

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

РИБІН Анастасія Сергіївна

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ЧАСТОТНО-
РЕГУЛЮВАЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З
ВИКОРИСТАННЯМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ / AUTOMATED SYSTEM
OF DIAGNOSTICS OF FREQUENCY-REGULATING ASYNCHRONOUS
ELECTRIC DRIVE USING SPECTRAL ANALYSIS.

спеціальність: 174 – Автоматизація комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота
здобувача другого (магістерського) рівня освіти

Виконала: студентка групи АКІТм–21
Рибін А. С.

Науковий керівник:
к.т.н., доцент А. І. Сегін

Випускну кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:
" ____ " _____ 2025 р.

Завідувач кафедри СКС
_____ А. І. Сегін

Тернопіль 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "магістр"
спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ:

зав. кафедри СКС

А. І. Сегін

"04" грудня 2024р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

РИБІН Анастасії Сергіївні

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Автоматизована система діагностики частотно-регульовального асинхронного електроприводу з використанням спектрального аналізу/ Automated system of diagnostics of frequency-regulating asynchronous electric drive using spectral analysis.

керівник роботи к.т.н., доцент Сегін А. І.

затверджено наказом по університету від « 28 » листопада 2024 р. № 938

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

1 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Будова, характеристики та принципи функціонування трифазного асинхронного короткозамкнутого електродвигуна, що управляється частотним перетворювачем.
2. Перелік основних типів поломок та дефектів при роботі трифазного асинхронного короткозамкнутого електродвигуна.

4. Основні питання, які потрібно розробити

1. Дослідити принципи функціонування трифазного асинхронного електродвигуна.
2. Побудувати модель асинхронного двигуна в програмних середовищах.
3. Здійснено моделювання роботи асинхронного двигуна, дослідити спектральні характеристики та визначити критерії виявлення пошкоджень за характером спектрів.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. 2D та 3D модель двигуна в програмному середовищі Maxwell.
2. Осцилограми перехідних процесів кутової швидкості та моментів електродвигуна.
3. Графіки спектральних характеристик струмів електродвигуна при різних типах проходжень та дефектів.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Сегін А. І.		
2	Сегін А. І.		
3	Сегін А. І.		

7. Дата видачі завдання 2 грудня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Технічне діагностування системи асинхронного електроприводу	01.01. 2025. – 31.03. 2025р.	виконано
2	Моделювання асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором у програмі ANSYS	01.03. 2025р.– 20.05.2025 р.	виконано
3	Моделювання режимів асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором в середовищі ANSYS SIMPLORER MAXWELL та аналіз системи його діагностики	21.05.2025р. – 30.09. 2025 р.	виконано
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	1.10.2025р. – 30.11.2025р.	виконано

Студентка

(підпис)

Рибін А. С.

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доц. Сегін А. І.

АНОТАЦІЯ

Рибін А. С. Автоматизована система діагностики частотно-регульовального асинхронного електроприводу з використанням спектрального аналізу. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль. 2024.

У кваліфікаційній роботі представлено автоматизовану систему діагностики частотно-регульовального асинхронного електроприводу на основі методу спектрального аналізу.

ANNOTATION

Rybin A. S. Automated system for diagnosing a frequency-controlled asynchronous electric drive using spectral analysis. – Manuscript.

Research for the degree of “Master” in specialty 174 – Automation, computer-integrated technologies and robotics, educational and professional program – Automation and computer-integrated technologies. – Western Ukrainian National University, Ternopil. 2024.

The qualification work presents an automated system for diagnosing a frequency-controlled asynchronous electric drive based on the spectral analysis method.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ СИСТЕМИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТОПРИВОДУ.....	11
1.1 Теоретичне дослідження системи асинхронного електроприводу.....	14
1.2 Опис методу діагностування та побудова графу пошуку несправностей.....	16
1.3 Огляд методів діагностування асинхронного електродвигуна.....	
2 МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНУТИМ РОТОРОМ У ПРОГРАМІ ANSYS.....	19
2.1 Моделювання у програмному середовищі ANSYS RMxp rt	19
2.2 Моделювання у програмному пакеті ANSYS MAXWELL.....	26
2.3 Модель SIMPLORER з інтегрованою моделлю MAXWELL...	30
2.4 Модель SIMPLORER з аналітичною моделлю двигуна.....	
3 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В СЕРЕДОВИЩЕ ANSYS SIMPLORER MAXWELL.....	35
3.1. Побудова моделі електродвигуна в середовищі ANSYS SIMPLORER MAXWELL.....	35
3.2 Побудова двовимірних моделей двигуна та аналіз його характеристик.....	40
3.3 Діагностика несправностей асинхронного електродвигуна на основі спектральних характеристик струмів та напруг.....	54
ВИСНОВКИ	65
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68
ДОДАТОК.....	72

ВСТУП

Актуальність теми. В даний час відбувається четверта промислова революція, що спирається на цифровізацію виробництва. З 2011 року з'явився термін Industry 4.0 (Індустрія 4.0 [1–3], невід'ємно пов'язаний із Smart Factory (Цифрове/Розумне підприємство) [4-5]– підприємство, що поєднує переваги масового промислового випуску з перевагами штучного виконання за індивідуальними вимогами замовників. Таке виробництво забезпечує максимальна якість продукції та мінімальні витрати на виготовлення. У умовах Smart Factory потрібно організувати відображення промислової ланцюжка виробництва продукту у віртуальному просторі. Для реальних об'єктів створюються відповідні цифрові двійники [5]. Для отримання економічного ефекту при віртуалізації виробничих процесів необхідно використовувати інструменти для роботи цифровими двійниками та інструменти для об'єднання реального та віртуального світів. Для промислового підприємства ланцюжок створення продукту включає фази: розробка продукту, планування виробництва, підготовка виробництва та інжиніринг, власне виробництво продукту, технічне обслуговування і ремонти (ТОiP).

Електромеханічний комплекс майбутнього – це система, здатна здійснювати функції управління та діагностики в онлайн-режимі без безпосередньої участі людини з використанням інтернету речей та технології Big Data. Розвиток високоточних датчиків технологічної інформації, розширення програмних та технічних можливостей оперативного аналізу величезного обсягу даних, застосування хмарних технологій, значне зниження ціни зберігання інформації (ціна зберігання) 1 ГБ становить менше 0,03 \$ США на рік (порівняно з 10 тис. дол. США двадцять років тому) робить це завдання цілком здійсненним і навіть необхідним [6-8].

Представники промисловості на Україні та світу зацікавлені у

забезпеченні надійної та безперебійної експлуатації електротехнічного обладнання за допомогою впровадження систем моніторингу та контролю у реальному часі стану об'єкта управління без виведення з експлуатації його елементів.

Асинхронний електропривод є найбільш поширеним типом електроприводу, що широко використовується для приведення в рух і керування масовими механізмами [9-10]. Найчастіше для живлення та керування асинхронним електродвигуном (АД) використовується дволанковий перетворювач частоти (ПЧ).

Сучасні промислові підприємства дедалі частіше застосовують частотно-регульовані асинхронні електроприводи завдяки їхній енергоефективності, гнучкості керування та високій надійності [11-14]. Водночас зростає потреба у своєчасній та достовірній діагностиці їхнього технічного стану, оскільки навіть незначні несправності можуть призвести до зупинки виробничого процесу, фінансових втрат або аварій [15-16].

Традиційні методи діагностики, що базуються на візуальному огляді чи періодичному технічному обслуговуванні, є недостатньо ефективними в умовах інтенсивної експлуатації обладнання. У зв'язку з цим актуальним є впровадження автоматизованих систем моніторингу та діагностики, що забезпечують безперервний контроль за станом електроприводів у режимі реального часу [17-19].

Одним з перспективних підходів до підвищення ефективності діагностики є застосування спектрального аналізу електричних сигналів, який дозволяє виявляти характерні ознаки пошкоджень на ранніх етапах розвитку несправностей. Це відкриває можливості для прогнозного технічного обслуговування та зниження витрат на ремонт [20-21].

Огляд літератури в галузі передиктивного аналізу стану електротехнічного обладнання [17-24] показав, що на сьогоднішній момент актуальне завдання створення оптимальної ієрархічної системи збору та

аналізу даних як для конкретного промислового об'єкта, так і створення універсального методу моніторингу та контролю стану електротехнічного обладнання реальному часі без виведення з експлуатації його елементів.

Таким чином, розробка автоматизованої системи діагностики частотно-регульованого асинхронного електроприводу з використанням спектрального аналізу є актуальним завданням, що відповідає сучасним тенденціям розвитку електропривідної техніки, цифровізації та промислової автоматизації.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження автоматизованої системи діагностики стану частотно-регульованого асинхронного електроприводу з використанням методів спектрального аналізу для своєчасного виявлення несправностей і підвищення надійності роботи приводу

Для досягнення поставленої мети необхідно :

- здійснити огляд існуючих методів пошуку несправностей та дефектів електроприводу.
- побудувати логічну та функціональну схему роботи електродвигуна;
- скласти таблицю функцій несправностей та граф їх пошуку;
- здійснити побудову моделі електродвигуна та його функціонування.
- скласти відповідність спектральних характеристик до типів несправностей і дефектів двигуна.

Об'єкт дослідження. Частотно-регульований асинхронний електропривод.

Предмет дослідження. Методи та засоби автоматизованої діагностики технічного стану асинхронного електроприводу з використанням спектрального аналізу електричних сигналів.

Методи дослідження. В роботі використовувалися методи спектрального (частотного) аналізу сигналів струмів та напруги; методи цифрового аналізу сигналів; методи математичного моделювання та

чисельного аналізу; Імітаційне моделювання в програмних пакеттах ANSYS та RMxpert;

Наукова новизна. Удосконалено метод автоматизованої діагностики частотно-регульованого асинхронного електроприводу шляхом використання спектрального аналізу сигналів, що дозволяє з високою точністю ідентифікувати типові несправності електродвигуна та системи керування без демонтажу обладнання. Запропоновано алгоритм аналізу гармонічного складу струму як діагностичної ознаки.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена система діагностики може бути інтегрована в промислові системи автоматизації для постійного моніторингу стану електроприводів, що дозволить підвищити їхню надійність, зменшити час простою обладнання, знизити витрати на ремонт та обслуговування. Результати дослідження можуть бути використані в галузях, де застосовується частотно-регульований електропривід — у машинобудуванні, енергетиці, транспорті тощо.

Апробація.

1. Сегін А.І. Автоматизована система діагностики частотно-регульовального асинхронного електроприводу / А.І. Сегін, А.О. Рибін, Р.В. Мукомела // Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму Технології інтернету речей: системи та рішення (ТІР: СМ –2025). Тернопіль, 2025. С.91 –97.

2. Біловус Д.П. Модель системи обліку електричної енергії на електровозах змінного струму / Д.П. Біловус, В.В. Жовток, А.С. Рибін // Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму Технології інтернету речей: системи та рішення (ТІР: СМ –2025). Тернопіль, 2025. С.102 –107.

1 ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ СИСТЕМИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТОПРИВОДУ

1.1 Теоретичне дослідження системи асинхронного електроприводу

Для дослідження системи перетворювача частоти асинхронного двигуна зі скалярним керуванням розглянуто функціональну електричну схему представлену на рисунку 1.1.

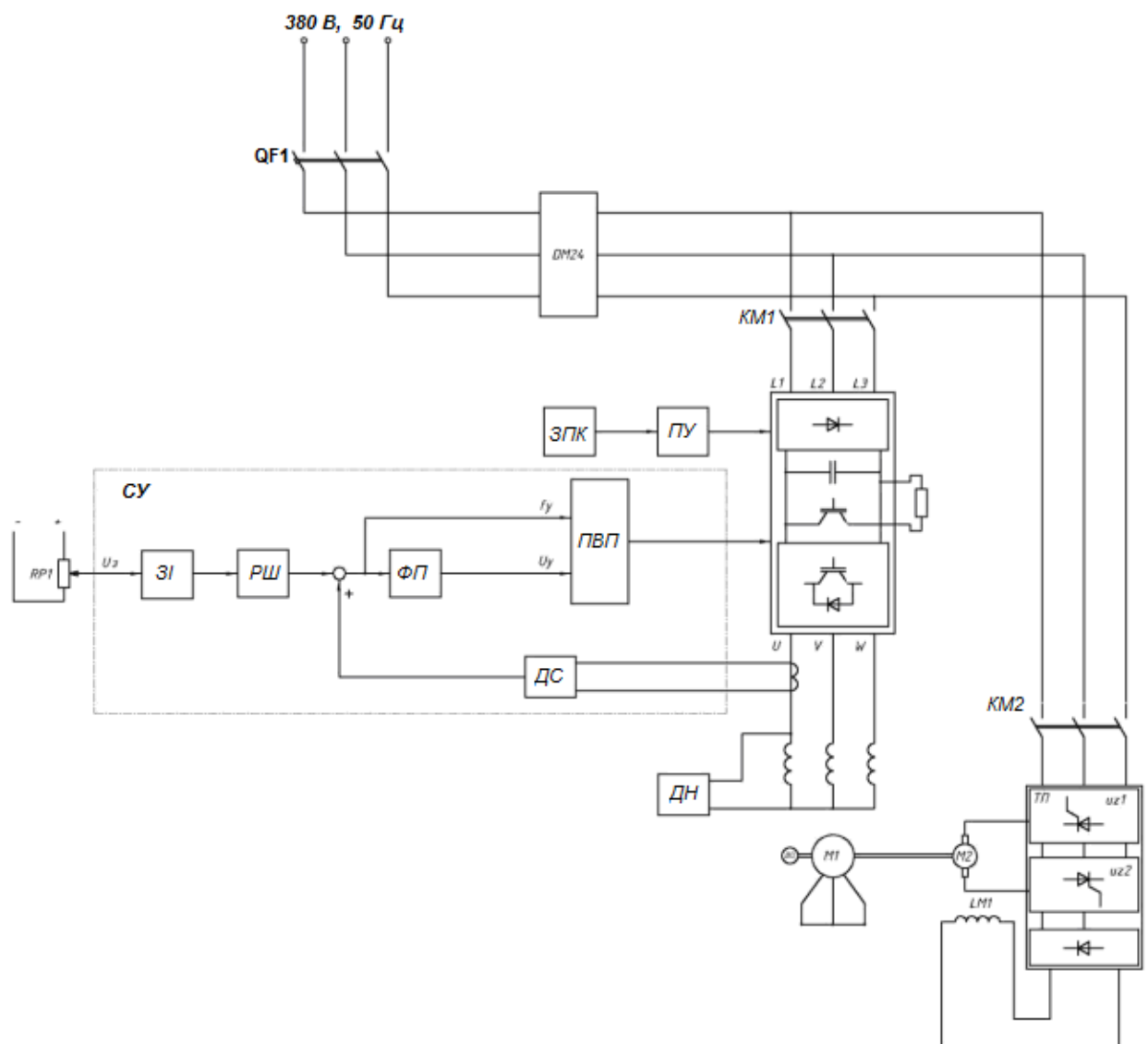


Рисунок 1.1 – Функціональна електрична схема перетворювача частоти

На рисунку 1.1 представлена схема дволанкового перетворювача частоти. Силова частина включає трифазний нерегульований випрямляч, автономний інвертор напруги, ланку постійного струму та гальмівний модуль.

Інвертор реалізований на шести транзисторах IGBT і працює в режимі широтно-імпульсної модуляції і перетворює нерегульовану напругу на виході випрямляча в регульовану за частотою і амплітудою першої гармоніки напругу на статорі асинхронного електродвигуна. Для здійснення гальмівних режимів паралельно конденсатору, підключений гальмівний ланцюжок із послідовно з'єднаного транзистора та резистора.

Основою системи керування електроприводом є програмований контролер, за допомогою якого здійснюється керуванням перетворювачем частоти. Управління інвертором здійснюється двома каналами: сигналом пропорційним заданій частоті і сигналом пропорційним заданій величині напруги AI.

Схема управління, представлена на рисунку 1.1, є розімкнутою скалярною схемою управління. На ній зображено регулятори, реалізовані у вигляді окремих блоків програми. Розробка логічної моделі здійснювалася на основі функціональної електричної схеми електроприводу та представлена на рисунку 1.2.

Виходячи з рисунку 1.2, складена таблиця 1.1 позначень.

Таблиця 1.1 – Таблиця позначень елементів логічної моделі

Номер елемента	Умовне позначення	Розшифровка
1	Мережа	Мережа
2	QF1	Автоматичний вимикач
3	ПВП	Первинний вимірювач потужності
4	КМ1	Контактор 1

5	КМ2	Контактор 2
6	КВп	Комплект вентилів вперед
7	КВн	Комплект вентилів назад
8	КВз	Комплект вентилів для обмотки збудження
9	ДПС	Двигун постійного струму
10	ОЗ	Обмотка збудження
11	ЗІ	Задатчик інтенсивності
12	РШ	Регулятор швидкості
13	Σ	Суматор
14	ФП	Функціональний перетворювач
15	ГШІМ	Генератор ШІМ
16	ЗПК	Зв'язок із персональним комп'ютером
17	ПУ	Пульт управління
18	ПрК	Програмований контролер
19	Д	Драйвер
20	В1	Плече мосту випрямляча 1
21	В2	Плече моста випрямляча 2
22	В3	Плече моста випрямляча 3
23	С	Конденсатор
24	Р	Резистор гальмівний
25	І1	Плече мосту інвертора автономного 1
26	І2	Плече мосту інвертора автономного 2
27	І3	Плече мосту інвертора автономного 3
28	Ст	Статор електромашини асинхронної
29	ДС	Датчик струму
30	Р	Ротор електромашини асинхронної
31	ЕнІ	Енкодер інкрементний

кожному наступному виборі елемента, що перевіряється, вибирається той, елементарна перевірка якого має максимум інформації про стан об'єкта діагностування.

Таблиця 1.2 – Таблиця функцій несправності системи

R	e0	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13	e14	e15	e16	e17	e18	e19	e20	e21	e22	e23	e24	e25	e26	e27	e28	e29	e30	e31	W
Z1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	30
Z2	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	28
Z3	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	26
Z4	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24
Z5	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24
Z6	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	22
Z7	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	22
Z8	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	22
Z9	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14
Z10	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20
Z11	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	22
Z12	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20
Z13	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18
Z14	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	16
Z15	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14
Z16	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	22
Z17	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20
Z18	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Z19	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6
Z20	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18
Z21	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18
Z22	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18
Z23	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	16
Z24	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	22
Z25	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	10
Z26	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	10
Z27	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	10
Z28	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	12
Z29	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	14
Z30	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	26	
Z31	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	28	

У даній кваліфікаційній роботі було застосовано метод половинного розбиття без урахування ймовірності виходу з ладу. В даному методі ймовірності технічних станів та ваги перевірок всіх логічних елементів рівні, тому першим перевіряється той, елементарна перевірка якого ділить навпіл всю множину логічних елементів по справних та несправних станах.

Відповідно, граф пошуку несправності об'єкта, що діагностується, за заданим методом пошуку несправності буде мати вигляд представлений на

рисунку 1.3.

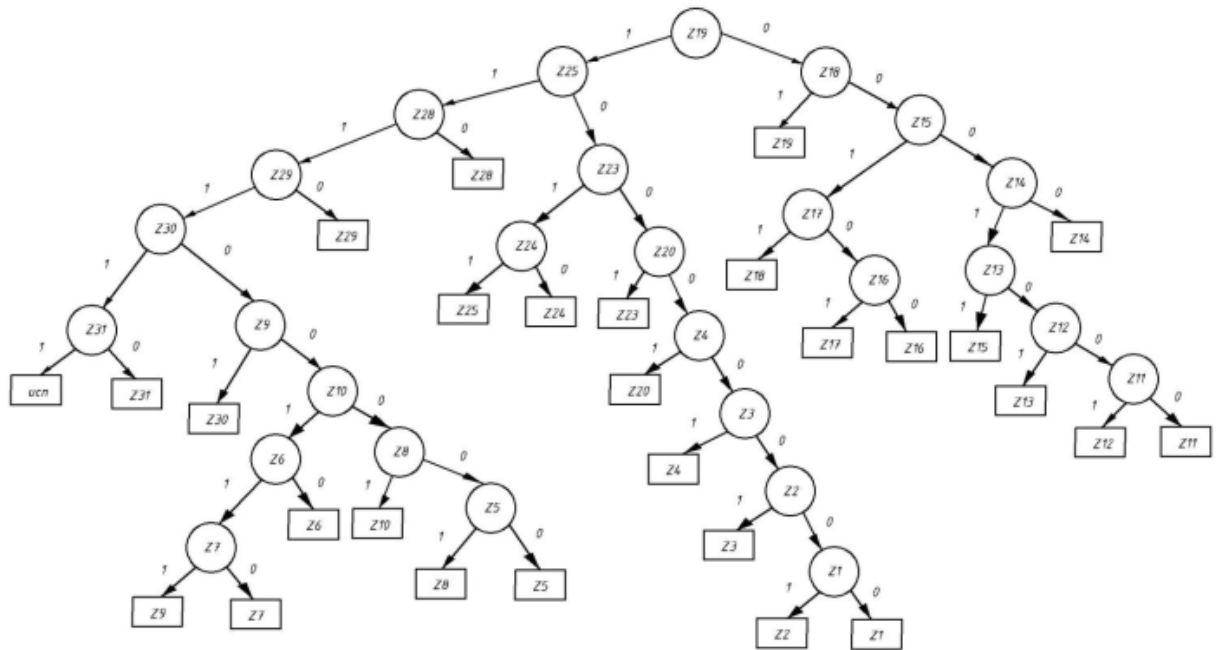


Рисунок 1.3 – Граф пошуку несправності

В результаті розроблено функціональну схеми системи, структуру логічної моделі, сформовано таблицю функцій несправності та побудовано граф пошуку несправності, шляхом половинного розбиття.

1.3 Огляд методів діагностування асинхронного електродвигуна

Існуючі методи діагностики стану АТ з КЗ можна класифікувати за закладеним у них принципом наступні функціональні групи методів:

1. Методи, що використовують аналіз вібрацій елементів об'єкта діагностування.
2. Методи, що використовують аналіз акустичних коливань працюючої машини.
3. Методи, що аналізують магнітний потік у зазорі АД.
4. Методи, що аналізують вторинні електромагнітні поля машини.

5. Методи, що аналізують температуру елементів артеріального тиску.
6. Методи, що аналізують вміст заліза в олії для діагностики механічних вузлів (зокрема підшипників)
7. Методи, що аналізують стан ізоляції.
8. Методи, що аналізують електричні параметри машини.

Вібродіагностика має широке поширення та аналізує вібраційні параметри у контрольних точках двигуна. Як вібраційних параметрів виділяють: вібропереміщення, віброприскорення та віброшвидкість. При вібродіагностиці реєструються діючі (середньоквадратичні) та максимальні значення вібраційних параметрів.

