обмотці та між фазні короткі замикання в статорній обмотці. При виявленні даних несправностей експлуатаційний персонал повинен провести огляд і вимірювання опору статорної обмотки асинхронного електричного двигуна.

Визначено, що на практиці застосовується метод вимірювання опору ізоляції, який дозволяє виявити більшу частину пошкоджень асинхронного електродвигуна. Представлена схема вимірювання опору ізоляції, а також методика визначення ступеня зволоження ізоляції.

					КНУ КРБ.151.26.10.01.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ З МОЖЛИВІСТЮ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОШКОДЖЕНЬ

2.1 Розробка моделі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

Для розробки моделі виконаємо розрахунок параметрів згідно з методикою, представленою в [22] для трифазного асинхронного електричного двигуна з короткозамкненим ротором серії 4А та паспортними даними згідно з [17], представленими в таблиці 2.1.

Повна номінальна потужність:

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos \varphi} = \frac{30 * 10^3}{0.9} = 33.333 \text{ (кВА)} \quad (2.1)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна активна потужність, згідно з таблицею 2.1, кВт; $\cos \varphi$ – номінальний коефіцієнт активної потужності, згідно з таблицею 2.1.

Номінальний струм двигуна:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} * \cos \varphi * \eta_{\text{ном}}} = \frac{30 * 10^3}{\sqrt{3} * 380 * 0.9 * 0.905} = 55.961 \quad (2.2)$$

де $\eta_{\text{ном}}$ – номінальний коефіцієнт корисної дії, згідно з таблицею 2.1.

Активний опір обмотки статора:

$$R_s = \frac{R'_1 * U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} * I_{\text{ном}}} = \frac{0.030 * 380}{\sqrt{3} * 55.961} = 0.118 \text{ (Ом)} \quad (2.3)$$

де R'_1 – активний опір обмотки статора асинхронного електричного двигуна в номінальному режимі, згідно з таблицею 2.1, в.о.; $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга

					КНУ КРБ.151.26.10.02.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Мінченко М. Ю.			РОЗДІЛ 2	Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Маринич І.А.							
							28	30	
Н. Контр.		Маринич І.А.				КНУ АКІТ-22			
Затверд.		Маринич І.А.							

двигуна, згідно з таблицею 2.1, В; $I_{ном}$ – струм двигуна в номінальному режимі, визначений у (2.2), А.

Таблиця 2.1 — Паспортні дані асинхронного електродвигуна [17]

Найменування параметра	Позначення параметра	Значення параметра
Типорозмір	-	4A180M2Y3
Номінальна потужність	$P_{ном}$	30
Паспортна швидкість обертання, об/хв	n_0	3000
Номінальний коефіцієнт корисної дії, %	$\eta_{ном}$	90,5
Номінальний коефіцієнт активної потужності	$\cos \varphi$	0,9
Номінальна частота живильної мережі, Гц	$f_{ном}$	50
Головний індуктивний опір, в.о.	X_{μ}	3,8
Активний опір обмотки статора в номінальному режимі, в.о.	R_1''	0,030
Індуктивний опір обмотки статора в номінальному режимі, в.о.	X_1''	0,073
Зведений до обмотки статора активний опір обмотки ротора в номінальному режимі, в.о.	R_2''	0,018
Зведений до обмотки статора індуктивний опір обмотки ротора в номінальному режимі, в.о.	X_2''	0,11
Зведений до обмотки статора активний опір обмотки ротора при короткому замиканні асинхронної машини, в.о.	R_{2n}''	0,024
Активний опір короткого замикання, в.о.	$R_{кп}$	0,054
Індуктивний опір короткого замикання, в.о.	$X_{кп}$	0,13
Кратність пускового моменту, %	m_n	1,4
Кратність максимального моменту, %	m_m	1,1
Кратність критичного моменту, %	m_k	2,5
Номінальне ковзання, %	$S_{ном}$	1,8
Критичне ковзання, %	S_k	12,5
Кратність пускового струму	I_n	7,5
Момент інерції, кг·м ²	J	0,085
Номінальна напруга, В	$U_{ном}$	380

Зведений активний опір обмотки ротора для номінального режиму:

$$R'_r = \frac{R''_2 * U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} * I_{\text{НОМ}}} = \frac{0.018 * 380}{\sqrt{3} * 55.961} = 0.071 \text{ (Ом)} \quad (2.4)$$

де R''_2 – зведений до обмотки статора активний опір обмотки ротора в номінальному режимі, згідно з таблицею 2.1, в.о.

Зведений активний опір обмотки ротора для режиму прямого пуску:

$$R'_r = \frac{R''_{2\pi} * U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} * I_{\text{НОМ}}} = \frac{0.024 * 380}{\sqrt{3} * 55.961} = 0.094 \text{ (Ом)} \quad (2.5)$$

де $R''_{2\pi}$ – зведений до обмотки статора активний опір обмотки ротора при короткому замиканні асинхронної машини, згідно з таблицею 2.1, в.о.

Індуктивності розсіювання обмоток статора для сталеного режиму:

$$L_{\ell s} = \frac{X'_1}{2\pi * f_{\text{НОМ}}} * \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} * I_{\text{НОМ}}} = \frac{0.073}{2\pi * 50} * \frac{380}{\sqrt{3} * 55.961} = 0.00091 \text{ (Гн)} \quad (2.6)$$

де X'_1 – індуктивний опір обмотки статора в номінальному режимі, згідно з таблицею 2.1, в.о.; $f_{\text{НОМ}}$ – номінальна частота живильної мережі, згідно з таблицею 2.1, Гц.

Індуктивності розсіювання обмоток ротора для сталеного режиму:

$$L'_{\ell r} = \frac{X''_2}{2\pi * f_{\text{НОМ}}} * \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} * I_{\text{НОМ}}} = \frac{0.11}{2\pi * 50} * \frac{380}{\sqrt{3} * 55.961} = 1.373 * 10^{-3} \text{ (Ом)} \quad (2.7)$$

де X''_2 – зведений до обмотки статора індуктивний опір обмотки ротора в номінальному режимі, згідно з таблицею 2.1, в.о.

Індуктивності розсіювання обмоток статора для режиму прямого пуску:

$$L_{\ell s} = L'_{\ell r} = \frac{X_{\text{КП}}}{4\pi * f_{\text{НОМ}}} * \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} * I_{\text{НОМ}}} = \frac{0.13}{4\pi * 50} * \frac{380}{\sqrt{3} * 55.961} = 8.111 * 10^{-4} \quad (2.8)$$

де $X_{\text{кп}}$ – індуктивний опір короткого замикання, згідно з таблицею 2.1, в.о.

Індуктивність кола намагнічування для сталеного режиму:

$$L_m = \frac{X_{\mu}}{2\pi * f_{\text{НОМ}}} * \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} * I_{\text{НОМ}}} = \frac{3.8}{2\pi * 50} * \frac{380}{\sqrt{3} * 55.961} = 0.047 \text{ (Гн)} \quad (2.9)$$

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де X_μ – головний індуктивний опір, згідно з таблицею 2.1, в.о.

Індуктивність кола намагнічування для режиму прямого пуску:

$$L'_m = K_m * L_m = 0.3 * 0.047 = 0.0141 \text{ (Гн)} \quad (2.10)$$

де K_m – коефіцієнт зв'язку індуктивності кола намагнічування для усталеного режиму та індуктивності кола намагнічування режиму прямого пуску. Згідно з [8] приймається $K_m = 0,3$.

Номінальна частота обертання:

$$n_H = n_0 \left(1 - \frac{S_{\text{ном}}}{100}\right) = 3000 \left(1 - \frac{1.8}{100}\right) = 2964 \left(\frac{\text{об}}{\text{хв}}\right) \quad (2.11)$$

де n_0 – паспортна швидкість обертання, згідно з таблицею 2.1, об/хв; $S_{\text{ном}}$ – номінальне ковзання, згідно з таблицею 2.1, %.

Коефіцієнт в'язкого тертя може бути приблизно визначений за виразом:

$$F = \frac{K_{\text{мех}} * P_{\text{ном}}}{\left(2\pi * \frac{n_H}{60}\right)^2} = \frac{0,03 * 30000}{\left(2\pi * \frac{2964}{60}\right)^2} = 0.003599 \quad (2.12)$$

де $K_{\text{мех}}$ – коефіцієнт зв'язку номінальної потужності асинхронного електричного двигуна з номінальною механічною потужністю, згідно з [8] приймається $K_{\text{мех}} = 0,03$.

Кількість пар магнітних полюсів:

$$p = \frac{60 * f_{\text{ном}}}{n_0} = 1 \quad (2.13)$$

де $f_{\text{ном}}$ – номінальна частота живильної напруги, згідно з таблицею 2.1, Гц; n_0 – паспортна частота обертання двигуна, згідно з таблицею 2.1, об/хв.

Оскільки всі параметри, розраховані за виразами (2.1) - (2.13), отримані в іменованих одиницях, то блок моделі асинхронного електродвигуна в MATLAB/Simulink також будемо використовувати з можливістю введення параметрів в іменованих одиницях (Asynchronous Machine SI Units) [1].

Загальний вигляд моделі з асинхронним електричним двигуном представлений на рисунку 2.1

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

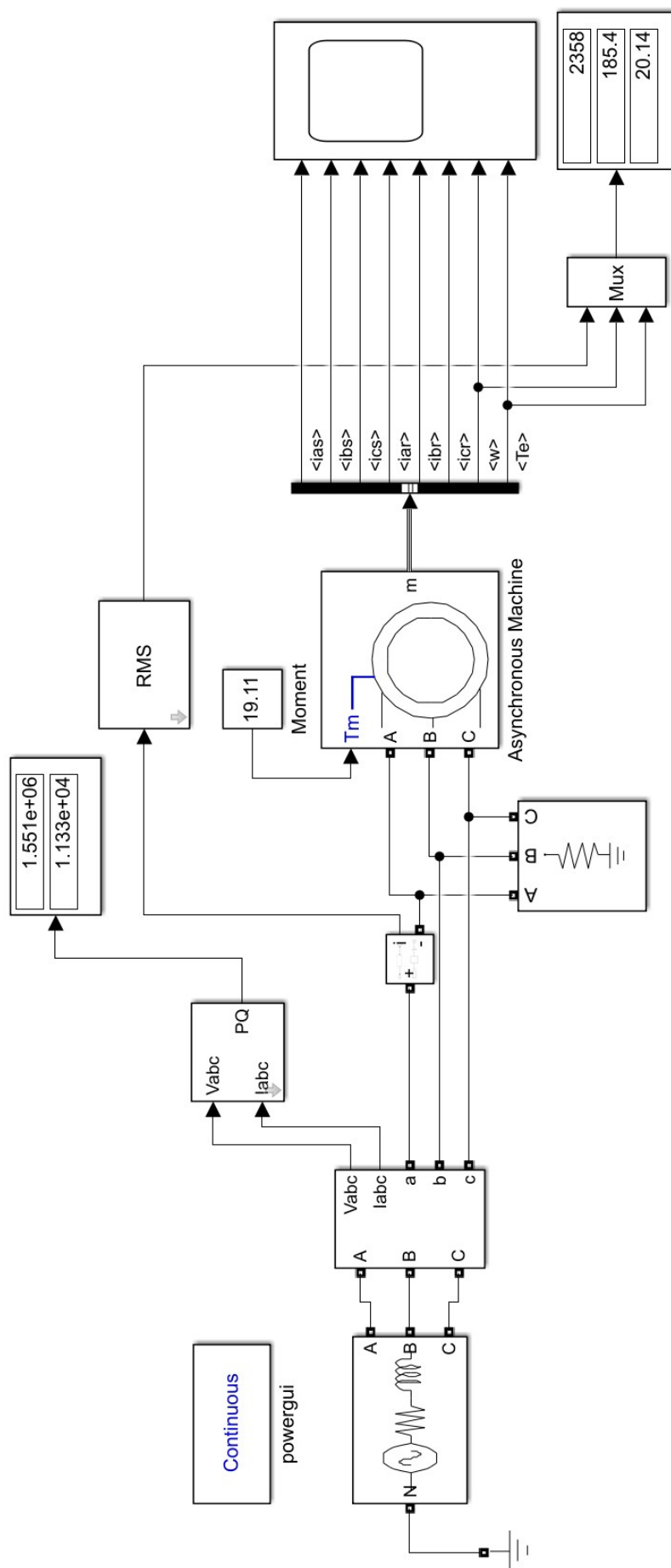


Рисунок 2.1 — Загальна модель асинхронного електродвигуна без урахування пошкодження

