Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
(повназва інституту/факультету)

Кафедра автоматики
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ І. С. Білюк
(підпис)

«15» 06 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

освітня програма Електротехніка та електротехнології
(назва освітньої програми)

на тему: Позиційний електропривод на базі безколекторного двигуна

Виконав: студент IV курсу, групи 4311
Рябий Павло Ігорович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник доц. каф. автоматики, к.е.н., доц. Майборода О. В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Нормоконтроль ст. викладач Савченко О. В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент доц. каф. СЕЕС, к.т.н., доц. Новогрецький С. М. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

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

м. Миколаїв– 2026 року

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
Кафедра автоматики
Освітній ступінь бакалавр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
(код і назва)
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)
Освітня програма «Електротехніка та електротехнології»
(назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Гарант освітньої програми,
к.т.н., доцент
_____ О. Г. Васильєв
(підпис)
16 02 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра студенту

Рябому Павлу Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Позиційний електропривод на базі безколекторного двигуна
керівник роботи Майборода О. В., к.е.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом закладу вищої освіти 286-УГ від 22.04.26
2. Строк подання студентом роботи 10.06.26
3. Вихідні дані до роботи технічні характеристики безколекторного двигуна постійного струму: кількість пар полюсів p=4, опір фази статора R_s=0Ом, індуктивність фази статораL_s=0,0001Гн, взаємна індуктивність статора M=0,0001 Гн, магнітний потікΦ_{max}=0,0175 Вб,момент інерції ротора J=0,0005 кг·м^2, напруга живлення U_{dc}=48 В;показники якості перехідного процесу: відносне пере регулювання σ<2 %, час встановлення t_p<0,1 с, усталена похибка $\varepsilon_{уст}$<0,05 рад.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 4.1. Огляд літератури за темою дослідження
4.2. Аналіз і узагальнення результатів дослідження 4.3. Охорона праці
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
5.1. Конструктивні особливості та принцип дії безколекторних двигунів з постійними магнітами
5.2. Функціональна схема позиційного електропривода на базі БДПС
5.3. Імітаційна модель позиційного електроприводана базі безколекторного двигуна в MATLAB Simulink
5.4. Дослідження динаміки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Майборода О. В., доцент кафедри автоматики		

7. Дата видачі завдання 16.02.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Обґрунтування актуальності проблеми, що розглядатиметься; визначення основної мети та завдань кваліфікаційної роботи. Вимоги до оформлення пояснювальної записки та графічної частини.		
2	Огляд літератури за темою дослідження: конструктивні особливості та принцип дії безколекторних двигунівз постійними магнітами; математичний опис безколекторного двигуна постійного струму; системи керування швидкістю електропривода на базібезколекторного двигуна.		
3	Функціональна схема позиційного електроприводана базі безколекторного двигуна постійного струму.		
4	Розробка імітаційної моделі позиційного електроприводана базі безколекторного двигуна в MATLAB Simulink.		
5	Дослідження динаміки.		
6	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини. Підготування доповіді.		

Студент Рябий (підпис) Рябий П. І. (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (підпис) Майборода О. В. (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 54 с., 3 р., 30 рис., 4 табл., 1 дод., 18 джерел.

Ключові слова: безколекторний двигун, моделювання, перехідна характеристика, позиційний електропривод, судновий механізм.

Об'єкт дослідження – перехідні процеси в позиційному електроприводі на базі безколекторного двигуна.

Мета роботи – розробка імітаційної моделі позиційного електропривода суднових механізмів та пристроїв на базі безколекторного двигуна постійного струму для дослідження його динаміки.

Методи дослідження – теоретичні дослідження виконані із залученням сучасної теорії електропривода, методів теорії автоматичного керування та комп'ютерного моделювання в MATLABSimulink.

