Форма № ДН-8.06.2

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки
(повне найменування інституту, назва факультету)

кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ О.Ю. Колларов
(підпис) (ініціали, прізвище)

"___"_____2021 р.

Дипломна робота

магістра
(освітній ступінь)

на тему Створення системи інтелектуальної діагностики роботи синхронного двигуна

Виконав: студент _2_ курсу, групи ЕЛКзм-19
(шифр групи)

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

Суботін В. Г. _____ _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Керівник Колларов О. Ю., зав. каф. ЕлІн, к.т.н, доц. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент:

_____ _____

_____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Нормоконтроль:

_____ Любименко О. М.
(підпис)

_____
(дата)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

_____
(дата)

Покровськ – 2021 р.

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

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки
Кафедра електричної інженерії
Освітній ступінь: магістр
Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри

_____(Колларов О. Ю.)

« ____» _____2020 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Суботіну Владиславу Геннадійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Створення системи інтелектуальної діагностики роботи синхронного двигуна

керівник роботи Колларов О. Ю., зав. каф. ЕлІн, к.т.н, доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ №

2. Строк подання студентом роботи 05 травня 2021 року

3. Вихідні дані до роботи: Номінальна напруга живлення – 6 кВ, номінальна активна потужність двигуна – 600 кВт, коефіцієнт потужності двигуна – 0,9, частота напруги живлення – 50 Гц, номінальна (синхронна) частота обертання двигуна – 1000 об/хв., розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття – 0,6, коефіцієнт форми поля – 1,25, обмотковий коефіцієнт обмотки статора – 0,95, лінійне навантаження статора – $500 \cdot 10^2$ А/м, максимальне значення індукції у повітряному зазорі при номінальному навантаженні – 0,75 Тл. Інше обрати довільно.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Огляд загальних відомостей про синхронні двигуни.
2. Виявлення, діагностика та прогноз несправностей електричних машин.
3. Розрахунок параметрів роботи синхронного двигуна.
4. Моделювання роботи синхронних двигунів у прикладних програмах.

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

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Біла Н. С.		
Розділи 1, 2	Колларов О. Ю.		
Нормоконтроль	Любименко О. М.		

7. Дата видачі завдання 15 лютого 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд загальних відомостей про синхронні двигуни.	15.02.2021 – 28.02.2021	
2.	Огляд причин виникнення несправностей синхронних машин.	01.03.2021 – 09.03.2021	
3.	Виявлення, діагностика та прогноз несправностей електричних машин.	10.03.2021 – 19.03.2021	
4.	Розрахунок параметрів роботи синхронного двигуна.	20.03.2021 – 31.03.2021	
5.	Огляд принципів інтелектуальної діагностики роботи синхронних двигунів.	01.04.2021 – 09.04.2021	
6.	Моделювання роботи синхронних двигунів у прикладних програмах.	10.04.2021 – 19.04.2021	
7.	Огляд питань охорони праці	20.04.2021 – 30.04.2021	

Студент _____ Суботін В. Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Колларов О. Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Суботін В.Г. Створення системи інтелектуальної діагностики роботи синхронного двигуна / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

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

У першому розділі здійснено огляд загальних відомостей про синхронні двигуни – визначено загальні принципи використання електричних приводів, природні основи створення синхронних машин та конструктивні особливості синхронних машин.

У другому розділі були визначені основні несправності синхронних машин, здійснено огляд причин виникнення несправностей та систем виявлення, діагностики та прогнозування несправностей машин.

У третьому розділі здійснено розрахунок параметрів роботи синхронного двигуна.

У четвертому розділі наведено способи інтелектуальної діагностики синхронних двигунів та виконано моделювання їх роботи у різних програмних середовищах.

Ключові слова: синхронна машина, несправність, діагностика, параметр роботи, моделювання, Mathcad, Matlab, модель

SUMMARY

Subotin V.G. Creating a system for intelligent diagnostics of the synchronous motor / Graduation qualifying work for obtaining an educational level "master" in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Pokrovsk, 2021.

Thesis consists of an introduction, the main part, which includes four sections, conclusions, list of references and appendices.

The first section provides an overview of general information about synchronous motors - identifies the general principles of using electric drives, the natural basis for the creation of synchronous machines and design features of synchronous machines.

The second section identified the main faults of synchronous machines, reviewed the causes of faults and systems for detection, diagnosis and prediction of machine faults.

In the third section the calculation of parameters of operation of the synchronous motor is carried out.

The fourth section presents methods of intelligent diagnostics of synchronous motors and simulates their operation in different software environments.

Keywords: synchronous machine, fault, diagnostics, operation parameter, simulation, Mathcad, Matlab, model

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП 9

1 ОГЛЯД ЗАГАЛЬНИХ ВІДОМОСТЕЙ ПРО СИНХРОННІ ДВИГУНИ 11

1.1 Загальні принципи використання електричних приводів 11

1.2 Природні основи створення синхронних машин 12

1.3 Конструктивні особливості синхронних машин 15

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ НЕСПРАВНОСТЕЙ СИНХРОННИХ МАШИН 26

2.1 Огляд причин виникнення несправностей синхронних машин 26

2.2 Огляд системних відмов електромеханічних систем 30

2.4 Виявлення, діагностика та прогноз несправностей електричних машин 33

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА 35

4 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ДІАГНОСТИКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА 48

4.1 Інтелектуальна діагностика роботи синхронних двигунів 48

4.2 Складання моделі синхронного двигуна у програмному середовищі Mathcad 55

4.3 Складання моделі синхронного двигуна у програмному середовищі Matlab 63

ВИСНОВКИ 66

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 67

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА 72

ДОДАТОК Б. ПРАВИЛА І ВИМОГИ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН 78

ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА 91

ВСТУП

Синхронні машини мають досить високу експлуатаційну надійність та мають широке коло застосування. Але і у таких машин іноді відбуваються відмови, що можуть іноді мати катастрофічний характер. Це твердження є вагомим аргументом на користь актуальності досліджень збоїв у роботі синхронних машин.

Найкращим методом визначення та/або запобігання відмов з одночасним підвищенням надійності роботи синхронних машин є використання систем моніторингу. У якості контрольованих параметрів можуть бути струми і напруги статора, частота обертання ротора, значення крутного моменту, вібрація і температура окремих елементів. Аналіз даних параметрів на основі проведених вимірювань дозволяє виявляти їх відхилення від нормованих значень.

Моніторинг параметрів роботи статорних обмоток вимагає застосування складних та коштовних вимірювальних приладів. На відміну від статора, контроль параметрів робот ротора є більш доступними та простими.

Наявність потужних магнітних полів, що діють у синхронних машинах, можуть бути небезпечними для двигунів у разі виникнення міжвиткових замикань в обмотках через індукування високих значень напруг у місці пошкодження. Зазначене магнітне поле не піддається жорсткому контролю та аналізу, а при виникненні несправності сприяють виникненню струму ушкодження, який викликає перегрів окремих елементів та вихід синхронної машини з ладу.

Найважливішою умовою правильної експлуатації електричних машин є своєчасне проведення планово-попереджувальних ремонтів і періодичних профілактичних випробувань. Система планово-попереджувального ремонту передбачає технічне обслуговування, що

поточний і капітальний ремонти, профілактичні й після ремонтні випробування. При експлуатації й ремонті електричних машин і мереж людина може виявитися в сфері дії електричного поля або безпосереднім зіткненні із проводками, що перебувають під напругою, електричного струму.

Зазначене вимагає застосування безпечних та продуктивних алгоритмів реагування на визначені несправності.

1 ОГЛЯД ЗАГАЛЬНИХ ВІДОМОСТЕЙ ПРО СИНХРОННІ ДВИГУНИ

1.1 Загальні принципи використання електричних приводів

У залежності від технології ведення робіт необхідно облаштовувати свою приводну систему, основною складовою якої є відповідний двигун, що відповідає певному набору бажаних критеріїв [1].

Основними критеріями для вибору двигуна є значення крутного моменту і частоти обертання. Крутний момент – це зазвичай максимальне безперервне значення моменту обертання, що може бути забезпечений на визначеній частоті обертання (номінальній частоті). При цьому визначається необхідність та/або можливість зворотного обертання і здатність працювати у генераторному режимі [1].

У деяких випадках виникає необхідність у постійності значень крутного моменту або постійності частоти обертання, робота у певних граничних межах навантаження та інше. Необхідне значення крутного моменту можуть визначатися певним періодом часу роботи з визначеним значенням навантаження та температурних умов роботи двигуна, що також може бути визначено його конструктивним виконанням.

Важливу роль та обмежуючий фактор є потужність джерела живлення, яка визначає можливості прискорення «розгону» двигуна та ширину діапазону швидкостей. Більш того, знаючи необхідний крутний момент і частоту обертання можна визначити мінімально-необхідну потужність джерела [2].

У деяких високопродуктивних приводах виникає необхідність забезпечення короткочасності максимального значення крутного моменту за умови дотримання номінальної частоти обертання при дотриманні вимог швидкого прискорення та швидкого уповільнення не залежно від напрямку обертання.

Іншими критеріями, що визначають або обмежують вибір того чи іншого типу приводу та засобів керування ними є [3]:

– відношення максимального крутного моменту до номінального крутного моменту,

– низьке значення інерції ротора,

– забезпечення максимального значення ККД,

– співвідношення потужнісно-масо-габаритних параметрів,

– наявність або відсутність пульсацій крутного моменту,

– створювані вібрації та шум,

– можливість роботи у небезпечних середовищах,

– параметри надійності та відмовостійкості,

– здатність до обслуговування,

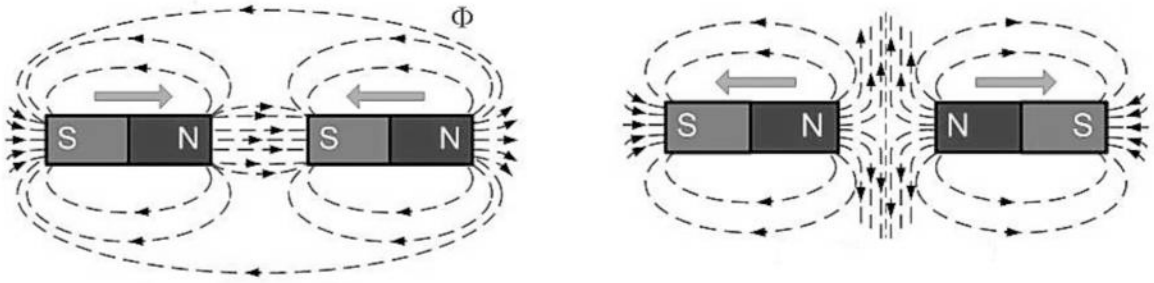
– вартість (початкова, залишкова та обслуговування).

1.2 Природні основи створення синхронних машин

Синхронні машини (електричні двигуни та генератори) відносять до сімейства електричних машин для забезпечення обертального руху, до яких також відносять машини постійного та змінного струму. Загальною рисою даних машин є перетворення електричної енергії у енергію електромагнітну і потім – у енергію механічну та у зворотному напрямку. Принцип роботи засновано на фізичних законах, законах електротехніки та електромеханіки [4].

У основі конструкції синхронних машин є застосування природних та штучних матеріалів, які мають магнітні властивості – тобто здатність притягувати або відштовхувати один одного (магніти, феромагніти та інші).

Ці матеріали викликають появу магнітного поля, яке являє собою фізичне поле, що має свої визначені властивості. Потужність (інтенсивність) та напрямок ліній магнітного поля визначаються накопиченими силами та розташуванням елементів, що його викликають (рис. 1.1) [5].



а) *б)*

Рисунок 1.1 – Напрямок магнітних силових ліній а) між різнойменними полюсами, б) між однойменними полюсами

Природні магнітні матеріали мають найрізноманітніші форми та склад, тому вони досить рідко використовуються у виробництві електричних машин – магнітні матеріали, що використовуються у двигунах, зокрема синхронних – створені (виготовлені) штучно. Останні здатні тривалий час зберігати свої магнітні властивості. Обмеження використання цих штучних елементів може бути викликано їх механічною міцністю та експлуатаційними впливами, особливо у потужних і великогабаритних машинах. У цих випадках, для створення конструкцій, що мають властивості магнітів, і здатні утворювати магнітні поля використовують властивості електричного струму, який при протіканні через провідник здатен утворювати навколо нього магнітне поле (рис. 1.2) [5].

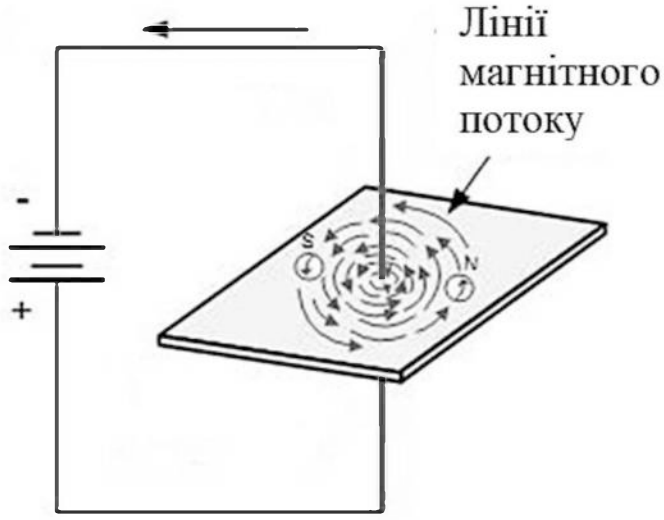


Рисунок 1.2 – Виникнення магнітного поля навколо провідника зі струмом

При укладанні провідника у формі котушки можна отримати більш потужне значення магнітного (рис. 1.3) [5].

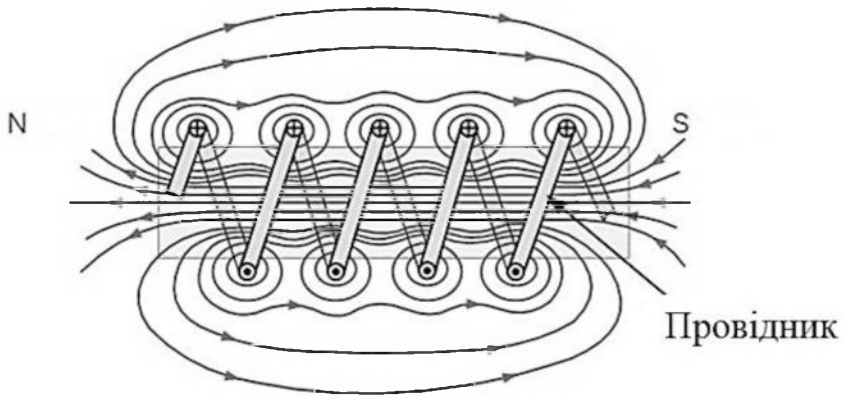


Рисунок 1.3 – Виникнення магнітного поля навколо котушкоподібного провідника зі струмом

Більшість промислових електроенергетичних систем виконано за трифазним принципом, що дозволяє передавати значні потужності за найменших витрат. Для врівноваження трифазних електричних мереж, до них іноді додають «нейтральний» провід, який компенсує струм неврівноваження, що якраз протікає по ньому. У трифазних системах у

залежності від їхньої конфігурації розрізняють фазні та лінійні напруги і струми [6].

Майже всі без винятку генератори джерел енергії мають обмотки, що з'єднано зіркою, що викликається міркуваннями їхнього ефективного захисту та конструктивними особливостями. А от навантаження можуть бути з'єднані будь як – у зручних для даних умов спосіб.

1.3 Конструктивні особливості синхронних машин

Наведені вище передумови для можливості створення синхронних машин базуються на використанні знань про електромагнетизм разом з дотриманням чотирьох основних фізичних законів.

У теперішній час синхронні машини можуть мати різноманітні розміри і форми. З роками синхронні машини збільшувалися у розмірах та потужностях, що пояснюється відношенням номінальної продуктивності машини на одиницю ваги. Розрізняють синхронні машини двох типів: зі стаціонарним магнітним полем та з магнітним полем, що обертається [7].

Синхронна машина зі стаціонарним магнітним полем має нерухомі полюси, що встановлені на статорі, намагнічування полюсів відбувається за допомогою постійних магнітів або за допомогою постійного струму. Якір містить трифазну обмотку, яка живиться через три струмоз'ємники (колектори) та набір ковзаючих по ним щіток [7].

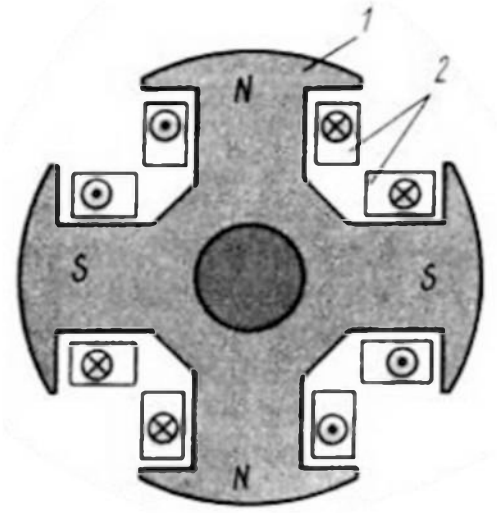
Синхронна машина з магнітним полем, що обертається має обмотку збудження, намотану на ротор (якір). Постійний струм, що створює магнітне поле, примушує ротор обертатися з синхронної швидкістю зовнішнього магнітного поля. Обмотка збудження може живитися через контактні кільця і щітки (так зване, зовнішнє збудження) або від випрямного моста, встановленого на роторі (так зване, самозбудження).

Випрямний міст живиться від встановленої на валу машини змінного струму.

Осердя статора виготовлено з ізольованих сталевих пластин. Товщина шару і тип стали обираються таким чином, щоб мінімізувати втрати на вихрові струми і гістерезис при збереженні необхідної ефективної довжини сердечника і мінімізації витрат. Осердя має нормально відкриті прорізи, у які вміщуються котушки, що є складовими обмоток. Обмотки якоря можуть мати кілька видів виконання (концентричні, колінчаті, розділені, хвилеподібні та інші). Зазвичай виконують двошарову обмотку вхрест [8].

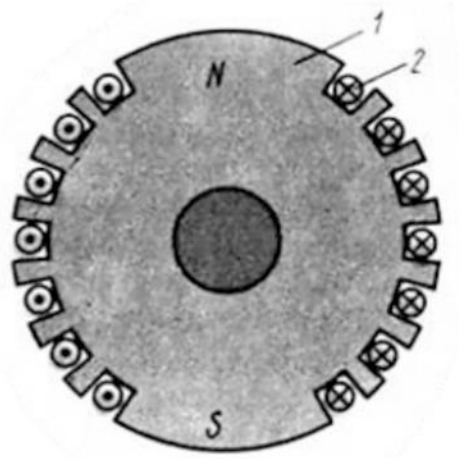
Поле ротора може бути або явнополюсним (рис. 1.4) або неявнополюсним (рис. 1.5) [9].

Неявнополюсні ротори використовуються у дво-, чотири- або шестиполюсних машинах. Переважна більшість явнополюсних машин мають шість або більше полюсів.



1 – осердя ротора, 2 – обмотка збудження

Рисунок 1.4 – Конструкція явнополюсної синхронної машини



1 – осердя ротора, 2 – обмотка збудження

Рисунок 1.5 – Конструкція неявнополюсної синхронної машини

Неявнополюсні ротори зазвичай виготовляються з цільної сталевий поковки, у прорізи якої вміщується обмотка, яка утримується від впливу відцентрових сил за допомогою алюмінієвих або сталевих клинів. Стопорні кільця утримують кінцеву частину обмоток. Потужні явнополюсні синхронні двигуни мають обмотку, розташовану під голівкою полюса. Ці полюса кріпляться на валу за допомогою шпонки. Зазначені машини мають додаткову короткозамкнену обмотку з мідних стрижнів у роторі, замкнутих накоротко з обох кінців. Зазначена обмотка призначена для запуску двигуна у період асинхронного пуску двигуна. Вона також слугує для виключення появи коливань ротора навколо синхронної частоти обертання [10].

Електричні машини призначені для перетворення електричної енергії у механічну і навпаки на основі електромеханічного перетворення. Синхронні машини є одними з найрозповсюдженішими у електроприводах. При цьому розрізняють синхронні машини з постійними магнітами та з окремим живленням ротора від джерела постійного струму. Конструкція синхронної машини залежить від вимог приводу. Важливою особливістю синхронних двигунів є їх здатність зберігати частоту обертання у незалежності від моменту опору [10].

Синхронні двигуни складаються з двох основних частин: статора і ротора. Статор нерухомий містить обмотки по яких протікають змінні струми. Струми створюють магнітне поле, що обертається відносно осі двигуна. Ротор – це частина, що обертається, і якає містить магнітні полюси, представлені або постійними магнітами, або електромагнітами. Протилежні магнітні полюси статора і ротора притягуються один до одного, призводячи до того, що ротор обертається з частотою, яка дорівнює частоті магнітного поля, що обертається з, так званою, синхронної частотою обертання [10].

Обмотки, що створюють магнітне поле, складаються з кількох котушок, на які за допомогою колекторних кілець подають постійний струм. Пропускання високих значень струмів і значної потужності через колекторні кільця і щітки являє серйозну технічну проблему.

Осердя статора складається з тонких пластин електротехнічної сталі, яка має дуже високе значення проникненості магнітного поля. Обмотки якоря розміщуються у пазах статора (рис. 1.6) [11].

Існує два основних типи роторів: неявнополюсні та явнополюсні. Двигуни з явнополюсними роторами зазвичай використовують для низькошвидкісних двигунів. Неявнополюсний ротор має не більше чотирьох полюсів, а явнополюсний ротор має їх значно більше.

Одним з найважливіших компонентів, розташованих на роторі, є демпферна обмотка, що утворена орієнтованими в осьовому напрямку струмопровідними демпферними стрижнями на краю ротора. Стрижні з'єднані на обох кінцях ротора за допомогою кілець. Демпферні обмотки використовуються для протидії магнітному потоку у повітряному зазорі, що викликається різними перехідними процесами (рис. 1.7) [12].