Модель (рисунок 2.1) складається з наступних блоків:

- джерело живлення (Three-Phase Source);
- трифазний вимірювач параметрів живильної мережі (Three-Phase V-I Measurement);
- вимірювач трифазної активної та реактивної потужностей (3-phase Instantaneous Active & Reactive Power);
- блок вимірювання діючих значень (RMS);
- блок вимірювання фазного струму (Current Measurement);
- блок трифазного навантаження (Three-Phase Series RLC Load);
- блок моделі асинхронного двигуна (Asynchronous Machine SI Units);
- блок для моделювання моменту на валу асинхронного двигуна (Constant);
- блок вимірювання внутрішніх параметрів моделі асинхронного двигуна (Bus Selector);
- блок побудови осцилограм (Scope) та відображення даних вимірювання (Display).

Для верифікації розробленої моделі асинхронного електричного двигуна з короткозамкненим ротором необхідно змоделювати бездефектний режим його роботи. Для моделювання режиму роботи асинхронного електричного двигуна без пошкоджень необхідно визначити номінальний механічний момент за виразом:

$$M_H = \frac{60P_H}{2\pi n_H} = \frac{60 \cdot 30 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 2964} = 96,65 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad (2.14)$$

де P_H – номінальна потужність асинхронного електричного двигуна, згідно з таблицею 2.1, Вт; n_H – частота обертання ротора асинхронного електричного двигуна в сталеному режимі роботи, визначена в (2.11), об/хв.

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Осцилограми, що характеризують режим прямого пуску моделі асинхронного електричного двигуна з моментом на валу 11,641 Н·м, показані на рис.2.2 – 2.4.

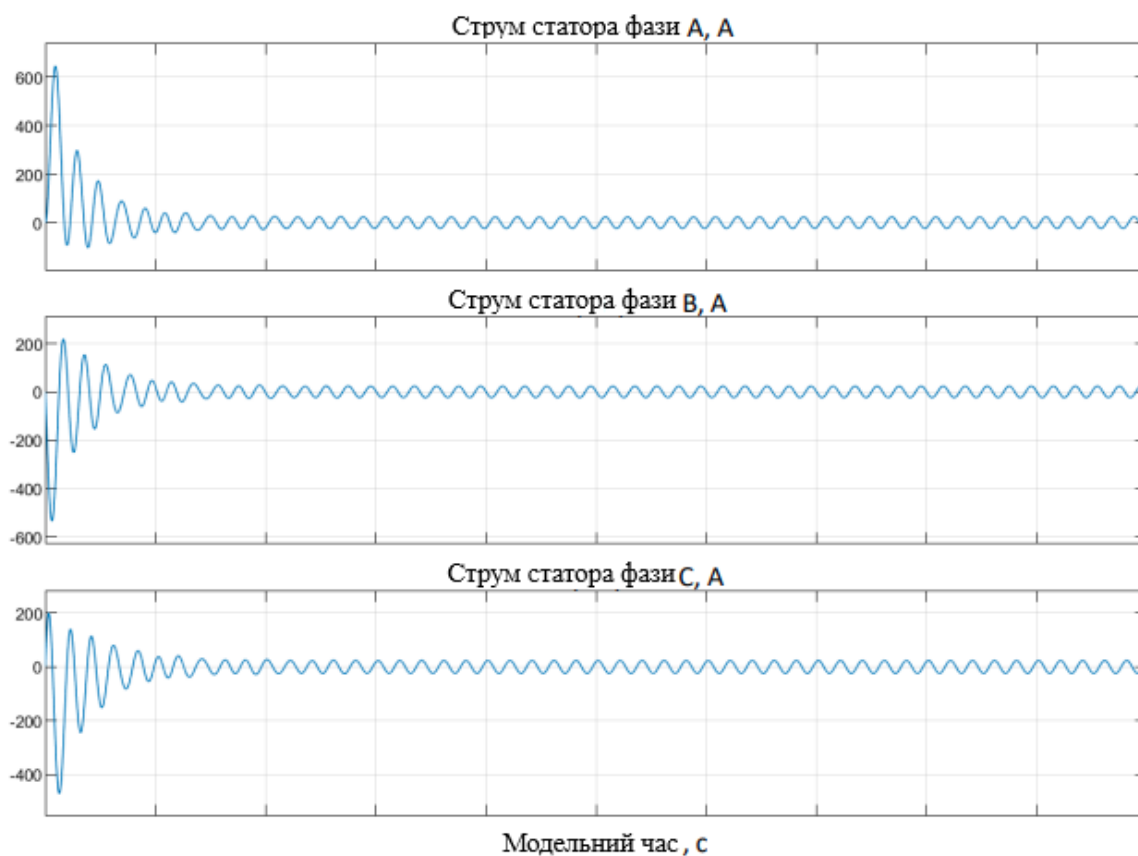


Рисунок 2.2 - Зміни миттєвих значень фазного струму обмоток статора АД при прямому пуску з моментом 11,641 Н·м

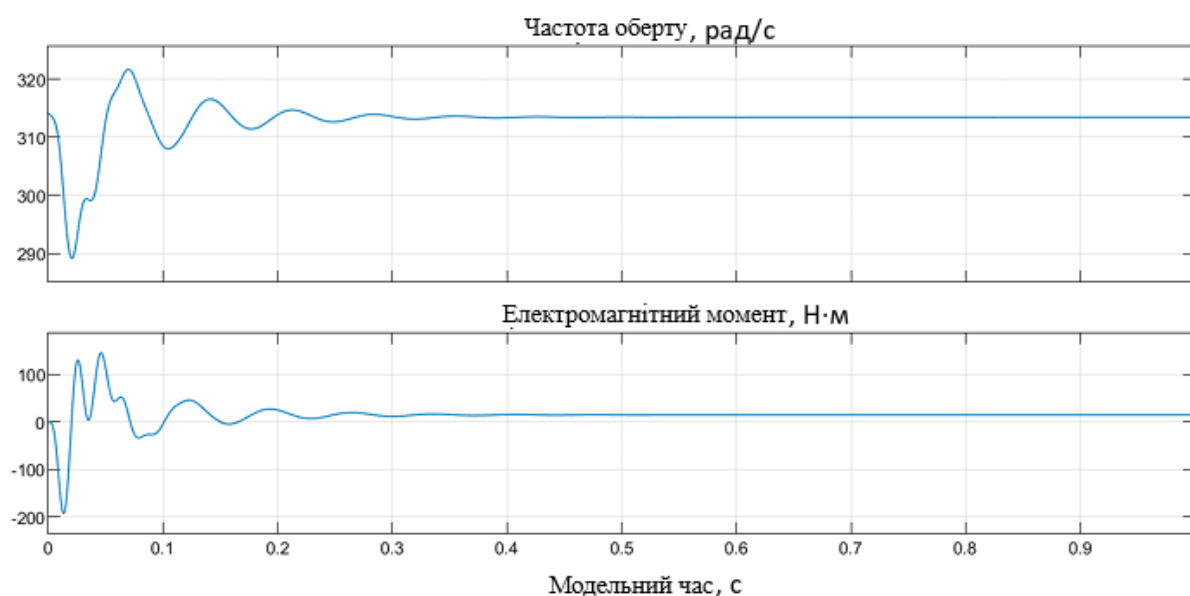


Рисунок 2.3 - Зміни миттєвих значень частоти обертання та електромагнітного моменту АД при прямому пуску з моментом 11,641 Н·м

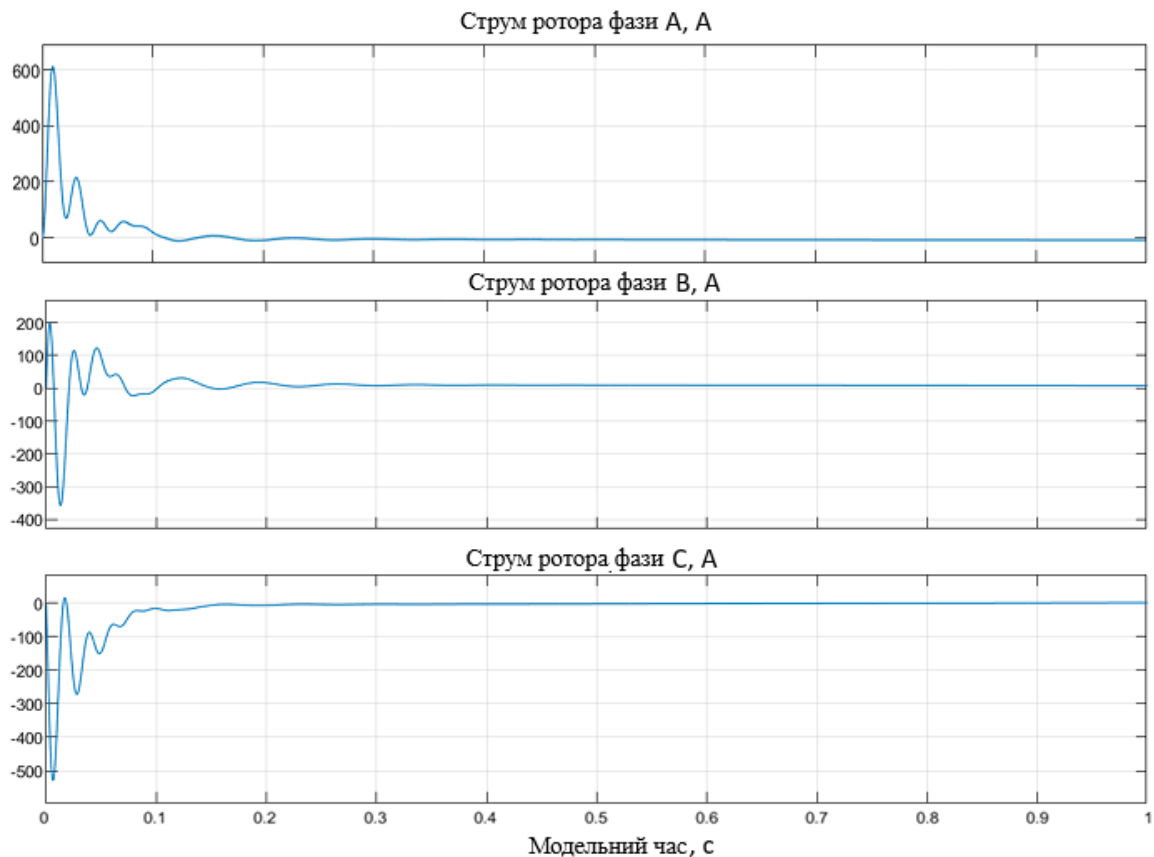


Рисунок 2.4 - Зміни миттєвих значень фазного струму ротора АД при прямому пуску з моментом 11,641 Н·м

Як видно з осцилограм (рисунки 2.2 – 2.4), прямий пуск викликає перехідний процес як в обмотках статора, так і в обмотках ротора асинхронного електродвигуна. При цьому струм статора зростає, що корелюється з теоретичними даними про кратність пускового струму. При цьому в момент модельного часу 0,3 с асинхронний електричний двигун входить у сталений режим роботи, тобто коливання миттєвих значень струму статора та ротора, а також швидкості обертання й електромагнітного моменту припиняються.