Допустимі значення вібраційних параметрів визначаються ДСТУ.

Вимірювання вібраційних параметрів проводять у кількох контрольних точках, реєструються параметри у вертикальному, горизонтальному та осьовому напрямках. Як первинні перетворювачі використовуються контактні датчики (зазвичай п'єзоакселерометри) і безконтактні (оптичні датчики переміщення).

Недоліки методів вібродіагностики:

1. Потрібний безпосередній доступ до об'єкта діагностування.
2. Низька ефективність та невчасність при виявленні електричних ушкоджень. Дані методи найбільш ефективно дозволяють виявити механічні пошкодження двигуна та механізмів.

Методи, що базуються на аналізі акустичної емісії, також недостатньо чутливі до електричних ушкоджень низьковольтних двигунів. Методи, що аналізують магнітний потік у зазорі АД, та методи, що аналізують вторинні електромагнітні поля машин, отримали найбільшого поширення для високовольтних машин (від 6 кВ і вище).

Встановлення датчиків магнітного поля потребує безпосереднього доступу до об'єкта діагностування. Встановлення датчиків магнітного поля (елементів Холла або магнітрезисторів) можливе лише при виготовленні

машини. Датчики вторинних електромагнітних полів машини дуже чутливі до впливу зовнішніх електромагнітних випромінювань.

Тепловізійний контроль дозволяє з високою точністю діагностувати стан підшипникових вузлів двигуна, але не дозволяють контролювати внутрішні ушкодження ізоляції двигуна. Перевагою тепловізійного контролю є можливість їх використання без безпосереднього доступу до діагностованого двигуна, так як термодатчики можна використовувати безконтактні інфрачервоні пірометри. Використання даних датчиків неможливе при закритому виконанні машин.

Методи, що аналізують вміст заліза в маслі, використовуються для діагностики стану механічних вузлів електроприводів. Недоліком даних методів є несвоєчасність визначення ушкоджень, що розвиваються, через застосування діагностики за непрямыми ознаками.

Контроль стану ізоляції досить широко застосовується під час діагностики електрообладнання. Більшою мірою вони застосовні тільки при відключеному напрузі живлення. Діагностика працюючих машин у реальному часі цими методами неможливо. Метод контролю стану ізоляції при працюючому устаткуванні (реєструються часткові розряди) нині розроблено лише високовольтного устаткування. [21]

2 МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНУТИМ РОТОРОМ У ПРОГРАМІ ANSYS

2.1 Моделювання у програмному середовищі ANSYS RMxprt

В даному розділі кваліфікаційної роботи проведено моделювання асинхронного електродвигуна із короткозамкненим ротором у програмному пакеті ANSYS. Нижче представлені каталожні параметри досліджуваного двигуна 4A100L2У3.

Таблиця 2.1 – Характеристики асинхронного електродвигуна 4A100L2У3

Параметр	Табличне значення
Типорозмір	4A100L2У3
Число полюсів	4
Номінальна напруга U_1 ,	380
Номінальна потужність $P_{\text{ном}}$, кВт	5,5
зазорі, Вб	0,68
Лінійна щільність струму A , А/см	247
Поверхнева щільність струму J , А/мм ²	5,6
ККД η , %	87,6
$\cos\varphi$	0,91
Номінальне ковзання S , %	3,4
Критичне ковзання $S_{\text{кр}}$, %	29,0
$N_{\text{ном}}$, про/хв	2893,43 (303,32)
$N_{\text{синхр}}$, об/хв	3000
Номінальний струм, А	10,48
Механічний момент інерції J_d , кг·м ²	0,0075
Номінальний момент, Н*м	18,16
Номінальний момент, Н*м	18,16
Пусковий момент, $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$	2,0 (36,32)
Критичний момент, $M_{\text{кр}}/M_{\text{ном}}$	2,5 (45,4)
Пусковий струм, $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$	7,5
T_d , с	0,36 (0,09)

Для подальшого дослідження необхідно здійснити моделювання роботи електродвигуна у програмному середовищі RMxprt [26]. Для цього необхідні габаритні, приєднувальні дані, маса та основні характеристики асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, які необхідні для моделювання даного двигуна було взято з довідника для асинхронних двигунів серії 4А. Нижче наведено конструктивні та обмотувальні параметри двигуна.

Спочатку проводиться моделювання статора на основі його параметрів представлених в таблиці 2.2 та здійснено креслення статора і його обмотки, представлених на рисунку 2.1 та 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри статора

Outer Diameter	Зовнішній діаметр	168	мм
Inner Diameter	Внутрішній діаметр	95	мм
Length	Довжина статора	130	мм
Stacking Factor	Коефіцієнт заповнення пакета магнітопроводу сталлю	0,97	—
Steel Type	Тип сталі	Сталь 2013	—
Number of Slots	Кількість пазів на статорі	24	—
Slot type	Форма паза статора	4	—
Lamination Sectors	Кількість секторів	247	—
Press Board Thickness	Товщина натискного листа	0,5	мм
Skew Width	Скіс пазів. Вимірюється серед пазів	0	—

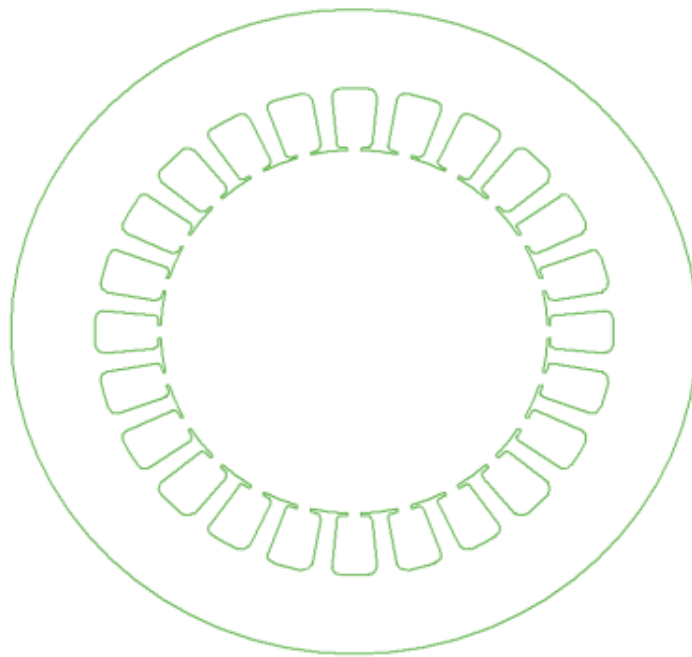
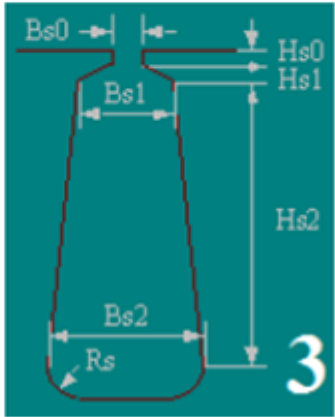


Рисунок 2.1 – Креслення статора у програмі RМхprt

В подальшому проводилося моделювання паза статора, тип і дані статора паза були взяті з довідника по асинхронних двигунів серії 4А Кравчика А.Е.

Таблиця 2.3 – Параметри паза статора

Auto Design	Автоматичний розрахунок конфігурації паза	ні	false
Parallel Tooth	Паралельні стінки біля зубця паза	ні	false
Hs0		0,5	MM
Hs1		0,8	MM
Hs2		12,5	MM
Bs0		3,5	MM
Bs1		9,1	MM
Bs2		11,3	MM
Rs		2	MM

Таблиця 2.4 – Параметри обмотки статора

Winding Layers	Кількість шарів обмотки в пазу	1	—
Winding Type	Тип обмотки: Whole Coiled (концентрична “врозвалку”) Half-Coiled (шаблонна) Editor (ручний режим розкладки обмотки)	Half-Coiled	—
Parallel Branches	Кількість паралельних гілок	1	—
Conductor per Slot	Кількість провідників в паузі	51	—
Number of Strands	Кількість жил в одному провіднику (елементарних провідників)	22	
Wire Wrap	Ізоляція проводу	0	ММ
Wire Size	Діаметр проводу	1,085	ММ

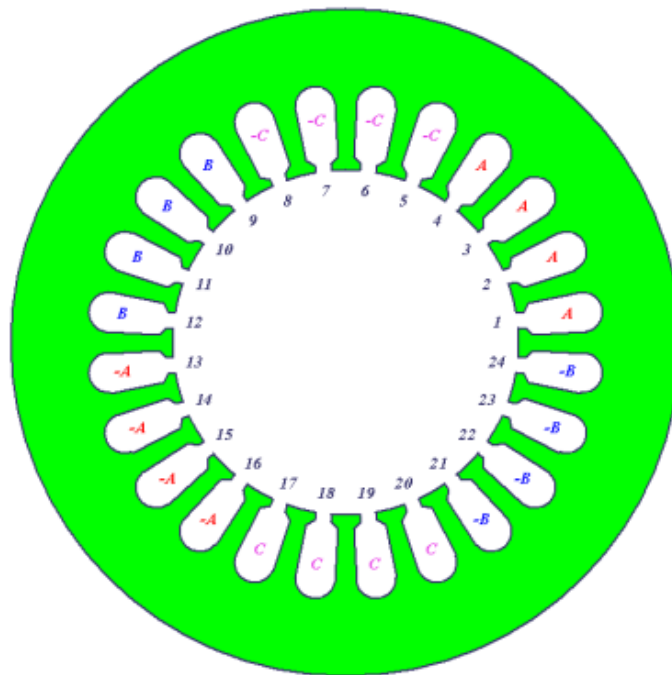


Рисунок 2.2 – Креслення обмотки статора

В подальшому здійснена побудова моделі ротора для дослідження його поведінки під час нормальної роботи двигуна та при виникненні відхилень через різні порушення та передаварійні стани внаслідок різних причин.

Таблиця 2.5 – Параметри ротора

Stacking Factor	Коефіцієнт заповнення пакета магнітопроводу сталлю	0,95	–
Number of Slots	Кількість пазів на роторі	20	–
Slot Type	Форма пазів ротора	1	–
Outer Diameter	Зовнішній діаметр ротора	94,1	мм
Inner Diameter	Внутрішній діаметр ротора	20	мм
Length	Довжина магнітопроводу ротора	130	мм
Steel Type	Матеріал листів магнітопроводу ротора	Сталь 2013	
Skew Width	Скіс пазів. Вимірюється в кількості пазів	0	–
Cast Rotor	Короткозамкнений ротор	так	true
Half Slot	Половина паза немає	ні	false
Double Cape	Подвійна «білизна клітина»	ні	false

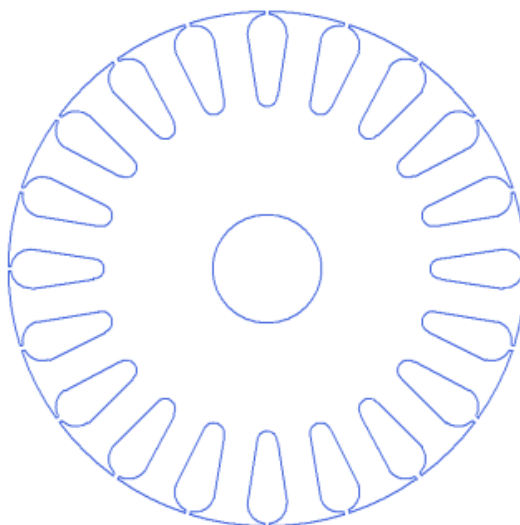
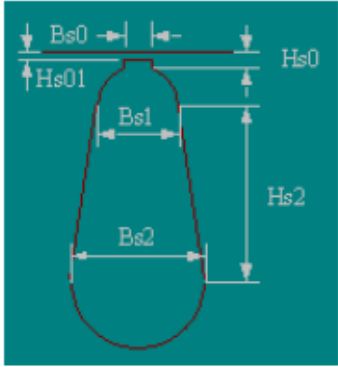


Рисунок 2.3 – Креслення ротора асинхронного двигуна

Так само, як і для статора для ротора, необхідно визначити параметри його пазів, що представлені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Дані паза ротора

Hs0		0,5	мм
Hs01		0	мм
Hs2		11,3	мм
Bs0		1	мм
Bs1		7,4	мм
Bs2		4	мм

Маючи моделі статора та ротора, можна переходити до моделювання досліджуваного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором 4A100L2Y3. Відповідні характеристики схеми електродвигуна наведені в таблиці 2.7 та на рисунку 2.4

Таблиця 2.7 – Дані двигуна для RMxprt

Machine Type	Тип електричної машини	Three-P...	Заблоковано
Number of Poles	Кількість полюсів	4	–
Stray Loss Factor	Коефіцієнт додаткових втрат	0,01	–
Frictional Loss	Втрати на тертя в підшипниках	50	Вт
Windage Loss	Вентиляційні втрати	50	Вт
Reference Speed	Синхронна частота обертання	1500	об/хв

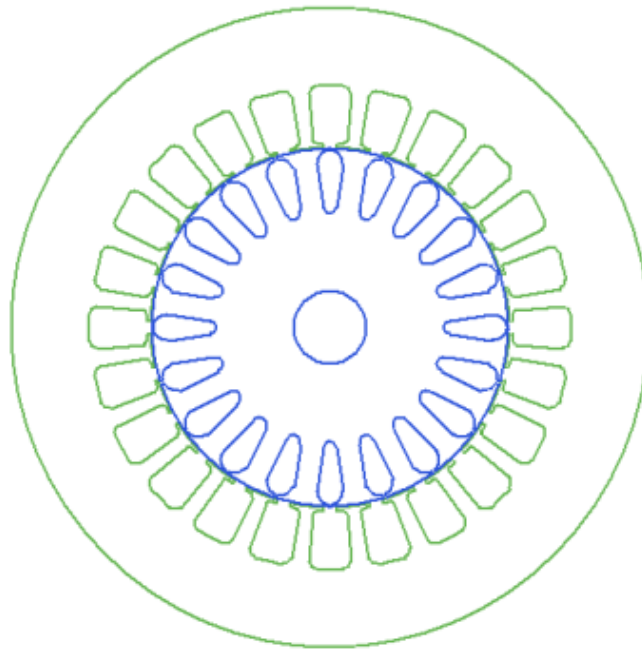


Рисунок 2.4 – Креслення двигуна у програмі RMxpert

У ході моделювання було побудовано та знято характеристики асинхронного електродвигуна 4A100L2Y3. Механічна та електромеханічна характеристики двигуна наведені на рисунку 2.5.

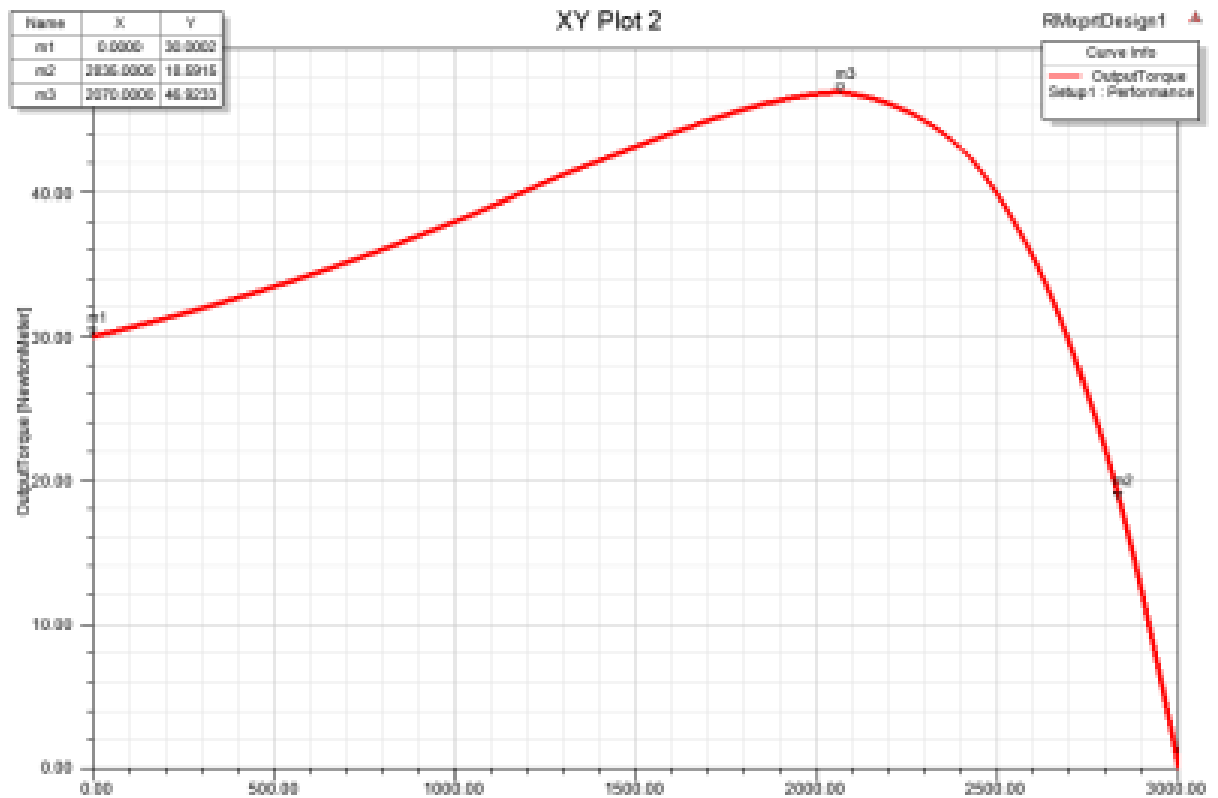


Рисунок 2.5 – Механічна характеристика, отримана в RMxpert

Таблиця 2.8 – Порівняння табличних та експериментальних значень

Параметр	Табличне значення	Експериментальне значення
Типорозмір	4A100L2Y3	
Кількість полюсів	4	
Номінальна напруга	U ₁ ,	380
Номінальна потужність P _{ном} , кВт	5,5	5,5
Електромагнітна індукція у зазорі, Вб	0,68	0,58
Лінійна щільність струму A, А/см	247	294,3
Поверхнева щільність струму J, А/мм ²	5,6	5,96
ККД η , %	87,6	88,9
cos φ	0,91	0,91
Номінальне ковзання s, %	3,4	5,4
Критичне ковзання s _{кр} , %	29,0	31,0
N _{ном} , про/хв	2893,43 (303,32)	2835,75

2.2 Моделювання у програмному пакеті ANSYS MAXWELL

В даному підрозділі проведено моделювання досліджуваного асинхронного двигуна у програмному середовищі ANSYS MAXWELL. На підставі попередньої моделі, побудованої в програмному середовищі ANSYS RMxprt, проводиться побудова 2D і 3D моделей двигуна. Побудова перехідного процесу швидкості та моменту. Порівняння механічних характеристик отриманих ANSYS RMxprt та ANSYS MAXWELL.

У середовищі Maxwell було отримано рисунки 2.7 і 2.8 перехідних процесів пуску $\omega = f(t)$, $M = \varphi(t)$.

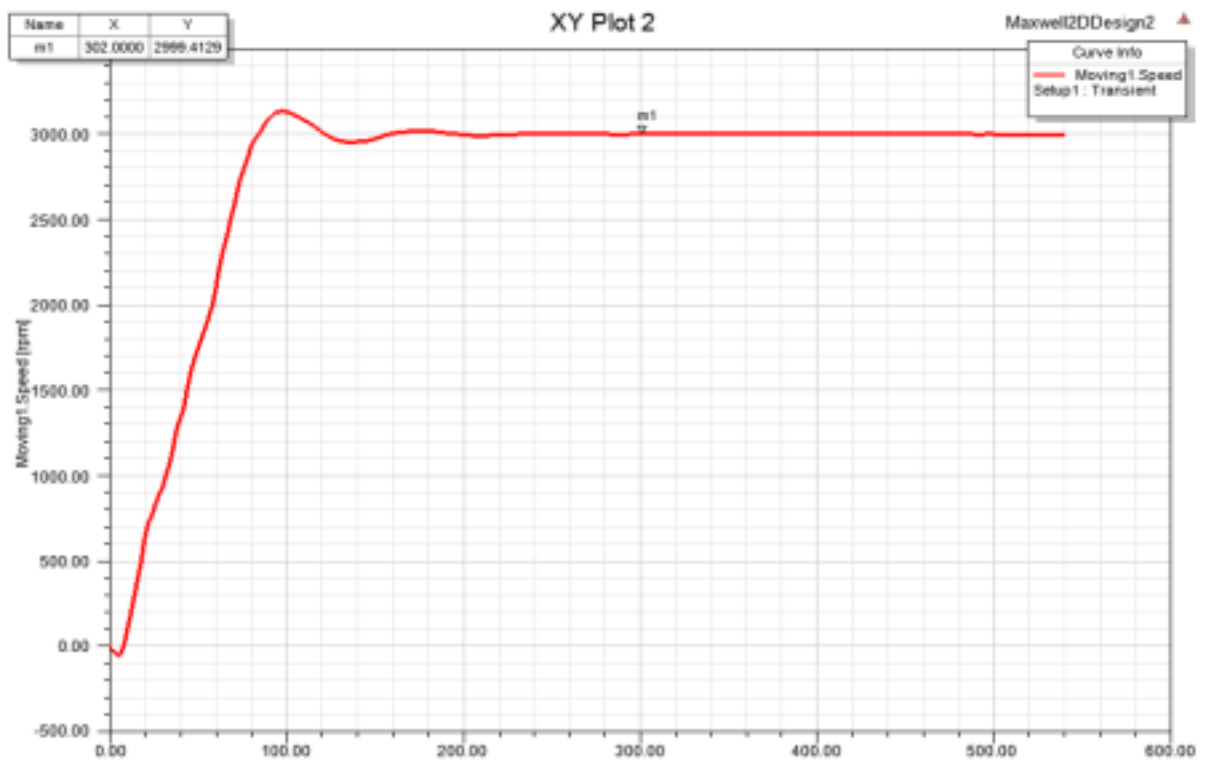


Рисунок 2.7 – Перехідний процес швидкості на холостому ході

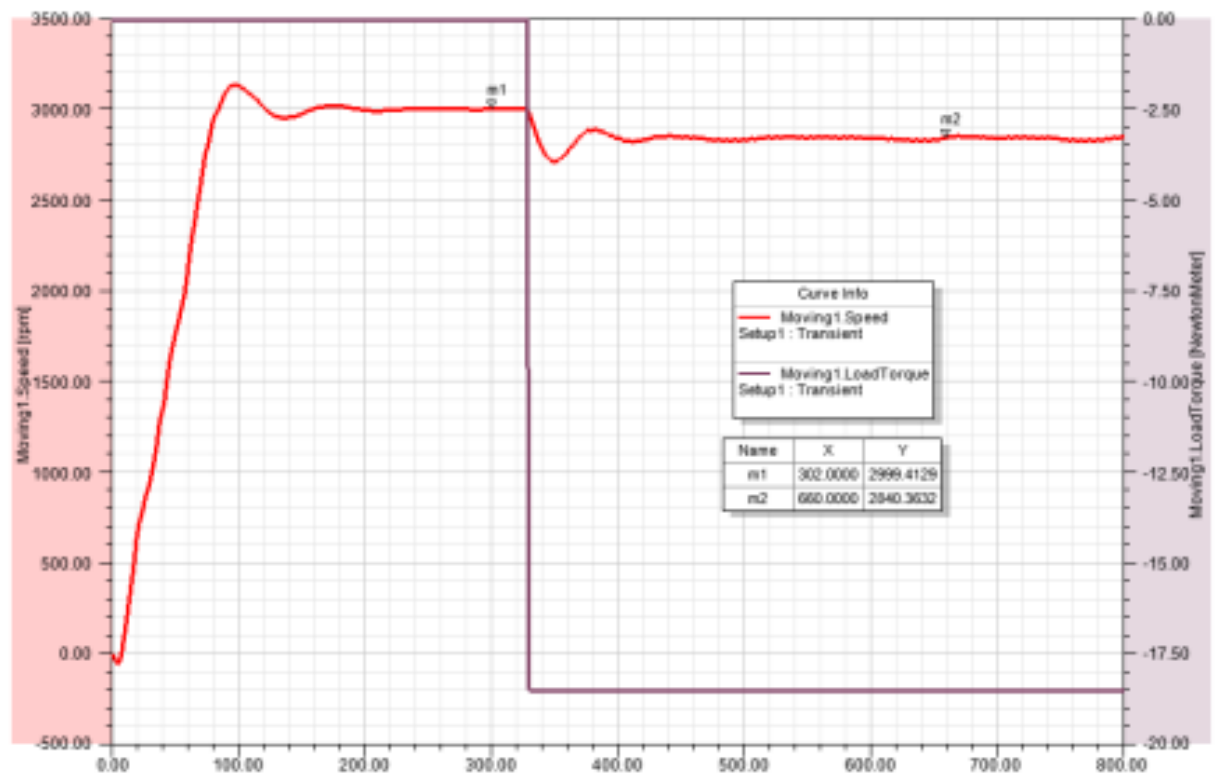


Рисунок 2.8 – Перехідний процес швидкості при номінальному моменті навантаження $M = 18,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$