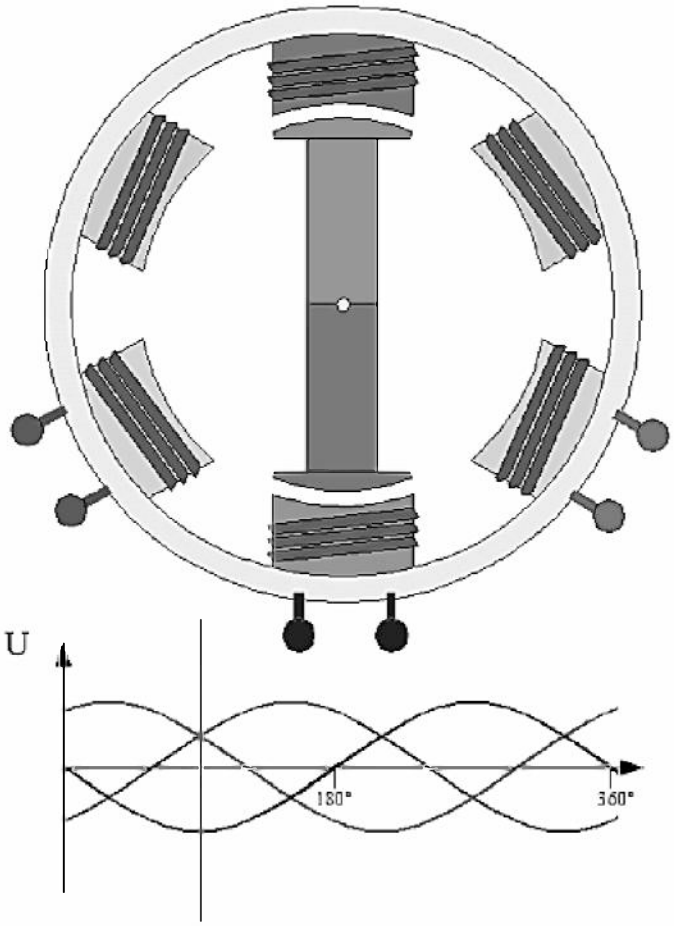
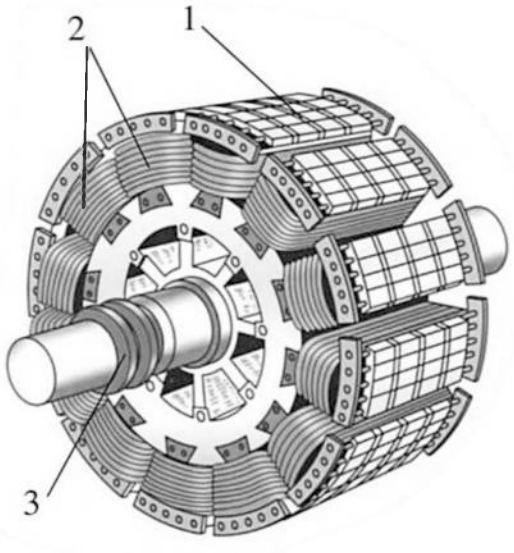


Рисунок 1.6 – Поперечний переріз синхронної машини



1 – демпферна обмотка, 2 – обмотки ротора, 3 – контактні кільця

Рисунок 1.7 – Розташування демпферних обмоток на роторі синхронного двигуна

При перехідних процесах, частота обертання ротора коливається навколо синхронної частоти, а демпферні стрижні створюючи протидіючий момент у разі відхилення частоти обертання від синхронного її значення, призводячи до згасання коливань. При прикладенні до обмоток статора змінної напруги у демпферних стрижнях індукується електрорушійна сила, що викликає появу додаткового крутного моменту, який прискорює обертання ротора [13].

Індуковане в обмотці статора магнітне поле залежить від величини напруги і частоти обертання та конструктивних особливостей обмоток статора. Обмотки статора можуть бути виконані у різних формах, що мають свої особливості, недоліки та переваги. Основне призначення статорних обмоток полягає у створенні симетричного магнітного поля, що обертається. Цим процесом можна керувати шляхом зміни кількості пазів та способів з'єднання окремих котушок (рис. 1.8) [14].

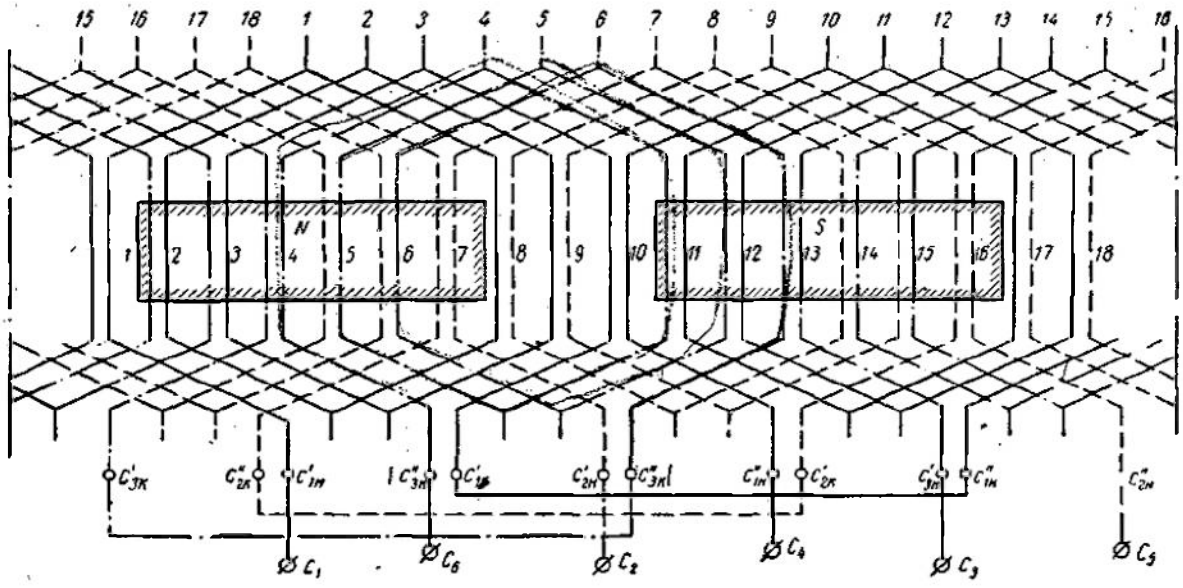


Рисунок 1.8 – Схема трифазної двошарової обмотки

У разі, коли через збалансовану трифазну обмотку протікають три збалансованих струми, що рівні по величині і віднесені один від одного на 120°, у повітряному зазорі електричної машини створюється магнітне поле

постійної величини, що обертається навколо осі машини з певною частотою (рис. 1.9) [15].

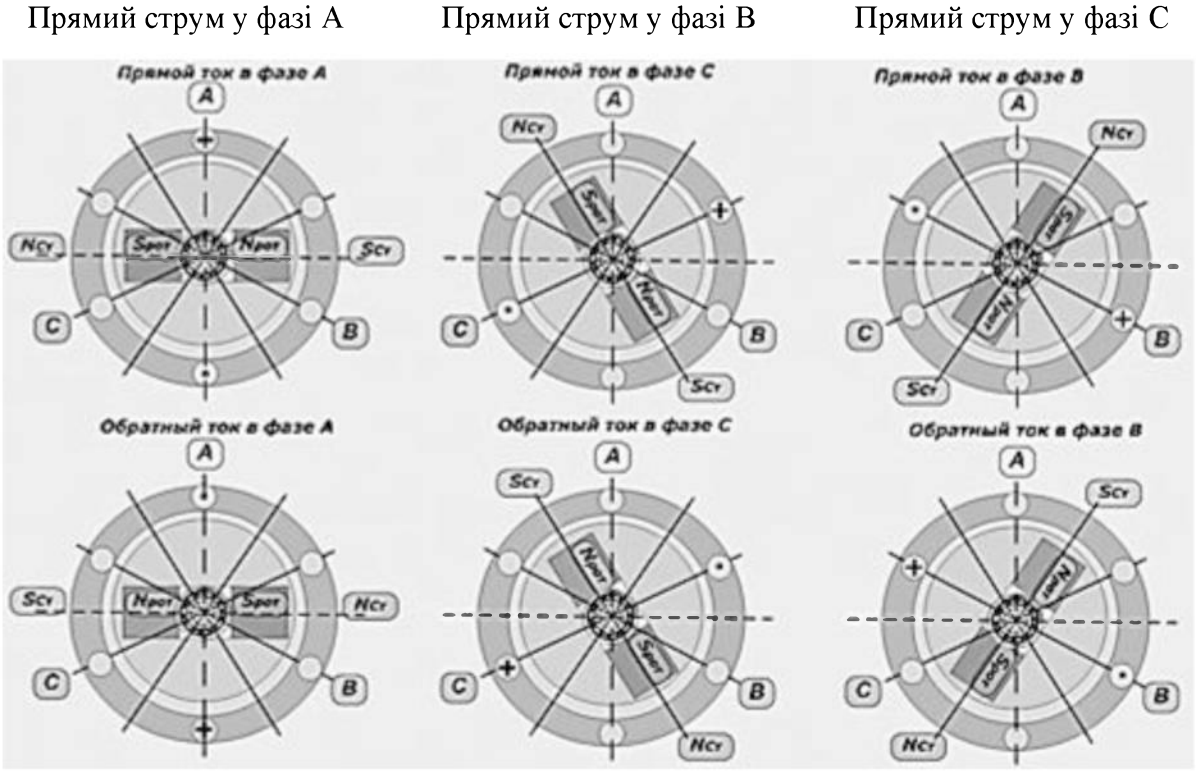
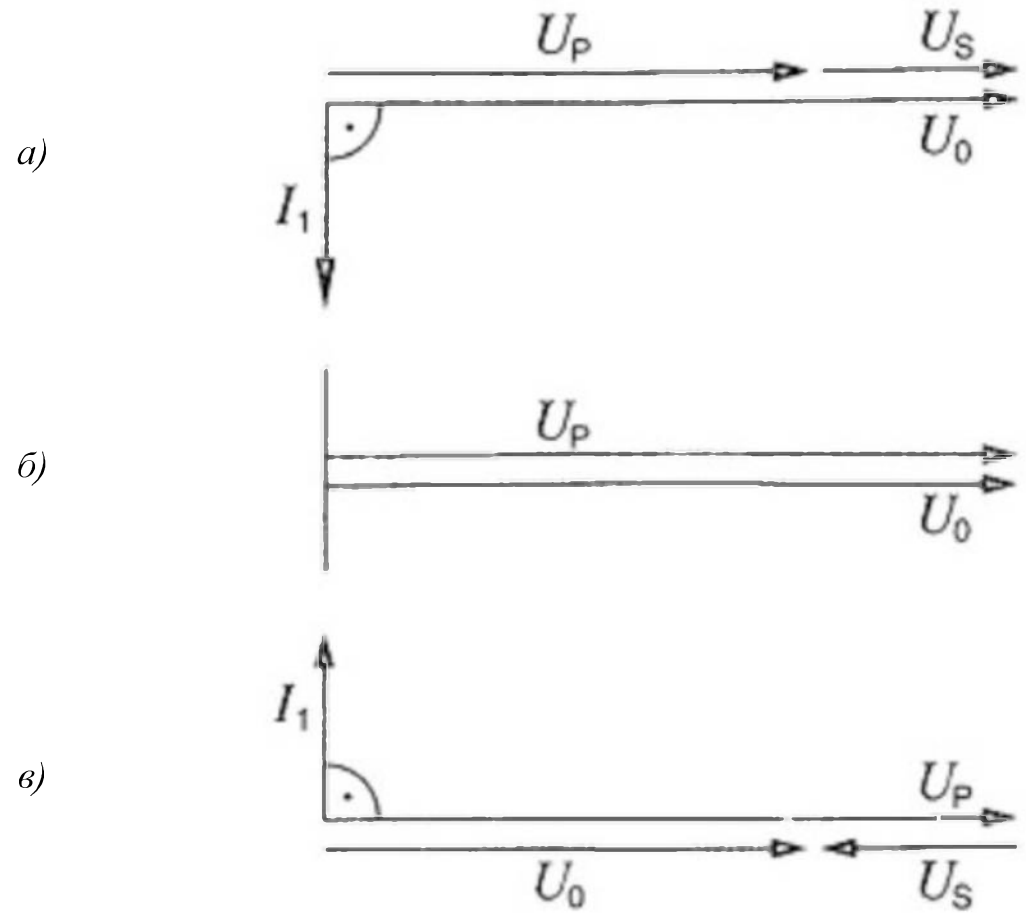


Рисунок 1.9 – Взаємодія магнітних полів статора і ротора у синхронній машині

Крутний момент у синхронній машині є результатом накладання двох магнітних полів – статора ($\varphi_{ст}$) і ротора ($\varphi_{р}$). Результуюче магнітне поле «працює» у повітряному зазорі і визначається як [16]:

$$\phi_{рез.} = \phi_{ст} + \phi_{р} \qquad (1.1)$$

У певний момент часу можна говорити про наявність кута між магнітними полями статора і ротора, який називають обертовим кутом моменту машини (рис. 1.10) [17].



U_p – напруга на полюсному колесі, В, U_s – реактивна напруга, В, U_0 – напруга живлення, В, I_1 – струм статора, А

Рисунок 1.11 – Робочі стани синхронного двигуна: а) недозбудження, б) холостий режим, в) перезбудження

Збалансована трифазна напруга, що прикладена до трифазної обмотки, рівномірно розподіляється і створює магніторушійних силу постійної величини у металевих осердях. Зазначена магніторушійна сила створюючи спротив опору з боку ротора, призводить до виникнення магнітного потоку.

Частоту обертання зазначеного поля навколо центру машини, можна визначити за виразом, об/хв. [16]:

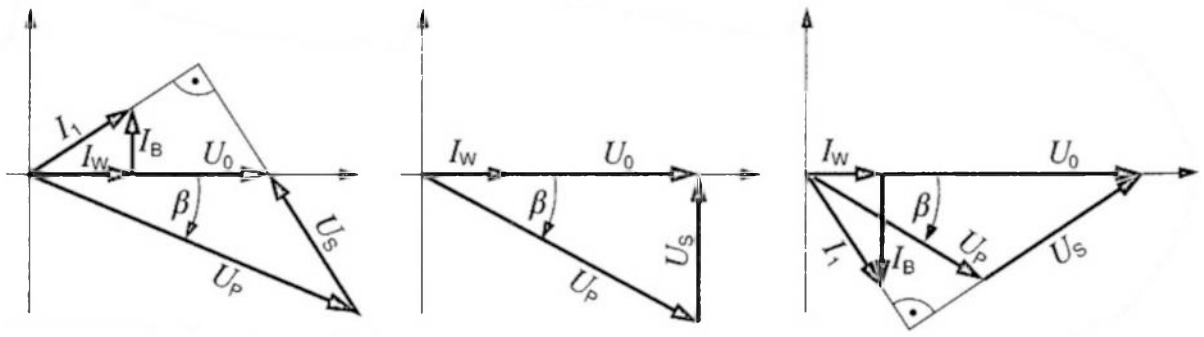
$$n_s = 120\frac{f_н}{p} \tag{1.2}$$

де $f_н$ – електрична частота напруги живлення, Гц,

p – кількість пар полюсів машини, шт.

Якщо на обмотку збудження не подається струм постійного струму, крутний момент у якорі не створюється, а результуючий потік ($\varphi_{рез}$) дорівнює потоку статора ($\varphi_{ст}$), намагнічування якоря здійснюється до тих пір поки прикладена напруга і протидіє у повній мірі електрорушійній силі.

При збільшенні збудження ротора, а до валу не докладається крутний момент опору, у роторі виникає збудження, необхідне для створення електрорушійної сили, що викликає еквівалентне зменшення напруженості магнітного поля статора. Ця ситуація є станом недозбудження (рис. 1.12 *в*) і синхронний двигун починає поглинати реактивну потужність з мережі, до якої він підключений [17].



а) *б)* *в)*

U_p – напруга на полюсному колесі, В, U_s – реактивна напруга, В, U_0 – напруга живлення, В, I_1 – струм статора, А, I_w – активний струм, А, $I_в$ – реактивний струм, А, β – кут потужності

Рисунок 1.12 – Робочі стани синхронного двигуна: а) перезбудження, б) робота у двигунному режимі з поглинанням активної потужності, в) недозбудження

При збільшенні збудження магнітне поле перевищує значення, яке необхідне для створення електрорушійної сили, створюване струмом

статора магнітне поле утворюють потік, який протидіє магнітному потоку, що створюється якорем. При цьому синхронний двигун вважається перезбудженим, і двигун виробляє реактивну потужність у мережу (рис. 1.12 а) [17].

За відсутності навантаження кут крутного моменту і кут навантаження дорівнюють нулю. Кут навантаження визначається як кут між вектором магніторушійної сили або вектором магнітного потоку ротора і результуючим вектором магніторушійної сили або вектором магнітного потоку. Кут навантаження встановлює межі значень крутного моменту, що може розвинути синхронна машина.

При дослідженні характеристик синхронної машини усі електромагнітні розрахунки виконуються на основі електричних величин. У разі прикладання моменту опору, ротор починає відставати від магнітного поля, що обертається.

Якщо момент опору збільшується, сягаємо межі, при якій ротор не встигає за магнітним полем, що обертається, і що може призвести до зупинки двигуна. Крутний момент двигуна також є функцією величин $\varphi_{рез}$ і φ_p. При перезбудженні значення φ_p більше, ніж у недозбудженому стані. З огляду на це, синхронні двигуни при перезбудженні мають більшу перевантажувальну здатність у порівнянні з недозбудженою роботою [17].

При досягненні синхронізації у демпферних стрижнях ЕРС не індукується. Однак вона може бути індукована через наявність тимчасових і просторових гармонік різної частоти у повітряному зазорі.

Джерелами виникнення гармонік може бути наявність виступаючих пазів статора, що викликає пульсацію магнітного поля. Іншою причиною може бути, так звана, реакція ротора, яка виникає в умовах недонавантаження через спотворення магніторушійної сили і кінцевим числом полюсів ротора. Індукована у демпферних стрижнях напруга викликає появу струмів у них і створюють магнітні поля та викликають резистивні втрати [17].

При роботі синхронного двигуна у ньому безумовно є втрати потужності, які обумовлені втратами на нагрівання у мідних обмотках (і ротора, і статора), втрати на вихроутворення та циркуляційні струми, втрати на перемагнічування у осердях, втрати на паразитні вихрові струми, втрати на індуковані струми у всіх металевих компонентах, механічні втрати у підшипниках, втрати на збудження, втрати на охолодження та інші [18].

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ НЕСПРАВНОСТЕЙ СИНХРОННИХ МАШИН

2.1 Огляд причин виникнення несправностей синхронних машин

Усі можливі несправності синхронних двигунів можна розділити на механічні, електричні та магнітні [19].

До механічних несправностей відносять ексцентриситет ротора, зношення підшипникових вузлів та механічні поломки окремих деталей [19].

До електричних несправностей відносять розімкнення або коротке замикання обмоток статора або ротора, погіршення властивостей ізоляції, відмови у клемній коробці [19].

До магнітних несправностей відносять розмагнічування постійних магнітів, викривлення форми магнітного поля та його нерівномірність у повітряному зазорі [19].

Обривом фази називають розмикання ланцюга будь-якої фазної обмотки або вихід з ладу релейної перемикаючої групи [19].

Міжвиткові короткі замикання є одними з найрозповсюджених і характеризують виникнення електричного контакту між витками однієї або кількох фаз. У синхронних двигунах фазні обмотки не мають спільних пазів, що призводить до зниження значення взаємної індуктивності. Не зважаючи на це, міжвиткові замикання можуть легко поширитися та погіршити ситуацію, що пояснюється лавиноподібним зростанням температури обмоток через виникнення струмів короткого замикання. У якості діагностичного параметру можуть бути використані наявні складові гармонійних струмів [20].

При роботі електричних машин можуть статися безліч різноманітних несправностей, що класифікуються залежно від того, у якій частині агрегату вони виникають. Найбільш схильними до виникнення

несправностей є обмотки статора і ротора та підшипникові вузли. Несправності обмоток статора можуть бути викликані різними чинниками, у основі яких є механічні, електричні та теплові впливи [19].

Механічні впливи спричиняються механічними напруженнями, вібраціями, вигином протяжних елементів, тепловим розширенням та інш. Електричні впливи викликаються різного роду електричними впливами – коронними розрядами, короткими замиканнями та інші, що викликають нагрів провідників та ушкодження ізоляції [19].

У роторі також можуть виникнути механічні, електричні та теплові впливи, що проявляються у незбалансованості магнітного поля і електромагнітних проявах, динамічних напругах, виникненні незбалансованих крутних моментів, циклічних напруг і відцентрових сил, що у кінцевому випадку можуть призвести до його ушкодження і виходу з ладу.

Несправності обмотки збудження проявляються у більшості випадків через міжвиткові замикання, що призводить до високих значень струмів, спотворення форми хвиль напруги, збільшення реактивної потужності та появи вібрацій. Самі замикання можуть бути викликані пошкодженням ізоляції, зовнішніми механічними впливами та перенавантаженнями [20].

З боку механічної частини найчастіше «відмовляють» підшипникові вузли, причинами яких є їхнє втомне руйнування, корозія окремих частин, перевантаження, вібрація, неспіввісність та використання невідповідних змащувальних матеріалів.

Несправність підшипникових вузлів викликають появу механічних коливань та ексцентриситет ротора. Ексцентриситет проявляється у появі неоднорідного повітряного зазору між ротором та статором.

Наявність ексцентриситету певним чином впливає на форму сигналу узагальненого вектору струму, оскільки магнітний потік у повітряному зазорі стає незбалансованим, а суттєві коливання ротора можуть призвести до механічних ушкоджень [19].

Розрізняють ексцентриситет статичний та динамічний.

При наявності статичного ексцентриситету (рис. 2.1) центр ротора суміщений відносно осі обертання і положення центру мас системи. При динамічному ексцентриситеті маємо дещо іншу ситуацію центр ротора суміщений відносно осі обертання, але може співпадати з положенням центру мас системи. Зазвичай, якщо у двигуні наявний статичний ексцентриситет, то у ній проявляється і ексцентриситет динамічний. Деякими джерелами ексцентриситету є неточна складання деталей машин і знос підшипників [21].

Навантаження підшипників можуть бути визначені за питомим навантаженням швидкістю ковзання, температурними показниками та параметрами змащувального матеріалу.

Змащувальні матеріали є надзвичайно чутливими до наявності ексцентриситету і взагалі до дефектів геометричної форми, а також до параметра динамічної в’язкості перших.