Схема моделі при моделюванні роботи асинхронного електродвигуна при номінальному моменті на валу показана на рисунку 2.5.

Як видно з показань вимірювальних приладів на рисунку 2.5, при номінальному моменті на валу асинхронного електродвигуна 96,65 Н·м активна потужність, споживана з мережі з урахуванням додаткового навантаження $P_{\text{доп}} = 10 \text{ Вт}$, становить $P_{\text{вим}} = 32385,17 \text{ Вт}$, при цьому реактивна потужність становить $Q_{\text{вим}} = 15040,55 \text{ вар}$. При цьому вимірний струм двигуна $I_{\text{вим}} = 51,56 \text{ А}$, а виміряна швидкість обертання асинхронного двигуна $n_{\text{вим}} = 2953 \text{ об/хв}$. За виміряними значеннями активної та реактивної потужностей отримаємо величину повної потужності, споживаної асинхронним електричним двигуном із мережі:

$$S_{\text{змін}} = \sqrt{P_{\text{змін}}^2 + Q_{\text{змін}}^2} = \sqrt{32385,17^2 + 15040,55^2} = 35707,3855 \text{ (ВА)} \quad (2.15)$$

При цьому коефіцієнт активної потужності:

$$\cos\varphi_{\text{змін}} = \frac{P_{\text{змін}}}{S_{\text{змін}}} = \frac{32385,17}{35707,3855} = 0,907 \quad (2.16)$$

Отримані в результаті модельного експерименту значення узгоджуються з паспортними значеннями (таблиця 2.1) асинхронного електричного двигуна серії 4А з типорозміром 4А180М2У3.

Розроблена комп'ютерна модель трифазного асинхронного електричного двигуна з короткозамкненим ротором. Для розробки моделі як об'єкт обрано електричний двигун серії 4А з типорозміром 4А180М2У3 та номінальною потужністю 30 кВт. Для даного двигуна визначено паспортні дані та розраховано параметри моделі. Комп'ютерна модель асинхронного електричного двигуна розроблена з використанням блоків програмного комплексу MATLAB/Simulink [7]. Представлено детальний опис блоків-компонентів моделі. Показано, що розроблена комп'ютерна модель асинхронного електричного двигуна може бути також використана для визначення характеристик асинхронного електричного двигуна в різних режимах його роботи.

Для контролю точності розрахунку параметрів моделі асинхронного електричного двигуна, а також визначення модельованих несправностей

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

необхідно побудувати годограф нормального (усталеного) режиму роботи трифазного асинхронного двигуна без пошкоджень.

Для побудови годографа необхідно прийняти припущення, що асинхронний двигун ідеалізується і є симетричним трифазним активно-індуктивним навантаженням. З урахуванням прийнятого припущення для побудови годографа узагальненого вектора струму Парка -Горєва для статора асинхронного двигуна скористаємося виразами [16]:

$$\begin{cases} i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} * I_{\text{ном.мах}} * \sin(\omega * t) \\ i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} * I_{\text{ном.мах}} * \sin\left(\omega * t - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (2.17)$$

де $I_{\text{ном.мах}}$ – амплітудне значення номінального струму асинхронного електродвигуна, А; ω – кутова частота, рад/с.

Для виразу (2.14) амплітудне значення струму визначимо як:

$$I_{\text{ном.мах}} = \sqrt{2} * I_{\text{ном}} \quad (2.18)$$

З урахуванням номінального струму асинхронного двигуна $I_{\text{ном}} = 55,961$ А за (2.15) отримаємо:

$$I_{\text{ном.мах}} = \sqrt{2} * I_{\text{ном}} = \sqrt{2} * 55.961 = 79.141 \text{ (А)} \quad (2.19)$$

Для побудови годографа узагальненого вектора струму Парка-Горєва скористаємося інтервалом часу $t \in [0,01; 0,04]$ із кроком $\Delta t = 0,00001$ с. Побудований годограф узагальненого вектора струму Парка-Горєва для асинхронного двигуна з параметрами з таблиці 2.1 за виразом (2.14) представлений на рисунку 2.6, побудову виконано з використанням інструментів пакета Mathcad [12].

З рисунка 2.6 видно, що годограф узагальненого вектора струму Парка-Горєва має форму кола з центром у точці з координатами (0,0; 0,0) та радіусом, описаним координатами (0,0; 0,0) – (0,0; 96,927), що характеризує нормальний стан асинхронного двигуна в усталеному (нормальному) режимі роботи.

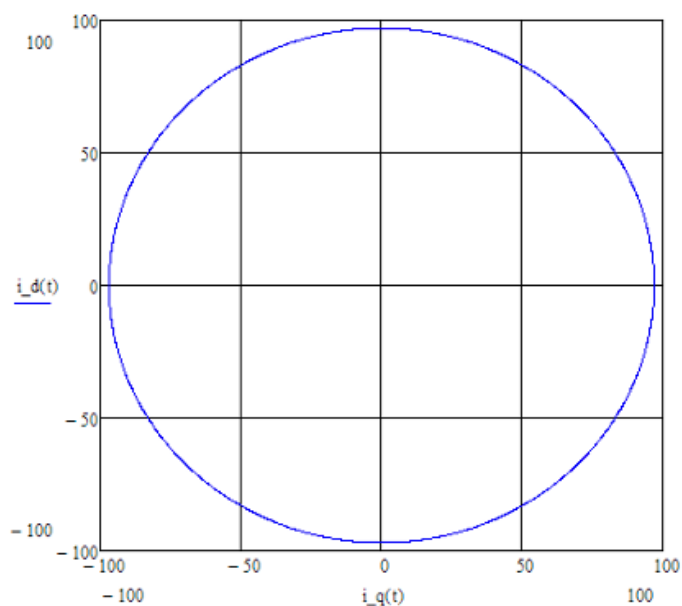


Рисунок 2.6 - Годограф узагальненого вектора струму Парка-Горєва

При зміні параметрів режиму роботи асинхронного двигуна відбувається зміна форми годографа, що дозволяє визначати можливі причини, в тому числі й пошкодження асинхронного двигуна.

Для виконання мети випускної кваліфікаційної роботи розроблену модель асинхронного двигуна необхідно доповнити блоками моделювання внутрішніх електричних пошкоджень [2].

2.2 Розробка моделі з урахуванням електричних пошкоджень асинхронного електродвигуна

При розробці моделі асинхронного електродвигуна з урахуванням електричних пошкоджень розглянуті такі пошкодження [15]:

- коротке замикання між фазними обмотками в статорі асинхронного електричного двигуна;
- пошкодження обмотки статора – обрив обмотки;
- коротке замикання фазної обмотки статора на корпус статора асинхронного електричного двигуна.

Для оцінки та виявлення пошкодження асинхронного електричного двигуна необхідно використовувати результати моделювання його роботи в бездефектному стані, а також годограф, що характеризує роботу модельованого асинхронного електричного двигуна в нормальному (усталеному) режимі роботи, які представлені в попередньому пункті.

Схема моделі з урахуванням пошкоджень – короткого замикання в обмотках статора асинхронного двигуна – представлена на рисунку 2.7.

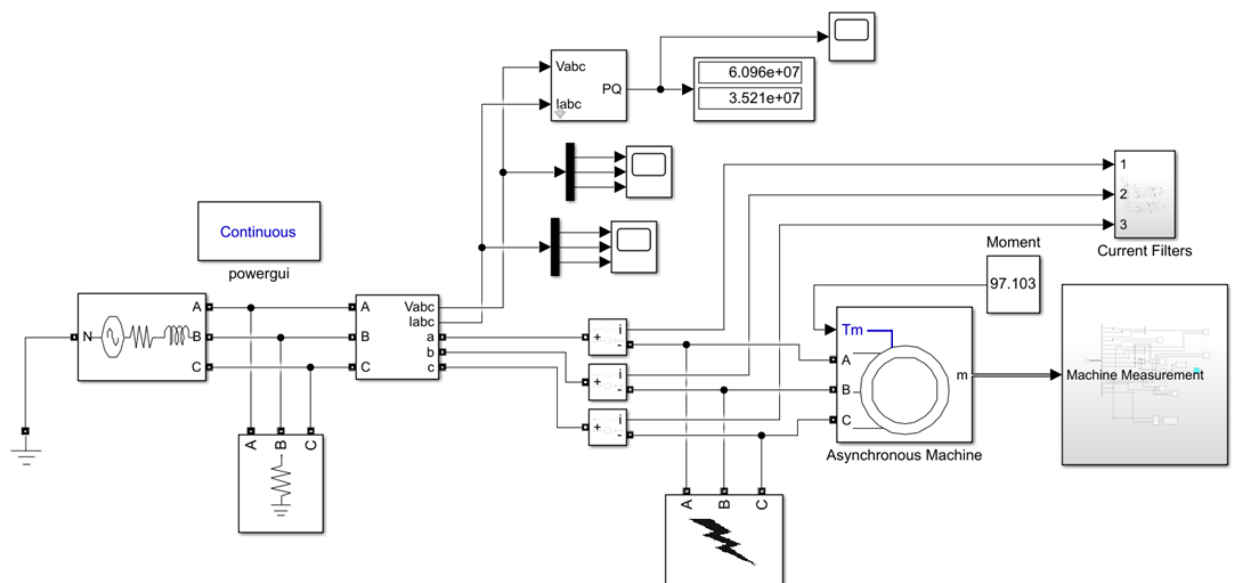


Рисунок 2.7 - Загальна модель асинхронного електродвигуна з урахуванням пошкоджень – коротке замикання обмоток статора

Моделювання пошкодження – короткого замикання обмоток статора асинхронного електричного двигуна виконаємо для замикань типу:

- трифазне коротке замикання на землю;
- двофазне коротке замикання;
- двофазне коротке замикання на землю;
- однофазне коротке замикання на землю.

Для моделювання пошкоджень необхідно вивести модель асинхронного електродвигуна в сталений режим роботи. Для визначення усталеного режиму роботи скористаємося інструментом блоку «powergui» - «Load Flow Analyzer». Інструмент «Load Flow Analyzer» дозволяє автоматично визначити режимні

параметри, що відповідають усталеному режиму роботи, а саме:

- напруга джерела живлення;
- фазові кути джерела живлення;
- момент на валу асинхронного електродвигуна;
- ковзання в номінальному режимі роботи.

Для розробленої моделі асинхронного електричного двигуна з урахуванням пошкоджень обмотки статора – коротких замикань, параметри усталеного режиму, визначені блоком «Load Flow Analyzer»:

- напруга джерела живлення: лінійна напруга $380 \cdot 1,00017$ В;
- кут фази А джерела живлення: $0,014674^\circ$;
- момент на валу асинхронного електродвигуна: $97,103$ Н·м;
- ковзання в номінальному режимі роботи: $0,0165837$.