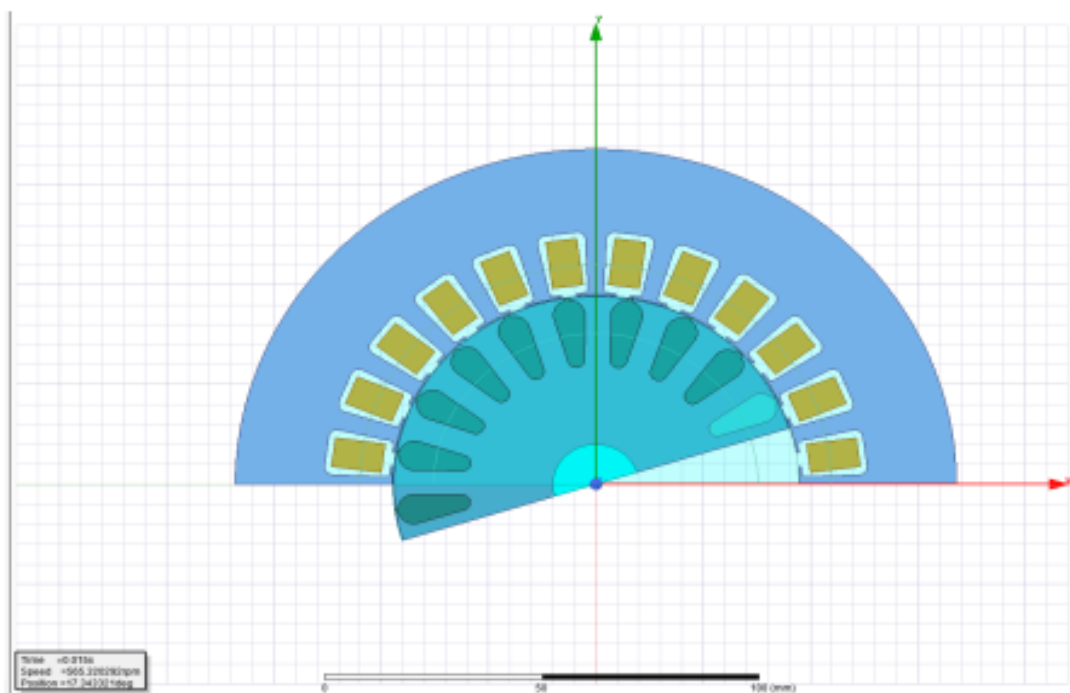


Рисунок 2.9 – 2D модель двигуна, отримана в програмному середовищі Maxwell

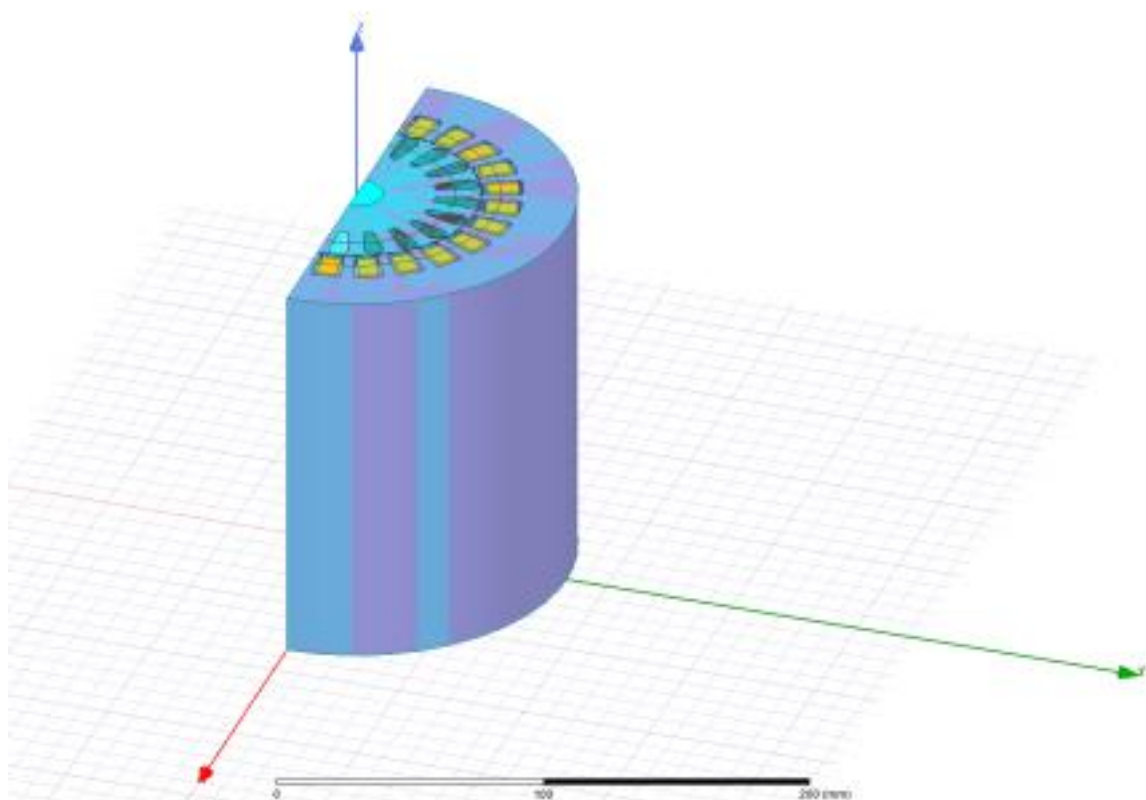


Рисунок 2.10 – 3D модель двигуна, отримана в середовищі Maxwell

Таблиця 2.10 – Параметри двигуна при різних навантаженнях в середовищі Maxwell

M,	Н·м	0	7,4	11,1	18,5	22,2	25,9
n,	об/хв	2999	2939	2907	2840	2800	2750

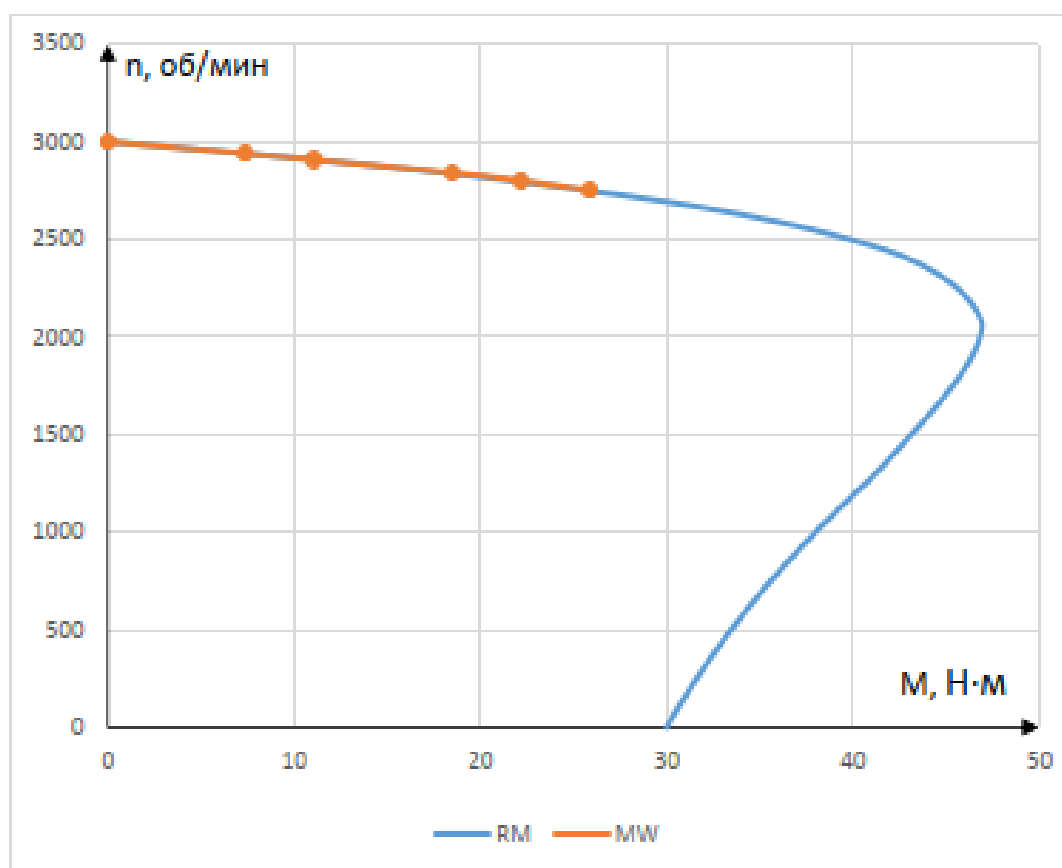


Рисунок 2.10 – Порівняння механічних характеристик двигуна у середовищах Maxwell та RMXprt

Таким чином, у середовищі Maxwell було побудовано двовірну і тривимірну модель двигуна, знято картини розподілу магнітної індукції та поверхневої щільності струму за площею обмоток двигуна. Також було знято перехідні характеристики при холостому ході і накиду навантаження, що дорівнює номінальному моменту. Шляхом здійснення накиду різних величин навантаження, за точками була побудована механічна характеристика та

здійснено порівняння характеристик з двох програмних середовищ Maxwell та RМхprt.

2.3 Модель SIMPLORER з інтегрованою моделлю MAXWELL

У даному розділі кваліфікаційної роботи представлена модель Simplorer прямого пуску трифазного асинхронного короткозамкнутого електродвигуна, виконаного в середовищі Maxwell. Кожна статора фаза живиться від ідеального джерела напруги (рисунок 11). Опори в ланцюзі ротора представлені у вигляді активного опору

Таблиця 2.11 – Параметри моделі

Найменування	Скорочення	Значення
Ідеальне джерело напруги	E1	$U = 311$, $f = 50$ Гц, $Deg = 0$ Гр
	E2	$U = 311$, $f = 50$ Гц, $Deg = 120$ Гр
	E3	$U = 311$, $f = 50$ Гц, $Deg = 240$ Гр
Опір ланцюга живлення	R4, R5, R6	$R = 1$ мОм
Активне опір обмотки ротора	R1, R2, R3	$R = 2,44$ Ом
Момент інерції	MASS_ROTБ2	$J = 0,0078$
Навантаження	F_ROTБ1	PIN
Джерело завдання	STEP 4	Step time = 0,325 с
		Final Value = -18,5



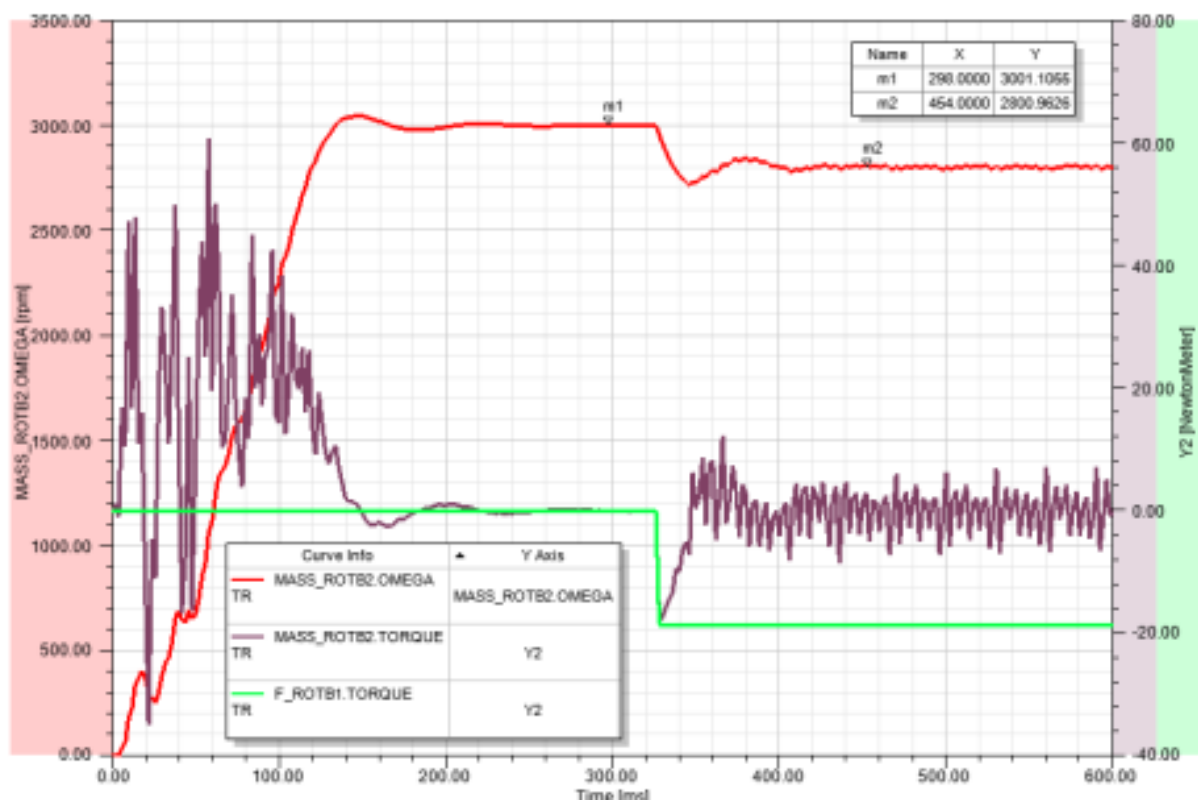


Рисунок 2.12 – Осцилограми перехідних процесів $\omega = f(t)$, $M = \varphi(t)$.

2.4 Модель SIMPLORER з аналітичною моделлю двигуна

У цьому розділі представлена модель Simplorer (рисунок 2.13) з режимом регулювання швидкості та моменту з аналітичною моделлю трифазного асинхронного короткозамкнутого електродвигуна. Двигун живиться від ідеального трифазного джерела напруги THREE_PHASE1. Амплітудою та частотою джерела керує сигнал задання швидкості STEP 2, який через математичні оператори GAIN перетворюється на сигнали з напруги f_{vu} та частотою n_{vf} . Гальмування двигуна відбувається перемиканням ключів TS1, TS2, TS3 на ланцюг джерела постійного струму I1, якими управляє компаратор COMP1. Навантаження на вал двигуна імітує елемент F_ROT1, сигнал якої задається через STEP4, інерційність задається елементом MASS_ROT1.

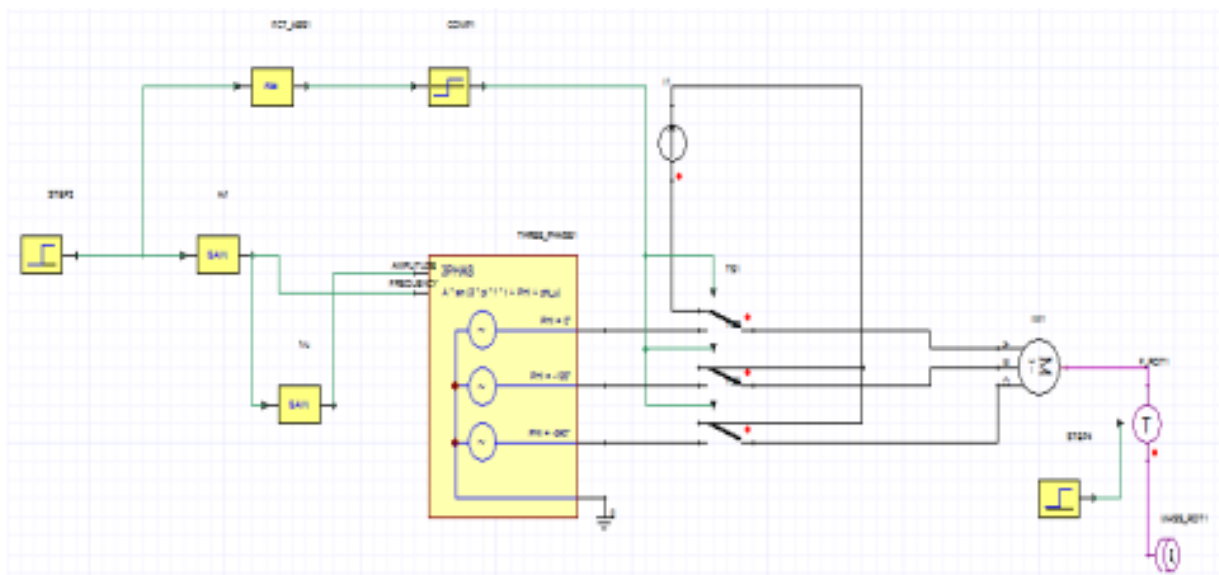


Рисунок 2.13 – Модель Simplorer з режимом регулювання швидкістю та моментом з аналітичною моделлю трифазного двигуна

Параметри елементів моделі наведено у таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Параметри елементів моделі

Найменування	Скорочення	Значення
Трифазне джерело напруги	THREE_PHASE1	$U_1 = 311 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$
Момент інерції	MASS_ROT1	$J = 0,0078$
Навантаження	F_ROT1	PIN
Джерело завдання навантаження	STEP 4	Step time = 0,2 с Final Value = -18,5
Джерело завдання швидкості	STEP 2	Step time = 0,4 с Final Value = 0 Init. Value = 3000
Оператор частоти	Nvf	$K_P = 1/60$
Оператор напруги	Fvu	$K_P = 220 \cdot 1,4/50$

Модуль миттєвого значення функції в одиницю часу	FCT_ABS1	TS = 0 с
Компаратор	COMP1	THRES = 200 VAL 1 = -1 VAL 2 = 1
Джерело струму	I1	Source current = 100 A
Двигун	IM1	Параметри двигуна (Табл 1.)
Ключі	TS1, TS2, TS3	0 – ланцюг змінного струму 1 – ланцюг постійного струму

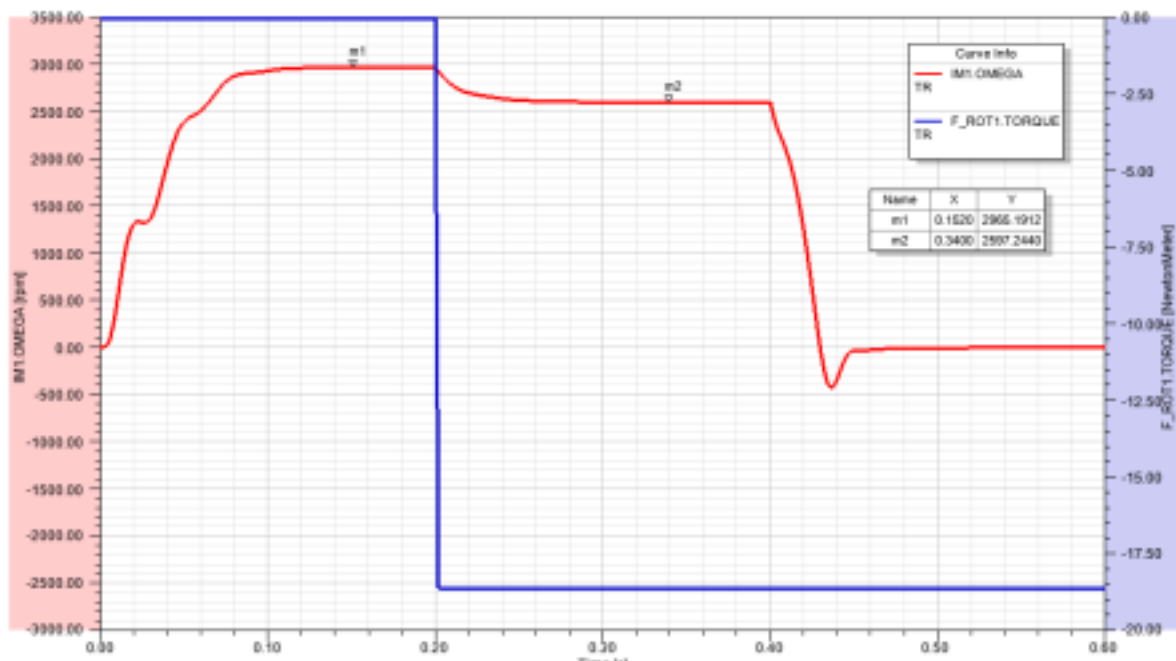


Рисунок 2.14 – Осцилограми перехідних процесів $\omega = f(t)$, $M = \varphi(t)$ з аналітичною моделлю двигуна

3 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНУТИМ РОТОРОМ В СЕРЕДОВИЩІ ANSYS SIMPLORER MAXWELL ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЙОГО ДІАГНОСТИКИ

3.1. Побудова моделі електродвигуна в середовищі ANSYS SIMPLORER MAXWELL

На рисунку 3.1 представлена модель Simplorer з режимом регулювання швидкості та моменту з інтегрованою моделлю трифазного асинхронного короткозамкнутого електродвигуна в середовищі Maxwell.