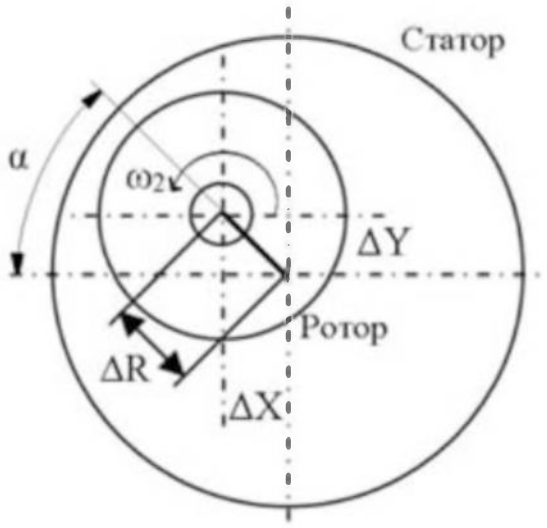


Рисунок 2.1 – Графічне пояснення статичного ексцентриситету

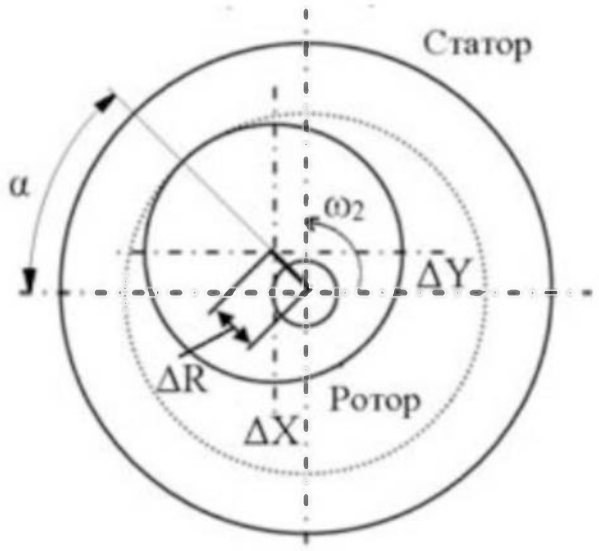


Рисунок 2.2 – Графічне пояснення динамічного ексцентриситету

Шар змащувального матеріалу покликаний відокремити внутрішнє кільце підшипника і валу ротора (рис. 2.3). Значення наявного ексцентриситету та кута визначають положення системи, що обертається, де виникає мінімальна товщина масляної плівки. [22]

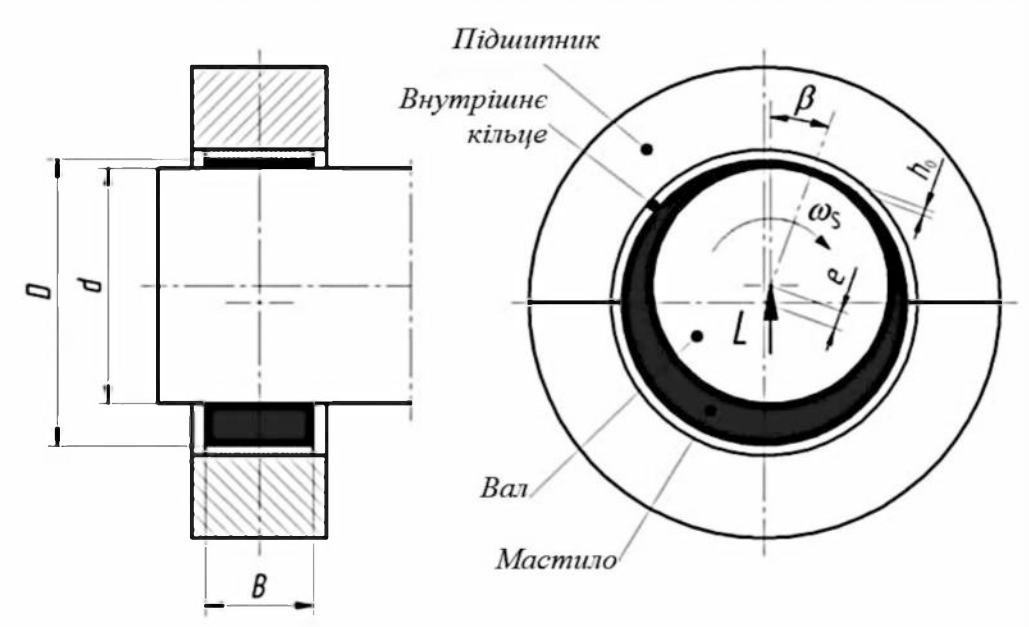


Рисунок 2.3 − Графічне пояснення впливу наявності динамічного ексцентриситету на роботу підшипника

За відсутності у змащувальному матеріалі абразивних частинок наявність динамічного ексцентриситету може і не проявитися, а при збільшенні їх концентрації може почати проявлятися зношування підшипникового вузла. Це відбувається через прояв поведінки частинок властивостей металу, і за великих розмірів може відбуватися їхня дифузія у поверхні ковзання або викликати абразивне зношення останніх. Як наслідок – отримуємо перегрів підшипника [23].

2.2 Огляд системних відмов електромеханічних систем

Виявлення несправностей та діагностика стану синхронних двигунів є досить актуальною задачею.

Несправність двигуна визначає часткову або повну відмову його роботи. З іншого боку, несправність – це неприпустиме відхилення будь-якого параметра двигуна від заданого значення, до виникнення якої можуть призвести помилки проектування, помилки при експлуатації, «людський фактор», перевантаження, природне зношення компонентів, зумисне псування, фізичне старіння матеріалів [23].

Наявність несправності може призвести до погіршення робочих характеристики, непродуктивних втрат енергії, порушення виробничого процесу, вплив на параметри безпеки.

Відмови у роботі двигуна та їх запобігання визначаються конструктивними особливостями, закладеними параметрами надійності та параметрами відмов [24].

До недавнього часу пошук несправностей електродвигунів в основному базувалося на простих і доступних методах, які базувалися на вимірюванні перенапруг у обмотках статора (ротора), яка після її визначення подавала сигнал на відключення двигуна для обмеження

впливу несправності на загальну мережу, що не може бути гарним рішенням. Тому було здійснено багато досліджень, для ефективного пошуку несправностей та визначити їх точне позиціонування та ступінь важливості [24].

Визначення несправностей на ранніх стадіях їх розвитку дозволить уникнути важких наслідків їх прояву – грошових та технологічних втрат. Для запобігання відмовам двигуна можна використовувати методи їх виявлення, діагностики та аналізу відмов й розробки засобів і заходів з технічного обслуговування.

Методи діагностики несправностей вимагають певної класифікації цих несправностей.

Бажаний результат для пошуку несправностей залежить від складності створюваних систем та використаного програмного забезпечення.

У двигунах застосовуються деталі, що обертаються, тому у них застосовуються підшипники, що є одними з найбільш важливих механічних елементів у двигунах. Це вимагає застосування методів відстеження стану та прогнозування несправностей підшипників для забезпечення нормальної роботи двигунів.

При нормальних умовах роботи двигунів струм, що протікає через його обмотки, знаходиться у межах розрахункових значень, що відповідають номінальним характеристикам роботи двигуна. Для оцінки роботи двигуна у даному режимі можна здійснити аналіз або розрахунок напруг і струмів у даній машині для порівняння при нормальних режимах і режимах ушкодження [25].

Аварійні ситуації, збої та ушкодження можуть бути викликані впливом зовнішніх впливів – аварій, природних явищ, погіршенням ізоляційних властивостей матеріалів, вандалізму та іншого.

Під несправністю розуміють протікання струмів значної величини невстановленими технологіями шляхами, що може викликати ушкодження

обладнання, травмування або летальні випадки серед обслуговуючого персоналу.

Для ефективного запобігання ушкодження двигунів необхідно здійснювати моніторинг, аналіз та оцінку несправностей, що виникають у ньому, та визначити заходи для забезпечення відповідного захисту та гарантування безпеки експлуатації. Більш того, аналіз виникнення можливих несправностей може стати у нагоді для вибору відповідних налаштувань систем і апаратів захисту [25].

Ступінь ушкодження у відомому ступені залежить від місця виникнення несправності, шляхів проходження струмів ушкодження, значень повних опорів на цьому шляху та рівень прикладеної напруги у досліджуваних точках. Це також може бути керуючим сигналом для ізоляції ушкоджених двигунів від загальної системи електроживлення за допомогою відповідних систем (релейний захист, автоматичні вимикачі та інші). Щоб можна було з достатнім ступенем точності визначити наявність несправностей, необхідною умовою є аналіз їх наявності або розвитку у кількох характерних точках. Даний аналіз має на меті визначення оптимальних схем і засобів визначення струмів і напруг [25].

Несправності можна визначити за збільшенням показників струму або їх протікання по невизначеному шляху. Так, струми короткого замикання мають амплітуди у кілька разів більші за номінальні значення. Для запобігання їх негативного впливу на систему, необхідно якомога швидше відключити несправне обладнання [27].

При ушкодженнях і несправностях рівень напруги буде мати коливальний характер, що певним чином впливає на можливість двигуна виконувати покладені на нього зобов’язання у технологічному процесі та змінювати властивості ізоляційних матеріалів. Сам процес оцінки значень напруг і струмів при різних типах ушкоджень називається аналізом несправностей, на основі якого можна буде визначити необхідні заходи та системи для захисту обладнання, що досліджується [27].

Для аналізу початково-збалансованої системи двигуна застосовують метод аналізу симетричних компонентів, а отримані результати можуть бути використані для визначення несправностей при розбалансуванні параметрів двигуна [28].

Будь-яка незбалансована система може бути представлена кількома збалансованими системи, представленими відповідною кількістю векторів, що можуть бути складені за принципом суперпозиції.

Для трифазного двигуна можна скласти три набори збалансованих симетричних компонентів: прямої, зворотної та нульової послідовності. Пряма послідовність має набір векторів, що мають симетричну послідовність, зворотна послідовність має зворотньо-направлену систему векторів до векторів прямої послідовності, нульова послідовність має три компоненти, що виконують синхронізацію векторів по фазі.

2.4 Виявлення, діагностика та прогноз несправностей електричних машин

Виявлення можливих несправностей – це процедура спостереження за показаннями вимірювальних пристроїв, збирання інформації про роботу двигуна та їх оцінки за допомогою порівняння з нормалізованими параметрами. Виявлення несправностей базується на пошуку взаємозв'язку між численними значеннями вимірених величин для з’ясування стану об’єкта та необхідність коригування його роботи при наявності несправності(ей) або виведення його у ремонт [29].

Для цього процесу можуть бути використані комп’ютерні моделі досліджуваних сигналів, які дозволяють заздалегідь визначити та оцінити основні параметри досліджуваних сигналів – їх амплітуду, частоту, період, коливання та інше [30].

Виявлення наявності несправностей є вкрай важливим для підвищення якості технологічного процесу та виключення незворотного руйнування агрегату. Будь-яка несправність двигуна, як механічна так і електрична, спостерігається зниженням ефективності, перевитратою енергії, зниженням надійністю і збільшенням ролі систем захисту [29].

Методи виявлення несправностей характеризуються наступним алгоритмом дій [30]:

– збирання інформації,

– визначення головних і вторинних параметрів,

– аналіз зібраної інформації,

– вибір технології та способу захисту,

– постадійна оцінка прийнятих рішень.

Методи виявлення несправностей зазвичай розділяють на методи, засновані на створенні моделей, і методи, засновані на статистичних даних.

Метод, заснований на створенні моделей, відрізняються доступністю та невисокою вартістю. Методи, засновані на статистичних даних, дають більш точні результати досліджень, але є досить складними, вимагають використання великої кількості реєструючих пристроїв і тому є досить дорогим.

У процесі діагностування відбувається прогнозування стану виникнення несправностей або специфічних станів електричної машини до того, як вони здійснять відповідний (негативний) вплив на роботу двигуна і суттєво впливають на строк їх служби. Стратегії прогнозування несправностей базується на класифікації та методах отримання систематичних знань порівняння стану нормальної роботи і несправністю [30].

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

Для визначення геометричних параметрів синхронного двигуна визначмо ряд електромеханічних величин.

Значення номінальної фазної напруги при з'єднанні статорних обмоток у зірку визначимо за формулою [31]:

$$U_{нф} = \frac{U_н}{\sqrt{3}} \tag{3.1}$$

$U_н$ – номінальне значення напруги, $U_н$ = 6 кВ,

$$U_{нф} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3465 \text{ В}$$

Значення номінальної повної потужності розрахуємо за формулою, ВА [31]:

$$S_н = \frac{P_н}{\eta_н \cdot cos\ \varphi_н} \tag{3.2}$$

де $P_н$ – номінальна активна потужність двигуна, $P_н$ = 600 кВт,

$cos\varphi_н$ – коефіцієнт потужності, $\cos\varphi_н$ = 0,9,

$\eta_н$ – номінальний ККД двигуна, $\eta_н$ = 0,95.

$$S_н = \frac{600 \cdot 10^3}{0,95 \cdot 0,9} = 702 \cdot 10^3 \text{ ВА}$$

Значення номінального фазного струму розрахуємо за формулою, А [31]:

$$I_{нф} = \frac{S_н}{\sqrt{3} \cdot U_{нф}} = \frac{702 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 67,5 \text{ А} \quad (3.3)$$

Число пар полюсів розрахуємо за формулою, шт [31]:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_н} \quad (3.4)$$

де f – частота напруги живлення, f = 50 Гц,

$n_н$ – номінальна (синхронна) частота обертання двигуна, $n_н$ = 1000 об/хв.,

$$p = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 3$$

Розрахункову потужність визначимо за формулою, ВА [31]:

$$S' = k_E \cdot S_н \quad (3.5)$$

де k_E – коефіцієнт, що представляє собою відношення ЕРС у роторі при номінальному навантаженні до номінальної навантаженні, k_E = 1,05 [31].

$$S' = 1,05 \cdot 702 \cdot 10^3 = 737,1 \cdot 10^3 \text{ ВА}$$

Попередньо приймаємо внутрішній діаметр статора D = 0,6 м.

Зовнішній діаметр статора [31]:

$$D_{ст} = k_D \cdot D \quad (3.6)$$

де k_D – коефіцієнт, який в залежності від числа полюсів, k_D = 1,4 – 1,45 [31].

$$D_{ст} = (1,4 - 1,45) \cdot 0,6 = 0,84 - 0,87 \text{ м}$$

Найближчий нормалізований зовнішній діаметр статора $D_{ст}$ = 850 мм, висота осі обертання h = 0,5 м [31].

Величину полюсного поділу розрахуємо за формулою, м [31]:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot 0,6}{2 \cdot 3} = 0,314 \text{ м} \tag{3.7}$$

Розрахункову довжину статора розрахуємо за формулою, м [31]:

$$\iota_{ст} = \frac{6,1 \cdot S'}{\alpha_{\delta} \cdot k_B \cdot k_{обм} \cdot A \cdot B_{\delta н} \cdot D^2 \cdot n_н} \tag{3.8}$$

де α_{δ} – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття, α_{δ} = 0,6,

k_B – коефіцієнт форми поля, k_B = 1,25,

$k_{обм}$ – обмотковий коефіцієнт обмотки статора, $k_{обм}$ =0,95,

A – лінійне навантаження статора, $A = 500 \cdot 10^2$ А/м,

$B_{\delta н}$ – максимальне значення індукції в повітряному зазорі при номінальному навантаженні, $B_{\delta н}$ = 0,75 Тл,

$$\iota_{ст} = \frac{6,1 \cdot 737,1 \cdot 10^3}{0,6 \cdot 1,25 \cdot 0,95 \cdot 50000 \cdot 0,75 \cdot 0,6^2 \cdot 1000} = 0,467 \text{ м}$$

Дійсну довжину статора визначимо за формулою, м [31]:

$$\iota_{ст1} = 1,05 \cdot \iota_{ст} = 1,05 \cdot 0,467 = 0,49 \text{ м} \tag{3.9}$$

У більшості синхронних двигунів застосовують петльові обмотки, які складаються з багатовиткових котушок та хвильових обмоток з числом ефективних провідників у пазу не більше двох.

З огляду на вищесказане приймаємо число паралельних гілок обмотки статора $a = 1$ (з урахуванням того, що $I_{нф} < 200$ А) [31].

Зубцовий поділ для $\tau = 0{,}317$: $t_{1\min} = 0{,}025$ м, $t_{1\max} = 0{,}030$ м.

Максимальне число пазів (зубців) магнітопроводу статора визначимо за формулою [31]:

$$z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\min}} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}6}{0{,}025} = 75{,}36 \tag{3.10}$$

Мінімальне число пазів (зубців) магнітопроводу статора визначимо за формулою [31]:

$$z_{1\min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\max}} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}6}{0{,}030} = 62{,}8 \tag{3.11}$$

Число пазів магнітопроводу статора обираємо виходячи зі значення його діаметра і кратним числу фаз та числу паралельних гілок α: $z_1 = 74$ [31].

Число ефективних провідників у пазу [31]:

$$U_{п} = \frac{\pi \cdot a \cdot D \cdot A}{z_1 \cdot I_{нф}} = \frac{3{,}14 \cdot 1 \cdot 0{,}6 \cdot 50000}{74 \cdot 67{,}5} = 18{,}9 \approx 20 \tag{3.12}$$

За знайденим значенням U_n уточнюємо значення лінійного навантаження [31]:

$$A = \frac{z_1 \cdot U_{п} \cdot I_{нф}}{\pi \cdot a \cdot D} = \frac{74 \cdot 20 \cdot 67{,}5}{3{,}14 \cdot 1 \cdot 0{,}6} = 53025 \ \frac{\text{А}}{\text{м}} \tag{3.13}$$

Попередню ширину паза статора розрахуємо за формулою [31]:

$$b_{п1} = 0,494 \cdot t_1 = 0,494 \cdot 0,49 = 0,242 \text{м} \quad (3.14)$$

Поперечний перетин ефективного провідника обмотки статора розрахуємо за формулою [31]:

$$q_{эф} = \frac{I_{нф}}{a \cdot J_1} \quad (3.15)$$

де J_1 – припустима щільність струму, А/м^2,

$$J_1 = \frac{AJ_1}{A} \quad (3.16)$$

де AJ_1 – приведена припустима щільність струму при τ = 0,317 м, $AJ_1=2700 \cdot 10^8$ [31].

$$J_1 = \frac{2700 \cdot 10^8}{53025} = 5,09 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

$$q_{еф} = \frac{67,5}{1 \cdot 5,09 \cdot 10^6} = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Ширина ізольованого провідника складе [31]:

$$b'_{1із} = b_{п1} - \delta_{із.п} \quad (3.17)$$

У синхронних машинах від 100 кВт застосовують безперервну ізоляцію класу нагрівостійкості В, двостороння товщина ізоляції при $U_н$ = 6 кВ складає $\delta_{із.п}$ = 5,0 мм.

$$b'_{1із} = 0,242 - 0,005 = 0,237 \text{ м}$$

Приймаємо, що ефективний провідник складається з одного елементарного провідника ($q_{еф}$= 13,3 мм^2 < 18 мм^2), що відповідає марці провідника ПЭТВ-2, який має двосторонню товщину ізоляції на рівні 0,5 мм, розміри мідного провідника: $a_1 \times b_1$=1,75×8,0 мм, $q_{эф}$= 14,0 мм^2, $a_{1із} \times b_{1із}$= 1,5×8,0 мм [32].

Остаточна ширина паза складе [31]:

$$b_{п1} = n_ш \cdot b_{1із} + \delta_{із.п} + \delta_{р.ш} + \delta_ш \qquad (3.18)$$

де $n_ш$ – число елементарних провідників по ширині паза, $n_ш$ = 1 [31],

$\delta_{из.п}$ – двостороння товщина паза, $\delta_{із.п}$ = 5,0 мм [31],

$\delta_{р.ш}$ – допуск на розбухання ізоляції, $\delta_{р.ш}$ = 0,05·$n_ш$ [31],

$\delta_ш$ – технологічний допуск на укладання провідника, $\delta_ш$ = 0,2 мм [31].

$$b_{п1} = 1 \cdot 8,0 + 5,0 + 0,05 + 0,2 = 13,25 \text{ мм}$$

Висоту паза розрахуємо за формулою [31]:

$$h_{п1} = U_п \cdot n_в \cdot a_{1із} + \sum \delta_{із} + h_к + \delta_{рв} + \delta_в, \qquad (3.19)$$

де $h_к$ – висота клина, $h_к$ = 4 мм [31],

$\Sigma\delta_{із}$ – сумарна товщина ізоляції по висоті паза, $\Sigma\delta_{із}$= 12,5 мм [31],

$\delta_{рв}$ – допуск на розбухання, $\delta_{рв}$= 0,05·$n_в$·$U_п$ [31],

$\delta_в$ – допуск на укладання, $\delta_в$ = 0,2 мм [31].

$$h_{п1} = 20 \cdot 1 \cdot 1,5 + 12,5 + 4 + 0,05 \cdot 1 \cdot 20 + 0,2 = 47,7 \text{ мм}$$

Щільність струму в провіднику обмотки статора розрахуємо за формулою [31]:

$$J_1 = \frac{I_{\text{нф}}}{a \cdot q_{\text{еф}}} = \frac{67,5}{1 \cdot 14 \cdot 10^{-6}} = 4,82 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \tag{3.20}$$

Значення індукції у зубі розрахуємо за формулою [31]:

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta\text{н}} \cdot t_1 \cdot \iota_{ст}}{(t_1 - b_{\text{п}1}) \cdot \iota_{\text{ст}1} \cdot k_{\text{с}}} \tag{3.21}$$

де k_c – коефіцієнт заповнення пакету сталі, k_c= 0,95 [31].

$$B_{z1} = \frac{0,75 \cdot 0,49 \cdot 0,467}{(0,49 - 0,242) \cdot 0,49 \cdot 0,95} = 1,487\,\text{Тл}$$

Значення індукції знаходиться у межах 1,45 – 2 Тл, що задовольняє технологічним умовам роботи двигуна.

Значення індукції у ярмі статора розрахуємо за формулою [31]:

$$B_a = \frac{\alpha_\delta \cdot B_{\delta\text{н}} \cdot \tau \cdot \iota_{ст}}{2 \cdot h_a \cdot \iota_{ст1} \cdot k_{\text{с}}} \tag{3.22}$$

де h_a – висота спинки статора, м [31]:

$$h_a = \frac{D_{ст} - D}{2} - h_{\text{п}1} = \frac{0,85 - 0,6}{2} - 0,0477 = 0,0773\,\text{м} \tag{3.23}$$

$$B_a = \frac{0,6 \cdot 0,75 \cdot 0,317 \cdot 0,467}{2 \cdot 0,0773 \cdot 0,49 \cdot 0,95} = 1,21\,\text{Тл}$$

Значення індукції знаходиться у межах 1,2 – 1,45 Тл, що задовольняє технологічним умовам роботи двигуна.