Також для підтвердження відповідності моделюваного режиму роботи асинхронного електричного двигуна сталеному (нормальному) необхідно побудувати годограф вектора струму Парка-Горєва [9] для статорних обмоток. Годограф будується без урахування перехідного процесу, що виникає в момент запуску моделі та, відповідно, початку роботи асинхронного двигуна. Згідно з результатами моделювання, перехідний процес, що відповідає запуску моделі та пуску асинхронного електричного двигуна, закінчується о $0,3$ с модельного часу. Годограф для моменту часу з $0,3$ с до $0,6$ с, що відповідає усталеному (нормальному) режиму роботи, представлений на рисунку 2.8.

Порівнюючи годографи на рисунках 2.6 і 2.8, можна встановити, що обидва годографи мають однакову форму – форму кола. При цьому відрізняється лише діаметр кола, оскільки інструмент «Load Flow Analyzer» визначає номінальний момент виходячи з механічної потужності асинхронного двигуна, яка задана для модельованого двигуна на рівні 30 кВт.

При моделюванні короткого замикання використовується блок «Three-Phase Fault», що дозволяє моделювати різні типи коротких замикань. Коротке замикання буде змодельовано після виходу двигуна на сталений (нормальний) режим роботи, тобто після $0,3$ с модельного часу.

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

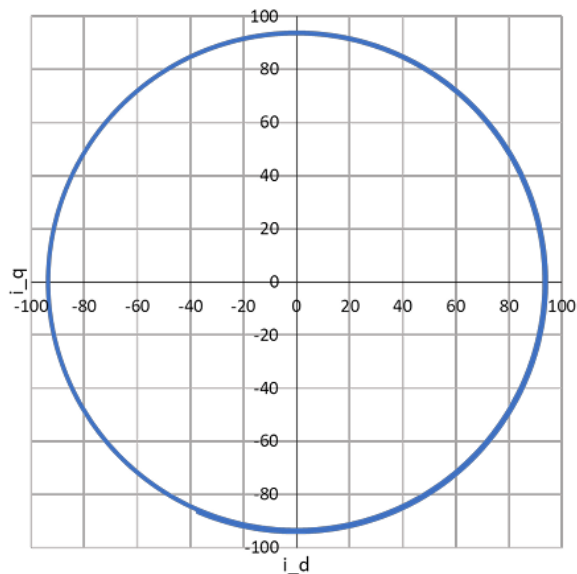


Рисунок 2.8 — Безаварійна робота моделі асинхронного двигуна у усталеному режимі роботи

Моделювання короткого замикання відбувається в момент модельного часу 0,5 с, а тривалість короткого замикання 0,5 с, тобто з 0,5 с до 1,0 с модельного часу. При цьому годограф пошкодження буде записаний з 0,5 с модельного часу. Додатково контролювати момент появи пошкодження необхідно за графіком функції струму статора та спектром функції струму статора вигляду:

$$f(i_d, i_q) = \frac{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}}{\sqrt{2}} \quad (2.20)$$

де i_d – миттєві значення струму статора по осі d; i_q – миттєві значення струму статора по осі q.

Спектральний аналіз функції (2.16) дозволить також діагностувати виникнення пошкоджень асинхронного електродвигуна. При цьому враховується, що у бездефектному стані спектр функції (2.16) містить постійну складову ($f = 0$ Гц), в умовах виникнення дефекту в спектрі функції (2.16) виникатимуть додаткові гармонійні складові, а також змінюватиметься форма годографа вектора Парка-Горєва для струму статора асинхронного електродвигуна від форми кола до форми еліпса або потовщеного кола.

Одночасний аналіз спектра функції (2.16) та форми годографа вектора Парка-Горєва струму статора дозволяє визначати внутрішні дефекти асинхронного електродвигуна, в тому числі на ранній стадії їх розвитку. При цьому необхідно враховувати, що дефекти асинхронного електродвигуна виявляються в режимі роботи, тобто в режимі реального часу [3].

Для визначення несправностей, викликаних короткими замиканнями в обмотці статора асинхронного електродвигуна, за частотним спектром [23] функції (2.16) аналізується наявність і амплітуди характерних частот, що відповідають виразу [13]:

$$f_{\text{кз.статора}} = f_{\text{ном}} * \left(\frac{n}{p} * (1 - s) \pm k \right) \quad (2.21)$$

де $f_{\text{ном}}$ – номінальна частота мережі, Гц; n, k – непарні цілі числа; p – кількість пар полюсів асинхронного електродвигуна; s – ковзання асинхронного електродвигуна.

Для моделюваного асинхронного електродвигуна за (2.17) частоти, що відповідають замиканню в обмотці статора для $n, k \in [1; 7]$: 84,25 (Гц); 88,75 (Гц); 93,25 (Гц); 97,75 (Гц); 184,25 (Гц); 188,75 (Гц); 193,25 (Гц); 197,75 (Гц); 284,25 (Гц); 288,75 (Гц); 293,25 (Гц); 297,75 (Гц); 384,25 (Гц); 388,75 (Гц); 393,25 (Гц); 397,75 (Гц); 484,25 (Гц); 488,75 (Гц); 493,25 (Гц); 584,25 (Гц); 588,75 (Гц); 684,25 (Гц).

Для аналізу спектра функції (2.16) за результатами, отриманими за (2.17) для моделюваного асинхронного електродвигуна, скористаємося інструментом блоку «powergui» - «FFT Analysis».

Інструмент «FFT Analysis» дозволяє визначати спектр сигналу з урахуванням основної гармоніки. Спектр сигналу може бути визначений для періодів сигналу, заданих користувачем. Максимальна частота спектра також повинна бути задана користувачем. Для аналізу спектра функції (2.16) як основна гармоніка використовується гармоніка 50 Гц, а максимальна частота згідно з розрахунками за (2.17) приймається 1000 Гц, тривалість аналізу спектра 4 періоди.

Виконаємо моделювання трифазного короткого замикання в момент модельного часу 0,5 с. Годограф для моменту трифазного короткого замикання на землю показаний на рисунку 2.9.

Спектр функції (2.16) з урахуванням значень, отриманих за (2.17), показаний на рисунку 2.10.

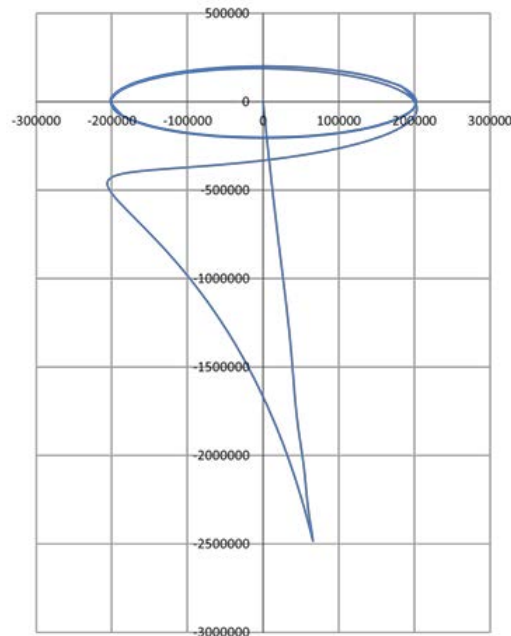


Рисунок 2.9 - Годограф при трифазному короткому замиканні на землю в обмотках статора асинхронного електричного двигуна

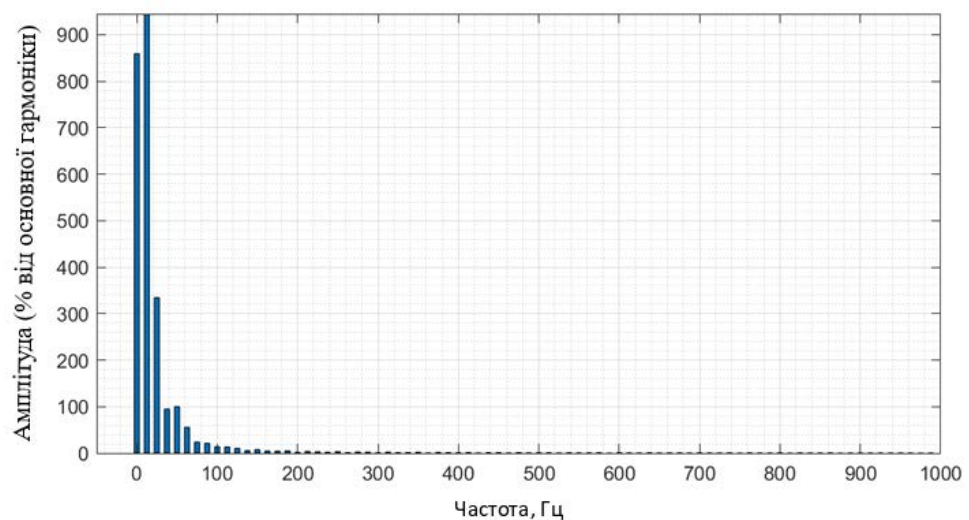


Рисунок 2.10 - Гармонійний спектр у момент трифазного короткого замикання на землю в обмотках статора асинхронного електричного двигуна

Годограф на рисунку 2.9 при виникненні трифазного короткого замикання на землю змінює свою форму на форму еліпса, а спектр (рисунок 2.10) має яскраво виражене переважання гармонійних складових із частотами:

- 0 Гц – відповідає постійній компоненті функції (2.16);
- 12,5 Гц – перевищує постійну компоненту спектра функції (2.16);
- 25 Гц – на рівні 40% від постійної компоненти;
- 37,5 Гц – на рівні 11% від постійної компоненти;
- 50 Гц – на рівні 11,5% від постійної компоненти;
- 62,5 Гц – на рівні 6,5% від постійної компоненти.

Усі інші компоненти спектра мають значення нижче 3% від постійної компоненти.

Досліджуючи графік спектра функції (2.16), побудований для одного періоду сигналу (рисунок 2.11) та моменту початку короткого замикання (0,5 с), можна спостерігати високе значення гармоніки з частотою 50 Гц, а також зростання гармонійних складових із частотами 100 Гц і вище.