У першому розділі розглянуто класифікацію електричних машин та складові елементи електропривода. Проведено порівняльний аналіз безколекторного двигуна з колекторним двигуном постійного струму та синхронним двигуном із постійними магнітами. Розглянуто конструктивні особливості, принцип дії та математичний опис безколекторного двигуна постійного струму. Також проаналізовано системи керування швидкістю електропривода на базі безколекторного двигуна. Другий розділ містить Функціональна схема позиційного електропривода на базі безколекторного двигуна постійного струму. Розроблено імітаційну модель позиційного електропривода на базі безколекторного двигуна та досліджено його динаміку в MATLAB Simulink. У третьому розділі проведено аналіз небезпечних та шкідливих факторів. Розглянуті питання щодо захисту від ураження електричним струмом та пожежної безпеки. Додаток містить слайди мультимедійної презентації.

ABSTRACT

Qualification work: 54 p., 3 chapters, 30 figs., 4 tables, 1 app., 18 references.

Keywords: brushless motor, marine mechanism, modeling, positional electric drive, transient characteristic.

Object of study – transient processes in a positional electric drive based on a brushless motor.

Aim of the work – development of a simulation model of a positional electric drive for marine mechanisms and devices based on a brushless DC motor to study its dynamics.

Research methods – theoretical studies carried out using modern electric drive theory, methods of automatic control theory, and computer simulation in MATLAB/Simulink.

Chapter 1 reviews the classification of electrical machines and the components of an electric drive. It conducts a comparative analysis of a brushless motor with a brushed DC motor and a permanent magnet synchronous motor. The design features, operating principle, and mathematical description of a brushless DC motor are considered. Speed control systems of an electric drive based on a brushless motor are also analyzed.

Chapter 2 contains the functional diagram of a positional electric drive based on a brushless DC motor. A simulation model of a positional electric drive based on a brushless motor has been developed, and its dynamics have been investigated in MATLAB/Simulink.

Chapter 3 analyzes hazardous and harmful factors, and considers issues regarding protection against electric shock and fire safety.

The Appendix contains multimedia presentation slides.

ЗМІСТ

ВСТУП 6
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ 8
1.1 Класифікація електричних машин 8
1.2 Складові елементи електричного привода 16
1.3 Порівняльний аналіз безколекторного двигуна з колекторним двигуном постійного струму та синхронним двигуном із постійними магнітами 20
1.4 Конструктивні особливості та принцип дії безколекторних двигунів з постійними магнітами 24
1.5 Математичний опис безколекторного двигуна постійного струму . 28
1.6 Системи керування швидкістю електропривода на базі безколекторного двигуна 33
2. АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ 36
2.1 Функціональна схема позиційного електропривода на базі безколекторного двигуна постійного струму 36
2.2 Розробка імітаційної моделі позиційного електропривода на базі безколекторного двигуна в MATLAB Simulink 38
2.3 Дослідження динаміки 42
3. ОХОРОНА ПРАЦІ 46
3.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів 46
3.2 Захист від ураження електричним струмом 47
3.3 Пожежна безпека 50
ВИСНОВКИ 54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 55
ДОДАТОК А. Мультимедійна презентація 57

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному суднобудуванні та експлуатації водного транспорту особлива увага приділяється автоматизації виробничих процесів, підвищенню надійності, енергоефективності та точності роботи суднових механізмів і пристроїв. Одним із найбільш перспективних напрямків вирішення цих завдань є впровадження високоточних позиційних електроприводів. На зміну традиційним системам постійного струму з колекторними двигунами, які потребують постійного технічного обслуговування в складних умовах експлуатації, приходять безколекторні двигуни. Вони мають вищі показники надійності, кращі масогабаритні характеристики та тривалий термін служби. Однак проектування таких систем потребує глибокого аналізу їхньої динаміки, що робить розробку та дослідження відповідних імітаційних моделей вкрай актуальним завданням для сучасної морської техніки.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка імітаційної моделі позиційного електропривода суднових механізмів та пристроїв на базі безколекторного двигуна постійного струму для дослідження його динаміки. Щоб досягти поставленої мети, слід розв'язати наступні завдання:

1) розглянути класифікацію електричних машин, визначити складові елементи електропривода та провести порівняльний аналіз безколекторного двигуна з колекторним двигуном постійного струму і синхронним двигуном із постійними магнітами;

2) вивчити конструктивні особливості, принцип дії, скласти математичний опис безколекторного двигуна постійного струму та проаналізувати існуючі системи керування швидкістю;

3) розробити функціональну схему позиційного електропривода на базі безколекторного двигуна постійного струму;

4) побудувати комплексну імітаційну модель позиційного електропривода в середовищі MATLAB/Simulink та дослідити перехідні процеси і динамічні показники системи під час роботи;

5) виконати аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, розробити заходи щодо захисту від ураження електричним струмом та забезпечення пожежної безпеки під час експлуатації обладнання.