Кількість витків однієї фази обмотки статора розрахуємо за формулою [31]:

$$\omega_1 = 2 \cdot p \cdot q_1 \cdot \frac{U_n}{2} \cdot \frac{1}{a} = 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot \frac{20}{2} \cdot \frac{1}{1} = 240 \text{ шт.} \quad (3.24)$$

Крок обмотки розрахуємо за формулою [31]:

$$y_1 = (0.8 \div 0.86) \cdot \tau_п \quad (3.25)$$

де

$$\tau_П = 3 \cdot q_1 = 3 \cdot 4 = 12, \quad (3.26)$$

$$y_1 = (0,80 - 0,86) \cdot 12 = 9,6 - 10,32 \approx 10$$

Коефіцієнт скорочення кроку розрахуємо за формулою [31]:

$$k_у = \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{y_1}{\tau_п} = \sin \frac{3.14}{2} \cdot \frac{10}{12} = 0,966 \quad (3.27)$$

Коефіцієнт розподілу обмотки статора розрахуємо за формулою [31]:

$$k_р = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin \frac{\pi}{6 \cdot q_1}} = \frac{0,5}{4 \cdot \sin \frac{3,14}{6 \cdot 4}} = 0,958 \quad (3.28)$$

Обмотковий коефіцієнт розрахуємо за формулою [31]:

$$k_{обл} = k_у \cdot k_р = 0,966 \cdot 0,958 = 0,925. \quad (3.29)$$

Повітряний зазор визначає показники роботи двигуна – при його збільшенні збільшуються розміри полюсів, обмоток збудження та зростають втрати у обмотках. При малих зазорах збільшуються втрати на наконечниках, а також підвищується небезпека механічних ушкоджень.

Приблизне значення повітряного зазору розрахуємо за формулою [31]:

$$\delta = 0.28 \cdot \frac{A}{B_{\delta o}} \cdot \frac{\tau}{x_{d*}} \cdot 10^{-6} \tag{3.30}$$

де $B_{\delta 0}$ – максимальне значення індукції у зазорі при холостому ході, $B_{\delta 0} = 0{,}95 \cdot B_{\delta н} = 0{,}95 \cdot 0{,}75 = 0{,}713$ Тл [31].

$$\delta = 0,28 \cdot \frac{53025}{0,713} \cdot \frac{0,317}{1,9} \cdot 10^{-6} = 6,6 \cdot 10^{-3}\ м$$

Приймаємо повітряний зазор по середині полюса 0,0036 м (3,6 мм), тоді зазор по краям полюса розрахуємо за формулою [31]:

$$\delta' = \delta + \frac{\delta_m - \delta}{3} \tag{3.31}$$

де $\delta_m = 1{,}5 \cdot \delta = 1{,}5 \cdot 3{,}6 = 5{,}4$ мм.

$$\delta' = 0,0036 + \frac{0,0054 - 0,0036}{3} = 0,0042\ \text{м}.$$

Ширину полюсного наконечника розрахуємо за формулою [31]:

$$b_{\text{р}} = \alpha \cdot \tau \tag{3.32}$$

де α – коефіцієнт полюсного перекриття, $\alpha = 0{,}75$ [31].

$$b_{\text{р}} = 0,75 \cdot 0,317 = 0,238 \text{ м}.$$

Радіус дуги полюсного наконечника розрахуємо за формулою [31]:

$$R_{\text{р}} = \frac{D}{2 + 8 \cdot D \cdot \frac{\delta_m - \delta}{b_{\text{р}}^2}} = \frac{0,6}{2 + 8 \cdot 0,6 \cdot \frac{0,0054 - 0,0036}{0,238^2}} = 0,279 \text{ м} \qquad (3.33)$$

Демпферна обмотка розміщена у пазах полюсних наконечників ротора і слугує для здійснення асинхронного пуску синхронного двигуна та заспокоєння можливих непродуктивних коливань ротора. Демпферна обмотка являє собою набір короткозамкнених мідних (латунних) стрижнів.

Число стрижнів пускової обмотки на полюсі приймаємо дорівнюючим n_c = 8 шт.

Поперечний переріз стрижня пускової обмотки розрахуємо за формулою [31]:

$$q_c = \frac{(0,25 \div 0,35) \cdot \tau \cdot A}{n_c \cdot J_1} = \frac{(0,25 \div 0,35) \cdot 0,317 \cdot 53025}{7 \cdot 5,09 \cdot 10^6} = 117,9 \cdot 10^{-6} \div 165,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \qquad (3.34)$$

Приймаємо q_c = 120 $\cdot 10^{-6}$ м^2.

Діаметр стрижня розрахуємо за формулою [31]:

$$d_c = 1,13 \cdot \sqrt{q_c} = 1,13 \cdot \sqrt{120 \cdot 10^{-6}} = 0,0124 \text{ м} \qquad (3.35)$$

Приймаємо d_c = 125$\cdot 10^{-3}$ м, а q_c= 122,4$\cdot 10^{-6}$ м^2.

Зубцовий крок на роторі розрахуємо за формулою [31]:

$$t_2 = \frac{b_{\text{р}} - d_c - 2 \cdot z}{n_c - 1} \qquad (3.36)$$

де z – відстань між крайнім стрижнем і краєм полюсного наконечника, z = 0,038 м.

$$t_2 = \frac{0,238 - 0,0124 - 2 \cdot 0,038}{8 - 1} = 0,0214 \text{ м}$$

Діаметр паза ротора розрахуємо за формулою [31]:

$$d_s = d_c + 0,0001 = 0,0124 + 0,0001 = 0,0123 \text{ м} \tag{3.37}$$

Довжину стрижня розрахуємо за формулою [31]:

$$\imath_c = \imath_{ст1} + 0,3 \cdot \tau = 0,49 + 0,3 \cdot 0,317 = 0,585 \text{ м} \tag{3.38}$$

Переріз короткозамикаючого сегмента розрахуємо за формулою [31]:

$$q_{кз} = 0,5 \cdot n_c \cdot q_c = 0,5 \cdot 8 \cdot 122,4 \cdot 10^{-6} = 489,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \tag{3.39}$$

У якості матеріалу стрижнів обираємо мідні стрижні, геометричні розміри яких складають 10×50 мм (площа перерізу $q_{кз}$ = 500 мм^2).

Значення магнітного потоку у повітряному зазорі визначається за формулою [31]:

$$\Ф = \frac{E_1}{4 \cdot k_B \cdot f \cdot \omega_1 \cdot k_{об1}} = \frac{E_1}{4 \cdot 1,25 \cdot 50 \cdot 240 \cdot 0,95} = 1,75 \cdot 10^{-5} \cdot E_1 \tag{3.40}$$

Індукція у повітряному зазорі визначається за формулою [31]:

$$B_\delta = \frac{\Ф}{\alpha_\delta \cdot \tau \cdot \imath_{ст1}} = \frac{1,75 \cdot 10^{-5}}{0,6 \cdot 0,317 \cdot 0,49} \cdot E_1 = 1,88 \cdot 10^{-4} \cdot E_1 \text{ Тл} \tag{3.41}$$

Таблиця 3.1 – Розрахунок магнітного потоку і індукції у повітряному зазорі

Розрахункова величина	Значення ЕРС індукції, В				
	1000	2000	3000	4000	5000
Магнітний потік, Вб	0,018	0,035	0,053	0,070	0,088
Індукції у повітряному зазорі, Тл	0,188	0,376	0,564	0,752	0,940

За значеннями у табл. 3.1 будуємо графіки залежності магнітного потоку (рис. 3.1) і індукції у повітряному зазорі (рис. 3.2) від значення ЕРС індукції.

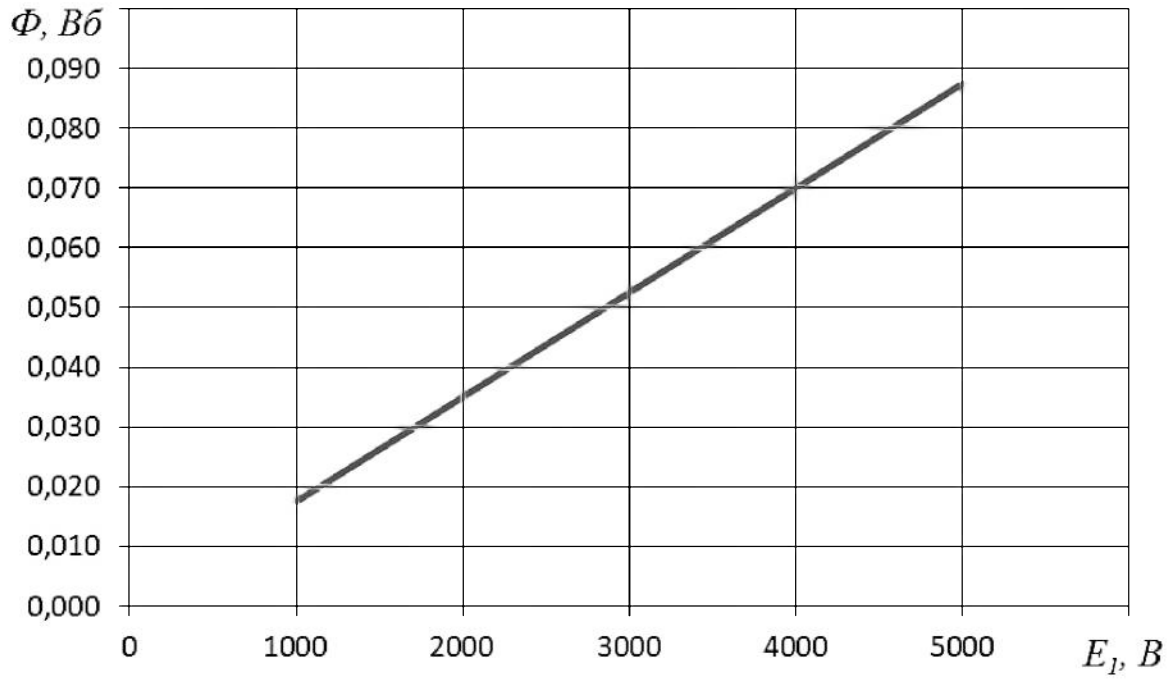


Рисунок 3.1 − Графік залежності магнітного потоку від значення ЕРС індукції

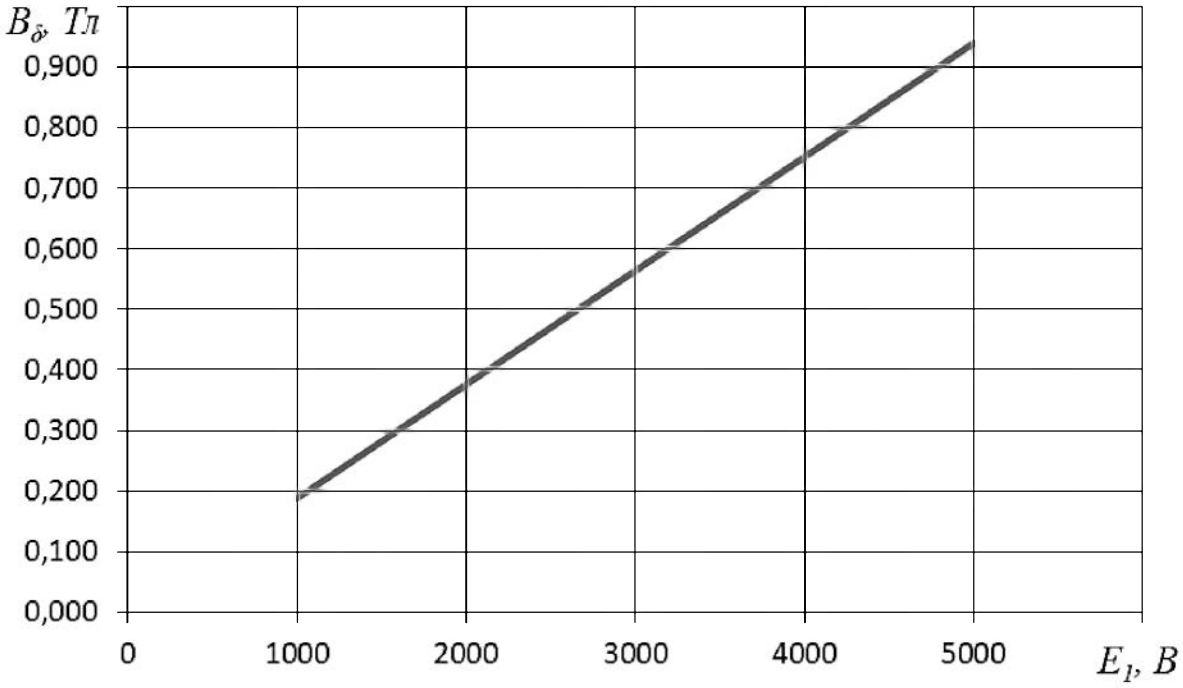


Рисунок 3.2 – Графік залежності індукції у повітряному зазорі від значення ЕРС індукції

Конструювання синхронного двигуна мало на меті розрахунок основних геометричних розмірів статора і ротора, вибір типу обмоток, параметрів обмотувальних дротів та їх ізоляції, матеріалу активних та конструктивних частин електричної машини. Окремі частини машини були сконструйовані таким чином, щоб при подальшому виготовленні або моделюванні двигуна знизити трудомісткість та витрату матеріалів та забезпечити доступність досліджень енергетичних показників його роботи.

4 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ДІАГНОСТИКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

4.1 Інтелектуальна діагностика роботи синхронних двигунів

Вимогою сьогодення є проведення технічного обслуговування машин та механізмів за поточним станом. Це дозволяє скоротити час простою обладнання та витрат на його технічне обслуговування [33].

Поточний стан машин взагалі і синхронних двигунів досить складно реалізувати без якісного моніторингу стану машин та визначення задач по плануванню технічного обслуговування з оптимальної точки зору. З даного твердження виходить, що технічне обслуговування рекомендується здійснювати лише в разі, коли спостерігається аномальні значення параметрів його роботи [33].

Сам процес моніторингу стану двигуна можна здійснити шляхом використання різноманітних моделей – фізичних, математичних, комп'ютерних та їх комбінації [34].

Роботу синхронного двигуна не дивлячись на складність електромагнітних процесів, що у ньому протікають, можна схарактеризувати кількома чітко визначеними параметрами – струмами і напругами у обмотках статора і ротора, частотою напруги живлення, частотою обертання ротора, крутним моментом на валу ротора. Тому для складення моделі буде досить використати доступний математичний апарат та прикладні програми з використанням відомих алгоритмічних підходів [35].

Складена модель повинна здійснювати аналіз роботи окремих компонентів двигуна та виокремлювати режими, що характеризують наявність збоїв у їх функціонуванні.

Основну увагу при складанні моделей необхідно приділяти універсальності застосування запропонованих алгоритмів для вирішення

поставлених задач – визначати справний або несправний стан електричної машини. Створена модель діагностики несправностей на основі контролювання даних роботи системи повинна давати можливість її використання за будь-яких станів цієї системи – і нормальних, і перехідних, і аварійних, тобто бути універсальною [35].

Аналіз сигналів струмів в обмотках двигуна для здійснення діагностики несправностей найкращим чином реалізуються шляхом дослідження сумарного вектору. Гарним підґрунтям можуть стати гібридні інтелектуальні моделі з використанням нейронних мереж на основі нечіткої логіки, що вимагає створення дерева можливих рішень з одночасним введенням певних правил, що дещо скорочує застосованість створеної моделі [35].

Штучні нейронні мережі (ШНМ) набули у останній час широкого застосування у технічних системах [36].

Застосування ШНМ дозволяє реалізувати можливості з діагностики та моніторингу технологічних об’єктів [36].

У основі ШНМ містяться нейронні вузли, з'єднані між собою зв’язками, які називають синаптичними вагами [36].

Для створення ШНМ необхідно мати значний набір статистичних даних про стан досліджуваних систем. Завданнями, що реалізують штучні нейронні мережі є штучна реалізація функціональних зв’язків у досліджуваному об’єкті [36].

ШНМ набуває знань у процесі навчання, а для їх зберігання можуть бути використані міжнейронні сили зв’язку. Вихідний сигнал ШНМ коригується шляхом порівняння отриманого результату із заданим завданням. Ці операції реалізуються шляхом засобів нелінійної обробки інформації, прогнозування зміни стану числових рядів, впрвадженням засобів інтелектуального керування, що залежить від поставлених завдань, застосованих алгоритмів та специфіки архітектури штучної нейронної мережі [37].

Оцінка роботи ШНМ базується на використанні програмного забезпечення як на етапі проектування, коли визначається структура і топологія мережі, так і на етапі оцінки результатів. При незадовільному результаті на виході ШНМ постає завдання зміни структури останньої. Такий підхід дозволяє реалізувати найкраще рішення поставлених завдань для конкретного об’єкта. Пошук найоптимальнішої архітектури ШНМ вимагає визначення заданої форми алгоритму і завдання точності обчислень [37].

ШНМ, у загальному випадку, являє собою систему обробки даних і складається із взаємопов'язаних елементів для обробки з використанням систем вводу і виводу. Зазначені елементи поєднуються у шари, які також зв’язані між собою за допомогою зв’язків, що носять назву вагових коефіцієнтів. Загальна інформація сумується та порівнюється в обчислювальному центрі із заданим пороговим значенням. Загальний вид структури ШНМ представлено на рис. 4.1 [37].

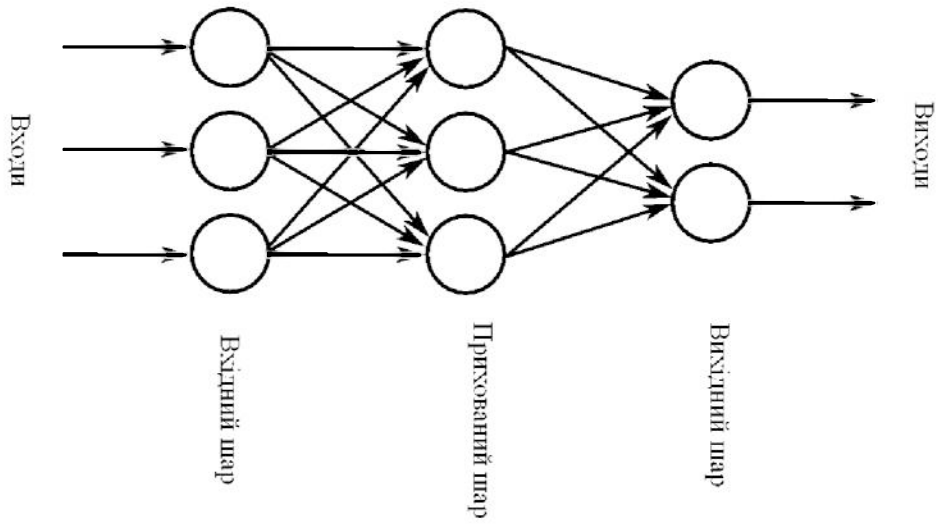


Рисунок 4.1 – Структура штучної нейронної мережі

ШНМ можуть у процесі роботи здатні навчатися на своїй власній поведінці та здатні покращувати ефективність своєї роботи. Сама

структура ШНМ може бути реалізована у різний спосіб, а принципи самоорганізації реалізуються пошарово [37].

Методи моделей та машинного навчання на основі нечіткої логіки багатошарової нейронної мережі оперують опорними векторами, що визначають різноманітні діагностичні стани – короткі замикання у статорних і роторних обмотках, перевищення припустимих меж навантаження, відхилення частотних характеристик та вихід з синхронізму [38].

Постійний моніторинг за різних умов роботи машини з метою прийняття рішень по технічному обслуговуванню вимагає створення інтелектуальної системи визначення стану електричної машини, яка видає достатню кількість знань про поведінку двигуна та наявні ознаки передвідмов системи електроприводу. Для збирання зазначеної інформації необхідним є створення моделі, що має властивості масштабування до «розмірів» реального об’єкта.

При створенні системи інтелектуальної діагностики необхідно зважати на те, що один і той же стан системи і наявна у ній несправність продукує різноманітні сигнали про наявність несправності у залежності від поточного стану системи, параметрів джерела живлення, умов роботи двигуна та умов навантаження. Тому модель повинна адаптуватися до визначених станів та усувати вплив зазначених факторів на адекватність оцінки наявної несправності і розробки універсальних методів їх діагностування [38].

Сама модель будується на отриманні струмових сигналів від діагностичних датчиків, що контролюють різноманітні несправності (міжвиткові короткі замикання, зниження опору, підвищення навантаження та інше).

Переваги систем моніторингу стану на основі будови дерева рішень полягають в тому, що створені алгоритмічні правила, можна легко змінювати та використовувати для інтерпретації отриманих знань.

Зазначене дерево рішень складається з певної кількості кореневих вузлів та ланок, що з'єднують їх між собою. Розрізняють вхідні, внутрішні та вихідні вузли. Головна мета цього способу полягає у тому, щоб побудувати оптимальне дерево рішень, яке мінімізує помилки пошуку розв'язання поставленої проблеми [39].

Для створення дерева рішень необхідно мати набір питань, відповіді на які визначають наступний набір питань. Масив питань формує деревоподібну структура та залежності для обчислень у внутрішніх вузлах, які розподіляють ймовірності появи тих чи інших значень контрольованої величини [40]:

$$\Omega = 1 - \sum_{i=1}^{n} p\,(\mathrm{t}). \tag{4.1}$$

де n – кількість вузлів, шт.

$p(t)$ – вірогідності відмови, що визначаються станами контрольованої величини (ваговий коефіцієнт).

Вагові коефіцієнти у системах розпізнавання слугують для фільтрації окремих зовнішніх впливів за правилами, що задають вхідні параметри, – виокремлюються ті впливи, що мають суттєвий вплив на виникнення несправності. Вважається, що несправність впливає на протікання процесів у створеній моделі, змінює форми коливальних сигналів напруг і струмів. Однак зазначимо, що сигнатури двох генераторів істотно розрізняються. При цьому необхідно визначити і виокремити вплив векторів перешкод у системі, ідентифікуючи його як «шум» [41].

Створення зазначених моделей дозволить обслуговуючому персоналу мати інформацію про поточний стан синхронних двигунів у складі електроприводів та визначати завдання та необхідність здійснення дій з регулювання з метою підвищення надійності їх роботи.

З огляду на поставлені задачі складемо систем диференційних рівнянь, які описують роботу системи, що розглядається.

Напруги джерела живлення синхронного двигуна незалежного збудження при симетричних параметрах роботи матимуть вигляд [42]:

$$\begin{cases} U_a = U_m \cos(\omega t + 0) \\ U_b = U_m \cos(\omega t - 120°) \\ U_c = U_m \cos(\omega t + 120°) \end{cases} \quad (4.2)$$

У разі несиметричності напруг у визначених вузлах, доцільним є розкладання перших на напруги прямої та зворотної послідовності, що можна записати наступним чином [42]:

$$\begin{cases} U_{\Delta a} = U_{\Delta ma} \cos(\omega t + \varphi_a) \\ U_{\Delta b} = U_{\Delta mb} \cos(\omega t + \varphi_b) \\ U_{\Delta c} = U_{\Delta mc} \cos(\omega t + \varphi_c) \end{cases} \quad (4.3)$$

де $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ – початкові фази відповідної напруги.