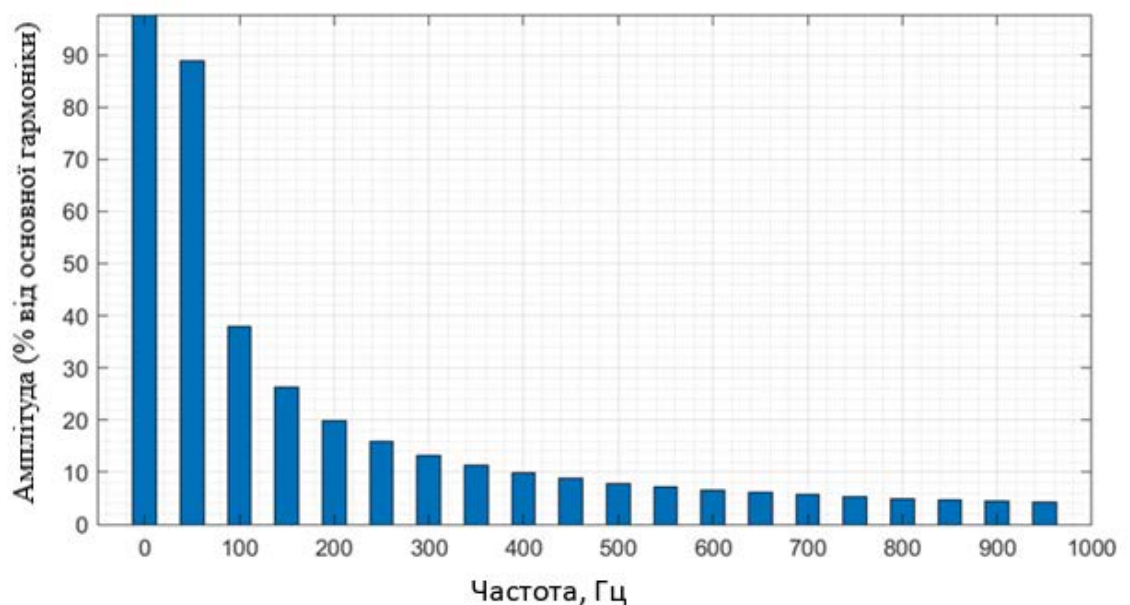


Рисунок 2.11 — Спектр функції для одного періоду для трифазного короткого замикання на землю в момент 0,5 с модельного часу

У цілому дана картина спектра (рисунок 2.11) пояснюється симетричністю модельованого пошкодження – трифазним коротким замиканням на землю. Даний вид пошкодження не є раннім, і його виникнення викличе повне пошкодження та вихід із ладу асинхронного електричного двигуна. Застосування методу аналізу спектра функції (2.16), а також аналізу форми годографа не є достатньо інформативним для симетричних видів пошкоджень. Однак отримані результати для трифазного короткого замикання можуть бути використані надалі для виявлення порушень цілісності головної ізоляції асинхронних електричних машин з короткозамкненим ротором, а саме зростання сигналу з частотою 50 Гц при одночасному підвищенні сигналу на частоті 100 Гц.

Виконаємо моделювання однофазних коротких замикань на землю та двофазних коротких замикань на землю для визначення параметрів годографів та частотного спектра.

Годограф для однофазного замикання фази А обмотки статора асинхронного двигуна на землю представлений на рисунку 2.12.

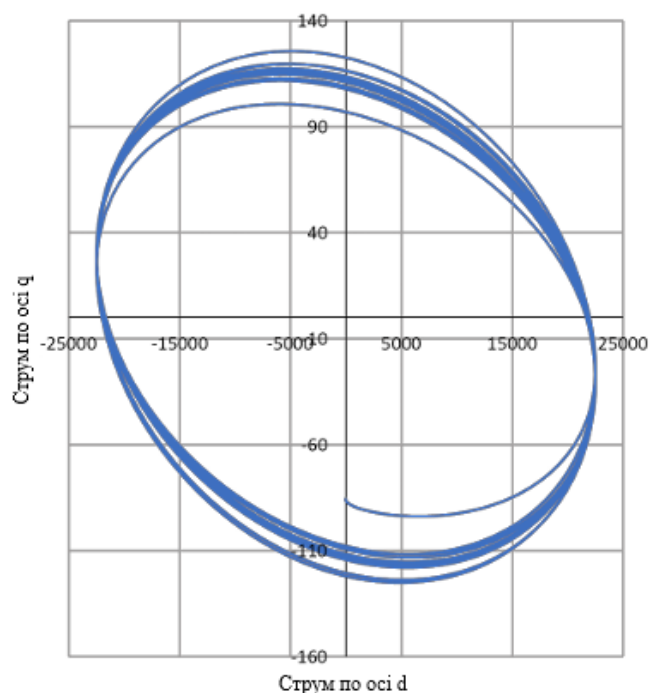
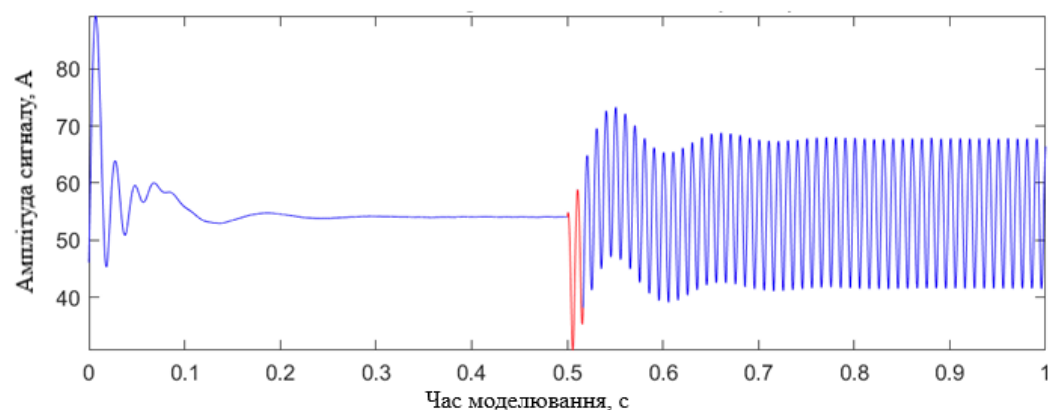
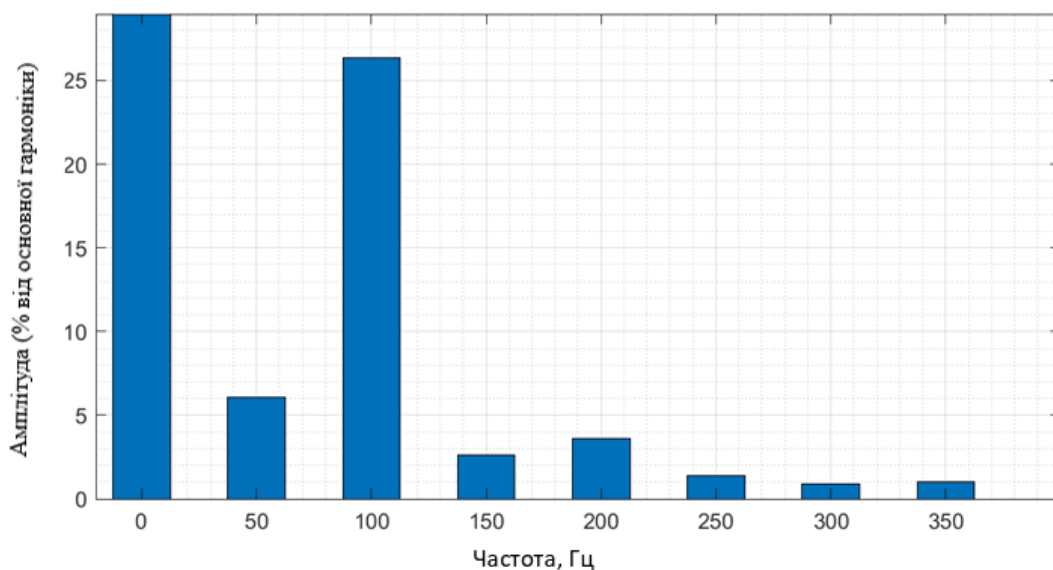


Рисунок 2.12 — Годограф струму вектора Парка-Горєва при замиканні фази А на землю

На рисунку 2.13 показані форма сигналу функції (2.16) – рисунок 2.13, а, а також спектр для моменту виникнення замикання фази А статорної обмотки асинхронного двигуна на землю – рисунок 2.13, б. Момент замикання фази А на землю виділено на рисунку 2.13, а червоним кольором, для цього часу побудовано спектр (рисунок 2.13, б).



а



б

а – функція струму вектора Парка-Горєва при замиканні фази А на землю, б – спектр функції струму вектора Парка-Горєва у момент модельного часу 0,5 с

Рисунок 2.13 — Вигляд і спектр функції струму вектора Парка-Горєва при замиканні фази А на землю

При проведенні модельного експерименту з почерговим замиканням фаз В і С на землю спектр струму вектора Парка (Горєва), а також форма сигналу

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

функції (2.16) мали схожі форми та частотні компоненти, тому результати не наводяться у даній роботі.

Результати моделювання двофазного короткого замикання на землю представлені годографом, показаним на рисунку 2.14.

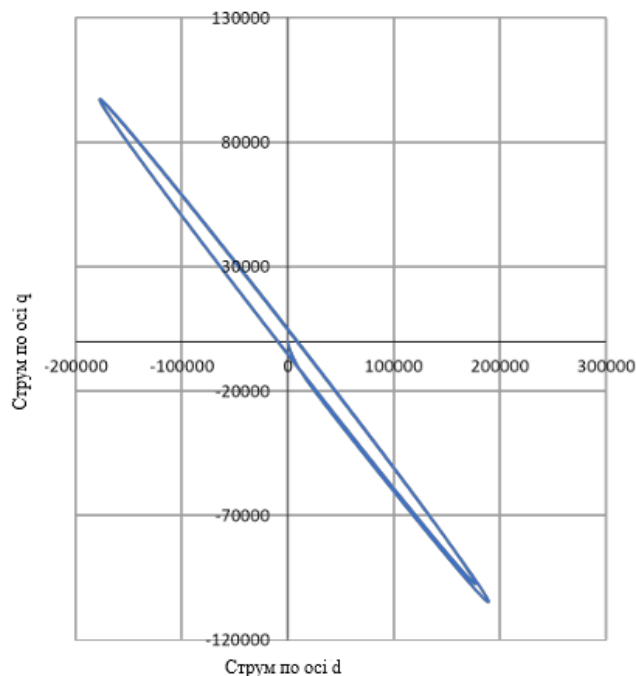
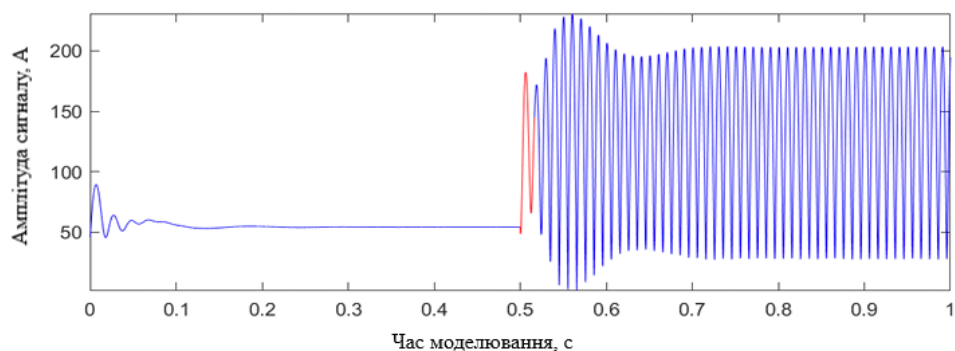


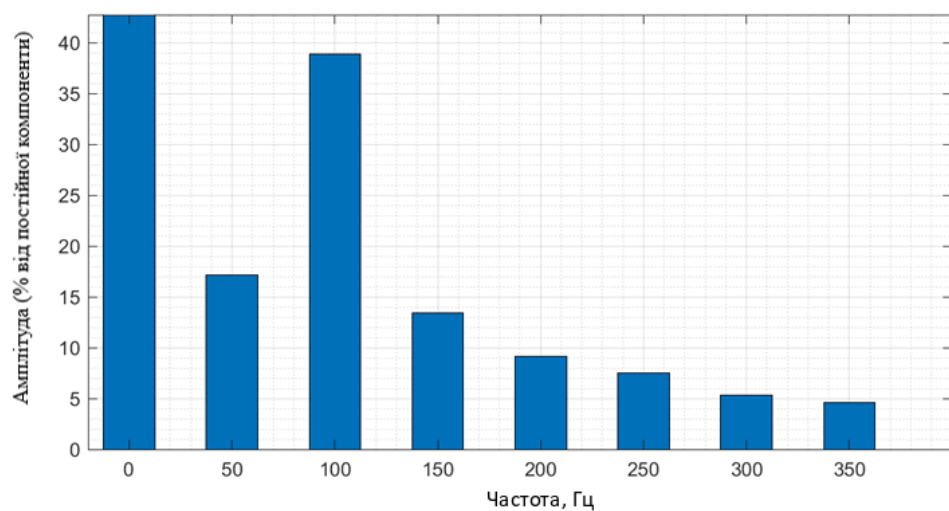
Рисунок 2.14 — Годограф струму вектора Парка-Горєва при замиканні фаз А і В на землю

Годограф струму вектора Парка-Горєва має яскраво виражену еліпсоїдність, центр еліпса також розташовується в центрі координат, однак головна вісь еліпса розташована під кутом, тобто еліпс нахилений відносно осей координат, що є яскравою ознакою наявності двофазного короткого замикання на землю – висока несиметрія за фазними струмами.