Об'єктом дослідження є перехідні процеси в позиційному електроприводі на базі безколекторного двигуна. Предмет роботи – параметри та алгоритми керування позиційного електропривода суднових механізмів на базі безколекторного двигуна постійного струму, які впливають на якість та точність відпрацювання заданого положення.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Класифікація електричних машин

1.1.1 Рухомий об'єкт, який має лінійне або обертальний рух, наводиться в рух первинним двигуном. Первинний двигун – це обладнання, яке виробляє механічну енергію за рахунок використання теплової енергії, електрики, гідравлічної енергії, пара, газу, тощо. Приклади первинного двигуна включають газову турбіну, двигун внутрішнього згоряння і електродвигун. Серед них електродвигуни останнім часом стали одними з найважливіших первинних двигунів, і їх використання швидко зростає. Майже 70% всієї електроенергії, що використовується в поточній галузі для виробництва електроенергії в системах, приводяться в рух двигуном.

Електродвигуни можна розділити на два різних типи в залежності від типу використовуваного джерела живлення, як показано на рисунку 1.1: двигун постійного струму (DC) і двигун змінного струму (AC). Нещодавно розроблений Безколекторний двигун постійного струму важко класифікувати як один з двигунів, оскільки його конфігурація аналогічна конфігурації синхронного двигуна з постійними магнітами (двигун змінного струму), а його електричні характеристики аналогічні характеристикам двигуна постійного струму.

На створення першого електродвигуна надихнуло відкриття Майклом Фарадеєм електромагнітної індукції. У 1831 році Майклу Фарадею і Джозефу Генрі одночасно вдалося провести лабораторні експерименти по експлуатації двигуна. Пізніше, в 1834 році М. Якобі винайшов перший практичний двигун постійного струму. Двигун постійного струму є прототипом всіх двигунів з точки зору створення крутного моменту. У 1888 році Нікола Тесла отримав патент на винахід електродвигунів змінного струму, які включають синхронний електродвигун, реактивний електродвигун і асинхронний електродвигун. До 1895 року трифазне джерело живлення, розподілена обмотка статора і короткозамкненим ротором були розроблені послідовно. Завдяки цим розробкам три-

фазні асинхронні двигуни нарешті стали доступні для комерційного використання в 1896 році.

Традиційно серед розроблених двигунів двигуни постійного струму широко використовуються для управління швидкістю і положенням через простоту управління крутним моментом і відмінних характеристик приводу. З іншого боку, асинхронні двигуни широко використовуються для загальних цілей в додатках з постійною швидкістю через їх низьку вартість і міцній конструкції. На асинхронні двигуни припадає близько 80% всієї електроенергії, споживаної двигунами.

До початку 1970-х років основні зусилля щодо вдосконалення були спрямовані в основному на зниження вартості, розміру та ваги двигунів. Поліпшення магнітних матеріалів, ізоляційних матеріалів, дизайну і технологій виробництва зіграло важливу роль і досягло великого прогресу. В результаті сучасний двигун потужністю 100 к.с. має той же розмір, що і двигун потужністю 7,5 к.с., який використовувався в 1897 році. У зв'язку із зростанням цін на нафту через нафтової кризи 1973 року економія витрат на електроенергію стала особливо важливим питанням. З тих пір було докладено багато зусиль для підвищення ефективності двигунів. Останнім часом швидко зростаючі витрати на енергію і великий глобальний інтерес до скорочення викидів вуглекислого газу спонукають галузі приділяти більше уваги високоефективним двигунів і їх приводним системам.