Додатковими умовами до рівнянь (4.3) є наступні [42]:

$$U_{\Delta a} \neq U_{\Delta b} \neq U_{\Delta c},\ U_{\Delta a} + U_{\Delta b} + U_{\Delta c} = 0 \quad (4.4)$$

Напруги на шинах живлячого трансформатора можна записати [42]:

$$\begin{cases} U_{\Delta a} = U_a - L_{\text{тр.}a} \sum_{j=1}^{n} \text{p} i_{\Delta a}^j - R_{\text{тр.}a} \sum_{j=1}^{n} i_{\Delta a}^j \\ U_{\Delta b} = U_b - L_{\text{тр.}b} \sum_{j=1}^{n} \text{p} i_{\Delta b}^j - R_{\text{тр.}b} \sum_{j=1}^{n} i_{\Delta b}^j \\ U_{\Delta c} = U_c - L_{\text{тр.}c} \sum_{j=1}^{n} \text{p} i_{\Delta c}^j - R_{\text{тр.}c} \sum_{j=1}^{n} i_{\Delta c}^j \end{cases} \quad (4.5)$$

де $L_{\text{тр}.i}$ – індуктивний опір живлячого трансформатора та лінії від нього, Ом,

$R_{\text{тр}.i}$ – активний опір живлячого трансформатора та лінії від нього, Ом,

p – число пар полюсів, шт.

$i_{\Delta i}^{j}$ – фазний струм, А.

Диференційні рівняння фаз для статорних і роторних обмоток двигунів мають вигляд:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathrm{p}i_{sa} \\ \mathrm{p}i_{sb} \\ \mathrm{p}i_{sc} \\ \mathrm{p}i_{r1}^{m} \\ \mathrm{p}i_{r2}^{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s^{-1} & L_{s-r1}^{-1} & L_{s-r2}^{-1} \\ L_{r1-s}^{-1} & L_{r1}^{-1} & L_{r1-r2}^{-1} \\ L_{r2-s}^{-1} & L_{r2-r1}^{-1} & L_{r2}^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{\Delta a} \\ U_{\Delta b} \\ U_{\Delta c} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_s^{-1} & L_{s-r1}^{-1} & L_{s-r2}^{-1} \\ L_{r1-s}^{-1} & L_{r1}^{-1} & L_{r1-r2}^{-1} \\ L_{r2-s}^{-1} & L_{r2-r1}^{-1} & L_{r2}^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{sa} \\ R_{sa} \\ R_{sa} \\ R_{r1}^{m} \\ R_{r2}^{m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sa} \\ i_{sa} \\ i_{r1}^{m} \\ i_{r2}^{m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega \\ \omega \\ \omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sa} \\ i_{sa} \\ i_{r1}^{m} \\ i_{r2}^{m} \end{bmatrix} \\ p\omega = \frac{1}{J}(M_e - M_o) \end{cases} \quad (4.6)$$

де i_{si} – статорні струми двигуна, А,

$\mathrm{i}_{ri}^{(m)}$ – роторні струми двигуна, А,

L_s^{-1} – зворотна матриця індуктивності обмотки статора:

$$L_s^{-1} = \begin{bmatrix} k_s & l_s & l_s \\ l_s & k_s & l_s \\ l_s & l_s & k_s \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

L_{ri}^{-1} – зворотна матриця індуктивності обмоток ротора,

L_{s-ri}^{-1} – зворотна матриця взаємної індукції між статором і ротором,

$\mathrm{L}_{r(i\pm1)-r(i\mp1)}^{-1}$ – зворотна матриця взаємної індукції між обмотками ротора,

R_{si} – активний опір статора, Ом,

$\mathrm{R}_{ri}^{(m)}$ – активний опір ротора, Ом,

ω – кутова швидкість обертання ротора, об/хв.,

M_e – значення електромагнітного моменту двигуна, Н·м [4]:

$$M_e = \frac{3}{2}\bar{\psi}_S \times \bar{i}_S \tag{4.7}$$

M_o – момент опору на двигуні, Н·м,

J – момент інерції приводу, кг·м^2,

$\bar{\psi}_S$ – потокозчеплення, Вб,

$\bar{i}_S$ – узагальнений вектор статорного струму.

За допомогою системи рівнянь (4.6) можна досліджувати режими роботи синхронних двигунів та виконувати його діагностику шляхом реєстрації пульсацій струмів статора і ротора та коливань споживання потужності.

4.2 Складання моделі синхронного двигуна у програмному середовищі Mathcad

Для складання моделі синхронного двигуна необхідно розглянути теорію, яка описує його роботу (рис. 4.2) [43].

Система рівнянь для опису роботи синхронного двигуна у відносних одиницях описує взаємозв’язок між його електричними та магнітними параметрами.

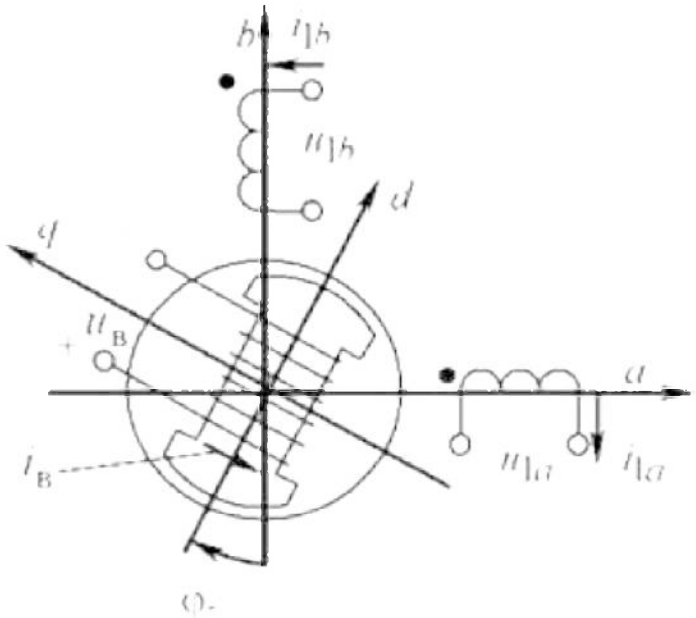


Рисунок 4.2 – Схема синхронного двигуна з явнополюсним ротором

Цей зв'язок можна через потокозчеплення, зміну яких для різних елементів синхронного двигуна можна записати [44]:

$$\begin{cases} \dfrac{d\psi_d}{dt} = U_d - i_d r_a + \omega\psi_q, \\ \dfrac{d\psi_q}{dt} = U_q - i_q r_a - \omega\psi_d, \\ \dfrac{d\psi_f}{dt} = U_f - i_f r_f, \\ \dfrac{d\psi_{ed}}{dt} = -i_{ed} r_{ed}, \\ \dfrac{d\psi_{eq}}{dt} = -i_{eq} r_{eq}. \end{cases} \tag{4.8}$$

де U_d, U_q – значення напруг ротора у повздовжній та поперечній осях,

i_d, i_q – значення струмів ротора у повздовжній та поперечній осях,

ω – колова швидкість обертання магнітного поля,

i_{ed}, i_{eq} – значення струмів у демпферній обмотці ротора у повздовжній та поперечній осях,

i_f – значення струму в обмотці збудження.

ψ_d, ψ_q – значення потокозчеплень у повздовжній та поперечній осях:

$$\begin{cases} \psi_d = i_d x_d + i_f x_{ad} + i_{ed} x_{ad}, \\ \psi_q = i_q x_{q+} i_{eq} x_{aq}, \\ \psi_f = i_d x_{ad} + i_f x_f + i_{ed} x_{ad}, \\ \psi_{ed} = i_d x_{ad} + i_f x_{ad} + i_{ed} x_{ed}, \\ \psi_{eq} = i_q x_{aq+} i_{eq} x_{eq}. \end{cases} \quad (4.9)$$

Електромагнітний момент синхронного двигуна визначається за залежністю:

$$M = \left(\psi_d i_q - \psi_q i_d\right). \quad (4.10)$$

Рівняння руху буде визначатися:

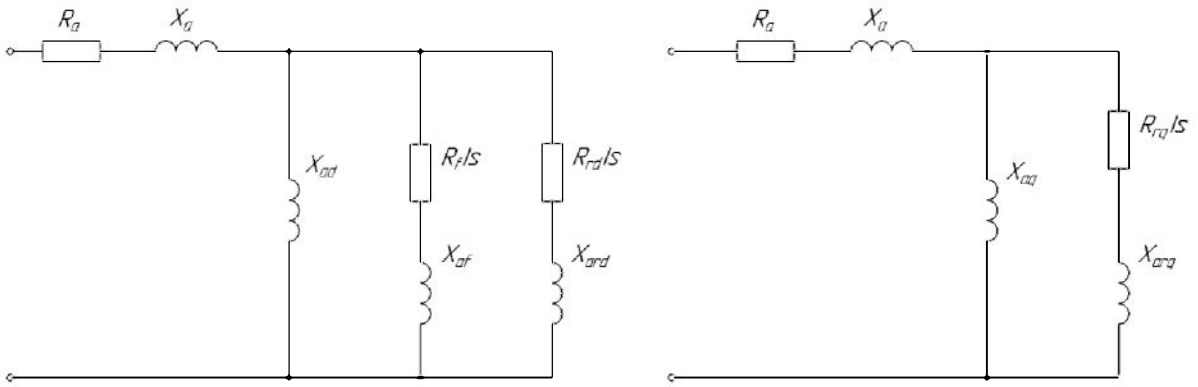
$$H_j \frac{d\omega}{dt} = M - M_c. \quad (4.11)$$

де M_c – момент обумовлений опором навантаження.

Зв'язок між струмами і потокозчепленнями можна визначити наступним чином [44]:

$$\begin{cases} i_q = \dfrac{\psi_q}{x_{2q}} - \dfrac{\psi_{eq}}{x_{2qeq}}, \\ i_d = \dfrac{\psi_d}{x_{2d}} - \dfrac{\psi_f}{x_{2df}} + \dfrac{\psi_{ed}}{x_{2ded}}, \\ i_f = -\dfrac{\psi_d}{x_{2df}} + \dfrac{\psi_f}{x_{2f}} - \dfrac{\psi_{ed}}{x_{2def}}, \\ i_{ed} = -\dfrac{\psi_d}{x_{2ded}} - \dfrac{\psi_f}{x_{2fed}} + \dfrac{\psi_{ed}}{x_{2ed}}, \\ i_{eq} = -\dfrac{\psi_q}{x_{2qeq}} + \dfrac{\psi_{eq}}{x_{2eq}} \end{cases} \quad (4.12)$$

Розрахунковими даними для визначення роботи синхронних двигунів є значення активних та реактивних опорів, що імітують обмотки статора і ротора. Для задоволення цієї потреби необхідно скласти заступні схеми двигуна за напрямками обраних осей (рис. 4.3) [45].



вісь d *вісь q*

Рисунок 4.3 − Схема заміщення синхронного двигуна вздовж обраних осей

Залежності опорів за наведеною схемою та у відповідності до формул (4.8) – (4.12) можна записати наступним чином:

Значення індуктивних опорів статора у повздовжній (x_d) та поперечній (x_q) осях визначаються за формулою [45]:

$$x_d = x_q, \tag{4.13}$$

Значення відносних індуктивних понадперехідних опорів статора у повздовжній (x_d'') та поперечній (x_q'') осях визначаються за формулою [45]:

$$x_d'' = x_q'' \tag{4.14}$$

Значення індуктивних опорів демпферної обмотки ротора у повздовжній (x_{ed}) та поперечній (x_{eq}) осях визначаються за формулою [45]:

$$\begin{cases} x_{ed} = x_{eq}, \\ x_{eq} = x_{aq} + x_{ceq}, \end{cases} \tag{4.15}$$

Значення індуктивних опорів розсіювання демпферної обмотки ротора у повздовжній (x_{ced}) та поперечній (x_{ceq}) осях визначаються за формулою [45]:

$$x_{ceq} = x_{ced} = \frac{x_{ad} \cdot \left(x_q'' - x_c\right)}{x_{aq} - x_d'' + x_c} \tag{4.16}$$

де x_c – індуктивний опір розсіювання,

x_{ad}, x_{aq} — взаємні індуктивні опори статорної обмотки та ротора у повздовжній та поперечній осях [45]:

$$x_{ad} = x_{aq} = x_d - x_c \tag{4.17}$$

До рівнянь (4.13) – (4.17) необхідно визначити додаткові параметри опорів, що характеризують роботу синхронного двигуна [45]:

$$\begin{cases} x_{2d} = \dfrac{x_d x_f x_{ed} - x_{ad}^2\left(x_d + x_f + x_{ed}\right) + 2x_{ad}^3}{x_f x_{ed} - x_{ad}^2}, \\ x_{2f} = \dfrac{x_d x_f x_{ed} - x_{ad}^2\left(x_d + x_f + x_{ed}\right) + 2x_{ad}^3}{x_d x_{ed} - x_{ad}^2}, \\ x_{2q} = \dfrac{x_q x_{eq} - x_{aq}^2}{x_{eq}}. \end{cases} \tag{4.18}$$

$$\begin{cases} x_{2ed} = \dfrac{x_d x_f x_{ed} - x_{ad}^2\left(x_d + x_f + x_{ed}\right) + 2x_{ad}^3}{x_f x_d - x_{ad}^2}, \\ x_{2df} = \dfrac{x_d x_f x_{ed} - x_{ad}^2\left(x_d + x_f + x_{ed}\right) + 2x_{ad}^3}{x_{ad} x_{ed} - x_{ad}^2}, \\ x_{2eq} = \dfrac{x_q x_{eq} - x_{aq}^2}{x_q}. \end{cases} \tag{4.19}$$

$$\begin{cases} x_{2ded} = \dfrac{x_d x_f x_{ed} - x_{ad}^2\left(x_d + x_f + x_{ed}\right) + 2x_{ad}^3}{x_f x_{ad} - x_{ad}^2}, \\ x_{2fed} = \dfrac{x_d x_f x_{ed} - x_{ad}^2\left(x_d + x_f + x_{ed}\right) + 2x_{ad}^3}{x_{ad} x_d - x_{ad}^2}, \\ x_{2eq} = \dfrac{x_q x_{eq} - x_{aq}^2}{x_{aq}}. \end{cases} \tag{4.20}$$

Рівняння (4.13) – (4.20) є вихідними даними для розв'язання диференційного рівняннями, що описує роботу синхронного двигуна:

$$D(t, Y) := \begin{bmatrix} \cos\left(t - Y_6\right) - rd \cdot \left[\left(\dfrac{Y_0}{x2d} - \dfrac{Y_2}{x2df}\right) + \dfrac{Y_3}{x2ded}\right] + Y_1 \cdot Y_5 \\ \sin\left(t - Y_6\right) - rq \cdot \left(\dfrac{Y_1}{x2q} - \dfrac{Y_4}{x2qeq}\right) - Y_0 \cdot Y_5 \\ Uf1 - rf1 \cdot \left(\dfrac{Y_0}{-x2df} + \dfrac{Y_2}{x2f} - \dfrac{Y_3}{x2fed}\right) \\ -red \cdot \left[\dfrac{(-Y)_0}{-x2ded} - \dfrac{Y_2}{x2fed} + \dfrac{Y_3}{x2ed}\right] \\ -req \cdot \left(\dfrac{Y_1}{-x2qeq} + \dfrac{Y_4}{x2ed}\right) \\ \dfrac{1}{Hj} \cdot \left[\left[Y_0 \cdot \left(\dfrac{Y_1}{x2q} - \dfrac{Y_4}{x2qeq}\right) - Y_1 \cdot \left(\dfrac{Y_0}{x2d} - \dfrac{Y_2}{x2df} + \dfrac{Y_3}{x2ded}\right)\right] - \left(Y_5\right)^2\right] \\ Y_5 \end{bmatrix} \tag{4.21}$$

Розв'язання даного диференційного рівняння виконаємо у програмному середовищі Mathcad [46, 47].

Розрахунки можна представити у вигляді графічних залежностей, що відображають протікання перехідних процесів при прямому пуску синхронного двигуна. На рис. 4.4 наведено графік залежності струму у обмотці збудження впродовж часу.

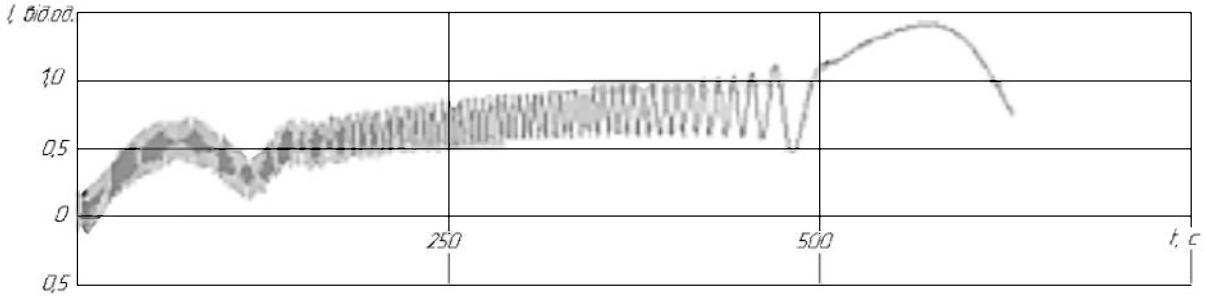


Рисунок 4.4 – Графік залежності струму у обмотці збудження

На рис. 4.5 наведено графік залежності крутного моменту від швидкості обертання ротора двигуна.

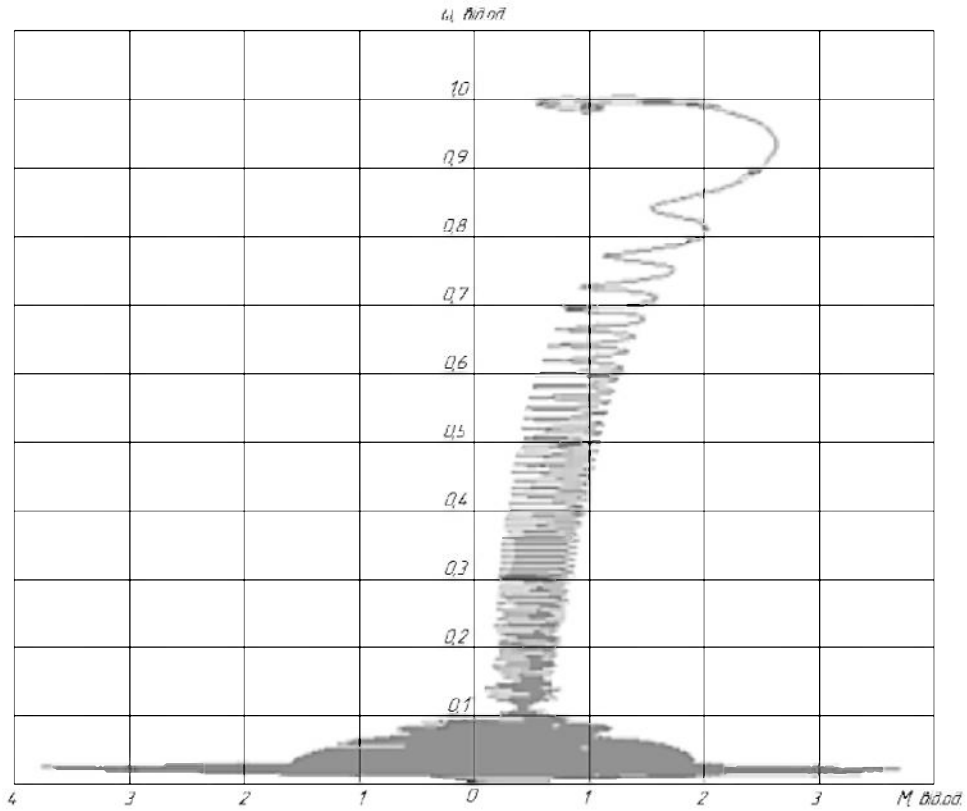


Рисунок 4.5 – Графік залежності крутного моменту від швидкості обертання ротора двигуна

На рис. 4.6 наведено графік залежності зміни електромагнітного моменту впродовж часу.

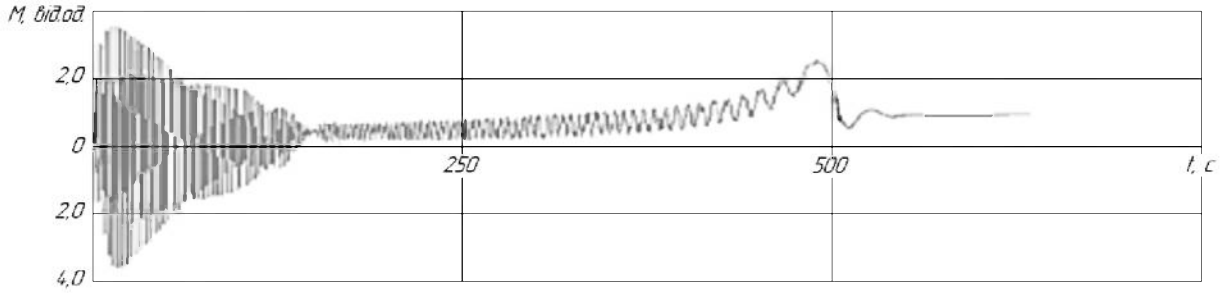


Рисунок 4.6 – Графік зміни електромагнітного моменту

На рис. 4.7 приведено графік зміни струму статора впродовж часу.

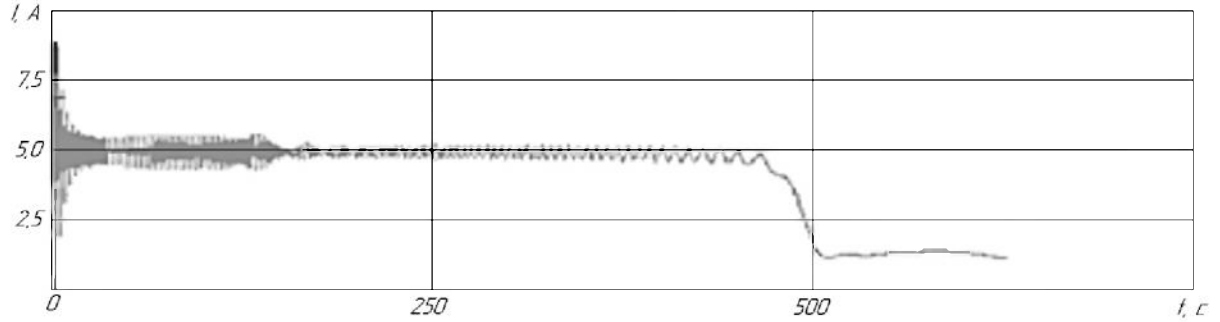


Рисунок 4.7 – Графік зміни струму статора

На рис. 4.8 приведено графік зміни швидкості обертання ротора впродовж часу.