Двигун живиться від ідеального трифазного джерела напруги THREE_PHASE1. Амплітудою та частотою джерела керує сигнал завдання швидкості STEP 2, який через математичні оператори GAIN перетворюється на сигнали з напруги f_{vu} та частотою nvf . Гальмування двигуна відбувається перемиканням ключів TS1, TS2, TS3 на ланцюг джерела постійного струму I1, якими управляє компаратор COMP1 через елемент модуля миттєвого значення FCT_ABS1. Навантаження на валу двигуна імітує елемент F_ROT1, сигнал якого задається через STEP4, інерційність задається елементом MASS_ROT1. Опори в ланцюзі ротора представлені у вигляді активних опорів R1, R2, R3. Внутрішній опір ланцюга живлення визначається через опори R4, R5, R6.

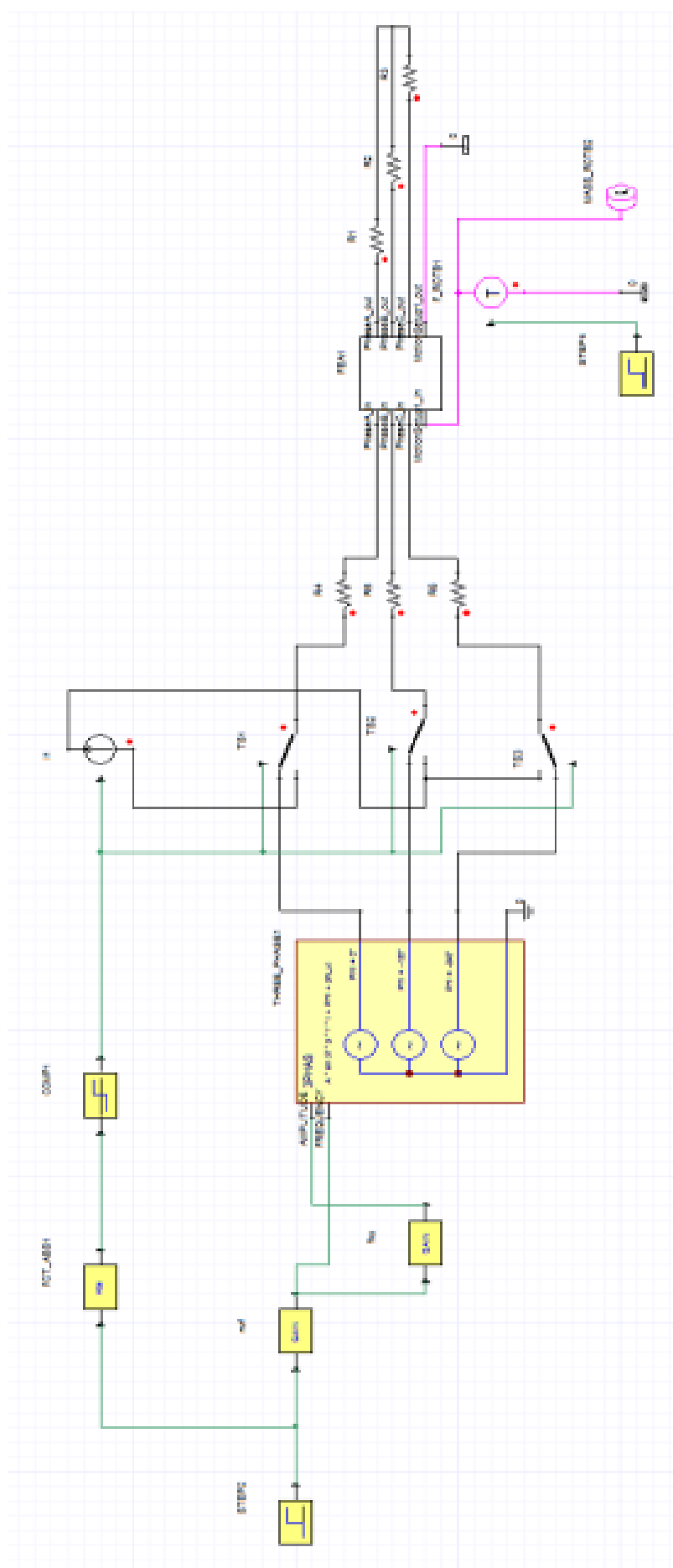


Рисунок 3.1 – Модель электроприводу Simuloner з інтегрованою моделлю двигуна Maxwell

Таблиця 3.1 – Параметри елементів моделі

Найменування	Скорочення	Значення
Трифазне джерело напруги	THREE_PHASE1	$U_1 = 311 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$
Момент інерції	MASS_ROT1	$J = 0,0078$
Навантаження	F_ROT1	PIN
Джерело завдання навантаження	STEP 4	Step time = 0,25 с Final Value = -18,5
Джерело завдання швидкості	STEP 2	Step time = 0,4 с Final Value = 0 Init. Value = 3000
Оператор частоти	Nvf	KP = 1/60
Оператор напруги	Fvu	KP = 220*1,4/50
Модуль миттєвого значення функції в одиницю часу	FCT_ABS1	TS = 0 с
Компаратор	COMP1	THRES = 200 VAL 1 = -1 VAL 2 = 1
Джерело струму	I1	PIN
Двигун	IM1	Параметри двигуна (табл 1.)
Ключі	TS1, TS2, TS3	0 – ланцюг змінного струму 1 – ланцюг постійного струму
Опір ланцюга живлення	R4, R5, R6	$R = 1 \text{ мОм}$
Активний опір обмотки ротора	R1, R2, R3	$R = 2,44 \text{ Ом}$

При моделюванні були отримані наступні осцилограми перехідних процесів (рис. 3.2, 3.3, 3.4, 3.5) ω , $M = f(t)$, $I = f(t)$, $U = f(t)$.

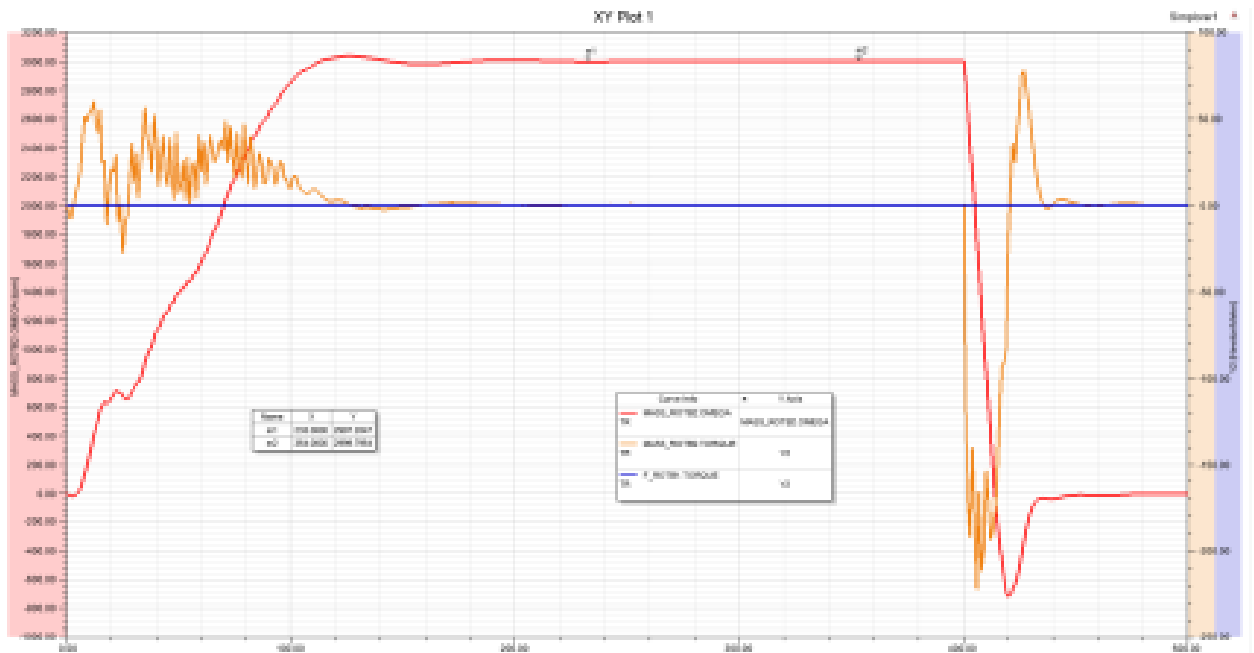


Рисунок 3.2 – Осцилограми перехідних процесів на холостому ході
 $\omega, M = f(t)$.

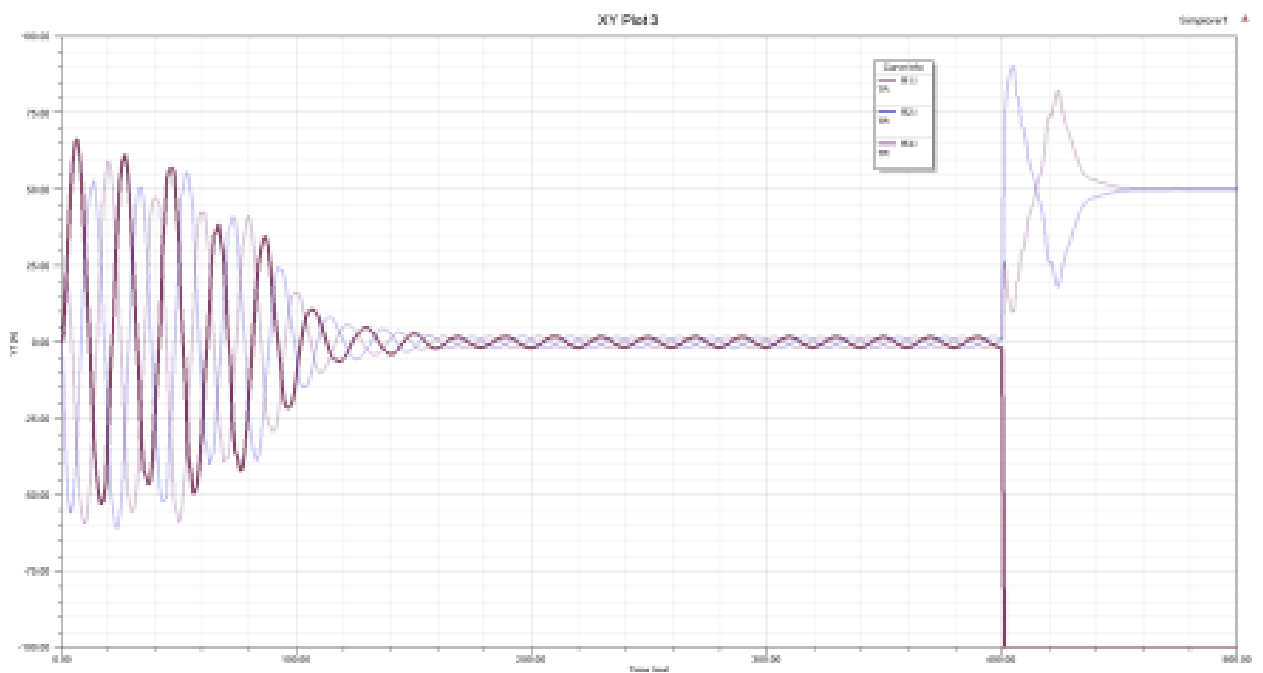


Рисунок 3.2 – Осцилограми перехідних процесів на холостому ході $I = f(t)$

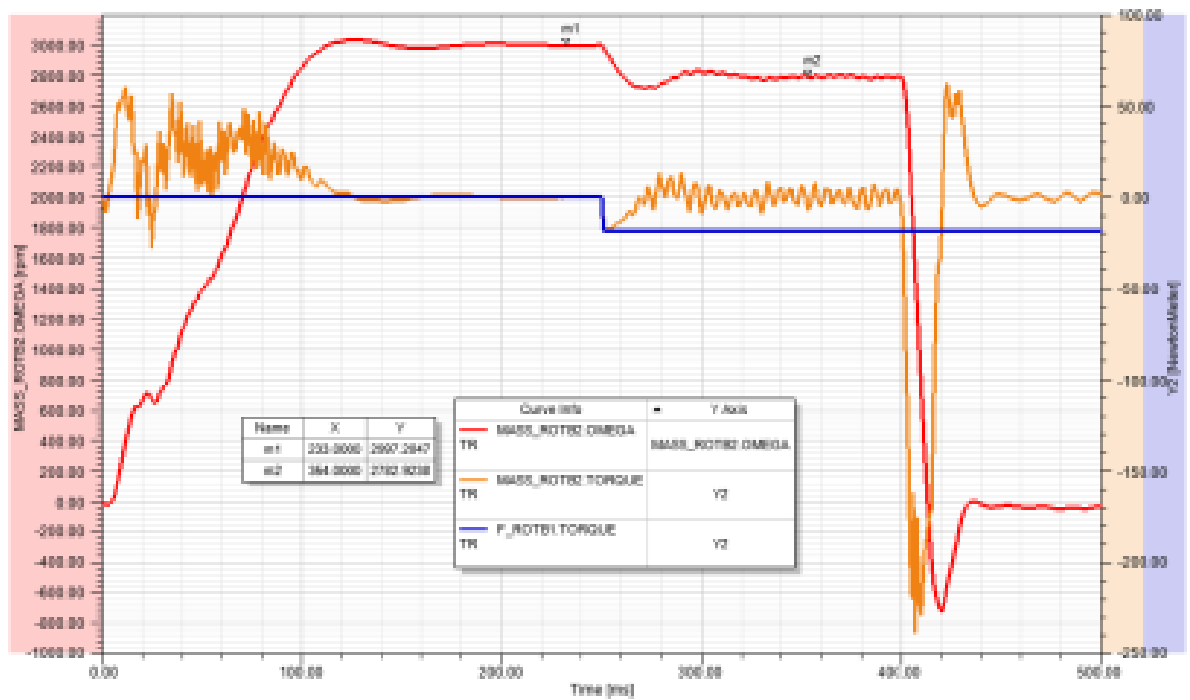


Рисунок 3.4 – Осцилограми перехідних процесів з номінальним навантаженням $\omega, M = f(t)$

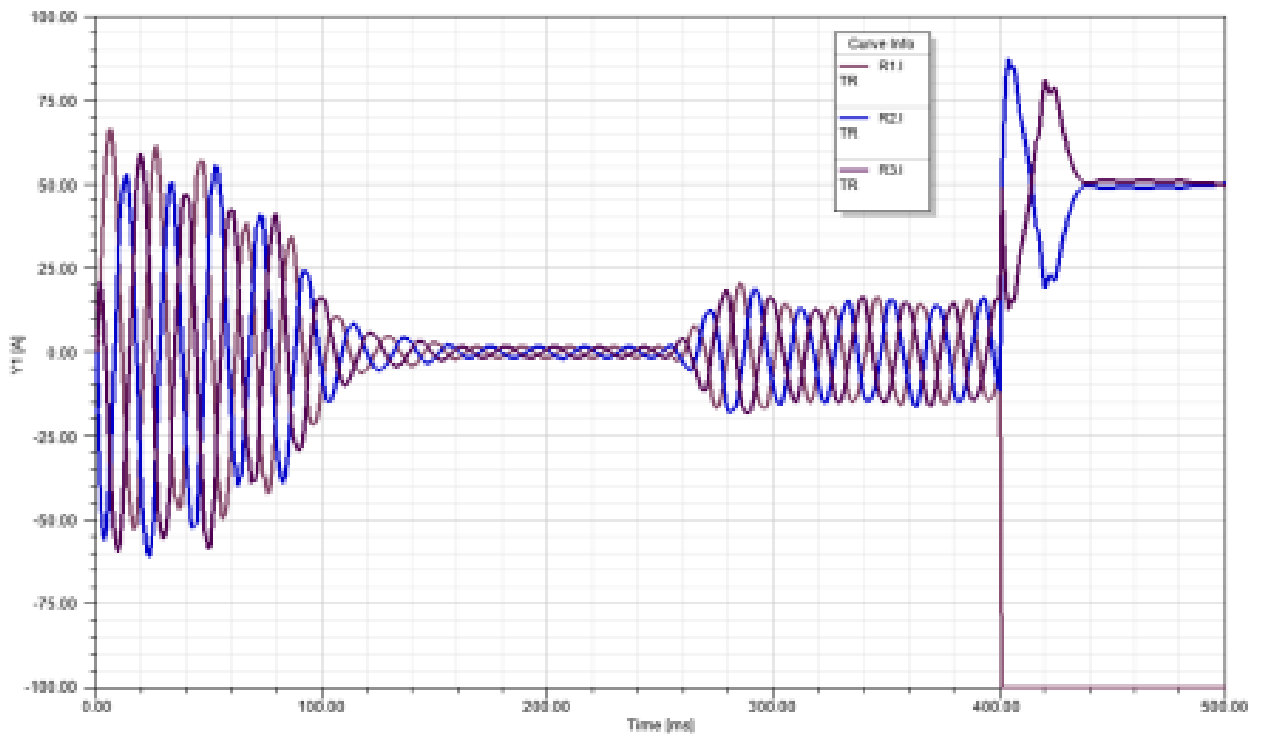


Рисунок 3.5 – Осцилограми перехідних процесів з номінальним навантаженням $I = f(t)$

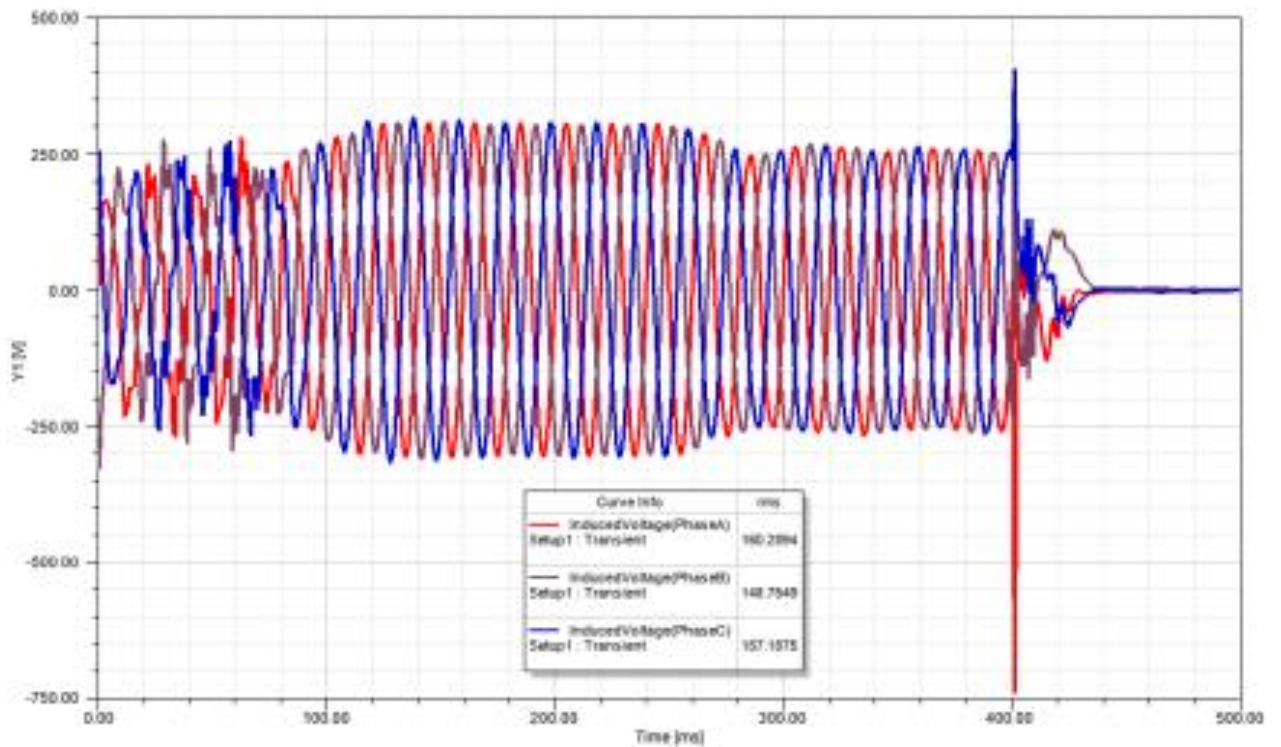


Рисунок 3.6 – Осцилограма напруги, отримана серед Maxwell

Також було отримано картини поля двигуна у трьох характерних точках часу: $t_1 = 0,15$; $t_2 = 0,25$; $t_3 = 0,35$.