Поряд з удосконаленням двигунів було багато досягнень в технології їх приводів. У 1960-х роках поява силових електронних перетворювачів, які використовують силові напівпровідникові пристрої, дозволило виготовляти двигуни з робочими характеристиками, адаптованими до конкретних системним додатків. Більш того, використання мікроконтролерів з високопродуктивними функціями цифрової обробки сигналів дозволило інженерам застосовувати передові методи управління двигунами, що значно підвищило продуктивність систем з приводом від двигуна.

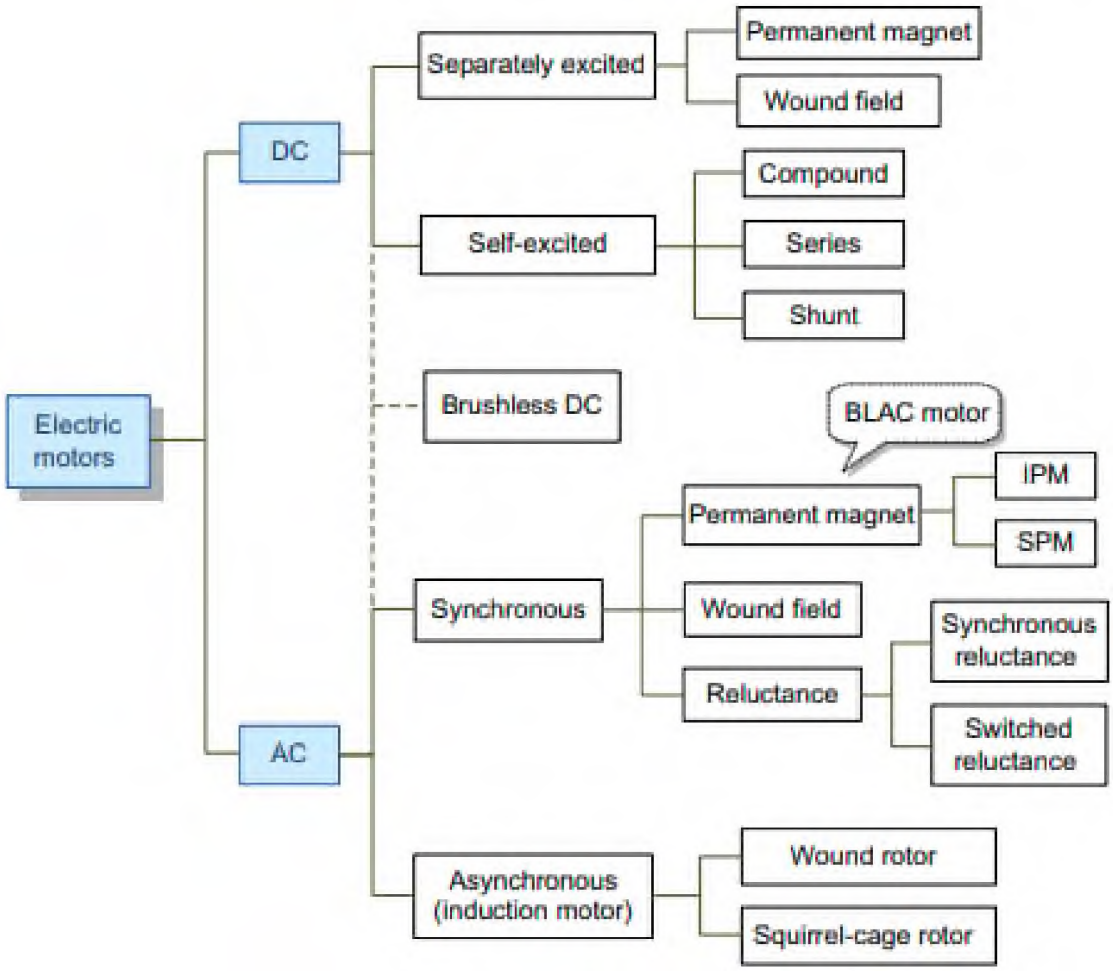


Рисунок 1.1 – Класифікація електродвигунів

1.1.2 Основний принцип роботи електричних моторів. Конфігурація електромоторів

Електродвигун складається з двох основних частин: нерухомої частини, яка називається статором, і рухомої частини, званої ротором, як показано на рисунок 1.2. Повітряний зазор між статором і ротором необхідний для того, щоб ротор міг обертатися, і довжина повітряного зазору може змінюватися залежно від виду двигунів. Кожна частина статора та ротора має як електричний, так і магнітний контур. Статор і ротор сконструйовані із залізним сердечником, як показано на рисунок 1.3, через який буде протікати магнітний потік, створюваний струмами обмоток, і який відіграє роль підтримки провідників обмоток.