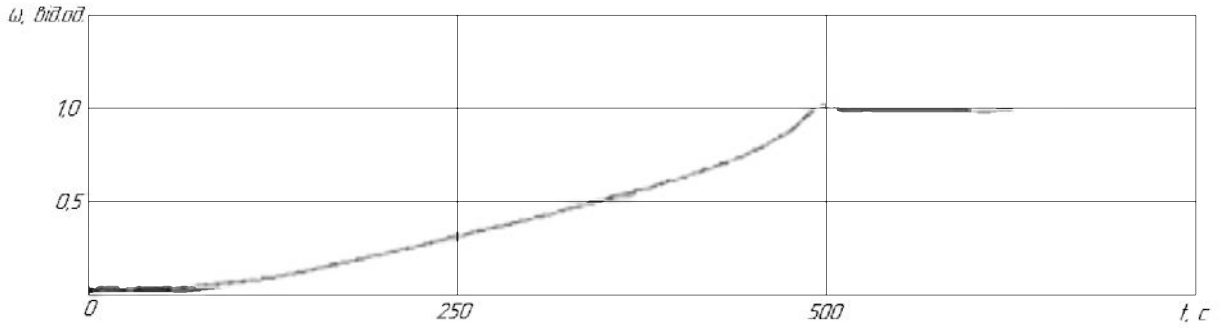


Рисунок 4.8 – Графік зміни швидкості обертання ротора

4.3 Складання моделі синхронного двигуна у програмному середовищі Matlab

Для складання моделі роботи синхронного двигуна у програмному середовищі Matlab необхідно скористатися стандартними блоками цієї програми, серед яких: Three-Phase Programmable Voltage Source, Synchronous Machine SI Fundamental, Bus Creator, Scope, Display, Step та деякі інші (рис. 4.9) [48].

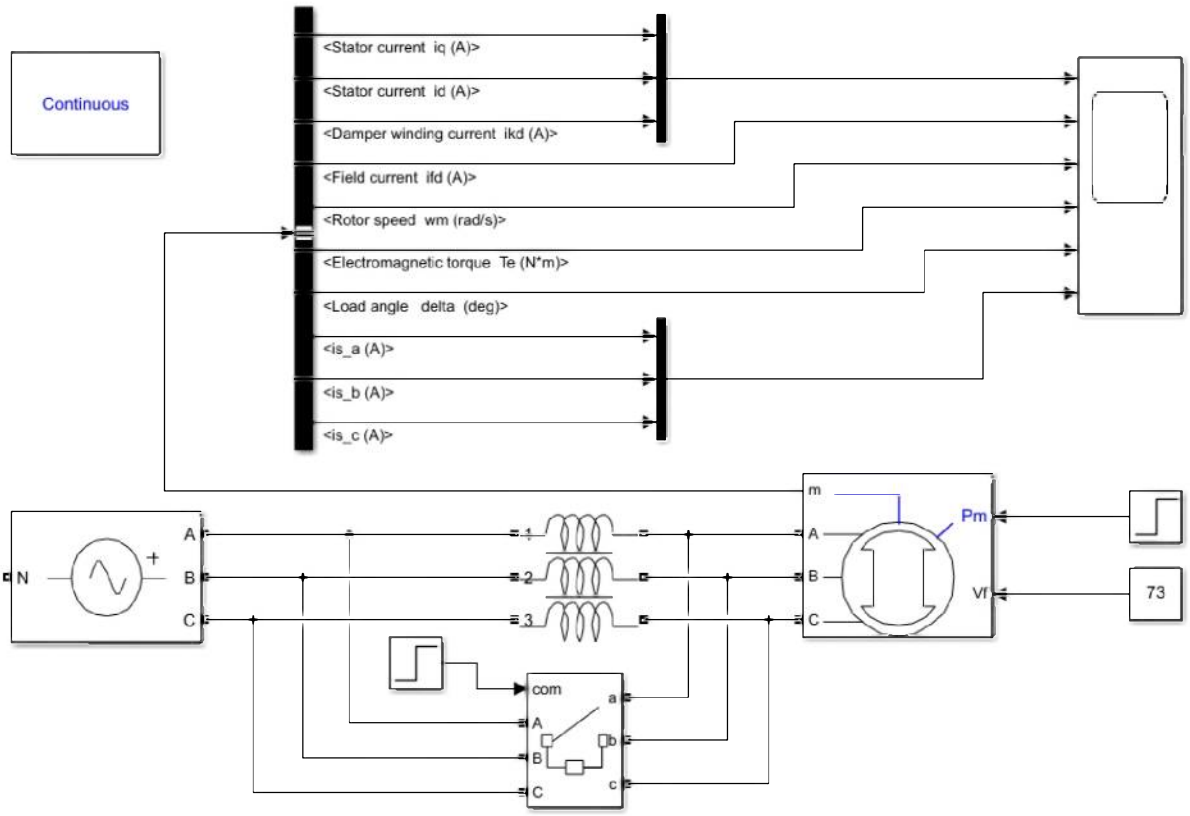


Рисунок 4.9 – Модель роботи синхронного двигуна у програмному середовищі Matlab

На рис. 4.10 зображено графік зміни струму статора впродовж часу.

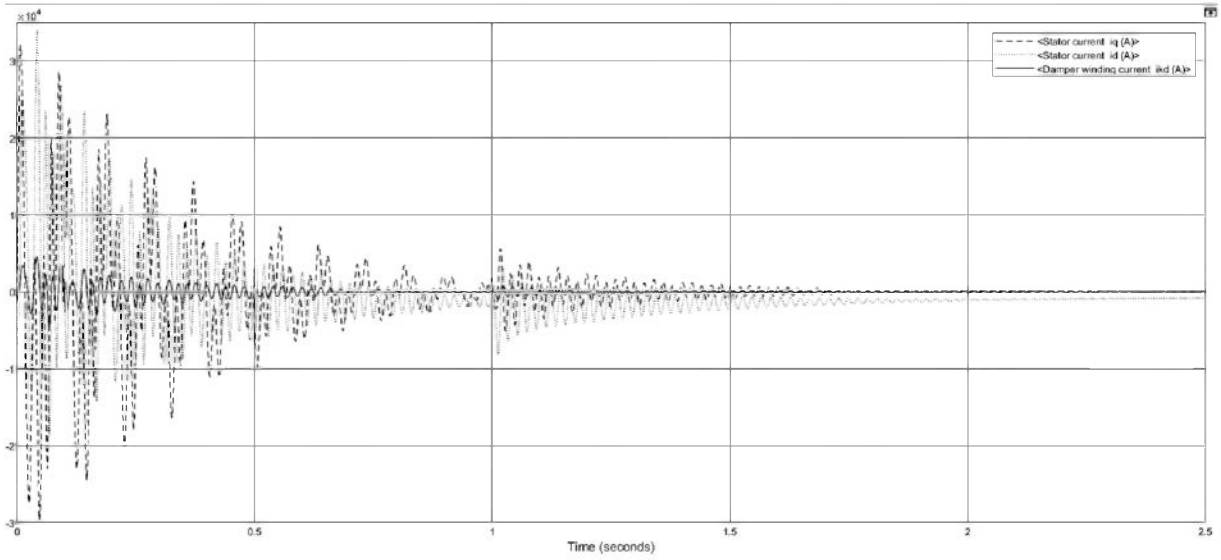


Рисунок 4.10 – Графік зміни струму статора

На рис. 4.11 зображено графік зміни кутової швидкості ротора впродовж часу.

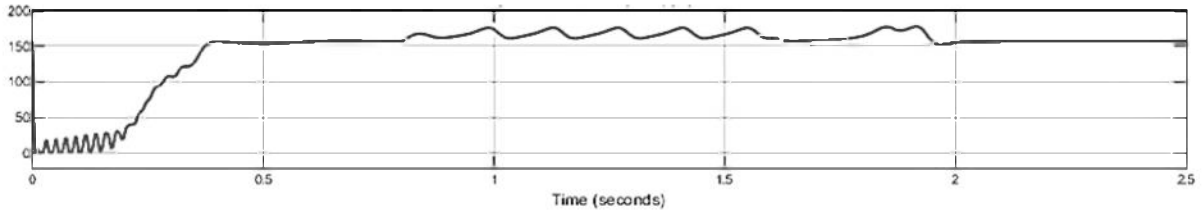


Рисунок 4.11 – Графік зміни кутової швидкості ротора

На рис. 4.12 зображено графік зміни струму самозбудження впродовж часу.

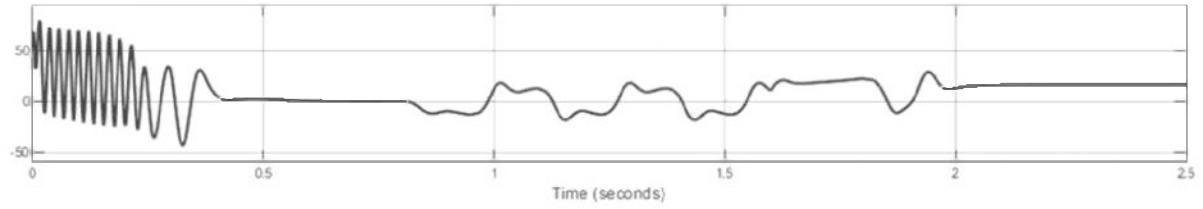


Рисунок 4.12 – Графік зміни струму самозбудження

На рис. 4.13 зображено графік зміни коефіцієнта потужності синхронного двигуна впродовж часу.

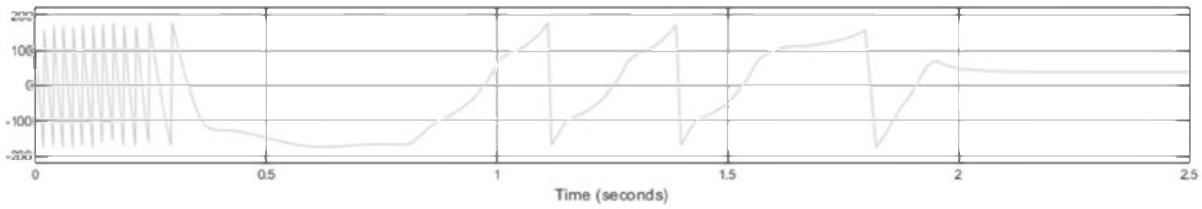


Рисунок 4.13 – Графік зміни коефіцієнта потужності синхронного двигуна

Аналіз графіків дозволяє визначити окремі стації пуску синхронного двигуна:

– на ділянці від 0 до 0,4 с відбувається розгін синхронного двигуна у асинхронному режимі,

– на ділянці від 0,4 с до 0,8 с відбувається синхронізація швидкості обертання,

– на ділянці від 0,8 с до 1,6 с до синхронного двигуна підключається навантаження за відсутності струму збудження – струм статора при цьому суттєво зростає,

– на ділянці від 1,6 с до 2 с синхронний двигун знову входить у режим синхронізму,

– на ділянці від 2 с до 2,5 с бачимо номінальний режим роботи синхронного двигуна.

Результати моделювання роботи синхронного двигуна показують коректність складеної моделі.

ВИСНОВКИ

У даній роботі були вирішені задачі з аналізу режимів роботи синхронного двигуна, вибір його геометричних розмірів та електричних, магнітних та механічних параметрів роботи. Застосовані алгебраїчні методи розрахунків дозволяють вибрати конструктивні параметри синхронних двигунів з огляду на їх подальше виготовлення та можливість здійснення моделювання роботи.

Було запропоновано до застосування інтелектуальна система розпізнавання поведінки електричної машини для порівняння вихідних і заданих параметрів сигналів.

Визначені до застосування прикладні програми дозволяють реалізувати найкращі принципи дослідження електричних машин, реалізувати наявні нелінійні зв'язки, фіксувати розраховані показники та розпізнавати закономірності взаємозв'язків у досліджуваній системі.

Побудовані моделі визначають певні межі роботи синхронного двигуна та визначають можливість досягнення заданих станів у вибраному технологічному процесі.

Результати моделювання показало, що кореляція даних є коректною та показує високу точність розрахунків.

У роботі в програмному середовищі Mathcad були виконані математичні обчислення математичних рівнянь для знаходження параметрів двигуна. А за допомогою програмного забезпечення Matlab було проаналізовано та представлено у графічному вигляді принципи функціонування роботи синхронного двигуна. Аналіз роботи двигуна визначає можливості порушення збудження двигуна під час роботи з навантаженням, що призводить до стрибків значень струму у статор них обмотках у кілька разів і може призвести до виходу двигуна з ладу при досить тривалій роботі у цьому режимі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студентов высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.

2. Куликов Ю. А. Переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие / Ю. А. Куликов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. – 283 с.

3. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

4. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. - СПб.: Питер, 2010. – 350 с.

5. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ruselectronic.com/magnetic-field/

6. Электрические системы. Электрические сети: учебник для электроэнерг. спец. вузов / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков и др.; под ред. В. А. Веникова, В. А. Строева. – Москва : Высшая школа, 1998. – 511 с.

7. C. Concordia, Synchronous Machines, Theory and Performance, Wiley and Sons, New York, 1971.

8. Elements of Electrical Engineering and Electronics by V.K. Mehta, S. Chand & Co.

9. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.myshared.ru/slide/819360/

10. Кислицын А.Л. Синхронные машины: Учебное пособие по курсу «Электромеханика». – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 108 с.

11. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://biysk-tv.ru/raznoe-2/odnofaznyj-sinxronnyj-dvigatel-princip-dejstviya-sinxronnogo-dvigatelya.html

12. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ppt-online.org/725638

13. Брускин Д.Э., Зорохович А.В., Хвостов В.С. Электрические машины. М.: Высшая школа, 1987.

14. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://studfile.net/preview/3242793/page:32/

15. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://electricalschool.info/main/osnovy/1603-principy-dejjstvija-i-ustrojjstvo.html

16. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 3. Синхронные машины. Учебное пособие для вузов. – Москва: МГАУ, 2008. – 195 с.

17. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://press.ocenin.ru/asinhronnyj-i-sinhronnyj-elektrodvi/

18. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник. – 5-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 2006.

19. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. Под ред. Р.Б.Уманцева. – 9-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1989. – 336 с.

20. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Учеб. для студ. вузов. Л.: Энергия, 1980 − 256 с.

21. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fcore.ac.uk%2Fdownload%2Fpdf%2F187159823.pdf&psig=AOvVaw1g77_QJQ-Pt6KEtK90RbA0&ust=1621261022455000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwixkfaLss7wAhUE_SoKHe5lAKcQjRx6BAgAEAc

22. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://k-a-t.ru/detali_mashin/29-podshipniki_skoljenia-2/index.shtml

23. P. Tavner, L. Ran, J. Penmann, H. Sedding. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machinnes. The Institution of Engineering and Technology. London, UK, 2008.

24. R. Bojoi, F. Farina, F. Profumo and A. Tenconi, “Dual-three phase induction machine drives control – a survey,” CD-ROM Proc. of the 2005 IEEE Int’l Power Elect. Conf., 10 p.

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

26. Епифанов А. П., Епифанов Г. А. Электрические машины: Учебник. - СПб.: Издательство «Лань», 2017. – 300 с.

27. Гольдберг, О. Д. Надежность электрических машин: учеб. для вузов / О. Д. Гольдберг, С. П. Хелемская. – М. : Академия, 2010.

28. Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П., Воробейчик О.С. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 246 с.

29. Про затвердження Порядку проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки. Постанова Кабінету міністрів України №687 від 26.05.2004 р.

30. Черный А.П. Особенности организации и технического обеспечения мониторинга двигателей промышленных электроприводов // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. «Проблемы электропривода. Теория и практика». – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Спец. вып. – С. 353-358.

31. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. Учебное пособие для вузов. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.

32. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.sferaline.ua/product/termostoykiy_provod_petv_2_1_4/

33. Гашимов М. А. Диагностическое исследование электрических неисправностей электро-энергетических машин для задач экспресс-оценки технического состояния в процессе их работы / М. А. Гашимов, Н. К. Рамазанов // Электротехника. − 2006. − № 3. − С. 14−22.

34. Черный А.П. Методология мониторинга электрических двигателей в промышленных сетях // Тр. 5-ой Междунар. конф. «Проблемы электропривода». Харьков: Основа, 1997. – С. 291-294.

35. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике: Науч. пособие / Сивокобыленко В.Ф. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2005. – 350 с.

36. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд., испр. : Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. – 1104 с.

37. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей : Пер. с англ. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2001.

38. Крупенин Н.В., Голубев А.В., Завидей В.И. Новые возможности в диагностике электрических машин //Электричество. − 2011. − № 9. − С. 45−48.

39. Родькин Д.И. Комплексы для экспресс диагностики двигателей переменного тока // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ. – 2003. - №3, Т. 2. – С. 110 – 121.

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

41. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления: Учеб. Пособие для вузов - М.: Высш. шк. 2002. – 183 с.

42. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.

43. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://msd.com.ua/elektricheskij-privod/elektromexanicheskie-svojstva-yavnopolyusnyx-sinxronnyx-dvigatelej/

44. Сивокобыленко В.Ф., Нехме Х.А. Модифицированный метод численного интегрирования уравнений Парка-Горева. Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1981 г. №6, с. 53−60.

45. Кочетков В.П. Основы электропривода: учеб. пособие. / В.П. Кочетков. –2-е изд., испр. – Абакан: Сиб. федер. ун-т; ХТИ – Филиал СФУ, 2007. – 272 с.

46. Чабан В.Й. Математичне моделювання електромеханічних процесів: навч. посіб. / В. Й. Чабан. – Львів: Львівська політехніка, 1997. – 341 с.

47. Дьяконов В.П., VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математичес. моделирование / Владимир Дьяконов. - М.: Солон-Пресс, 2014. − 384 с.

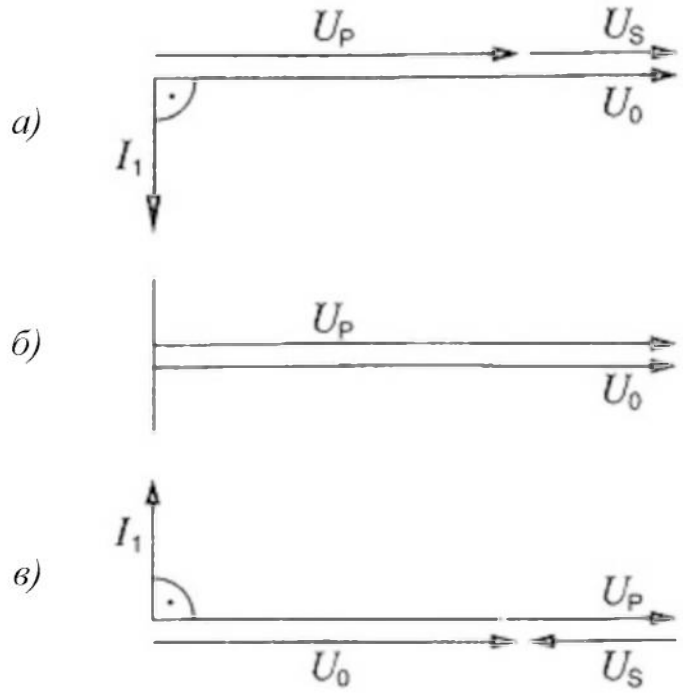
48. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. − 288 с.

49. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Техническое обслуживание, ремонт электрооборудования и сетей промышленных предприятий. – М.: ИРПО; Изд. Центр «Академия», 2000.

50. Правила безопасной эксплуатации энергоустановок. – Киев, 1998. – 142 с.