3.2 Побудова двовимірних моделей двигуна та аналіз його характеристик

На основі побудованої моделі двигуна в програмному середовищі ANSYS SIMPLORER MAXWELL здійснено аналіз картини поля електромагнітної індукції для трьох характерних точок часу, представленої на рисунку 3.7, поверхневу щільність струмів для трьох характерних точок (рисунок 3.8)

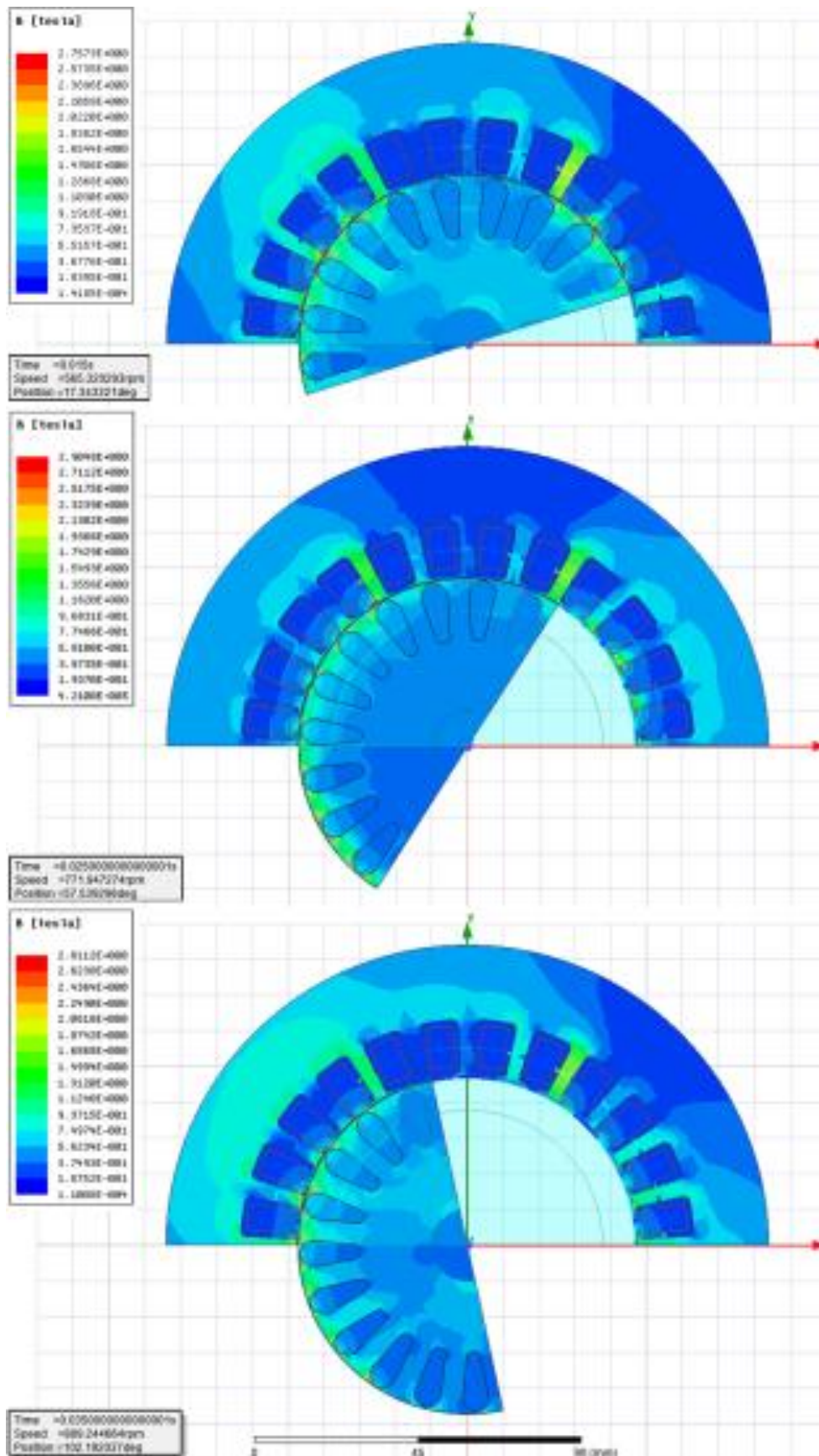


Рисунок 3.7 – Картини поля електромагнітної індукції для трьох характерних точок часу

На рисунках 3.9 і 3.10 представлені сітки розподілу при $t = 0$

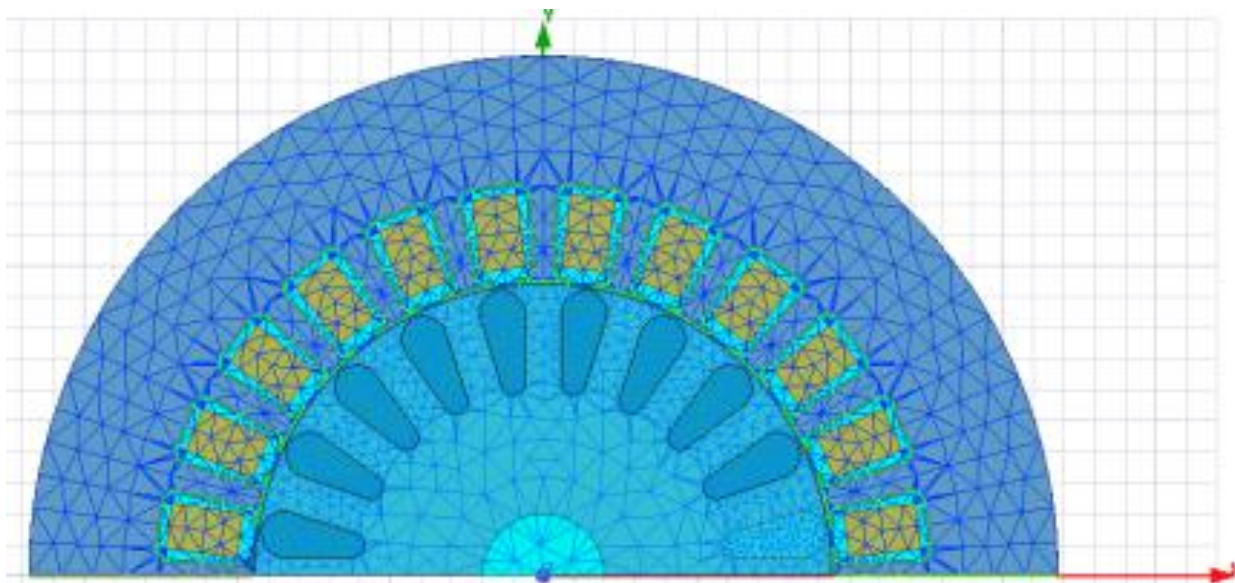


Рисунок 3.9 – Сітка моделі двигуна

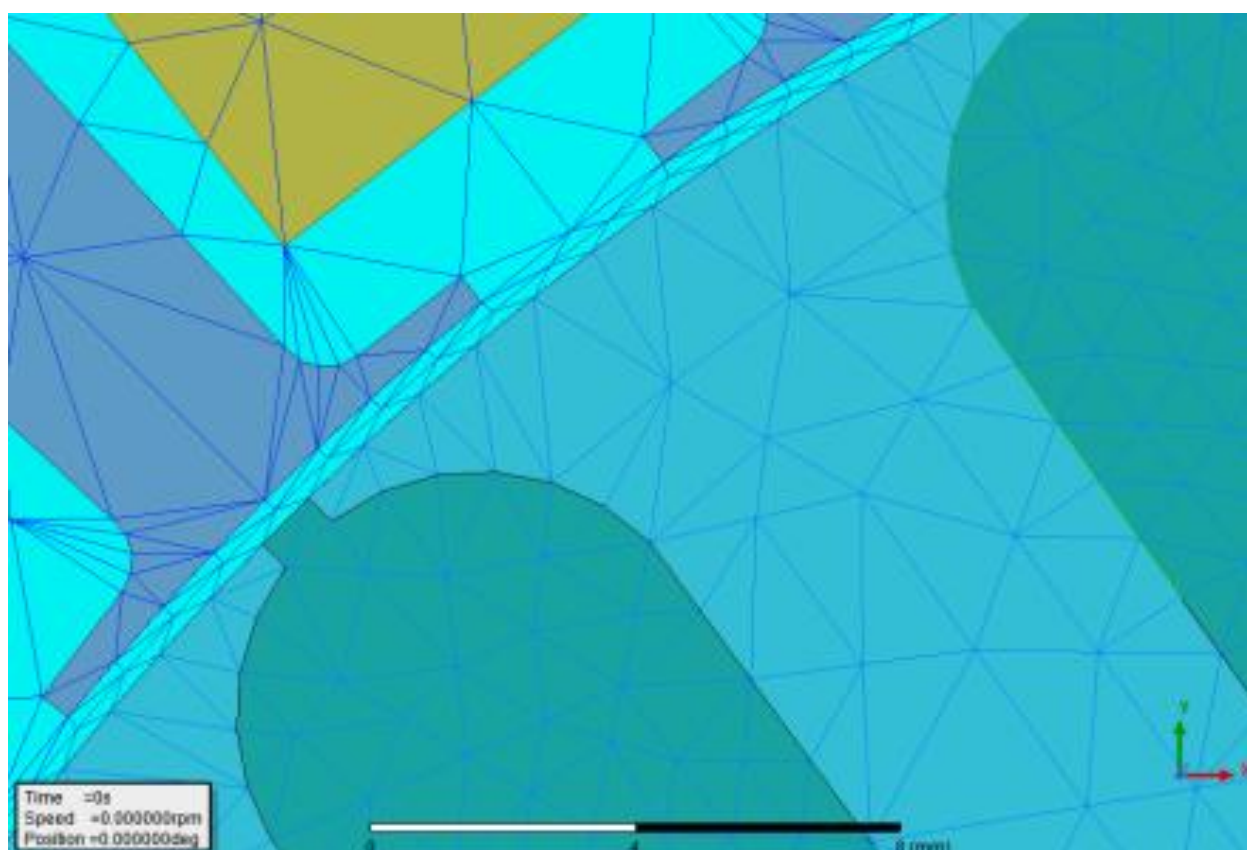


Рисунок 3.10 – Сітка повітряного зазору моделі двигуна у збільшеному масштабі.

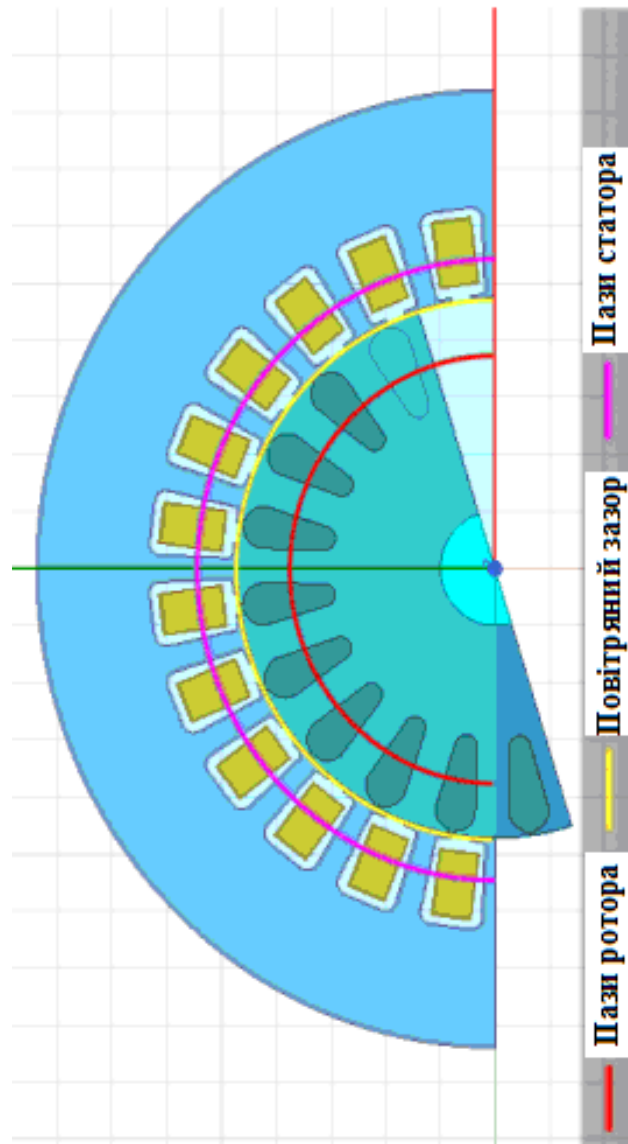


Рисунок 3.11 – Розташування інформаційних ліній

Аналіз електромагнітної індукції повітряному зазорі, поверхневу щільність струмів в пазах статора та спектральних характеристик фазових струмів та моментів

Таким чином, виконано побудову, параметризацію та дослідження математичної моделі трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкнутим ротором у програмному середовищі ANSYS Simplorer Maxwell. Проведено моделювання електромагнітних, механічних і перехідних процесів у двигуні за різних режимів роботи, а також аналіз його характеристик і можливостей діагностики технічного стану.

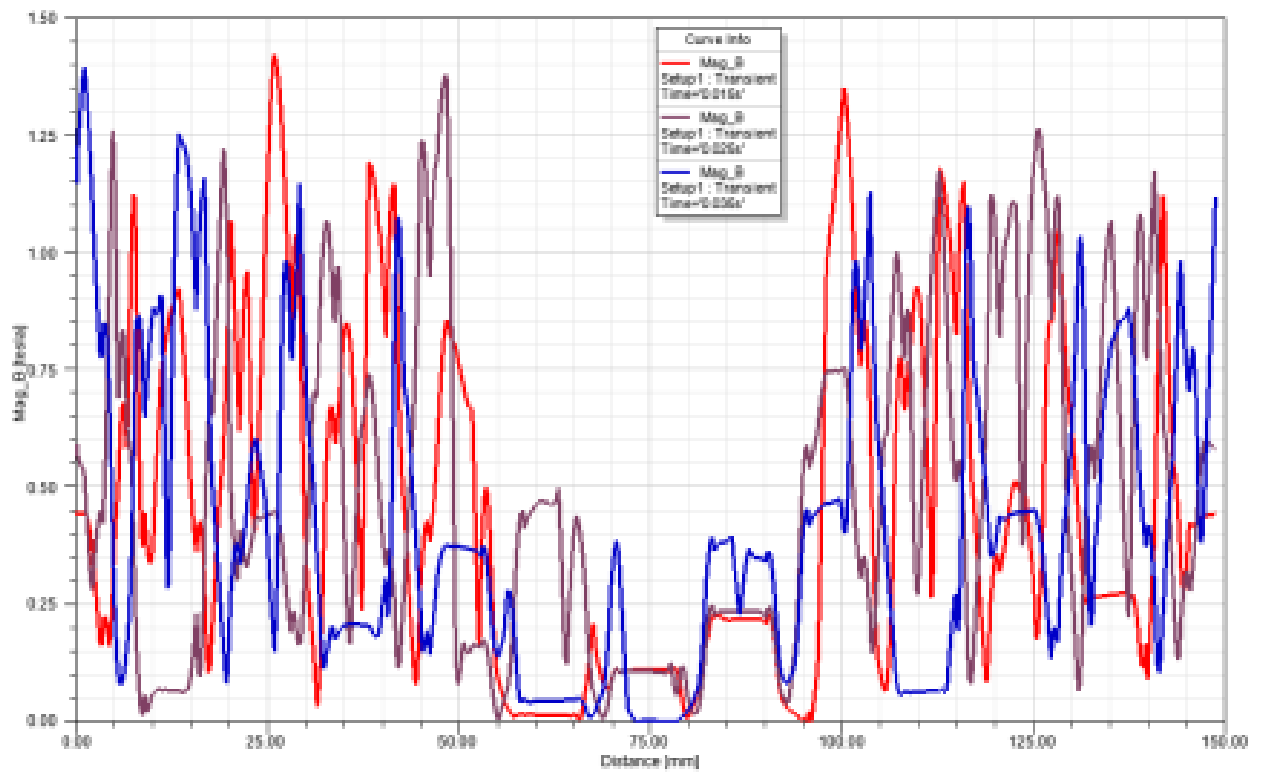


Рисунок 3.12 – Електромагнітна індукція в повітряному зазорі двигуна

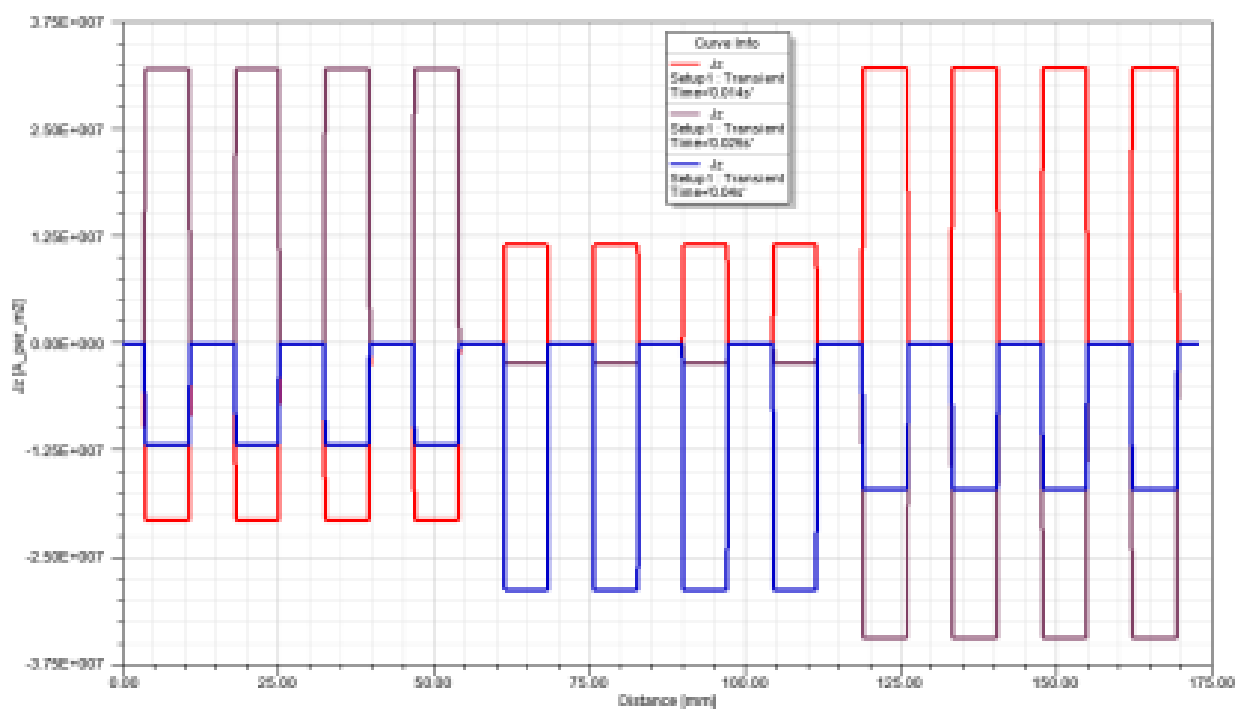


Рисунок 3.13 – Поверхнева щільність струму в пазах статора

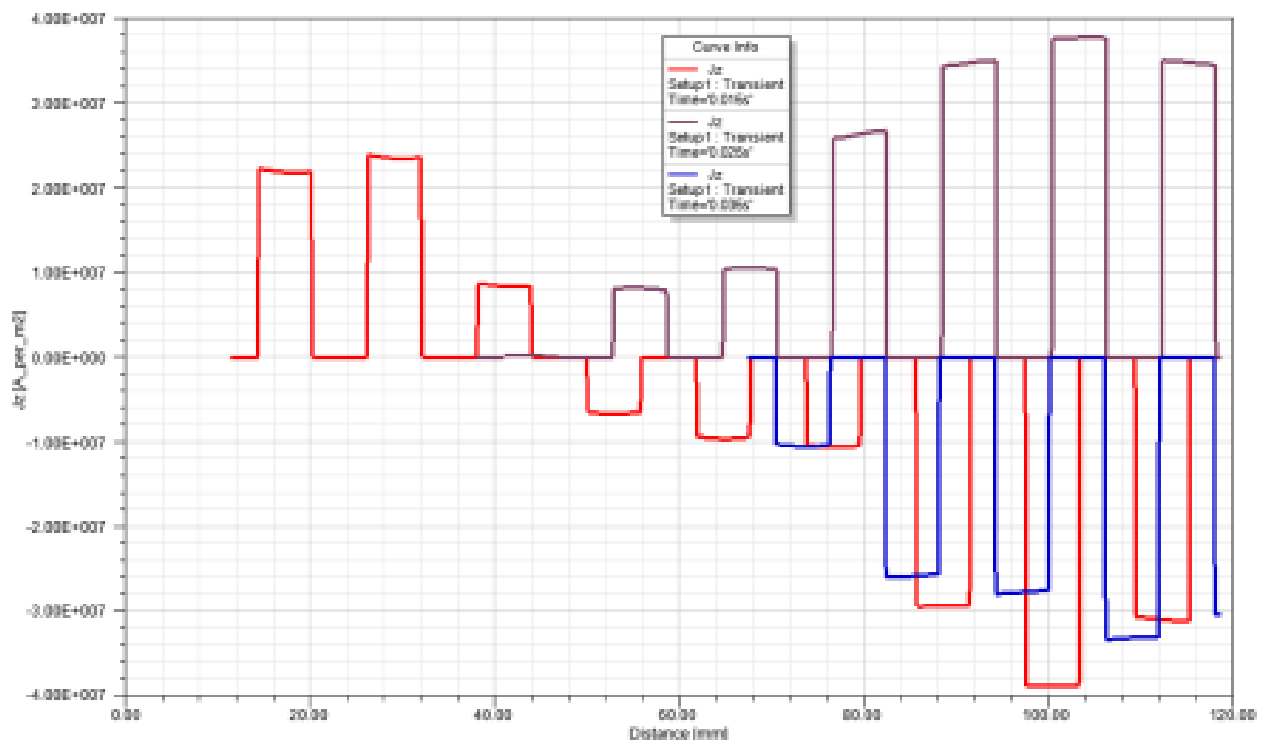


Рисунок 3.14 – Поверхнева щільність струму в пазах ротора.