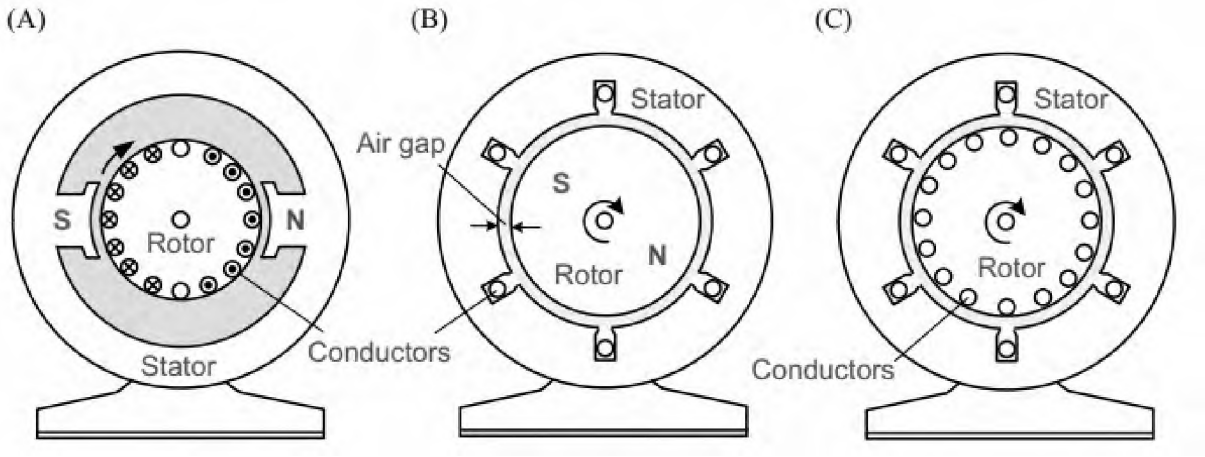


Рисунок 1.2 – Конфігурація електродвигунів. (A) двигун постійного струму, (B) синхронний двигун змінного струму та (C) асинхронний двигун змінного струму