Для модельованого короткого замикання (фази А і В на землю) графік сигналу функції (2.16) має вигляд, представлений на рисунку 2.15, а. Спектр сигналу в момент часу виникнення короткого замикання (0,5 с) показаний на рисунку 2.15, б.



а



б

а – функція струму вектора Парка-Горєва при замиканні фаз А і В на землю, б – спектр функції струму вектора Парка-Горєва у момент модельного часу 0,5 с
Рисунок 2.15 — Вигляд і спектр функції струму вектора Парка-Горєва при замиканні фаз А і В на землю

Як видно з графіка спектра (рисунок 2.15, б), гармоніки з частотами 50 Гц і 100 Гц мають більш високу амплітуду порівняно з однофазним коротким замиканням (рисунок 2.13, б). При цьому спостерігається також рівномірне зростання рівня гармонійних складових вище 100 Гц, а саме: 150 Гц, 200 Гц, 250 Гц, 300 Гц і 350 Гц.

Виконаємо моделювання двофазного короткого замикання між фазами А і В в обмотці статора асинхронного електричного двигуна. Годограф двофазного короткого замикання представлений на рисунку 2.16.

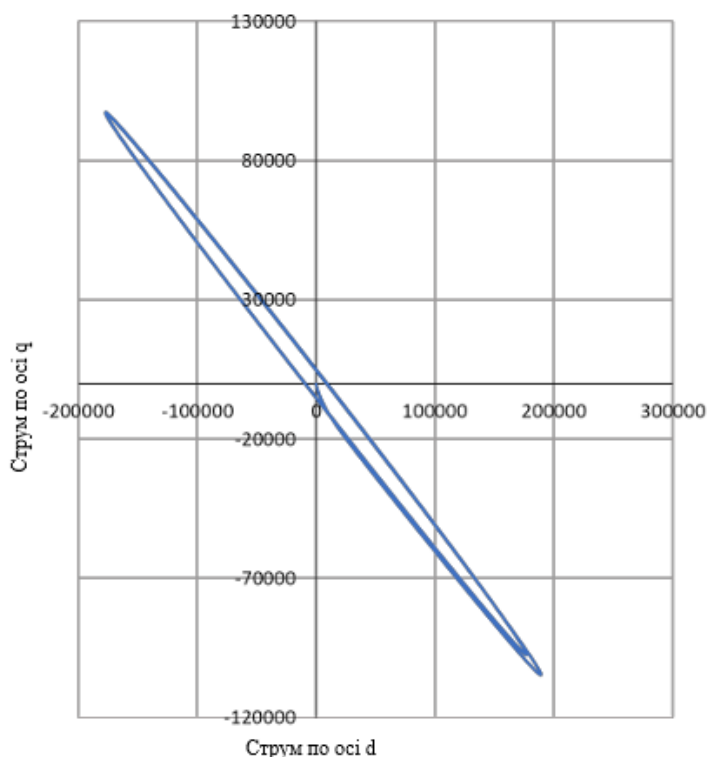
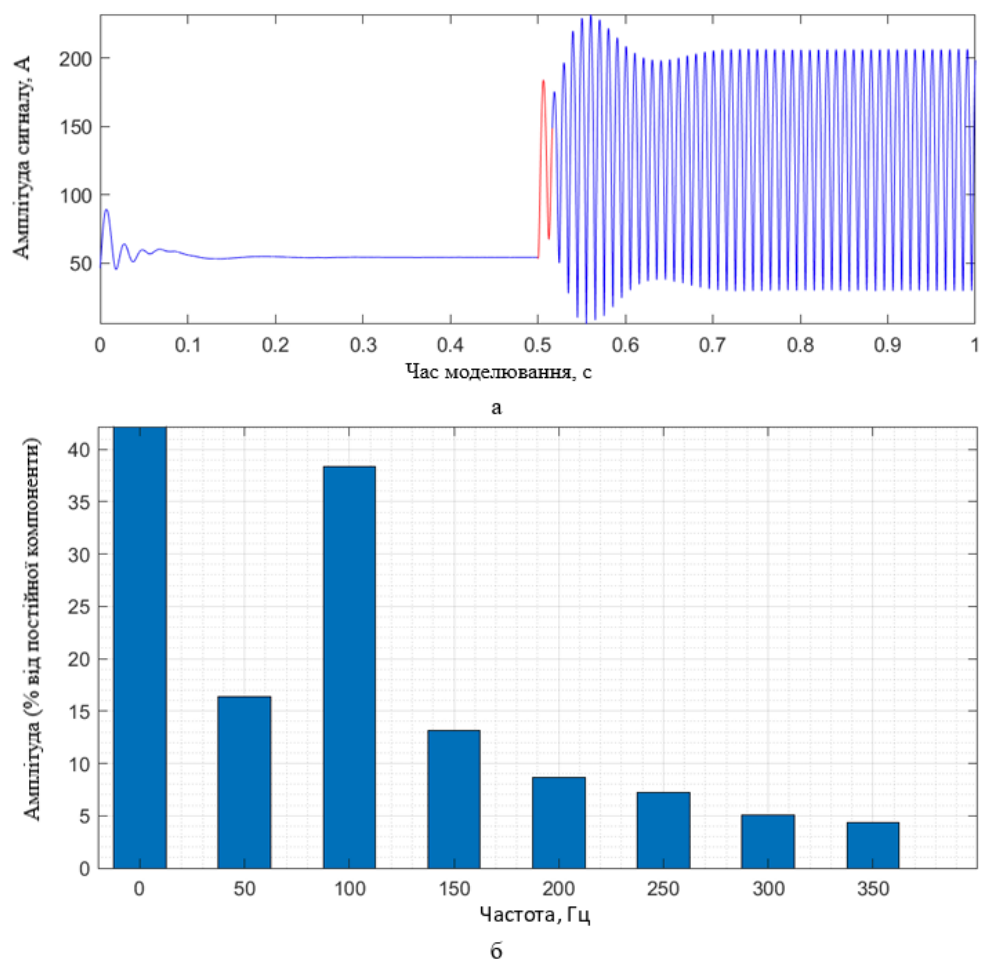


Рисунок 2.16 — Годограф струму вектора Парка-Горева при замиканні фаз А і В

Як видно з представленого годографа, на відміну від годографа двофазного короткого замикання на землю (рисунок 2.14), годограф двофазного короткого замикання звужується і в масштабі іменованих одиниць струму вектора Парка-Горева перетворюється на лінію.

Аналізуючи вигляд сигналу функції (2.16), представлений на рисунку 2.17, а, та спектр функції в момент часу виникнення короткого замикання (0,5 с), представлений на рисунку 2.17, б, можна побачити, що вони аналогічні результатам для двофазного короткого замикання на землю (рисунок 2.15). Виходячи з цієї подібності, можна стверджувати, що для ідентифікації типу пошкодження, а саме двофазного короткого замикання та двофазного короткого замикання на землю, необхідно комплексно розглядати як форму годографа вектора струму Парка-Горева, так і спектральний склад функції (2.16).



а – функція струму вектора Парка-Горєва при замиканні фаз А і В, б – спектр функції струму вектора Парка-Горєва у момент модельного часу 0,5 с
Рисунок 2.17 — Вигляд і спектр функції струму вектора Парка-Горєва при замиканні фаз А і В

Модель для дослідження пошкоджень, викликаних обривом обмотки статора, показана на рисунку 2.18.

Для моделювання обриву фазних обмоток використовується блок «Three-Phase Breaker». Даний блок є трифазним вимикачем, що дозволяє моделювати як відключення всіх трьох фаз, так і декількох на вибір користувача. При цьому відключення може бути змодельовано за заданим часом або за сигналом. Для розробленої моделі асинхронного електричного двигуна моделювати обрив фазного проводу статорної обмотки будемо в момент часу 0,5 с, так само як і для моделі з коротким замиканням, оскільки до моменту часу 0,5 с модель асинхронного електричного двигуна виходить

При моделюванні обриву фази А годограф набуває вигляду, представленого на рисунку 2.19.

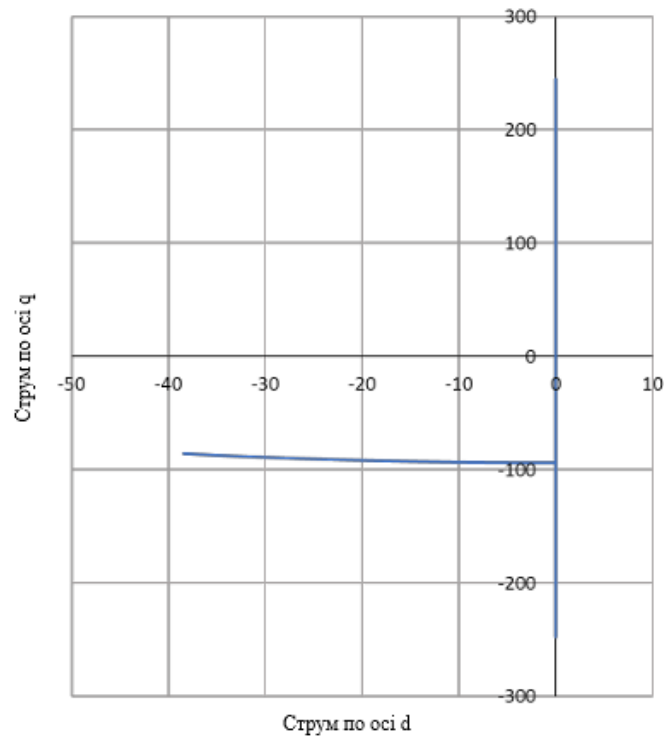
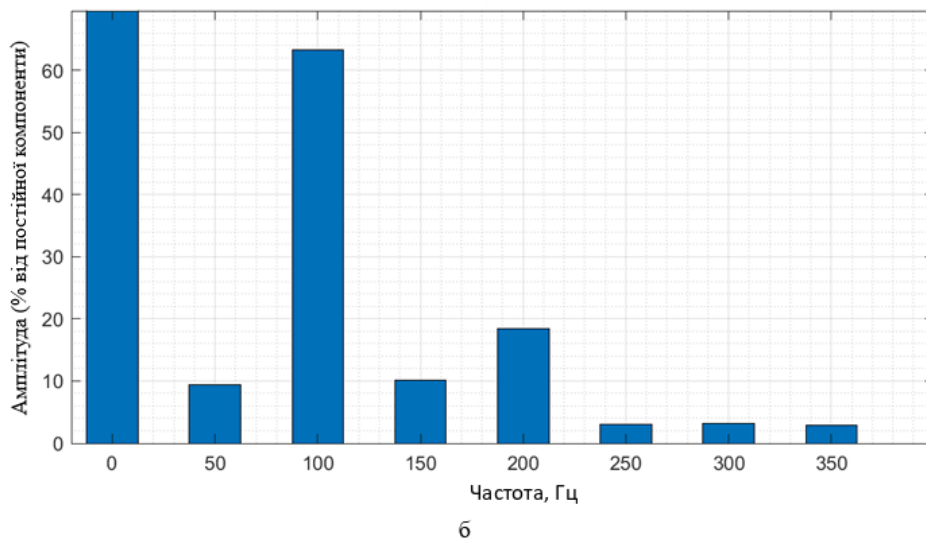
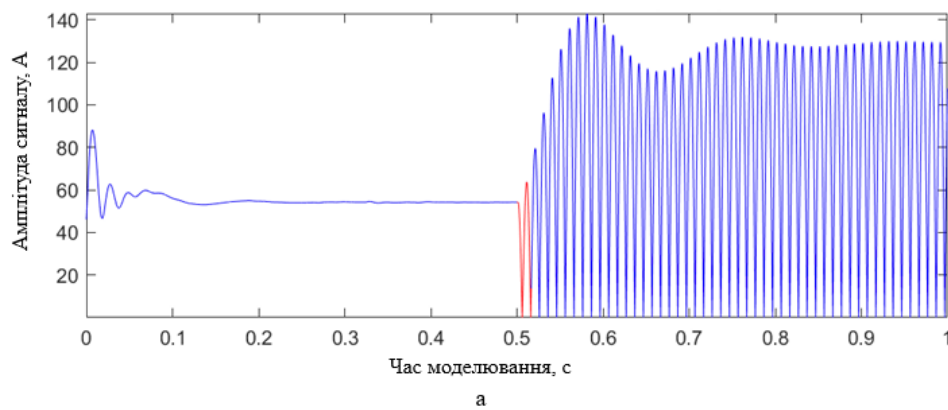