В подальшому здійснено спектральний аналіз струму і моменту в різних режимах роботи електродвигуна

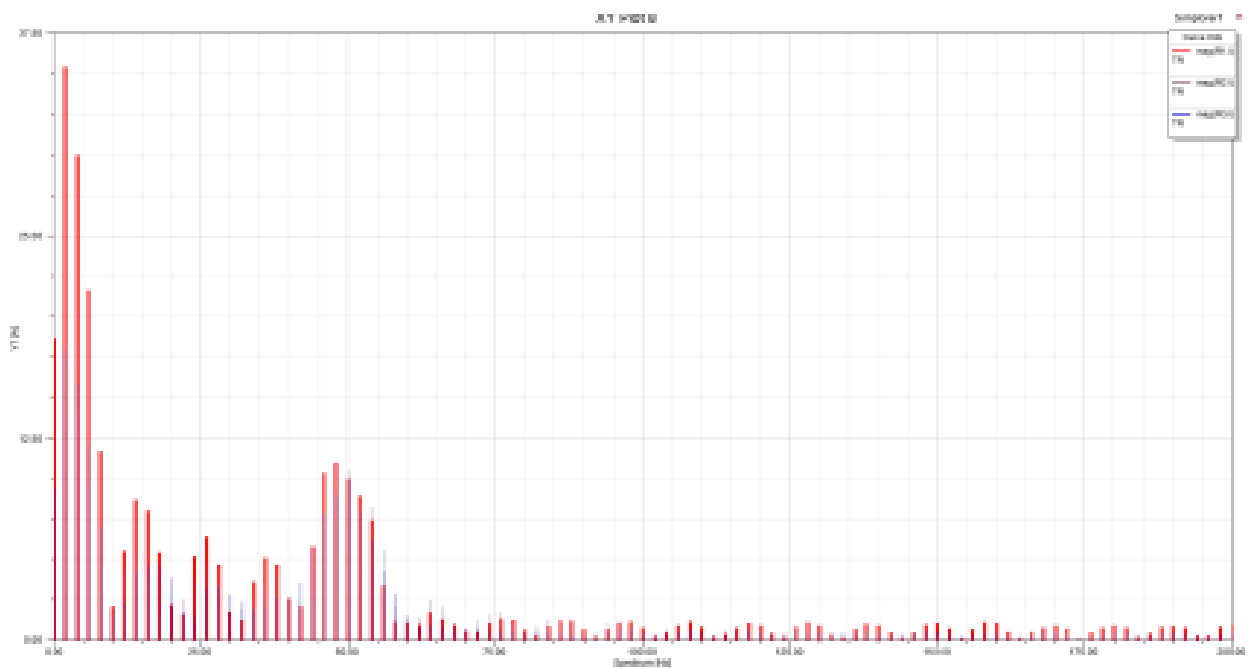


Рисунок 3.15 – Спектральний аналіз струмів в усіх трьох фазах

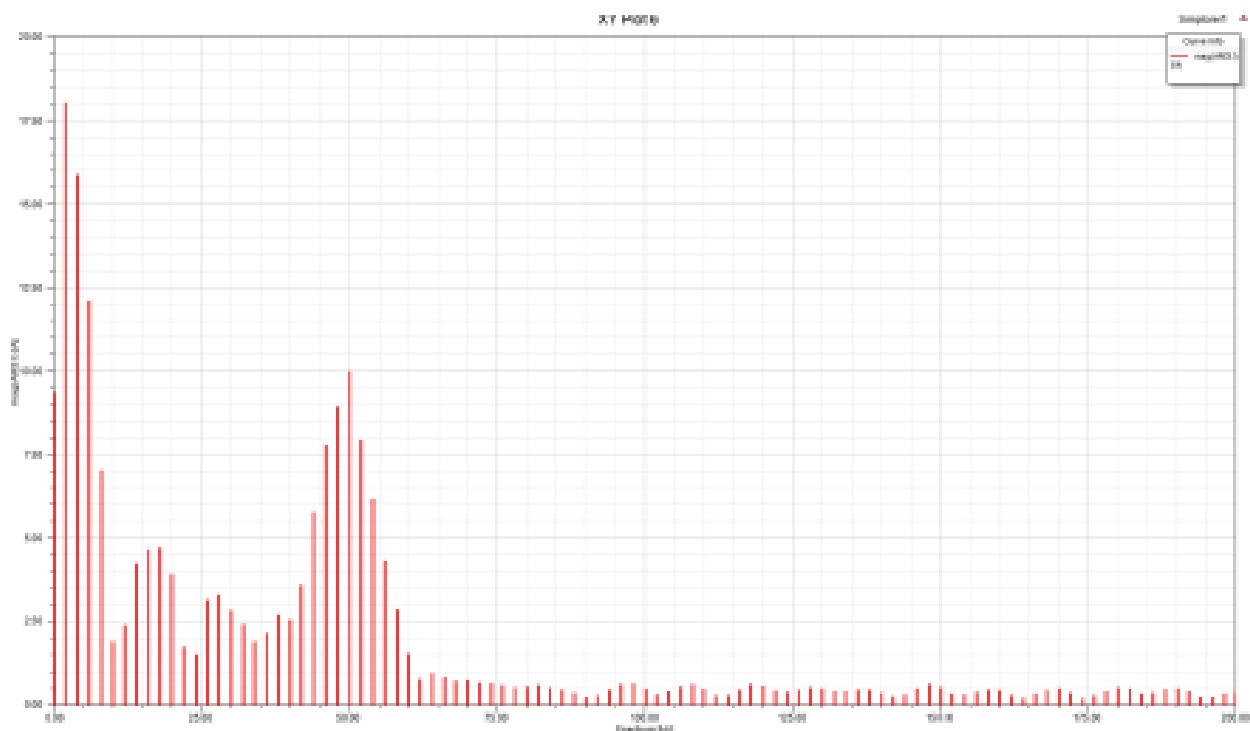


Рисунок 3.16 – Спектральний аналіз струмів в фазі А на холостому ході

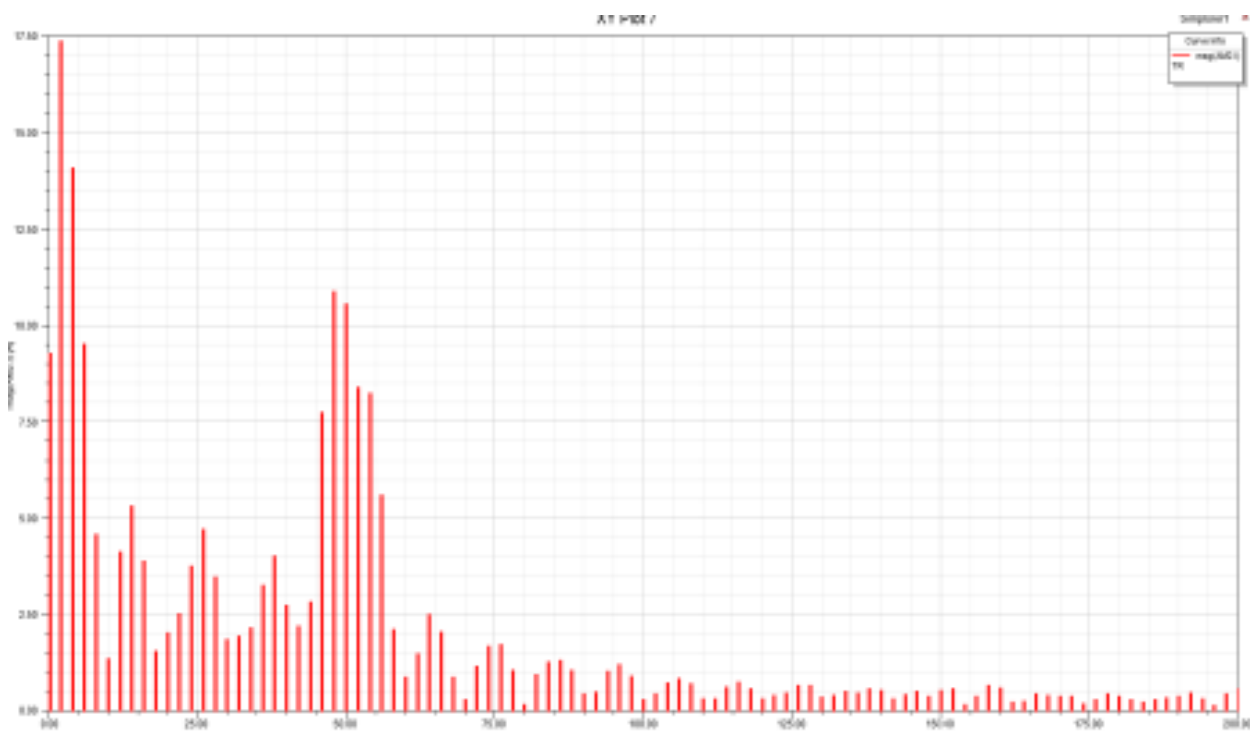


Рисунок 3.17 – Спектральний аналіз струмів в фазі В на холостому ході

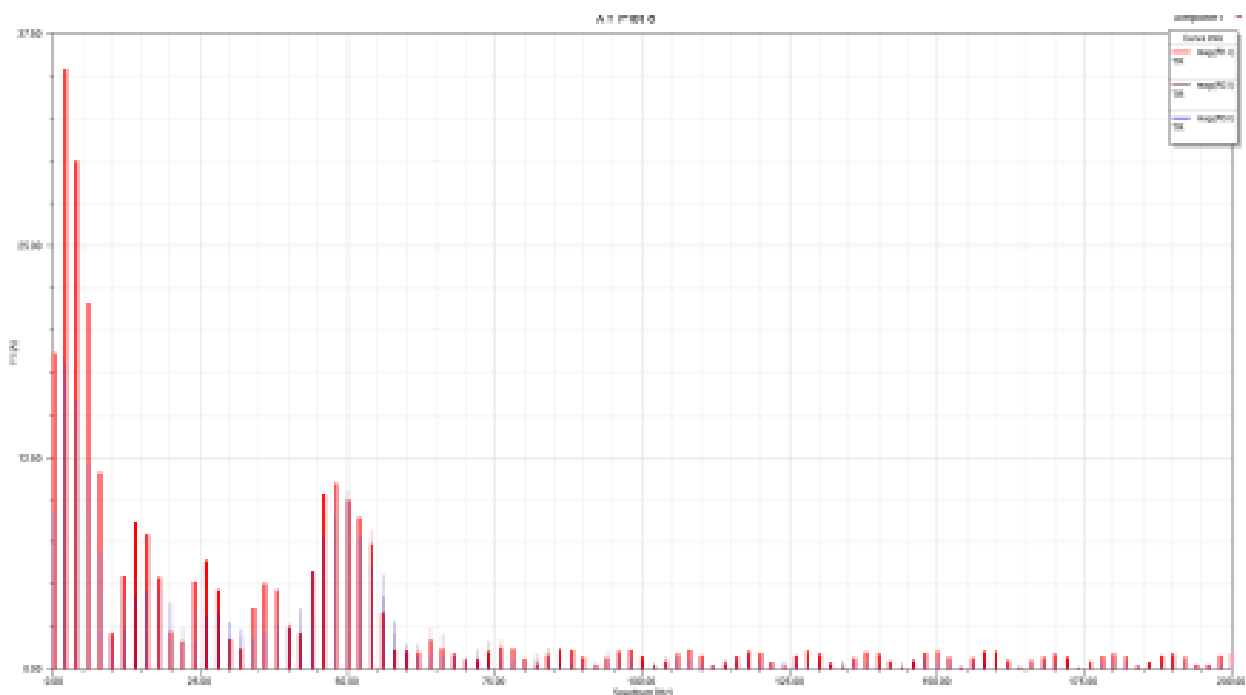


Рисунок 3.18 – Спектральний аналіз струмів в фазі С на холостому ходу

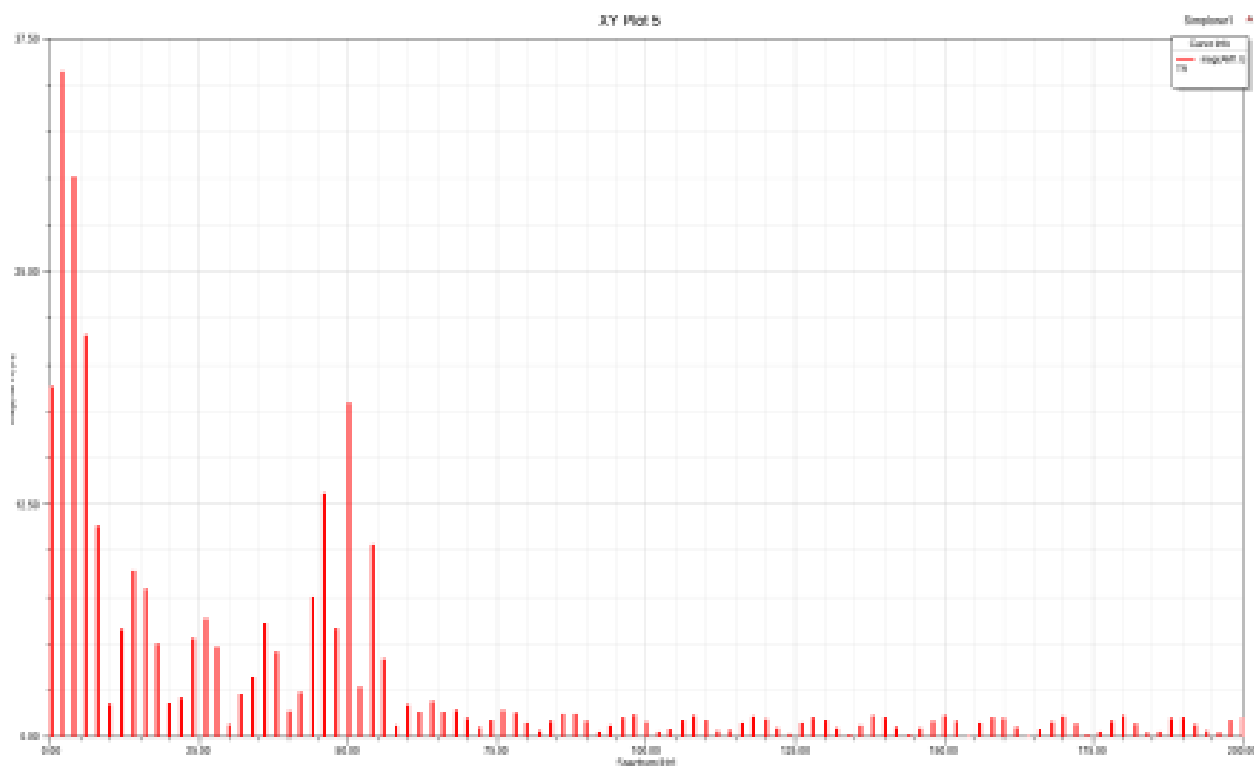


Рисунок 3.19 – Спектральний аналіз струмів в фазі А при навантаженні вищому за номінальне

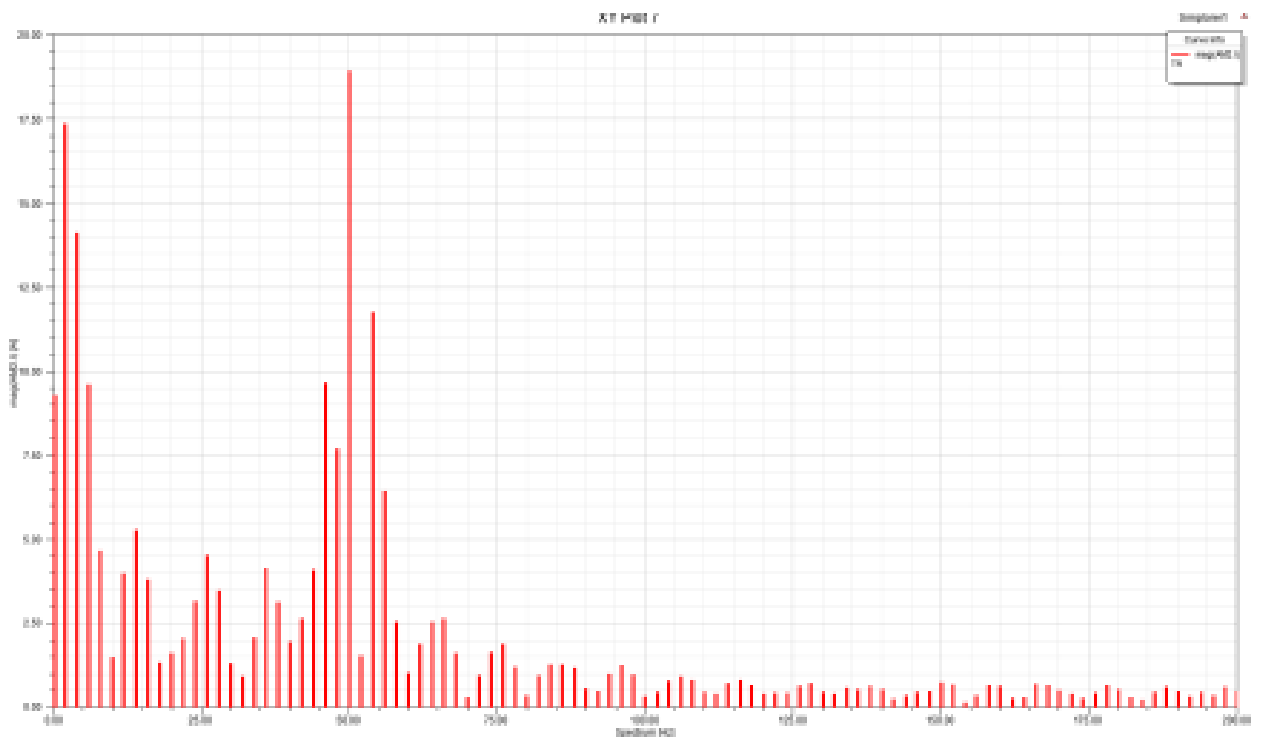


Рисунок 3.20 – Спектральний аналіз струмів в фазі В при навантаженні вищому за номінальне

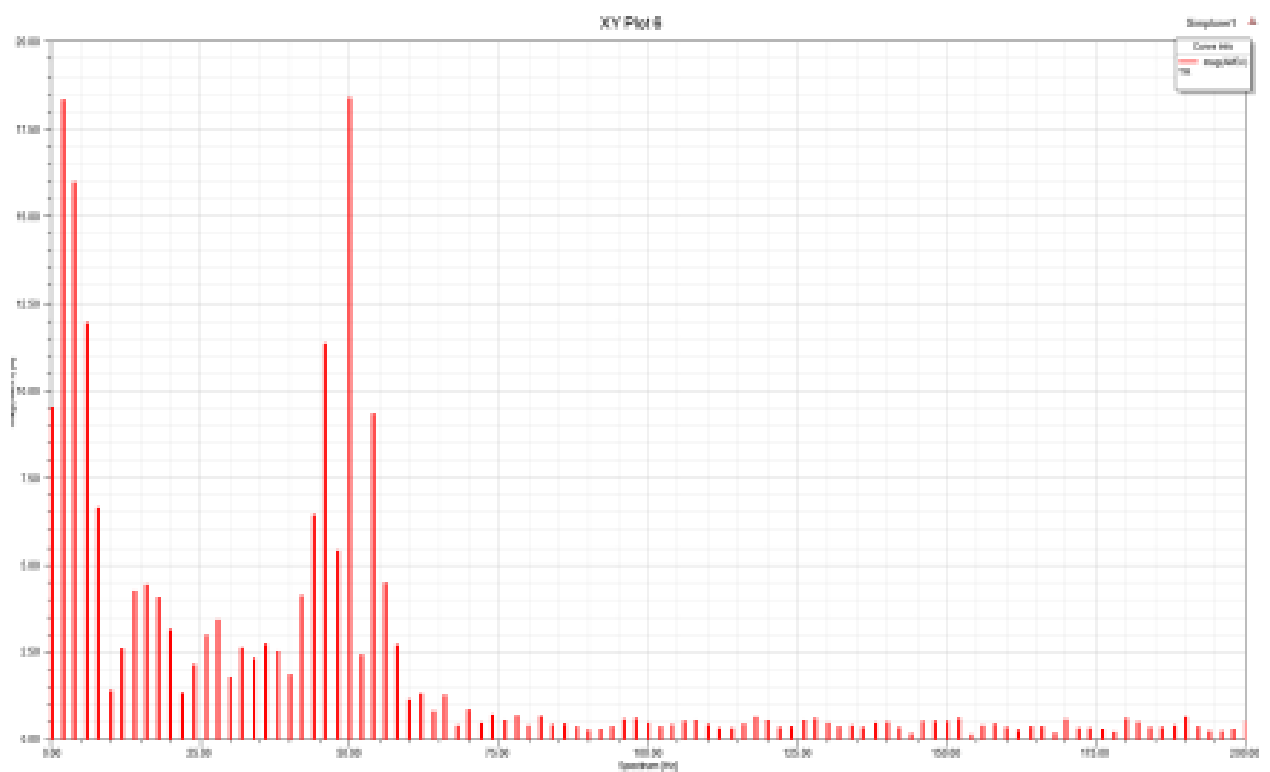


Рисунок 3.21 – Спектральний аналіз струмів в фазі С при навантаженні вищому за номінальне

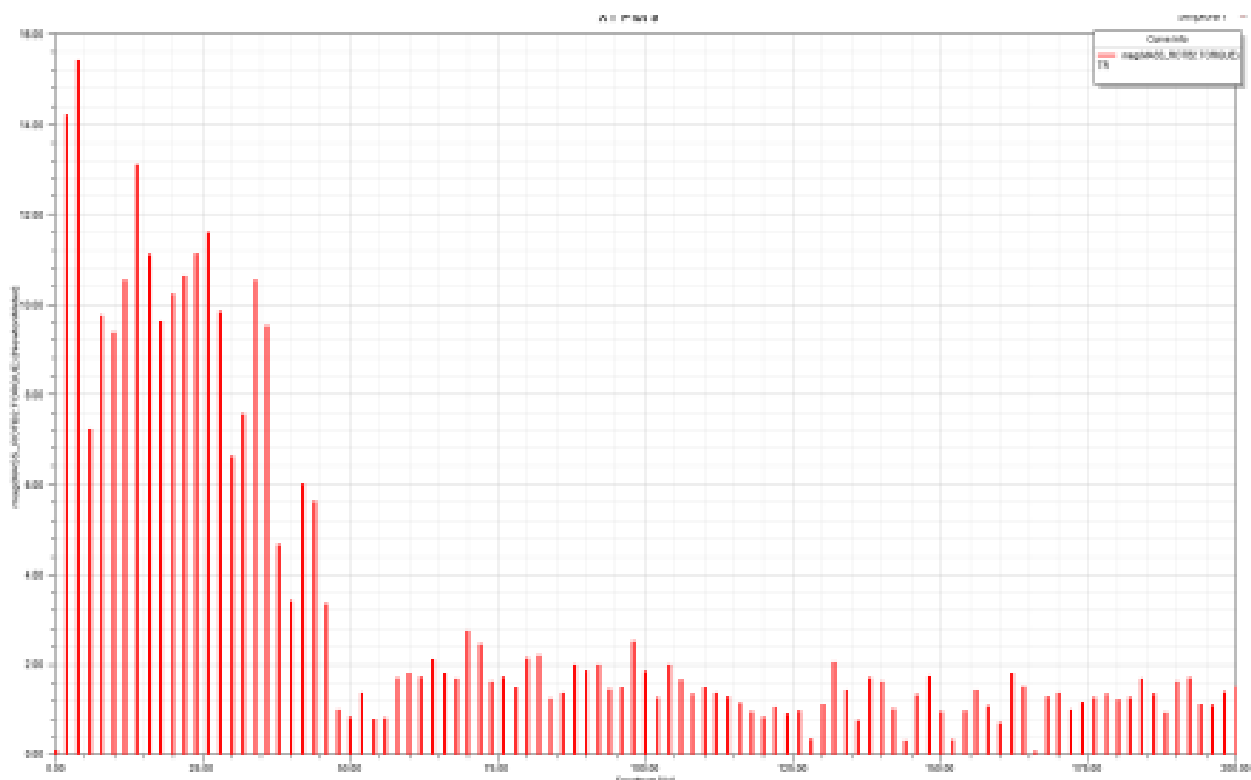


Рисунок 3.22 – Спектральний аналіз моменту електродвигуна на холостому ході.