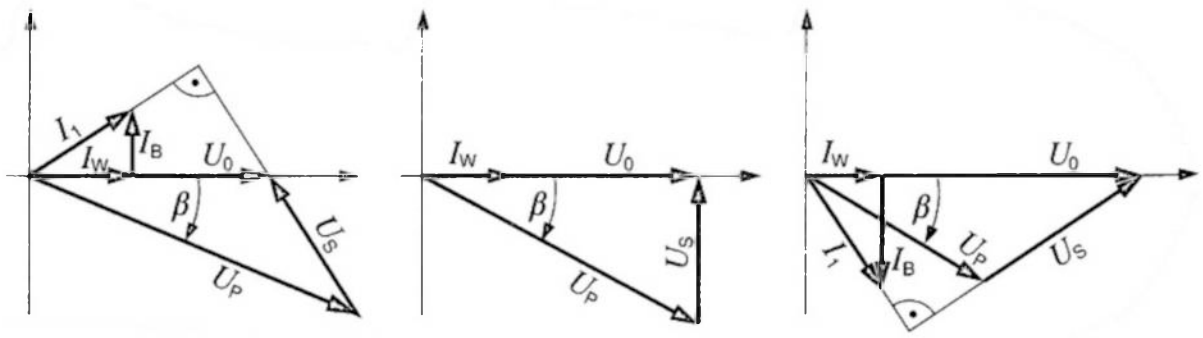
51. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



U_p – напруга на полюсному колесі, В, U_s – реактивна напруга, В, U_0 – напруга живлення, В, I_1 – струм статора, А

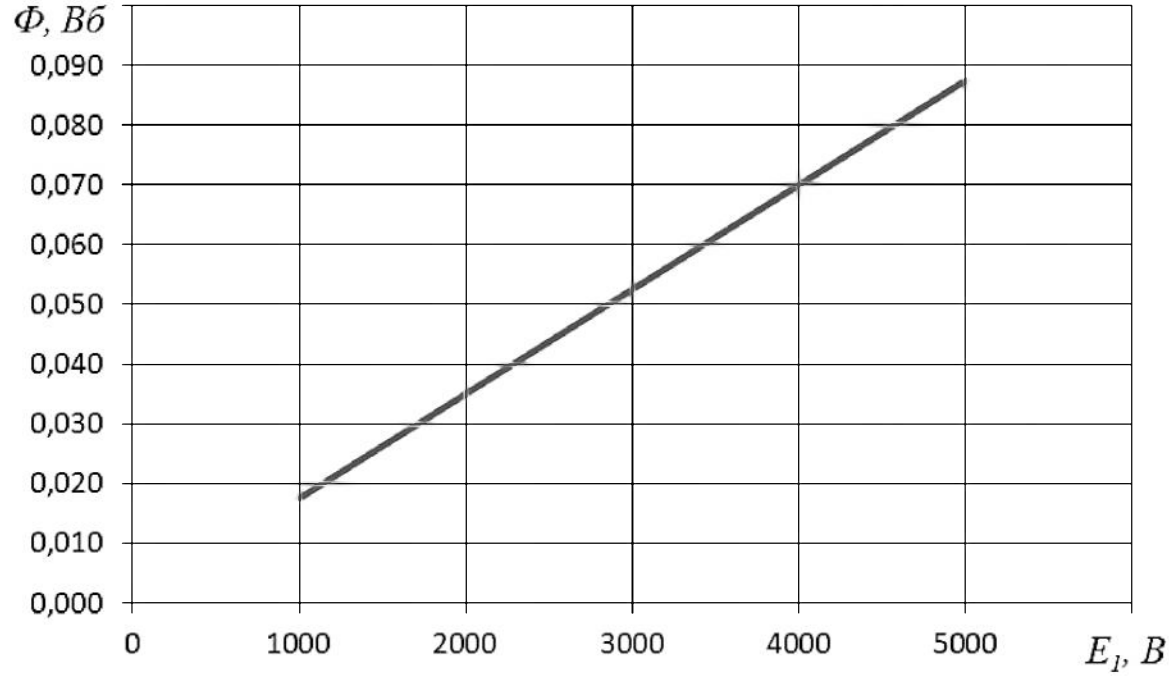
Робочі стани синхронного двигуна: а) недозбудження, б) холостий режим, в) перезбудження



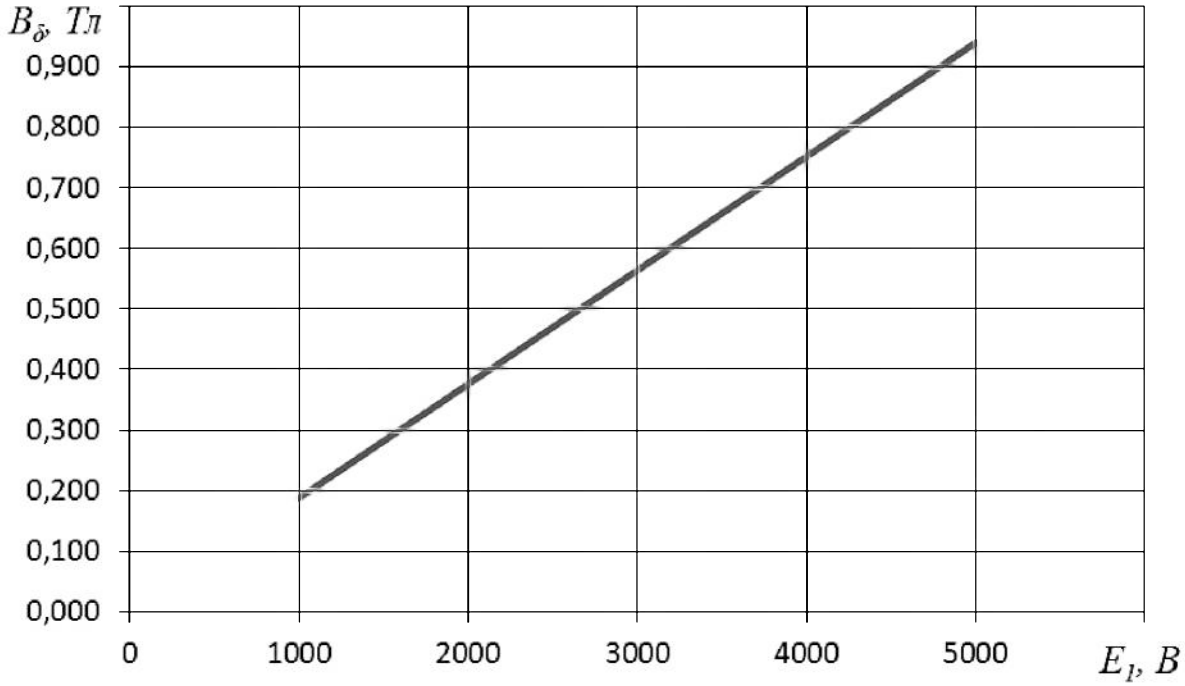
а) *б)* *в)*

U_p – напруга на полюсному колесі, В, U_s – реактивна напруга, В, U_0 – напруга живлення, В, I_1 – струм статора, А, I_w – активний струм, А, $I_в$ – реактивний струм, А, β – кут потужності

Робочі стани синхронного двигуна: а) перезбудження, б) робота у двигунному режимі з поглинанням активної потужності, в) недозбудження



Графік залежності магнітного потоку від значення ЕРС індукції



Графік залежності індукції у повітряному зазорі від значення ЕРС індукції

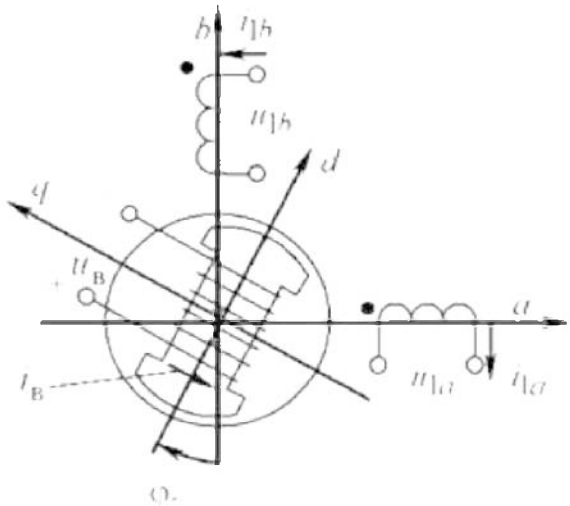
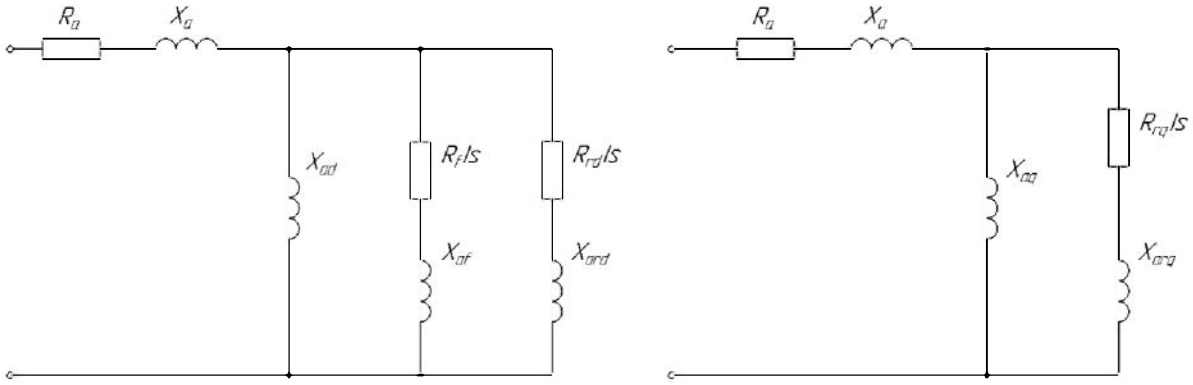


Схема синхронного двигуна з явнополюсним ротором

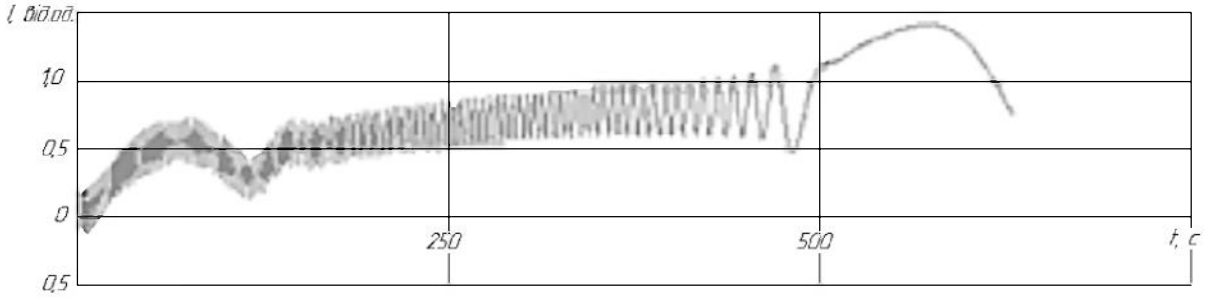


вісь d *вісь q*

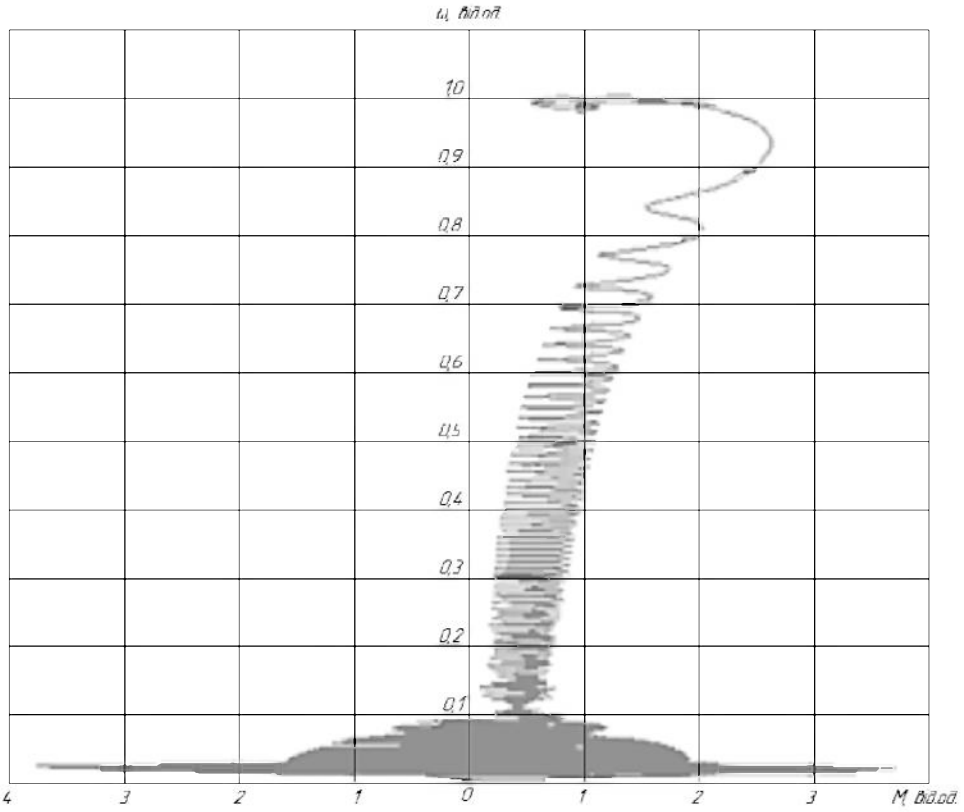
Схема заміщення синхронного двигуна вздовж обраних осей

$$D(t,Y) := \begin{bmatrix} \cos\left(t - Y_6\right) - rd\cdot\left[\left(\frac{Y_0}{x2d} - \frac{Y_2}{x2df}\right) + \frac{Y_3}{x2ded}\right] + Y_1\cdot Y_5 \\ \sin\left(t - Y_6\right) - rq\cdot\left(\frac{Y_1}{x2q} - \frac{Y_4}{x2qeq}\right) - Y_0\cdot Y_5 \\ Ufl - rfl\cdot\left(\frac{Y_0}{-x2df} + \frac{Y_2}{x2f} - \frac{Y_3}{x2fed}\right) \\ -red\cdot\left[\frac{(-Y)_0}{-x2ded} - \frac{Y_2}{x2fed} + \frac{Y_3}{x2ed}\right] \\ -req\cdot\left(\frac{Y_1}{-x2qeq} + \frac{Y_4}{x2ed}\right) \\ \frac{1}{Hj}\cdot\left[\left[Y_0\cdot\left(\frac{Y_1}{x2q} - \frac{Y_4}{x2qeq}\right) - Y_i\cdot\left(\frac{Y_0}{x2d} - \frac{Y_2}{x2df} + \frac{Y_3}{x2ded}\right)\right] - \left(Y_5\right)^2\right] \\ Y_5 \end{bmatrix}$$

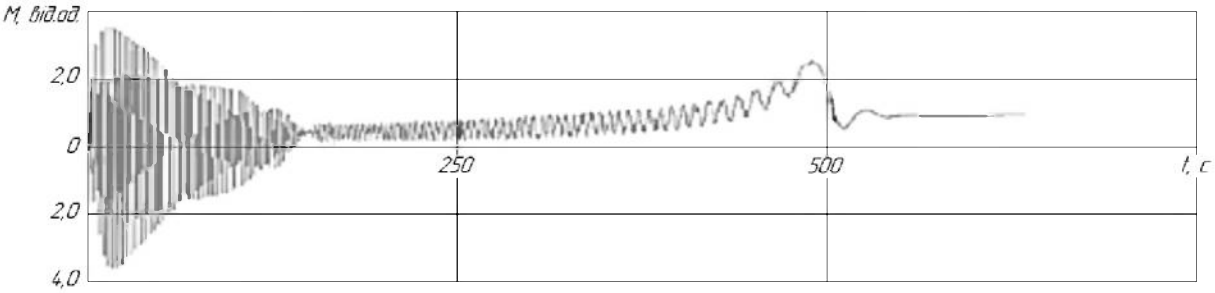
Диференційне рівнянням, що описує роботу синхронного двигуна



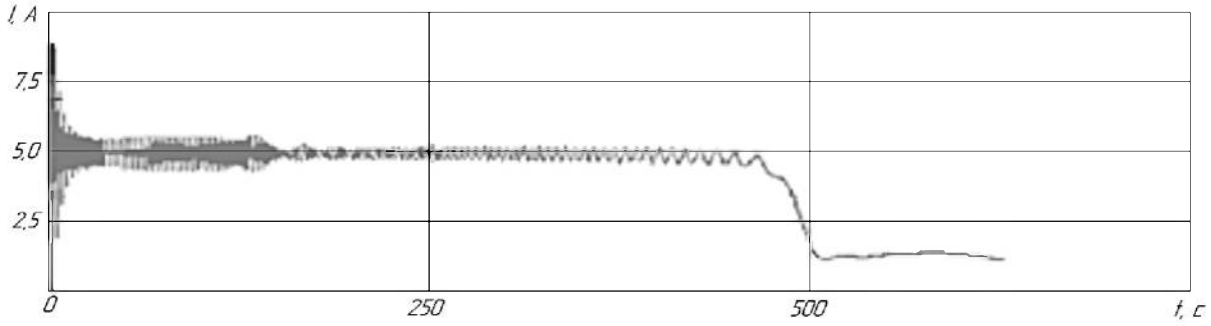
Графік залежності струму у обмотці збудження



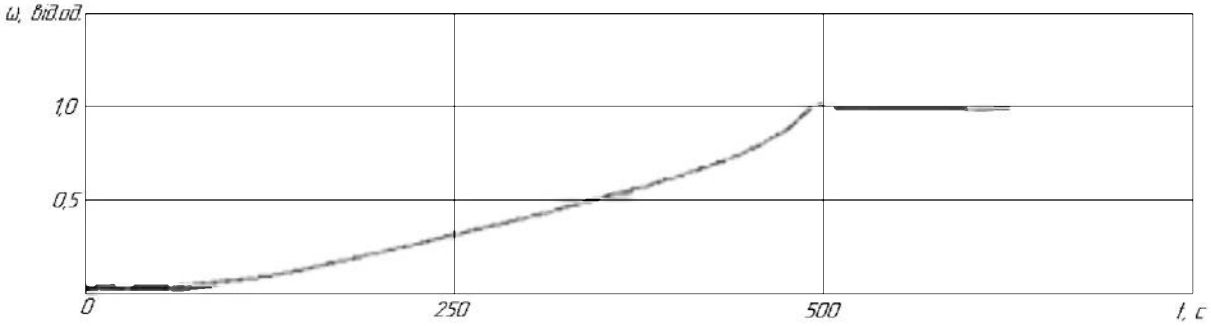
Графік залежності крутного моменту від швидкості обертання ротора двигуна



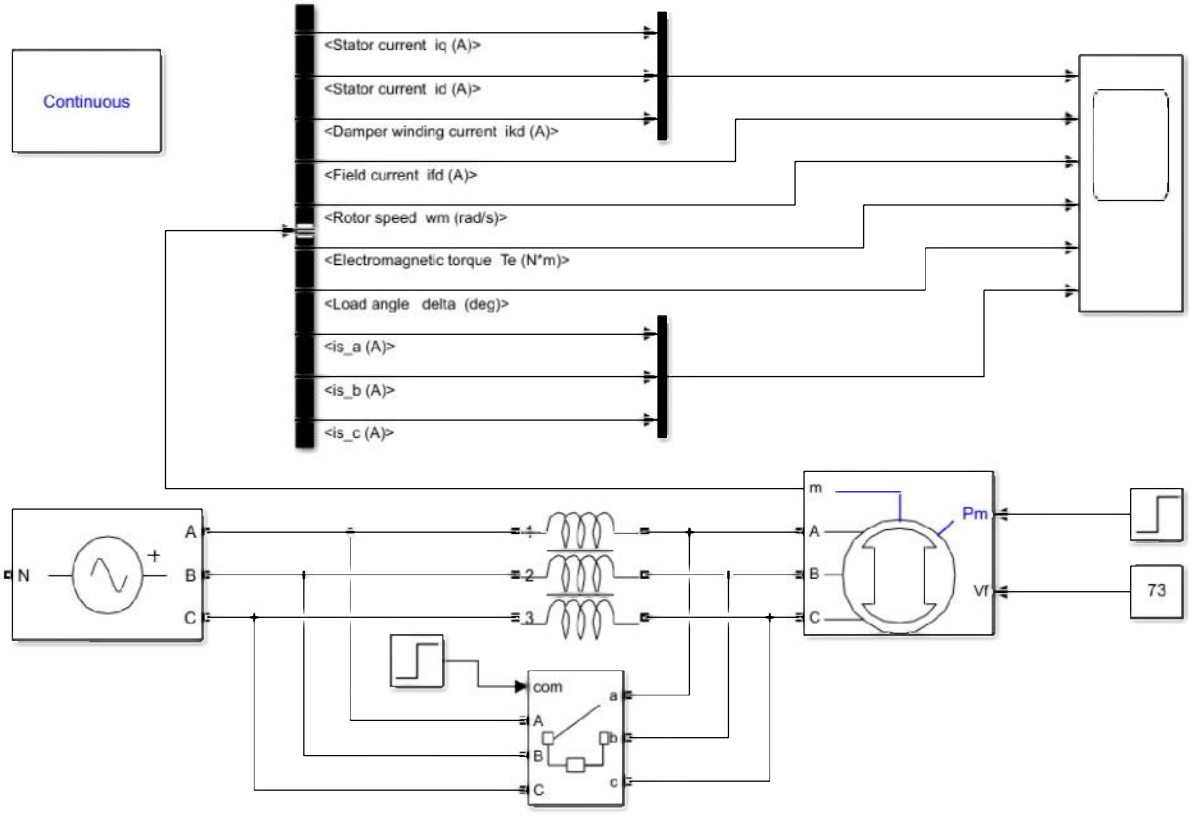
Графік зміни електромагнітного моменту



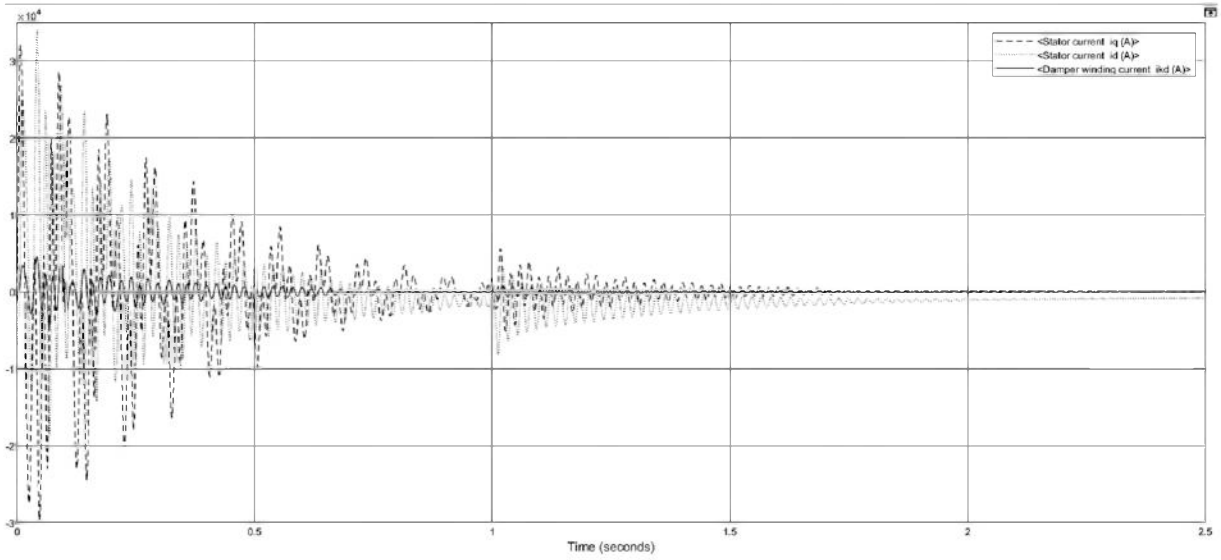
Графік зміни струму статора



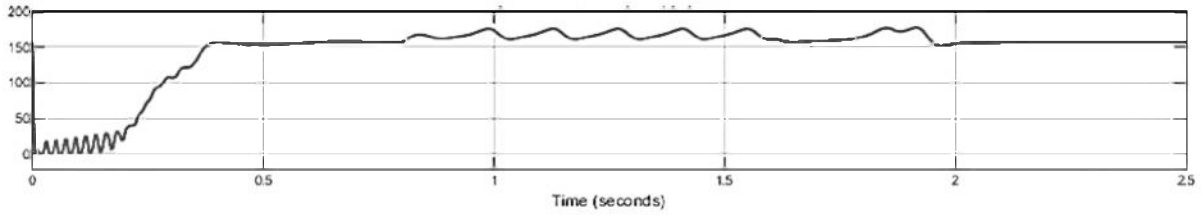
Графік зміни швидкості обертання ротора



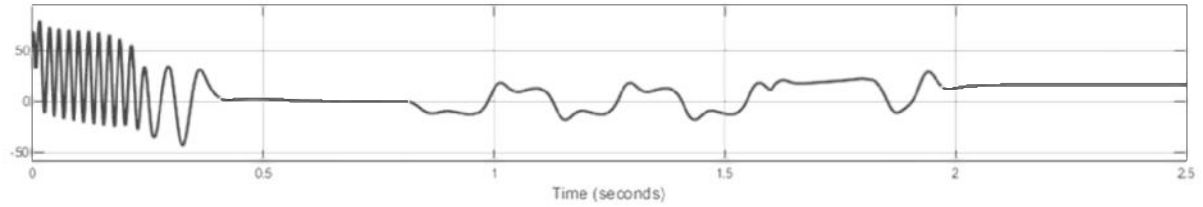
Модель роботи синхронного двигуна у програмному середовищі Matlab



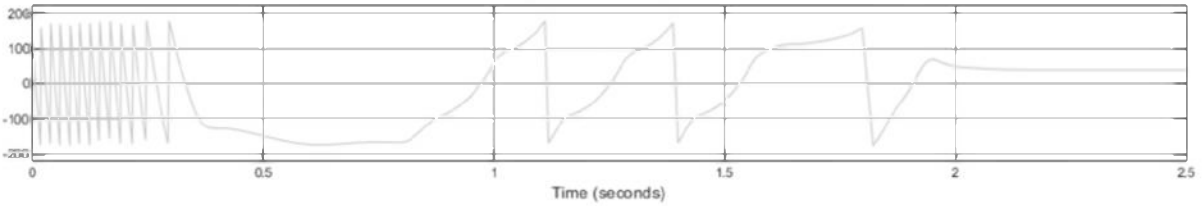
Графік зміни струму статора



Графік зміни кутової швидкості ротора



Графік зміни струму самозбудження



Графік зміни коефіцієнта потужності синхронного двигуна

ДОДАТОК Б. ПРАВИЛА І ВИМОГИ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Б.1 Загальні поняття про електричні машини

Електричні машини – це електромеханічні перетворювачі, у яких здійснюється перетворення електричної енергії в механічну або механічної в електричну. Основна відмінність електричних машин від інших перетворювачів у тім, що вони оборотні, тобто та сама машина може працювати в режимі двигуна, переробляти електричну енергію в механічну, і в режимі генератора, переробляти механічну енергію в електричну.