Рисунок 2.19 - Годограф струму вектора Парка-Горєва при обриві фази А

Як видно, при обриві однієї фази статорної обмотки годограф з еліптичної форми вироджується в криву. При цьому асинхронний електродвигун зупиняється. Як видно, годограф є неінформативним інструментом при визначенні пошкодження типу обрив фази статорної обмотки.

Сигнал функції (2.16) при обриві однієї фази представлений на рисунку 2.20, а. При цьому спектр функції (2.16) у момент часу 0,5 с показаний на рисунку 2.20, б.

Як видно, при виникненні обриву однієї з фаз статорної обмотки відбувається зниження амплітуди частоти 50 Гц і спостерігається зростання гармонійних складових із частотами 100 Гц і 200 Гц. Низьке значення частоти 50 Гц у спектрі з одночасним зростанням частот 100 Гц і 200 Гц є характерною ознакою обриву фазної обмотки.



а – функція струму вектора Парка-Горєва при обриві фази А; б – спектр функції струму вектора Парка-Горєва у момент модельного часу 0,5 с
Рисунок 2.20 - Вигляд і спектр функції струму вектора Парка-Горєва при обриві фази А

Виконаємо моделювання обриву двох фазних обмоток – обмотки фази А та обмотки фази В у статорі асинхронного електродвигуна.

На рисунку 2.21 представлений годограф струму вектора Парка-Горєва при обриві двох фазних обмоток статора асинхронного електричного двигуна.

При виникненні обриву двох фаз у статорній обмотці форма та характер зміни годографа аналогічні обриву однієї фазної статорної обмотки. Тобто годограф вироджується з еліптичної форми в криволінійну форму, що свідчить про зупинку асинхронного електричного двигуна. Оскільки двигун моделюється з номінальним моментом, то при обриві однієї та двох фазних обмоток статора відбувається його зупинка. Проте при меншому навантаженні

асинхронного двигуна він може продовжити свою роботу. Однак дане питання не досліджується в рамках виконання випускної кваліфікаційної роботи.

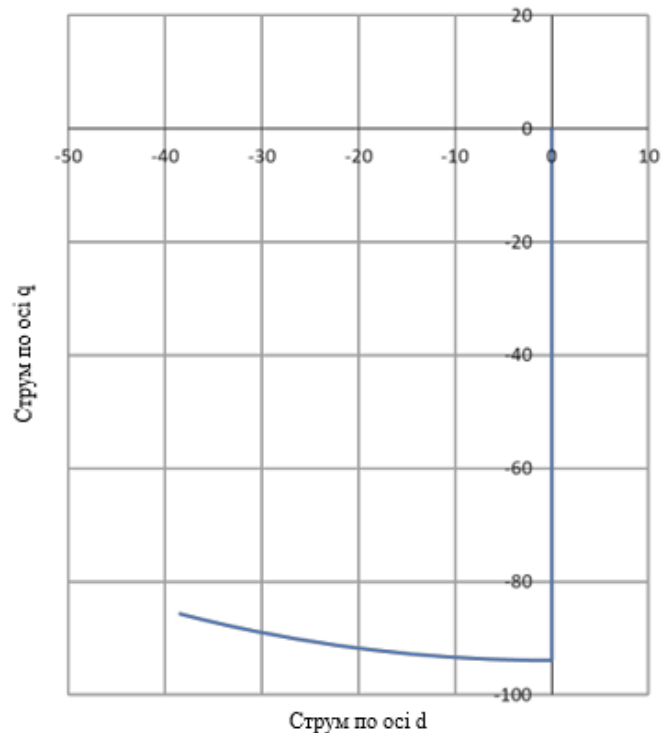
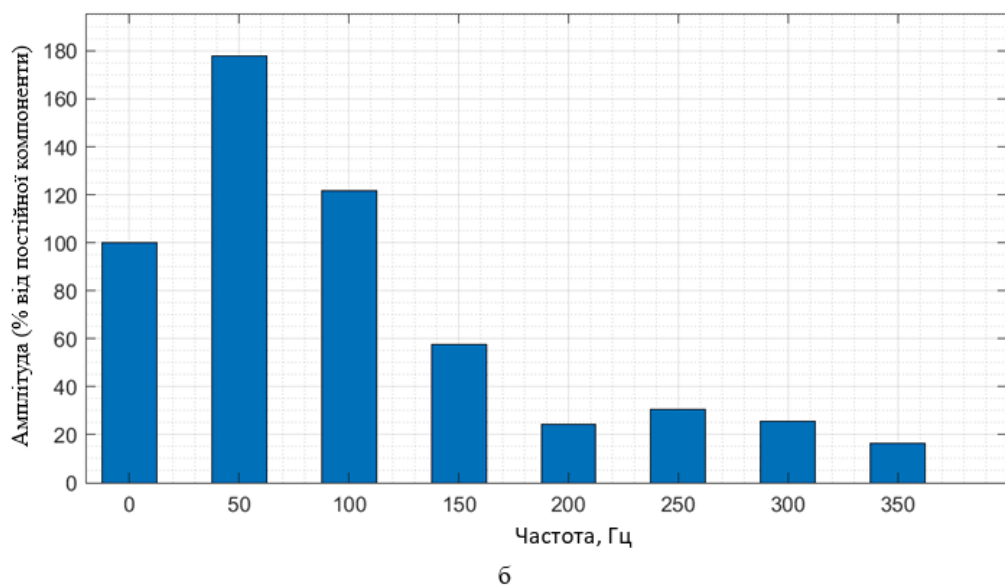
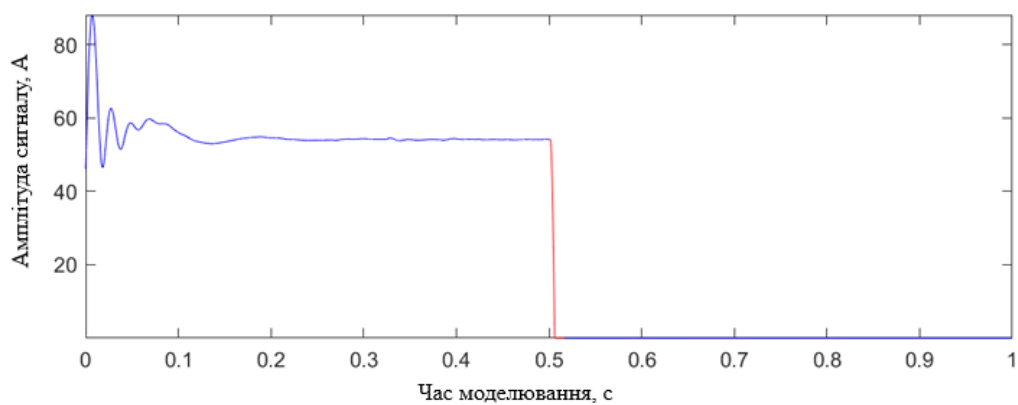


Рисунок 2.21 - Годограф струму вектора Парка-Горєва при обриві фаз А і В

При моделюванні обриву двох фазних статорних обмоток асинхронного двигуна вигляд функції (2.16), а також спектр функції для моменту часу моменту обриву двох фаз представлені на рисунку 2.22.

Як бачимо з графіка функції (2.16) (рисунок 2.22, а), значення функції стає рівним 0, а в спектрі (рисунок 2.22, б) різко знижується рівень постійної складової зі зростанням гармонік 50 Гц, 100 Гц і 250 Гц.

Варто зазначити, що при обриві двох фазних обмоток швидкість обертання двигуна значно знижується, чим і зумовлене зниження постійної складової.



а – функція струму вектора Парка-Горєва при обриві фаз А і В; б – спектр функції струму вектора Парка-Горєва у момент модельного часу 0,5 с

Рисунок 2.22 - Вигляд і спектр функції струму вектора Парка-Горєва при обриві фаз А і В

Висновки за розділом:

У другому розділі для моделювання коротких замикань і обривів статорної обмотки розроблено моделі в середовищі MATLAB/Simulink.

При моделюванні трифазного короткого замикання отримані результати пояснюються симетричністю моделюваного пошкодження. Даний вид пошкодження не є раннім, і його виникнення викличе повне пошкодження та вихід із ладу асинхронного електричного двигуна. Застосування методу аналізу спектра функції (2.16), а також аналізу форми годографа не є достатньо інформативним для симетричних видів пошкоджень. Однак отримані

результати для трифазного короткого замикання можуть бути використані надалі для виявлення порушень цілісності головної ізоляції асинхронних електричних машин з короткозамкненим ротором, а саме - зростання сигналу з частотою 50 Гц при одночасному підвищенні сигналу на частоті 100 Гц.

При моделюванні однофазного короткого замикання в спектрі функції (2.16) спостерігається підвищення гармонійних складових із частотою 100 Гц і 250 Гц, а також зниження гармоніки з частотою 50 Гц.

При моделюванні двофазного короткого замикання на землю в спектрі функції (2.16) переважають гармоніки з частотами 50 Гц і 100 Гц, вони мають більш високу амплітуду порівняно з однофазним коротким замиканням. При цьому спостерігається також рівномірне зростання рівня гармонійних складових вище 100 Гц, а саме: 150 Гц, 200 Гц, 250 Гц, 300 Гц і 350 Гц.

При моделюванні двофазного короткого замикання годограф звужується і в масштабі іменованих одиниць струму вектора Парка-Горєва перетворюється на лінію. При цьому спектр функції (2.16) схожий зі спектром двофазного короткого замикання на землю. При виявленні даного пошкодження необхідно контролювати як форму годографа струму вектора Парка-Горєва, так і спектр функції (2.16).