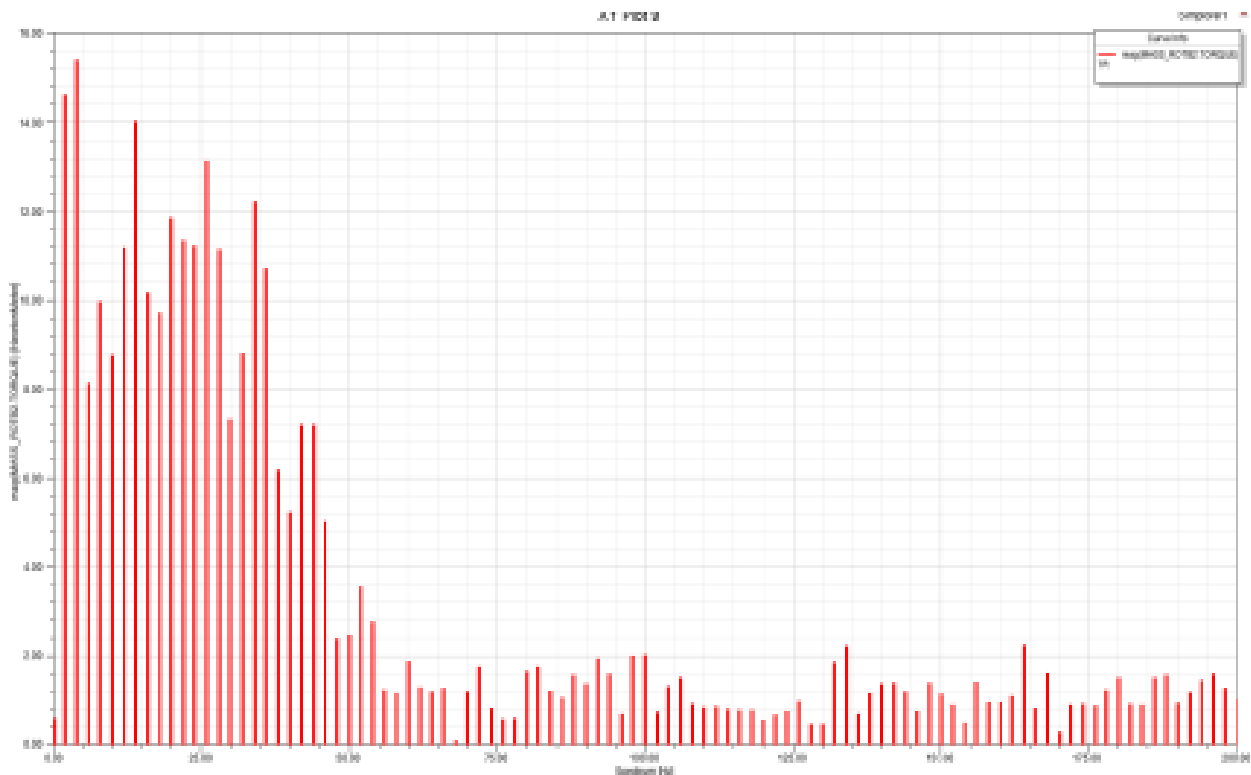


Рисунок 3.23 – Спектральний аналіз моменту електродвигуна при номінальному навантаженні

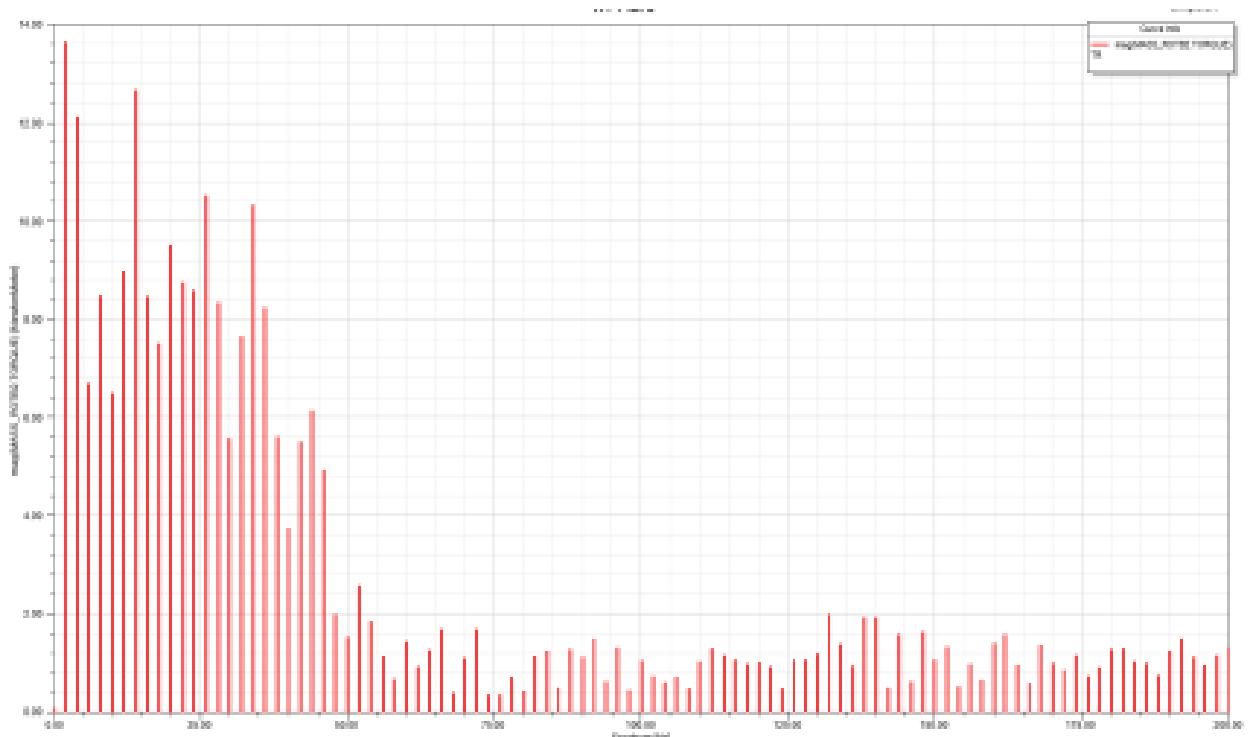


Рисунок 3.24 – Спектральний аналіз моменту електродвигуна при навантаженні вище номінального

Спочатку розроблено інтегровану модель електродвигуна з можливістю регулювання швидкості та моменту. Модель забезпечує взаємодію між електричною та механічною підсистемами, що дозволяє відтворити реальні умови експлуатації електромеханічного комплексу. Живлення двигуна здійснюється від ідеального трифазного джерела напруги, параметри якого задаються сигналом завдання швидкості. За допомогою математичних операторів реалізовано перетворення частоти та амплітуди сигналів у відповідності до режимів роботи системи. Для дослідження динамічних процесів передбачено режим гальмування, який реалізується через комутаційні елементи, керовані компаратором.

У моделі враховано активні опори обмоток ротора, опори ланцюга живлення, а також інерційні характеристики навантаження на валу двигуна. Таблиця параметрів елементів моделі (табл. 3.1) містить усі основні технічні дані, що відповідають реальному прототипу електродвигуна. В результаті

моделювання отримано осцилограми перехідних процесів для різних режимів роботи: холостого ходу, номінального навантаження та перевантаження. Аналіз осцилограм підтвердив адекватність побудованої моделі та відповідність отриманих результатів фізичним процесам у реальному електродвигуні.

Подальше моделювання здійснено у двовимірній постановці, що дало змогу дослідити розподіл електромагнітного поля, поверхневу щільність струмів і структуру сітки розрахункової області у повітряному зазорі. Візуалізація картин поля в трьох характерних моментах часу ($t_1 = 0,15\text{с}$, $t_2 = 0,25\text{с}$; $t_3 = 0,35\text{с}$;) дала можливість виявити закономірності зміни магнітної індукції та її вплив на формування крутного моменту. Аналіз розрахункової сітки підтвердив правильність дискретизації геометрії об'єкта та достатню точність чисельних обчислень.

Також приділено увагу аналізу електромагнітної індукції у повітряному зазорі та поверхневої щільності струмів у пазах статора і ротора, які є визначальними показниками при діагностиці технічного стану машини. Отримані графічні залежності дали змогу оцінити рівномірність розподілу електромагнітних величин, виявити зони підвищених втрат та локальних перенавантажень.

У завершення виконано спектральний аналіз фазних струмів та електромагнітного моменту двигуна за різних режимів роботи: холостого ходу, номінального навантаження та перевантаження. Отримані спектральні діаграми дозволили оцінити гармонійний склад струмів, виявити паразитні складові та частотні компоненти, які можуть свідчити про наявність дефектів або несиметрії магнітного поля. Проведений аналіз підтвердив можливість використання спектральних характеристик як інформативних ознак для побудови системи автоматизованої діагностики асинхронних двигунів.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що побудована модель у середовищі ANSYS Simplorer Maxwell є достовірною та придатною

для дослідження електромагнітних і механічних процесів у трифазному асинхронному електродвигуні. Вона дозволяє комплексно аналізувати робочі режими машини, прогнозувати її поведінку при зміні навантаження, а також виявляти відхилення у роботі за спектральними та часовими характеристиками.

Таким чином, підтверджується ефективність застосування програмного комплексу ANSYS Simplorer Maxwell як сучасного інструменту для моделювання, аналізу та діагностики асинхронних електродвигунів. Розроблена модель може бути використана для вдосконалення алгоритмів керування електроприводами, розробки систем моніторингу технічного стану та підвищення енергоефективності електромеханічних систем.

3.3 Діагностика несправностей асинхронного електродвигуна на основі спектральних характеристик струмів та напруг.

Поділяють внутрішні та зовнішні причини несправностей двигуна.

Внутрішні дефекти поділяються на механічні (ушкодження підшипників, і т. д.) та електричні (пробою ізоляції, пошкодження магнітного контуру, і т. д.). Зовнішні дефекти можуть бути механічними (поганий монтаж, пульсуючий навантаження, перевантаження), електричні (такі як коливання напруги), на рисунку 4.1 показана ймовірність появи різних дефектів в АТ:

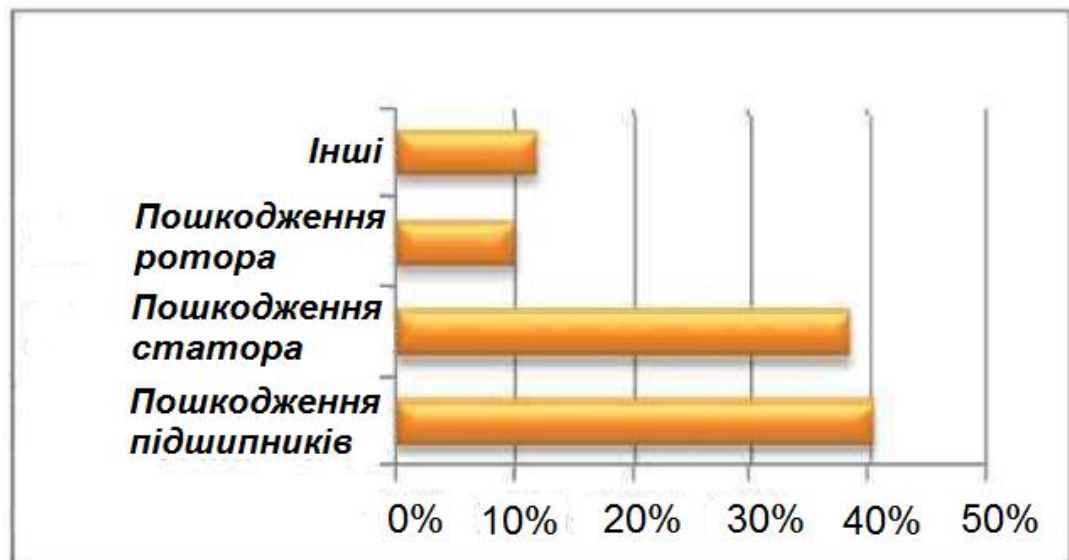


Рисунок 4.1 – Ймовірність несправностей у АТ

Дефекти підшипників можуть бути поділені як розподілені або локальні. Розподілені дефекти включають хвилястість, шорсткість поверхні і елементи кочення без зміни. Локалізовані дефекти включають відскоки, ями та тріщини на поверхні кочення. Ці локалізовані дефекти створюють серію ударних вібрацій у той момент, коли рухливий валик проходить поверхнею дефекту, період та амплітуда якого знаходяться за положенням, швидкістю та наявного дефекту. Несправними підшипниками генеруються механічні коливання (вібрації). Ці збурення визначаються швидкості обертання

кожного елемента. Габарити підшипника та швидкість обертання двигуна потрібні для визначення відповідних частот, пов'язаних з інтервалами кочення, а також кулями або роликами. Стан підшипник знаходиться шляхом аналізу цих частот. Ця проблема вирішується за допомогою методів механічного вібраційного аналізу.

Дефекти в обмотці статора, такі як коротке міжвиткове замикання, обрив ланцюга, міжфазне замикання і замикання фази із землею, є одними з найчастіших і отже – руйнівних несправностей. Якщо вони не ідентифіковані, тоді це може бути причиною глобальної поломки двигуна, і як наслідок, повного виходу його з ладу. Дефекти ротора можуть бути викликані електричними несправностями, такими як обрив стрижня або механічні збої, такі як неспіввісність ротора. Перший дефект виникає через термічні дії, гарячі точки або перенапруги під час перехідних процесів, таких операцій як пуск, особливо в великогабаритних машинах. Обламаний стрижень ротора значно змінює момент і стає небезпечним для електричного двигуна. Другий вид дефекту ротора безпосередньо пов'язаний із нерівномірністю повітряного зазору. Ця проблема є загальним дефектом, пов'язаним із рядом механічних несправностей у машинах змінного струму, таких як дисбаланс навантаження або неспіввісність валу.

Неспіввісність валу означає горизонтальне, вертикальне або радіальне зміщення між валом та його зчепленням навантаженням. При неспіввісності валу ротор буде зміщений зі свого нормального положення через постійну радіальну силу.

Стандартна система діагностики, представлена рисунку 1.2, складається з вузла датчиків, який подає сигнал несправності блок обробки сигналів, який далі відправляє його результат для аналізу експертними системами, де в кінцевому підсумку виявляється відповідна несправність.

Сучасний метод діагностування електричних машин повинен відповідати наступним пунктам, наведеним нижче:

- висока достовірність та точність виявлення дефектів та несправностей електромашини;
- можливість виявлення всіх або більшої частини електричних та механічних дефектів електромашини та пов'язаних з нею пристроїв;
- проведення діагностичних вимірювань віддалено, що необхідно у тих ситуаціях, коли важко звернутися до обладнання безпосередньо;
- мала трудомісткість та простота проведення діагностичних вимірювань;
- можливість проведення обробки отриманих результатів вимірювань за короткий час, із застосуванням програмних засобів.

Ряд джерел виділяють метод аналізу спектрів струму електродвигуна [17-20], [22-25]. Він потрібний для виявлення дефектів ротора, неспіввісності у статорі та нерівномірність повітряного зазору.

Аналіз струму електродвигуна ґрунтується на визначенні струмових гармонік із частотами, які розрізняють кожну групу дефектів. Крім того, цей метод не потребує додаткової установки вимірювальної системи. Поламани роторні стрижні викликають асиметрію ротора, неправильний розподіл струму ротора і, як наслідок, зміни магніторушійної сили ротора (МДС). Поломка роторних стрижнів має відмінну особливість частот, які можуть бути пораховані як:

$$f_{brb} = f_s(1 \pm 2ks), \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

На одиницю ковзання двигуна можна розрахувати, як:

$$s = \frac{f_{slip}}{f_{sync}} = \frac{2f_s / p - f_r}{2f_s / p},$$

де f_s і f_r – частота живлення та частота двигуна відповідно

p – кількість полюсів.

У разі пошкодження стрижня очікуються бічні смуги навколо частоти живлення в спектрі потужності фазного струму. Внаслідок цього бічні гармоніки першого порядку ($k=1$) мають колосальне значення знаходження дефектів несправного стрижня. Ліва бічна смуга $f_s(1-2k_s)$ обумовлюється електричною або магнітною асиметрією ротора, спричинена дефектами роторних стрижнів, тоді як поява правої смуги $f_s(1+2k_s)$ обумовлюється наявністю пульсацією швидкості або вібрацією.

Амплітуди та присутність бічних смуг безпосередньо залежать від положення у просторі несправних стрижнів ротора, швидкості та навантаження. Розташування бічних смуг зміщуватиметься назовні, якщо швидкість і навантаження будуть збільшуватися. Було визначено, що бічні смуги можуть виявлятися, коли електромашина не має дефектних стрижнів ротора. Це викликано тим, що еліптичність ротора та неспіввісність валу можуть певною мірою викликати асиметрію ротора. Але все одно, амплітуди бічних смуг, що вийшли в цих ситуаціях, набагато менші в порівнянні з іншими, які виявляються при дефектних роторних стрижнях. У роботі [22] використовувалися два несправні двигуни, один з одним зламаним стрижнем ротора, інший двигун – з двома зламаними стрижнями. Ротори цих двигунів були просвердлені та використані у випробуваннях для імітації пошкоджень стрижнів ротора, а потім порівнювалися зі справним двигуном.

Рисунок 4.2 і рисунок 4.3 ілюструють два піддослідних ротора з одним і двома пошкодженими стрижнями відповідно. Дефекти були створені свердлінням у стрижнях вздовж їхньої висоти таким чином, щоб отвір наскрізь пронизав стрижень.

На рисунку 4.4 показані спектри струму, справного і пошкодженого електродвигуна при різних навантаженнях. Амплітуди бокових пелюсток справного двигуна рівні -27 дБ (зліва) і -34 дБ (справа), тоді як вони складають -16 дБ (зліва) і -19 дБ (справа) у випадку одного дефектного

стрижня і -13 дБ (зліва) і -14 дБ (справа) у випадку двох дефектних стрижнів.



Рисунок 4.2 – Ротор з одним пошкодженим стрижнем



Рисунок 4.3 – Ротор із двома пошкодженими стрижнями

Різниця амплітуд лівих пелюсток спектральних характеристик у випадку справного ротора і ротора з двома пошкодженими стрижнями дорівнює 14 дБ при 75% від повного навантаження двигуна.

Зрозуміло, що амплітуда бокового діапазону буде збільшуватися по мірі збільшення навантаження і степені серйозності пошкодження при чому цей дефект краще може бути виявлений при більш високих навантаженнях.

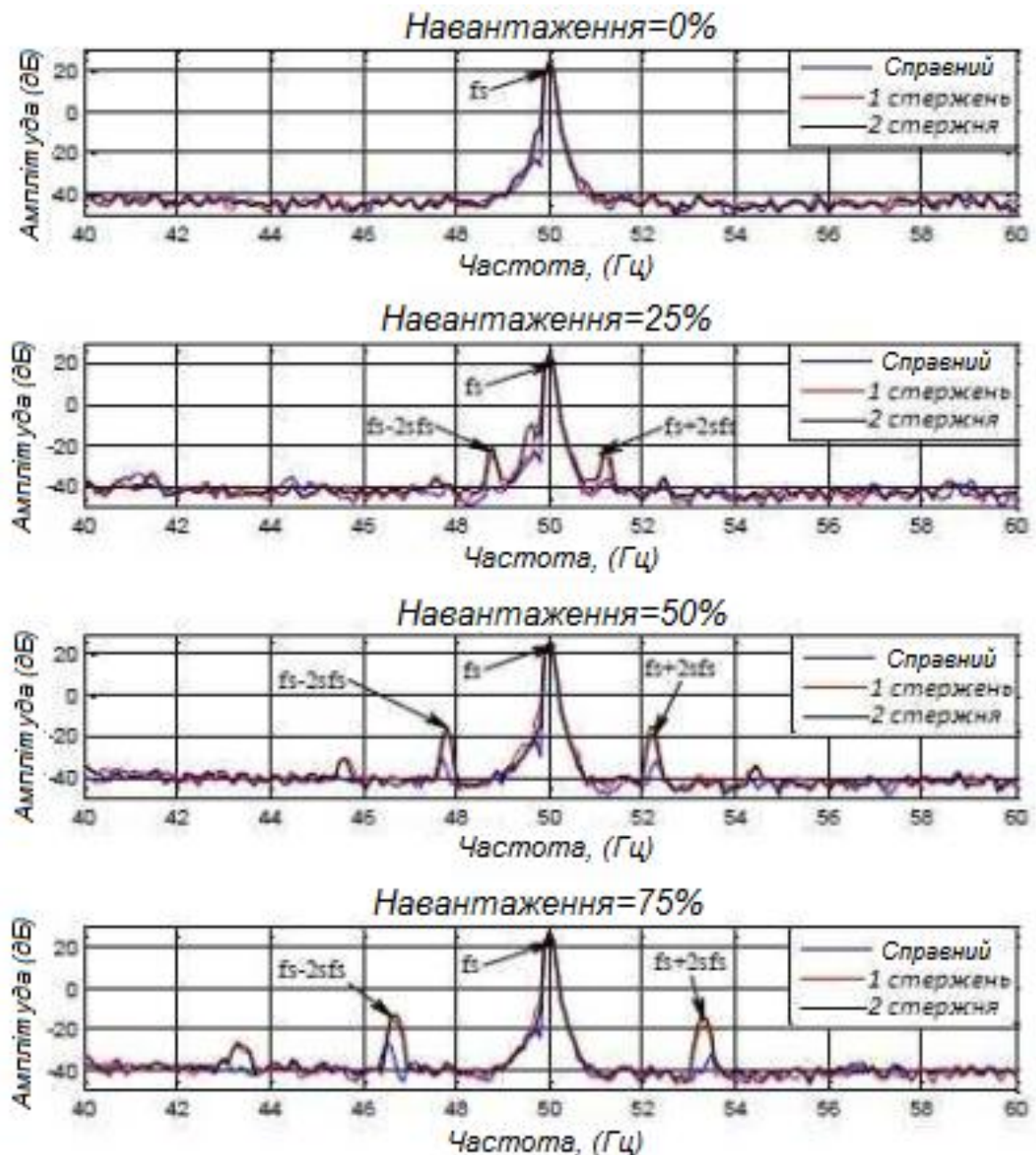


Рисунок 4.4 – Спектри струму асинхронного двигуна при різних навантаженнях

У роботі [7] був проведений схожий на перший експеримент, але з трьома дефектними стрижнями ротора.

Діючим є метод, базується на аналіз вібрації двигуна [22], [23], [24]. Використовуючи спектр вібрації електродвигуна, можна отримати більш точну швидкість та частоту мережі, а також частоти, пов'язані з дефектами. Завжди притаманний дисбаланс маси ротора та неспіввісність валу, що призводить до пікових компонентів у частоті обертання двигуна та до виникнення гармонік у його вібраційному спектрі. Як згадувалося раніше, у разі пошкодження стрижня ротора відбувається коливання швидкості із частотою $2sf_s$. Це коливання діє як частотна модуляція на частоті обертання і двох частотах бічних смуг $(f_r - 2sf_r)$ і $(f_r + 2sf_r)$ ($f_r + 2sfr$), які виявляють f_r у спектрі вібрації. Коли дисбаланс ланцюга ротора збільшується, величина коливання швидкості, і навіть величини частоти бічної лінії теж збільшуються. Отже, величини $(f_r \pm 2sf_r)$ можуть бути добре виміряні у разі виявлення пошкоджень стрижня. У роботі [22] наведено результат проведення цього методу виявлення пошкодженого стрижня з використанням вібрації.