По виду створюваного в машинах поля, у якому відбувається перетворення енергії, електричні машини підрозділяються на індуктивні, ємнісні й індуктивно-ємнісні. Сучасні широко застосовувані в промисловості й інших галузях народного господарства електричні машини - індуктивні. Перетворення енергії в них здійснюється в магнітному полі. Ємнісні електричні машини, хоча й були винайдені задовго до індуктивних, дотепер не знайшли практичного застосування через складність створення досить потужного електричного поля, у якому відбувається перетворення енергії. Індуктивно-ємнісні машини з'явилися лише в останні роки. Перетворення енергії в них відбувається в електромагнітному полі, і вони поєднують властивості індуктивних і ємнісних електричних машин. У практиці ці машини ще не застосовуються, тому в даній роботі розглядаються тільки індуктивні електричні машини, які надалі будуть називатися просто електричними машинами.

Б.2 Особливості випробувань синхронних двигунів

На стенді заводу-виготовлювача роблять приймально-здавальні випробування кожної машини й приймальні головних (досвідчених) машин.

За діючими стандартами здавальні та приймально-здавальні випробування кожної машини включають: виміру опорів ізоляції обмоток щодо корпуса й між обмотками, ізоляції закладених температурних перетворювачів, обмоток при постійному струмі в практично холодному стані, термометрів опору при постійному струмі в практично холодному стані; випробування ізоляції обмоток щодо корпуса й між обмотками на електричну міцність; визначення характеристики сталого замикання (для гідрогенераторів на місці установки), холостого ходу (для гідрогенераторів на місці установки); випробування при підвищеній частоті обертання (для турбогенераторів); вимір опору ізоляції підшипників, температури масла в підшипниках (для гідрогенераторів на місці установки); перевірку стану ущільнень вала в зборі й визначення витоку повітря при надлишковому тиску не менш номінального тиску водню (для машин з водневим охолодженням).

У приймальні випробування головних (досвідчених) зразків (для гідрогенераторів на місці установки) додатково включають: випробування на короткочасне перевантаження по струму; визначення ККД; випробування на нагрівання; визначення коефіцієнта перекручування синусоїдності кривій напруги, індуктивних опорів і постійних часу обмоток; випробування при ударному струмі короткого замикання, на нагрівання; визначення вібрацій, номінального струму порушення й регулювальної характеристики; вимір рівня шуму; перевірку роботи газо-масляної системи водневого охолодження й визначення витоку водню (для машин з водневим охолодженням); перевірку системи рідинного

охолодження (для машин з рідинним охолодженням). Відповідно до діючих стандартів виконання частини приймальних випробувань можливо на місці установки машин.

Вимір опору ізоляції обмотки статора щодо корпуса машини й між обмотками роблять за допомогою мегомметра не менш чим на 1000 У в практично холодному стані, при якому за температуру обмотки приймають температуру навколишнього середовища.

При вимірі опору ізоляції обмоток генераторів з безпосереднім водяним охолодженням вивід екрана мегомметра з'єднують із водяним колектором, від якого від'єднують зовнішню водяну систему. Опір ізоляції визначають по черзі для кожної галузі обмотки статора, при цьому інші галузі з'єднують із корпусом машини. При визначенні абсолютного значення опору ізоляції виміру проводять не менш чим через 60 з послу додатка напруги до ізоляції. Після виміру опору ізоляцію окремих частин обмотки розряджають на корпус генератора.

Вимір опору обмоток при постійному струмі проводять у практично холодному стані до початку сушіння генератора методом вольтметра й амперметра, при цьому використовують магнітоелектричні прилади класу точності не нижче 0,5. Відлік по приладах роблять одночасно при сталих значеннях обумовлених величин. Опору обмоток знаходять як середнє значення по даним не менш трьох вимірів, які проводять при різних значеннях струму. Точність вимірів у більшій мері залежить від якості контактів у місцях приєднання вимірювальних приладів, при цьому приєднання вольтметра рекомендується робити окремо від фотополяриметрів ланцюгів. Вимір опорів термометрів опору при постійному струмі проводять при температурі навколишнього середовища методом вольтметра й амперметра з погрішністю виміру опору не вище 0,5%. Вимір рекомендується проводити безпосередньо на складанні виводів.

Випробування проводять для кожної з фаз стосовно корпуса й двом іншим заземленим фазам. Для генераторів з водяним охолодженням обмотки статора випробування ізоляції виконують при циркуляції дистиляту. Для випробування рекомендується застосовувати іспитові трансформатори, потужність яких не менш 1 кВ А на 1 кВ напруги.

Іспитову напругу вимірюють на стороні вищої напруги іспитового трансформатора через вимірювальний трансформатор напруги. Для машин з номінальною напругою 13,8 кВ і вище на стороні вищої напруги іспитового трансформатора рекомендується включати захисний розрядник, що настроюється на напругу, рівне 110% іспитового.

Випробування рекомендується починати з напруги не вище 1/3 іспитового, при цьому час, протягом якого виробляється підйом напруги від половинного значення до повного, повинне бути не менш 10 с.

Випробування напругою ізоляції кожної фази обмотки статора стосовно корпуса й двом іншим заземленим фазам у машинах з непрямим охолодженням роблять напругою, рівним 1,6 іспитової напруги частотою 50 Гц.

Іспитова напруга в цих випробуваннях витримують протягом 1 хв, підйом напруги роблять не менш чим трьома щаблями, починаючи з половинної іспитової напруги. На кожному із щаблів вимірюють струм витоку при сталих показаннях приладів. Після випробування вимірюють опори ізоляції мегомметром.

Випробування міжвиткової ізоляції котушкової обмотки статора проводять напругою, рівним 150% номінального, протягом 5 хв, стрижневої обмотки – протягом 1 хв.

Характеристика холостого ходу являє собою залежність напруги обмотки статора від струму порушення при номінальній частоті обертання. Рекомендується робити вимір напруги приладами класом точності не нижче 0,5, при цьому можуть бути використані експлуатаційні трансформатори напруги. Вимір струму порушення можна робити також

приладами класу точності 0,5 із застосуванням шунтів класу 0,1 або 0,2. Під час визначення характеристики контролюють частоту обертання гідрогенератора.

Попередня напруга машини збільшують до 130% номінального. Характеристику знімають при плавному зменшенні струму порушення до нуля. При струмі порушення, рівному нулю, визначають залишкову напругу.

У генераторів, що працюють у блоці із трансформатором, знімається також характеристика холостого ходу блоку.

Одночасно зі зняттям характеристики холостого ходу визначається симетрія напруги, що перебуває по відношенню різниці найбільших і найменшого обмірюваних лінійних напруг до середнього його значення.

Коефіцієнт перекручування синусоїдності кривій напруги знаходять по амплітудах окремих гармонійних тридцятимільйонній кривій напруги, певним при номінальній напрузі при холостому ході генератора. Амплітуди гармонійних вимірюють, як правило, за допомогою аналізатора гармонійних.

Характеристика сталого короткого замикання являє собою залежність струму в обмотці статора від струму порушення генератора при трифазному короткому замиканні. При знятті характеристики вимірюють струми в кожній фазі обмотки статора й струм порушення. Зняття характеристики роблять при плавному підйомі струму статора до номінального значення. Для генераторів, що працюють у блоці із трансформатором, характеристику короткого замикання знімають для замкнутого на коротко трансформатора.

При приймально-здавальних випробуваннях, як правило, визначають лише основні параметри: відношення короткого замикання, реактивність, синхронний індуктивний опір, надперехідні індуктивні опори й, перехідний індуктивний опір індуктивний опір зворотного проходження фаз, постійну часу при розімкнутої і замкнутої обмотках статора.

На місці установки всі турбо-, гідрогенератори й великі синхронні машини піддаються приймально-здавальним випробуванням, які включають крім приймально-здавальних випробувань на стенді заводу-виготовлювача додатково випробування на нагрівання; вимір вібрацій підшипників; перевірку роботи газомасляної системи водневого охолодження й визначення витоку водню (для машин з водневим охолодженням); перевірку роботи системи рідинного охолодження (для машин з рідинним охолодженням).

На місці установки проводять також випробування гідрогенераторів і інших синхронних машин великого габариту, випробування яких на стенді заводу-виготовлювача або не представляються можливими, або вимагають більших витрат на їхнє проведення.

Б.3 Технічне обслуговування й ремонт електричних машин

Відповідно до «Правил технічної експлуатації» в системі планово попереджувальних ремонтів електроустаткування передбачено два види ремонтів: поточний і капітальний.

Поточний ремонт виробляється з періодичністю, установленої з урахуванням місцевих умов, для всіх електродвигунів, що перебувають в експлуатації, у тому числі в холодному або гарячому резерві. Поточний ремонт є основним видом профілактичного ремонту, що підтримує на заданому рівні безвідмовність і довговічність електродвигунів. Цей ремонт роблять без демонтажу двигуна й без повного його розбирання.

Розбирання електродвигуна виробляється в порядку, обумовленому особливостями конструкції електродвигунів. Послідовність розбирання електродвигунів малої й середньої потужності, що мають підшипникові щити з підшипниками кочення або ковзання.

Складання електродвигунів після ремонту. Підшипники кочення напресовують на вал ротора. Кулькові підшипники встановлюють цілком. У роликових підшипників на вал насаджують внутрішнє кільце з тілами кочення. Зовнішнє кільце встановлюють окремо в підшипниковий щит. Зовнішнє кільце встановлюють у посадкове гніздо підшипникового щита з рухливою посадкою (ковзної або руху). Перед складанням посадкові поверхні протирають і змазують. Внутрішні кришки підшипників установлюють на вал до посадки підшипників. Підшипники невеликих розмірів садять на вал у холодному стані. Для посадки використовують монтажну трубу, що передає ударні зусилля запресовування тільки на внутрішнє кільце підшипника. Для кращого центрування ударного посилення трубу постачають мідним кільцем і сферичним оголовком. Внутрішнє кільце підшипника повинне щільно прилягати до заплечнику вала. Зовнішнє кільце повинне легко обертатися вручну. Нероз'ємні вкладиші підшипників ковзання запресовуються в посадкові гнізда підшипникових щитів і фіксуються стопорним гвинтом.

Усунути дефект при зібраному електродвигуні й знятій кришці щіткового пристрою, для чого провести наступні операції й включити електродвигун у мережу. З боку, протилежної щітковому пристрою, прикласти по черзі до кожного контактного кільця ізольовану планку із закріпленої на ній шліфувальною шкуркою й шліфувати поверхня кілець до зникнення слідів плям і дрібних подряпин і одержання чистоти не нижче 8-го класу.

Система планово-попереджувального ремонту передбачає технічне обслуговування, поточний і капітальний ремонти, профілактичні й після ремонтні випробування. У зв'язку з більшою розмаїтістю електричних машин, що перебувають в експлуатації, неможливо дати повний перелік робіт з кожного із тридцятилітніх цієї системи (крім випробувань), тому обмежимося типовими обсягами робіт.

Перед ремонтом проводяться випробування електричних машин для виявлення й наступного усунення дефектів.

Типовим обсягом робіт по технічному обслуговуванню включає: щоденний нагляд за виконанням правил експлуатації й інструкцій заводу-виготовлювача (контроль навантаження, температури окремих вузлів електричної машини, температури охолодного середовища при замкнутій системі охолодження, наявності змащення в підшипниках, відсутності ненормальних шумів і вібрацій, надмірного іскріння на колекторі й контактних кільцях і ін.); щоденний контроль за справністю заземлення; контроль за дотриманням правил техніки безпеки працюючими на електроустаткуванні; відключення електричних машин в аварійних ситуаціях; дрібний ремонт, здійснюваний під час перерв у роботі основного технологічного встаткування й не потребуючої спеціальної зупинки електричних машин (підтяжка контактів і кріплень, заміна щіток, регулювання траверс, системи захисту, чищення доступних частин машини й т.д.); участь у приймально-здавальних випробуваннях після монтажу, ремонту й налагодження електричних машин і систем їхнього захисту й керування; планові огляди експлуатованих машин по затвердженому головним енергетиком графікові із заповненням карти огляду.

Типовим обсягом робіт при поточному ремонті включає: виробництво операцій технічного обслуговування; відключення від живильної мережі й від'єднання від приводного механізму (двигуна); очищення зовнішніх поверхонь від забруднень; розбирання електричної машини в потрібному для ремонту обсязі; перевірку стану підшипників, промивання їх, заміну підшипників кочення, якщо зазори в них перевищують припустимі, перевірку й ремонт системи примусового змащення, заміну змащення; перевірку, очищення й ремонт кріплення вентилятора, перевірку й ремонт системи примусової вентиляції; огляд, очищення й продувку стисненим повітрям обмоток, колектора, вентиляційних каналів; перевірку стану й надійності кріплення лобових частин обмоток, усунення виявлених

дефектів; усунення місцевих ушкоджень ізоляції обмоток, сушіння обмоток, покриття лобових частин обмоток покривним лаком; перевірку й підтяжку кріпильних з'єднань і контактів із заміною дефектних кріпильних деталей; перевірку й регулювання щіткотримачів, траверс, коротко замикаючих пристроїв, механізму підйому щіток; зачищення й шліфування колектора й контактних кілець, перевірку стану й правильності позначень вивідних кінців обмоток і клемних колодок з необхідним ремонтом; заміну фланцевих прокладок і ущільнень; приєднання машини до мережі й перевірку її роботи на холостому ходу й під навантаженням; усунення ушкоджень фарбування; проведення приймально-здавальних випробувань і оформлення здачі машини в експлуатацію.

Типовим обсягом робіт при капітальному ремонті включає: виробництво операцій поточного ремонту; перевірку осьового розбігу ротора й радіальних зазорів підшипників ковзання з наступним пере заливанням вкладишів; заміну підшипників кочення; повне розбирання машини із чищенням і промиванням всіх механічних деталей; заміну дефектних обмоток (включаючи ремонт коротко замкнутих обмоток)*, очищення й продувку обмоток, що зберігаються; просочення й сушіння обмоток, покриття лобових частин обмоток покривними лаками й емалями; ремонт колекторів, контактних кілець і щіткових вузлів (аж до їхньої заміни на нові); ремонт статора й ротора, включаючи часткову заміну листів; відновлення пресовки; ремонт підшипникових щитів, корпуса, відновлення розмірів посадкових місць; ремонт вала; ремонт або заміну вентилятора; заміну несправних пазових клинів, різних ізоляційних деталей; складання й фарбування машини; проведення випробувань і оформлення здачі машини в експлуатацію.

Після ремонту електричні машини піддаються випробуванням на ремонтному підприємстві, обсяг яких залежить від типу машини й виду проведеного ремонту. Висновок про придатність до експлуатації дається не тільки на підставі порівняння результатів випробування з нормами, але

й по сукупності результатів проведених випробувань і оглядів. Значення отримані при випробуваннях параметрів повинні бути зіставлені з вихідними, а також з результатами попередніх випробувань електричної машини.

Б.4 Техніка безпеки при ремонті електричних машин

При проведенні планово-попереджувальних робіт, технічного обслуговування, що течуть і капітальних ремонтів електричних машин фахівцеві необхідно дотримувати техніки безпеки при експлуатації.

Виводи обмоток і кабельні вирви в електродвигунів повинні бути закриті огородженнями, зняття яких вимагає вигвинчування гайок або вигвинчування гвинтів. Знімати ці огородження під час роботи електродвигуна забороняється. Обертові частини електродвигунів: контактні кільця, шківи, муфти, вентилятори - повинні бути обгороджені.

Відкривати ящики пускових пристроїв електродвигунів, установлених у цеху, коли пристрій перебуває під напругою, дозволяється для зовнішнього огляду особам, що мають кваліфікаційну групу не нижче 4-ой.

Операції по включенню й вимиканню електродвигунів пусковою апаратурою із приводами ручного керування повинні вироблятися із застосуванням діелектричних рукавичок або ізолюючої підстави (підставки).

Включення й відключення вимикачів електродвигунів виробляється черговим в агрегатів одноосібно.

У працюючого синхронного електродвигуна не використовувана обмотка й живильний його кабель повинні розглядатися як перебувають під напругою.

Робота в ланцюзі пускового реостата працюючого електродвигуна допускається лише при піднятих щітках і замкнутому на коротко роторі.

Робота в ланцюгах регулювального реостата працюючого електродвигуна повинна розглядатися як робота під напругою в ланцюгах до 1000У и вироблятися з дотриманням мер обережності.

Шліфування кілець ротора допускається проводити на обертовому електродвигуні лише за допомогою колодок з ізоляційного матеріалу.

Перед початком роботи на електродвигунах, що приводять у рух насоси або механізми, повинні бути вжиті заходи, що перешкоджають обертанню електродвигуна з боку механізму (насос може працювати як турбіна, димосос може почати обертатися у зворотну сторону за рахунок засоса холодного повітря через трубу й т.д.). Такими мірами є закриття відповідних вентилів або шиберів, їхнє заклинювання або перев'язка ланцюгом із запиранням на замок (або зняттям штурвала) і вивішуванням плакатів «Не відкривати - працюють люди» або розчіплюванням муфт.

При від'єднанні від синхронного електродвигуна живильного кабелю кінці всіх трьох фаз кабелю повинні бути замкнуті на коротко й заземлені.

Заземлення кінців кабелю повинне вироблятися за допомогою спеціально пристосованого для цієї мети переносного заземлення, виконаного відповідно до загальних вимог.

Б.5 Правила безпеки під час обслуговування електродвигунів

Під час роботи, пов'язаної з доторканням до струмопровідних частин електродвигуна або до частин електродвигуна, що обертаються, і механізму, який вони приводять у рух, необхідно зупинити електродвигуні на його пусковому пристрої або ключі керування вивісити плакат «Не вмикати! Працюють люди».

Під час роботи на електродвигуні або механізмі, що приводиться ним у рух, пов'язано з доторканням до струмопровідних, або тих, що і обертаються, частин, з електродвигуна має бути знята напруга У багатошвидкісного електродвигуна, що працює, обмотка, яка не використовується, і кабель, що її живить, слід розглядати як такі, що перебувають під напругою.

Обслуговувати щітковий апарат електродвигуна, що працює, допускається одноособово оперативному працівнику або виділеному для цього навченому працівнику з групою III.

Під час обслуговування електродвигунів необхідно дотримуватися таких заходів безпеки:

– працювати в головному уборі і застебнутому спецодязі, остерігаючись захвату його частинами машин, що обертаються;

– користуватися діелектричним взуттям або гумовими килимками;

– не торкатися руками одночасно до струмопровідних частин двох полюсів або струмопровідних і заземлених частин.

Під час роботи на електродвигуні заземлення встановлюється на кабелі (з від'єднанням або без від'єднання його від електродвигуна) або на його приєднанні в розподільчу установку (РУ), або на будь-якій дільниці кабельної лінії, що з'єднує електродвигун з РУ (збіркою). Під час роботи на механізмі, не пов'язаній з доторканням до частин, що обертаються, і у випадку роз’єднання з'єднувальної муфти, заземлювати кабельну лінію не слід.

Якщо на відключеному двигуні роботи не проводять або їх перервано на кілька днів, то під’єднана від нього кабельна лінія має бути заземлена збоку електродвигуна. В тих випадках, коли перетин жил кабелю не дозволяє застосовувати переносні заземлення, допускається у електродвигунів напругою до 1000 В заземлювати кабельну лінію мідним провідником, перетином не меншим від перетину з жили кабелю, чи з'єднувати між собою жили кабелю та ізолювати їх. Таке заземлення і

з'єднання жил кабелю слід враховувати в оперативному журналі нарівні з переносним заземленням.

На однотипних або близьких за габаритом електродвигунах, встановлених поряд з тим, на якому провадять роботи, слід вивісити плакати «Стій! Напруга» незалежно від того, перебувають вони в роботі чи у резерві.

Під час роботи забороняється знімати огородження тих частин електродвигунів, що обертаються, під час їх роботи.

Випробування електродвигуна спільно з виконавчим механізмом слід провадити з дозволу начальника зміни технологічного цеху, в якому вони встановлені. Під час видавання дозволу робиться запис в оперативному журналі технологічного цеху, а про отримання цього дозволу – в оперативному журналі цеху (дільниці), що проводить випробування.

Ремонт і налагоджування електросхем електроприводів, не з'єднаних з виконавчим механізмом, регулювальних органів і запірної арматури, можна проводити за розпорядженням. Дозвіл на їх випробування дає працівник, який дав розпорядження на виведення електроприводу в ремонт, налагодження. Про це слід зробити запис під час оформлення розпорядження. Вмикання електродвигуна для випробування до повного закінчення роботи здійснюється після виведення бригади з робочого місця. Після випробування провадиться повторний пуск з оформленням у наряді. Під час виконання робіт за розпорядженням на повторний пуск розпорядження дається знову.

Кільця ротора допускається шліфувати на електродвигуні, що обертається, лише за допомогою колодок з ізоляційного матеріалу, із застосуванням захисних окулярів.

ДОДАТОК В

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____ _____ _____