При моделюванні обриву обмотки по фазі А відбувається зниження амплітуди частоти 50 Гц і спостерігається зростання гармонійних складових із частотами 100 Гц і 200 Гц. Низьке значення частоти 50 Гц у спектрі з одночасним зростанням частот 100 Гц і 200 Гц є характерною ознакою обриву фазної обмотки.

При моделюванні обриву двох фазних обмоток значення функції (2.16) наближається до 0, а в спектрі знижується рівень постійної складової зі зростанням гармонік 50 Гц, 100 Гц і 250 Гц.

Для ідентифікації обривів обмоток годограф струму вектора Парка-Горєва є малоінформативним, оскільки вироджується в криву і може використовуватися тільки спільно з аналізом частотного спектра функції (2.16).

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

ВИСНОВКИ

У вступі розглянуто особливості різних типів електричних двигунів. Для виконання випускної кваліфікаційної роботи прийнято розглядати як об'єкт асинхронний електричний двигун, оскільки даний тип електричних двигунів є найбільш розповсюдженим у промисловому виробництві.

У першому розділі випускної кваліфікаційної роботи виконано аналіз несправності силових асинхронних електричних двигунів. Серед несправності розглянуто пошкодження, викликані порушенням ексцентриситету ротора, а також порушенням цілісності стрижнів ротора.

Метод аналізу вібрацій і метод аналізу спектральних характеристик струму статора є переважними при виявленні ексцентриситету ротора. Метод, пов'язаний з аналізом теплового стану, не дозволяє визначити пошкодження, що виникає, на ранній стадії, оскільки постійне використання тепловізійного контролю є складним, так само як і розміщення температурних датчиків усередині статора асинхронного силового електричного двигуна. Застосування методу, пов'язаного з моніторингом і аналізом спектральних характеристик струму і напруги статора, є досить перспективним для визначення пошкоджень, викликаних порушенням цілісності стрижнів ротора, оскільки даний метод не вимагає застосування додаткових дорогих датчиків і приладів на відміну від інших методів. Таким чином, для розглянутих несправності найбільш перспективним методом їх діагностики є метод, пов'язаний з моніторингом і аналізом спектральних характеристик струму і напруги статора асинхронного електричного двигуна.

Представлено ознаки, що дозволяють при візуальному огляді асинхронного електричного двигуна діагностувати ймовірні пошкодження.

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Мінченко М. Ю.			ВИСНОВКИі			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Маринич І.А.								58	4
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

Детально описано додаткові ознаки, що дозволяють виявити пошкодження конкретно асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором, а також пошкодження, що виявляються за додатковими ознаками.

Проведений аналіз пошкоджень, що виявляються при візуальному огляді асинхронного електричного двигуна, показав, що частина пошкоджень відноситься до проблем, викликаних якістю електричної енергії живильної мережі, інша частина відноситься до помилок підключення або вибору асинхронних електричних двигунів. При цьому показано, що проведення візуального огляду дозволяє виявити наявність електричних пошкоджень асинхронних електричних двигунів, а саме між виткові короткі замикання в статорній обмотці та між фазні короткі замикання в статорній обмотці. При виявленні даних несправності експлуатаційний персонал повинен провести огляд і вимірювання опору статорної обмотки асинхронного електричного двигуна.

Визначено, що на практиці застосовується метод вимірювання опору ізоляції, який дозволяє виявити більшу частину пошкоджень асинхронного електродвигуна. Представлена схема вимірювання опору ізоляції, а також методика визначення ступеня зволоження ізоляції.

У другому розділі розроблена комп'ютерна модель трифазного асинхронного електричного двигуна з короткозамкненим ротором. Для розробки моделі як об'єкт обраний електричний двигун серії 4А з типорозміром 4А180М2У3 і номінальною потужністю 30 кВт. Для даного двигуна визначено паспортні дані і розраховані параметри моделі. Комп'ютерна модель асинхронного електричного двигуна розроблена з використанням блоків програмного комплексу MATLAB/Simulink. Представлено детальний опис блоків-компонентів моделі. Показано, що розроблена комп'ютерна модель асинхронного електричного двигуна може бути також використана для визначення характеристик асинхронного електричного двигуна в різних режимах роботи.

Як електричні пошкодження змодельовані:

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- трифазне коротке замикання в обмотках статора на землю;
- двофазне коротке замикання на землю;
- двофазне коротке замикання;
- однофазне коротке замикання;
- обрив фази А статорної обмотки;
- обрив фаз А і В статорної обмотки.

Для моделювання коротких замикань і обривів статорної обмотки розроблено моделі в середовищі MATLAB/Simulink.

При моделюванні трифазного короткого замикання отримані результати пояснюються симетричністю пошкодження, що моделюється. Даний вид пошкодження не є раннім, і його виникнення викличе повне пошкодження і вихід з ладу асинхронного електричного двигуна. Застосування методу аналізу спектру функції (2.16), а також аналізу форми годографа, не є достатньо інформативним для симетричних видів пошкоджень. Однак отримані результати для трифазного короткого замикання можуть бути використані надалі для виявлення порушень цілісності головної ізоляції асинхронних електричних машин з короткозамкненим ротором, а саме — зростання сигналу з частотою 50 Гц при одночасному підвищенні сигналу на частоті 100 Гц.

При моделюванні однофазного короткого замикання в спектрі функції (2.16) спостерігається підвищення гармонійних складових з частотою 100 Гц і 250 Гц, а також зниження гармоніки з частотою 50 Гц.

При моделюванні двофазного короткого замикання на землю в спектрі функції (2.16) переважають гармоніки з частотами 50 Гц і 100 Гц, вони мають більш високу амплітуду в порівнянні з однофазним коротким замиканням. При цьому спостерігається також рівномірне зростання рівня гармонійних складових вище 100 Гц, а саме: 150 Гц, 200 Гц, 250 Гц, 300 Гц і 350 Гц.

При моделюванні двофазного короткого замикання годограф звужується і в масштабі іменованих одиниць струму вектора Парка-Горєва перетворюється на лінію. При цьому спектр функції (2.16) схожий зі спектром двофазного короткого замикання на землю. При виявленні даного пошкодження необхідно

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контролювати як форму годографа струму вектора Парка-Горєва, так і спектр функції (2.16).

При моделюванні обриву обмотки по фазі А відбувається зниження амплітуди частоти 50 Гц і спостерігається зростання гармонійних складових з частотами 100 Гц і 200 Гц. Низьке значення частоти 50 Гц в спектрі з одночасним зростанням частот 100 Гц і 200 Гц є характерною ознакою обриву фазної обмотки.

При моделюванні обриву двох фазних обмоток значення функції (2.16) наближається до 0, а в спектрі знижується рівень постійної складової з ростом гармоніки 50 Гц, 100 Гц і 250 Гц.

Для ідентифікації обривів обмоток годограф струму вектора Парка-Горєва є малоінформативним, оскільки вироджується в криву і може використовуватися тільки спільно з аналізом частотного спектру функції (2.16).

В результаті виконання випускної кваліфікаційної роботи розроблено моделі для дослідження пошкоджень в обмотках асинхронного електричного двигуна, а також розглянуто методи визначення внутрішніх пошкоджень у режимі реального часу. За результатами моделювання отримано характерні ознаки пошкоджень, які дозволять ідентифікувати початок пошкодження і його рівень.

					<i>КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини: навчальний посібник. Одеса: Наука і техніка, 2012. 480 с.
2. Васьковський Ю. М., Гераскін О. А. Електричні машини. Розділ: Асинхронні машини: методичні вказівки і контрольні задачі. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. 38 с.
3. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
4. Копылов И. П. Электрические машины: учебник для вузов. Москва: Энергоатомиздат, 1986.
5. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. 6-е изд. Москва: Энергоиздат, 1981.
6. Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D., Pekarek S. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. 3rd ed. Wiley-IEEE Press, 2013.
7. Boldea I., Nasar S. A. The Induction Machines Design Handbook. 2nd ed. CRC Press, 2010.
8. Vas P. Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines. Oxford: Clarendon Press / Oxford University Press, 1993
9. Nandi S., Toliyat H. A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors - A Review. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2005. Vol. 20, No. 4. P. 719–729.
10. Thomson W. T., Fenger M. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults. IEEE Industry Applications Magazine. 2001. Vol. 7, No. 4. P. 26–34.

					КНУ КРБ.151.26.10.00.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Мінченко М. Ю.			СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	Літ.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Маринич І.А.						66	3
						КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.							
Затвердив		Маринич І.А.							

11. Siddique A., Yadava G. S., Singh B. A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2005. Vol. 20, No. 1. P. 106–114.
12. Kliman G. B., Koegl R. A., Stein J., Endicott R. D., Madden M. W. Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors. IEEE Transactions on Energy Conversion. 1988. Vol. EC-3, No. 4. P. 873–879
13. Arkan M., Kostic-Perovic D., Unsworth P. J. Modelling and Simulation of Induction Motors with Inter-Turn Faults for Diagnostics. Electric Power Systems Research. 2005. Vol. 75. P. 57–66.
14. Singh A., Grant B., DeFour R., Sharma C., Bahadoorsingh S. A Review of Induction Motor Fault Modeling. Electric Power Systems Research. 2016. Vol. 133. P. 191–197.
15. Terron-Santiago C., Martinez-Roman J., Puche-Panadero R., Sapena-Bano A. A Review of Techniques Used for Induction Machine Fault Modelling. Sensors. 2021. Vol. 21, No. 14. Article 4855.
16. Rodriguez-Blanco M. A. et al. Fault Diagnosis of Induction Motor Using D-Q Simplified Model and Parity Equations. Energies. 2022. Vol. 15, No. 22. Article 8372. Корисно для побудови D-Q моделі двигуна та використання діагностичних рівнянь.
17. Issa R. et al. Review of Fault Diagnosis Methods for Induction Machines in Railway Traction Applications. Energies. 2024. Vol. 17, No. 11. Article 2728.
18. De Angelo C.H., Bossio G.R., Giaccone S.J., Valla M.I., Solsona J.A., García G.O. Online model-based stator-fault detection and identification in induction motors // IEEE Trans. Ind. Electron., No. 56, 2009. pp. 4671–4680.
19. IEEE PES. IEEE 1415-2006 IEEE Guide for Induction Machinery. Maintenance Testing and Failure. Analysis. New York: IEEE Publ., 2007. 12 pp.
20. Sakhara S., Saad S., Nacib L. Diagnosis and detection of short circuit in asynchronous motor using three-phase model // International Journal of System Assurance Engineering and Management, Vol. 8, 2017. pp. 308-317.

21. Ansari A.A., Deshpande D.M. Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink / International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2, No. 5, 2010. pp. 1260-1267.

22. Azizi H., Sekki D., Kihal M., Chebout M., Kihal M., Moulai H. Study and diagnostic of electrical faults in asynchronous machines /Studies in engineering and exact sciences, No. 5, 2024. <https://doi.org/10.54021/seesv5n2-608>.

23. Venugopal G., Udayakumar A.K., Balashanmugham A., Houran M.A., Alsaif F., Elavarasan R.M., Raju K., Alsharif M.H. Fault Identification and Classification of Asynchronous Motor Drive Using Optimization Approach with Improved Reliability // Energies , Vol. 16, No. 6, 2023. pp. <https://doi.org/10.3390/en16062660>.

24. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.

25. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

26. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

27. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

28. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)