На рисунку 4.5 показаний спектр вібрації електродвигуна за різного навантаження. На рисунку видно відмінності у бічних смугах між справним станом та дефектним стрижнем ротора на обох сторонах спектра вібрації при 75% повного навантаження. При нормальному стані амплітуди бічних смуг першого порядку становлять -59 дБ (ліворуч) та -55 дБ (праворуч).

При одному пошкодженному стрижні ротора амплітуда бічних смуг збільшується до -57 дБ і -54 дБ, різниця становить 4,3 дБ, а у разі двох пошкоджених стрижнів бічні смуги досягають -53,35 та -49,05 дБ.

У роботі [23] за допомогою спектра вібрації було виявлено такі пошкодження у підшипниках двигуна.

У роботах [23], [24] виокремлюються також інтелектуальні методи. До них відносять системи з фази логікою, штучні нейронні мережі, а також фази

нейронні мережі. Нейронна мережа може бути використана, щоб власну асиметрію та негативну частоту виявити, опору.

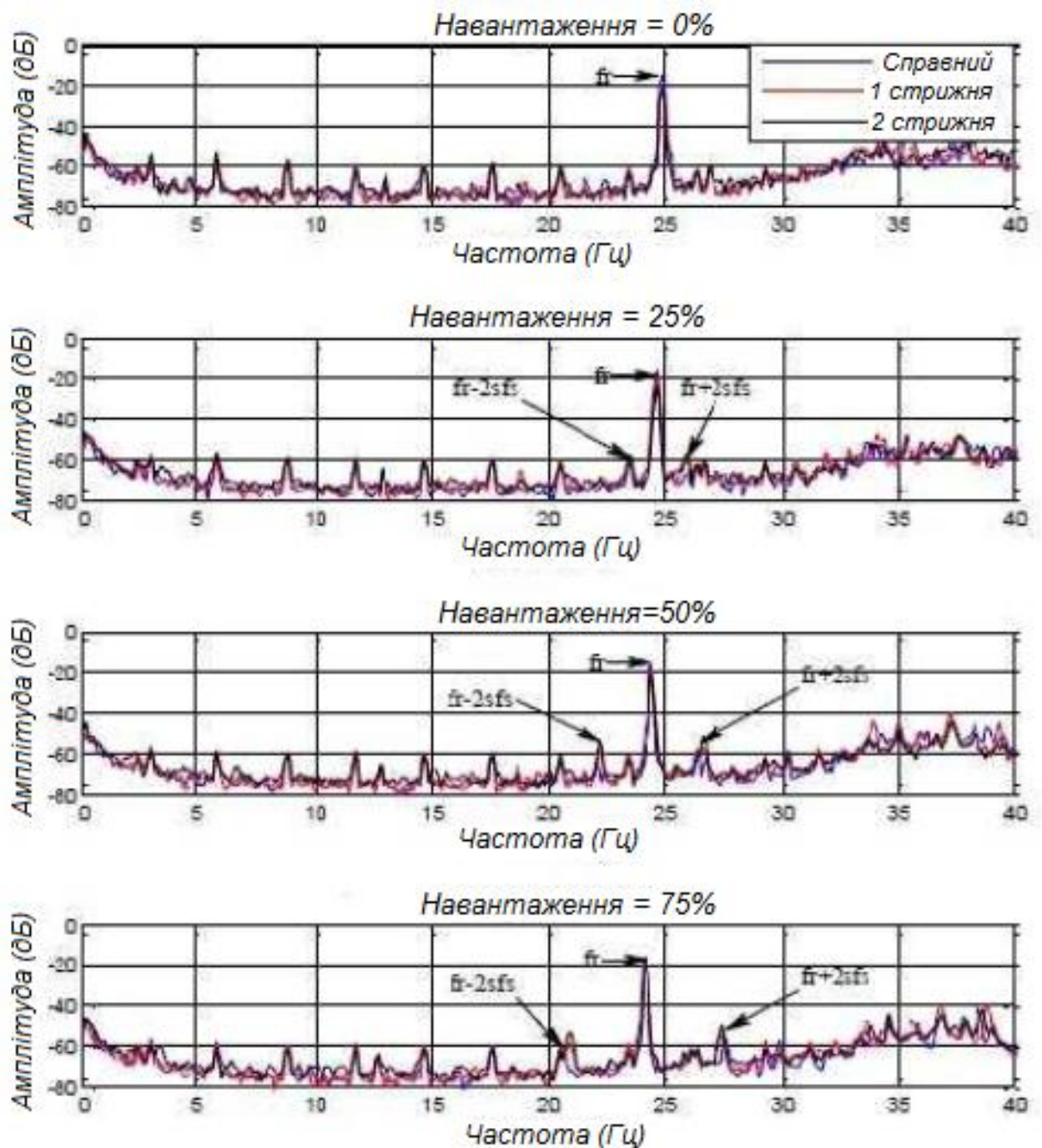


Рисунок 4.5 – Спектри вібрації асинхронного двигуна при різних навантаженнях

На рисунку 4.6 представлено схему нейронних мереж для моніторингу стану асинхронного електродвигуна [23].

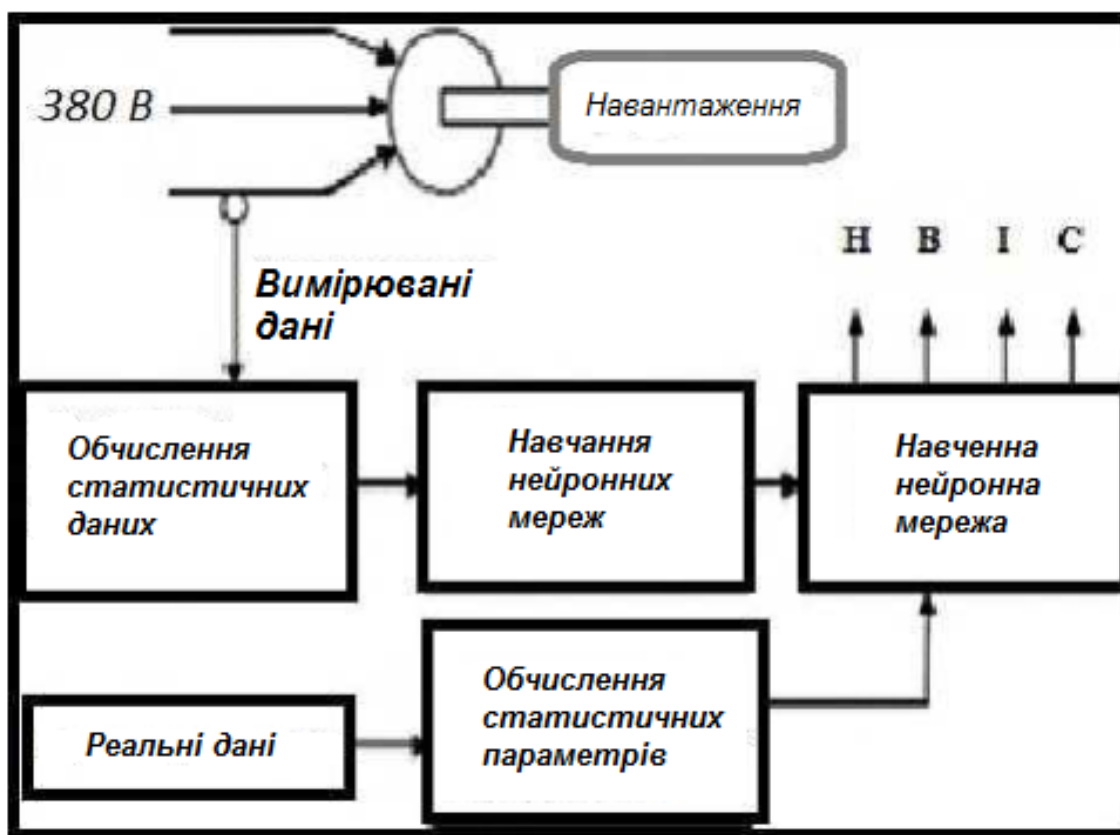


Рисунок 4.6 – Система діагностики АД з нейронною мережею

Робота [24] представляє власний метод виявлення несправностей та діагностики несправності перемикаючого пристрою в асинхронному електродвигуні з інвертором напруги ШІМ. Метод ґрунтується на стандартній моделі аналізу спектральної характеристики струму статора (рисунок 4.6)

Також відомі методи, що базуються на аналізі акустичних коливань, що генеруються працюючим двигуном, методи, що базуються на вимірюванні та аналізі магнітного потоку в зазорі двигуна і зовнішнього магнітного поля, методи, засновані на вимірюванні та аналізі температури окремих частин

електромашини, методи діагностування механічних вузлів (зокрема діагностики стану ізоляції [9].

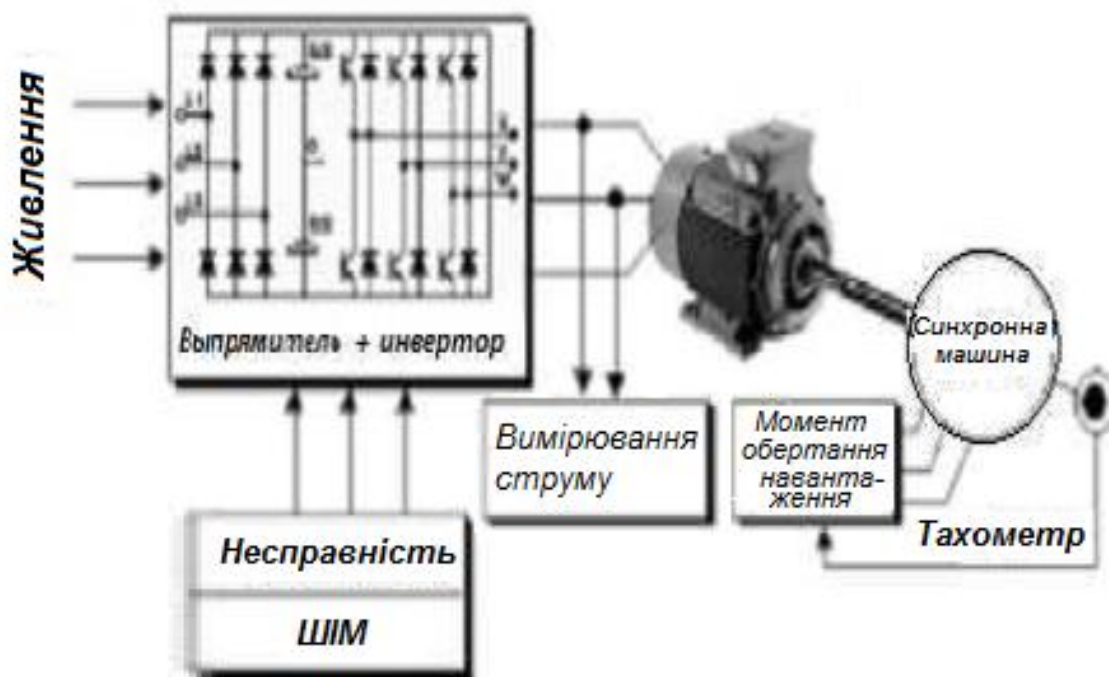


Рисунок 4.7 – Система діагностики АД з інвертором напруги ШІМ

У порівнянні всіх технічних, методологічних та економічних чинників можна дійти висновку, що з практичної реалізації найперспективнішими є методи діагностування асинхронного двигуна, що базуються на аналізі електричних параметрів двигуна, саме спектрів напруг і струмів.

Для встановлення технічних вимог до параметрів пристрою діагностики сигналів струмів і напруг статора АД, було розглянуто та проаналізовано ряд джерел.

Так, у публікації [25] основні дослідження проводилися з такими частотами: спектр струму при невідбалансованому роторі – 120 Гц, вібрація підшипників – 180 Гц, при зносі підшипників – 1000 і 3000 Гц.

У статті [25] говориться, що в загальному випадку при цифровій реєстрації струмів необхідна точність має місце при частотах їх фіксації ($20 \div 30$) разів більше частоти мережі f_1 .

У статтях [22] і [25] для порівняння роботи нового двигуна і двигуна, який відпрацював якийсь час, було обрано діапазон частоти 1 кГц, а конкретні приклади діагностики несправностей двигуна проводилася на меншому діапазоні (150 Гц і нижче).

На підставі наведеної вище інформації можна зробити висновок, що частота дискретизації вимірювального каналу повинна знаходитися в межах від 1,5 кГц до 3 кГц.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було здійснено комплексне дослідження процесів діагностики, моделювання та аналізу стану електроприводів змінного струму. Основна мета роботи полягала у розробленні інтегрованої системи моделювання, яка дозволяє підвищити достовірність виявлення несправностей асинхронних двигунів, оптимізувати режими їх роботи та підвищити ефективність технічної експлуатації.

В результаті дослідження проведено аналіз структури частотно-регульованого асинхронного електроприводу (ПЧ–АТ), визначено основні функціональні вузли та принципи взаємодії елементів системи. Побудовано функціональну та логічну схеми електроприводу, на основі яких сформовано таблицю функцій несправностей і граф пошуку відмов згідно з методом пошуку несправностей за варіантом. Такий підхід дозволив створити алгоритм автоматизованої діагностики, здатний визначати тип і місце несправності з мінімальними часовими витратами.

У ході експериментальних досліджень системи забезпечено роботу електроприводу в різних режимах навантаження – холостого ходу, номінального та навантаженого. Побудовано природні та штучні механічні характеристики, а також регульовальні характеристики, що відображають зміну швидкості обертання двигуна залежно від частоти живлення. Отримано осцилограми перехідних процесів швидкості та моменту, що дозволило проаналізувати динаміку електроприводу під час зміни режимів роботи. Встановлено, що система забезпечує стабільність параметрів при регулюванні частоти в широкому діапазоні, а перехідні процеси характеризуються малим часом усталення.

Також змодельовано асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором у середовищі ANSYS Maxwell, Simplorer та RMaxprt. На основі

каталожних і розрахункових даних розроблено інтегровану модель, яка поєднує електричну, механічну та магнітну підсистеми. Проведено порівняльний аналіз параметрів двигуна 4A100L2Y3, отриманих з експериментів і моделювання, який показав високу збіжність результатів: похибка не перевищує допустимих значень. Це підтверджує достовірність математичного опису та точність застосованої методики моделювання.

Розроблено модель електроприводу прямого пуску в середовищі Simplorer із використанням інтегрованої моделі двигуна з Maxwell. На основі моделювання отримано осцилограми швидкості та моменту в динаміці при різних режимах роботи. Встановлено, що час розгону двигуна становить 0,25–0,3 с, що відповідає типовим характеристикам для подібних систем. Похибка швидкості при накиданні навантаження не перевищує 40 об/хв, що свідчить про високу точність і адекватність чисельних розрахунків.

Розроблено аналітичну модель електроприводу змінного струму з можливістю регулювання швидкості, яка дозволила оцінити вплив різних режимів навантаження на динамічні процеси. У подальшому побудовано інтегровану модель електроприводу з регулюванням швидкості у середовищі ANSYS Maxwell, що дало змогу суттєво покращити точність відображення електромагнітних і механічних процесів. Порівняльний аналіз осцилограм аналітичної та інтегрованої моделей показав значне зменшення коливань швидкості та моменту, що підвищує стабільність роботи системи при змінних навантаженнях.

Особливу увагу в роботі приділено спектральному аналізу струмів і моменту асинхронного електроприводу. Проведено моделювання електромагнітних процесів у різних режимах роботи двигуна — холостому ході, під навантаженням і при перевантаженні. Застосування спектрального методу діагностики дозволило визначити частотні складові, що відповідають різним видам дефектів, таким як пошкодження стрижнів ротора, порушення симетрії фаз або міжвиткові замикання. Порівняння спектрів показало, що

даний метод забезпечує найвищу точність і чутливість порівняно з іншими існуючими підходами.

Отримані результати свідчать, що спектральний аналіз може бути ефективно використаний як основа для побудови автоматизованої системи діагностики асинхронних електроприводів. Така система здатна виявляти ранні ознаки несправностей, здійснювати прогнозування стану двигуна та запобігати аварійним ситуаціям.

Виконане моделювання у середовищах ANSYS Simplorer та ANSYS Maxwell довело ефективність інтегрованого підходу до аналізу електромеханічних систем. Використання програмного комплексу дозволило отримати тривимірні розподіли електромагнітних полів, щільності струму та магнітної індукції, що надало можливість детально вивчити роботу електроприводу на фізичному рівні.

Таким чином, поставлена в магістерській роботі мета повністю досягнута. У процесі виконання роботи:

- розроблено інтегровану модель частотно-регульованого асинхронного електроприводу;
- створено алгоритм автоматизованої діагностики на основі методу спектрального аналізу струмів;
- досліджено динамічні характеристики електроприводу в різних режимах роботи;
- підтверджено високу достовірність моделювання в середовищі ANSYS;
- доведено ефективність запропонованого методу діагностики для виявлення несправностей на ранніх стадіях.

Запропоновані методики можуть бути використані для вдосконалення систем моніторингу й технічної діагностики асинхронних електроприводів у промислових умовах, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців з електромеханіки, автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Що таке Індустрія 4.0? Все, що вам потрібно знати. Режим доступу: <https://fiberroad.com/uk/resources/new-trends/what-is-industry-4-0/>
2. Industry 4.0. Режим доступу: <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/industry-4>
3. Industry4ukraine. платформа промислових та хайтек секторів. Режим доступу: <https://www.industry4ukraine.net/>
4. Smart Factory. Режим доступу: <https://it-enterprise.com/knowledge-base/technology-innovation/smart-factory>
5. Smart Factory складання і Smart Factory виробництво. Режим доступу: https://www.sew-eurodrive.ua/auto_automatisierung/auto_maxolution_fabrikautomatisierung/auto_industrie_4_0_smart_fabrik/smart_factory_skladannja_smart_factory_virobnitstvo/smart_factory_skladannja_smart_factory_virobnitstvo.html
6. Volume, velocity, and variety: Understanding the three V's of big data. ZDNET. URL: <https://www.zdnet.com/article/volume-velocity-and-varietyunderstanding-the-three-vs-of-big-data/> (дата звернення: 11.12.2022).
7. Gutta S. The 5 v's of big data. Medium. URL: <https://medium.com/analytics-vidhya/the-5-vs-of-big-data-2758bfcc51d> (дата звернення: 11.12.2022).
8. Big data and business analytics / ред. J. Liebowitz. Auerbach Publications, 2016. URL: <https://doi.org/10.1201/b14700>
9. Асинхронний двигун: навіщо потрібен, принцип роботи, конструкція. Режим доступу: https://simat.com.ua/article-asinhronnyj-dvygatel-dlya-chego-nuzhen-pryncyp-raboty-konstrukcyja?srsId=AfmBOoi-z3AjebmjdP_4B5KHIEveiU6HgkU6HgfYfYTWKt-kgybGRYqbw
10. Укрпромотор Режим доступу: <https://ukrprommotor.com.ua/blog/asinhronnij-dvigun-jogo-tipi-printsip-roboti->

zastosuvannya-perevagi-ta-nedoliki?srsId=AfmBOortfw6LOX8-qEcERp-wHlHMA_p-ECVvhSP89knaBY1vvHxuGstv

11. Конспект лекцій з дисципліни «Автоматизовані електромеханічні системи» для студентів напряму 6.050701 – електротехніка та електротехнології / Укладач Ю. Ю. Шрамко Дніпродзержинськ, ДДТУ, 2016. – 86 с.

12/ Синявський О.Ю., Савченко В.В., Бунько В.Я., Рамш В.Ю. Електропривід виробничих машин. – К.: ФОП Ямчинський О.В., 2020. – 444 с. <http://dsp.bati.nubip.edu.ua/xmlui/handle/123456789/92>

13. Мілих В.І., Іваненко В.М. Дослідження асинхронних двигунів: Лабораторний практикум з курсу «Електричні машини» для студентів електротехнічних спеціальностей. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007.– 93 с.<http://web.kpi.kharkov.ua/elmasht/wpcontent/uploads/sites/108/2017/04/Doslidzhennya-asinhronnihdviguniv.Laboratornij-praktikum.Milih-V.I.-Ivanenko-V.M.-2007.pdf>

14. Теорія електропривода. Методичні вказівки до лабораторних робіт /Уклад.: Г.М. Голенков, С.П. Верпівський – К,:КНУБА, 2019. – 54 с
https://org2.knuba.edu.ua/pluginfile.php/62627/mod_resource/content/1/%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D180%80%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D0%B4%28%D0%95%D0%A1%D0%90%29.pdf

15. Венъчжун Ма, Ляньпін Бай. «Принципи та технології енергозбереження асинхрон-них двигунів» - 82 с., 2018 China Machine Press.- [Електронний ресурс].- Режим доступу до ресурсу: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/9781118981047>

16. Сюесон Чжоу, Бао Ян. «Огляд досліджень з енергозберігаючих технологій для асинхронних двигунів» [Електронний ресурс].- 34 с., 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation - Режим доступу <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8484643/authors#authors>

17. Купін А. І., Кузнецов Д. І. Інформаційна технологія для групової

діагностики асинхронних електродвигунів на основі спектральних характеристик та інтелектуальної класифікації. – Кривий Ріг : Видавець ФО-П Чернявський Д. О., 2016. – 200 с.

18. Briz F, Degner MW, Garcia P, Bragado D. Broken rotor bar detection in lined induction machines using complex wavelet analysis of startup transients. IEEE Trans Ind Appl 2008;44(3):760–768.

19. Perisse F, Werynski P, Roger D. A new method for ac machine turn insulation diagnostic based on high frequency resonances. IEEE Trans Dielect Elect Insul 2007;14(5):1308–1315.

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

21. Губаревич О.В., Голубєва С.М. Систематизація дефектів і вибір методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів: Тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг», 10 жовтня 2019 р. / відп. за вип. М. А. Зенкін. – Київ: КНУТД, 2019. – 176 с. С.65-67.

22. Губаревич О.В., Козынько А.С. Природа вібрації і сучасні методи вібродіагностики електричних машин: - Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля, науковий журнал. – Сєверодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2017, №3 (233). с.53-58.

23. Reinhold Sunder, Alexander Kolbasseff (Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, Garching) Zustandsorientierte Instandhaltung von Dampfturbosätzen, Gasturbinenanlagen und Pumpen durch frequenzselektive Verfahren im Online-Einsatz // Symposium zur schwingungsdiagnostischen Überwachung von Kraftwerksturbosätzen, Potsdam, 22 - 24.03. 2006. - P. 30.

24. Tavner, P. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines [Text] / P. Tavner, J. Penman, H. Sedding // The Institution of Engineering and

Technology, London, United Kingdom. – 2008. – 306 p.

25. Thomson, W. T. Current signature analysis for condition monitoring of cage induction motors [Text] / W. T. Thomson, I. Culbert // IEEE. –2017. – 427 p.

26. RMxpert. Manual.pdf <http://scribd.com/doc/129666336/RMxpert-Manual-pdf>