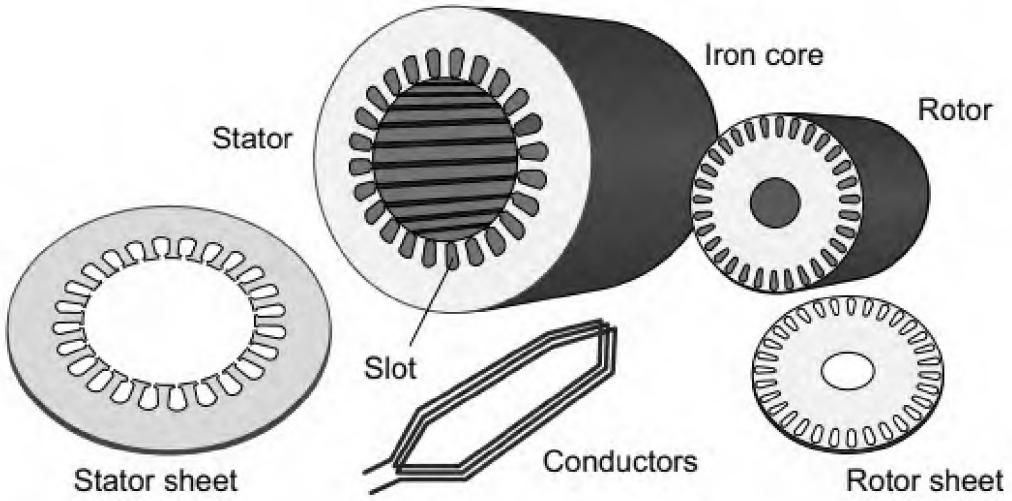


Рисунок 1.3 – Електричні та магнітні частини електродвигунів

Струмопровідні провідники, вставлені в прорізи залізного сердечника, утворюють електричну ланцюг. Коли струм протікає в цих провідниках, через залізний сердечник створюється магнітне поле, і статор і ротор стають електромагнітом. Щоб отримати більший магнітний потік для даного струму в провідниках, залізний сердечник, як правило, складається з феромагнітного матеріалу з високою магнітною проникною здатністю, такого як кремнієва сталь. У

деяких випадках статор або ротор створюють магнітний потік за допомогою постійного магніту.

1.1.3 Основний принцип роботи електромоторів

Усі електродвигуни обертаються за однаковим принципом роботи. Як показано на рисунку 1.4, А, в двигунах, як правило, є два магнітних поля. Один з них розроблений на стаціонарному статорі, а інший – на обертовому роторі. Ці магнітні поля генеруються або за допомогою енергетичних обмоток, використання постійних магнітів або індукованих струмів. Сила, що утворюється при взаємодії цих двох магнітних полів, породжує крутний момент на роторі і змушує ротор обертатися. З іншого боку, деякі двигуни, такі як реактивний двигун, використовують взаємодію між одним магнітним полем і магнітним матеріалом, таким як залізо, але вони не можуть виробляти великий крутний момент (рисунок 1.4, В). Більшість двигунів, що сьогодні комерційно використовуються, включаючи двигуни постійного струму, асинхронні та синхронні, використовують силу, що утворюється внаслідок взаємодії двох магнітних полів, для отримання більшого крутного моменту.

Крутний момент, що розвивається в двигуні, повинен створюватися безперервно, щоб він працював як двигун, що приводить в дію механічне навантаження. Два типи двигунів, класифіковані відповідно до використовуваного джерела живлення, тобто двигун постійного струму та двигун змінного струму, мають різні способи досягнення безперервного обертання. Тепер ми детальніше розглянемо ці методи для досягнення безперервного обертання.

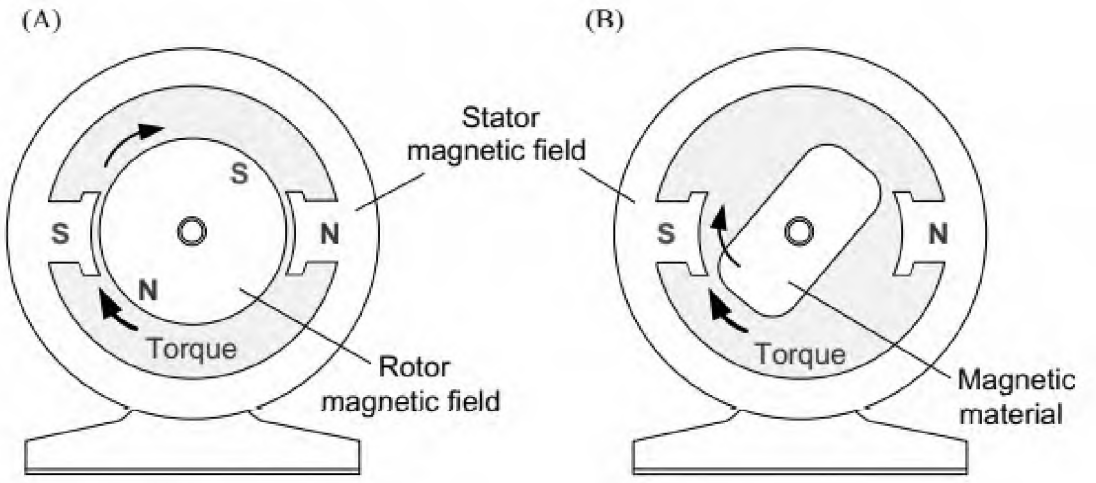


Рисунок 1.4 – Обертання електродвигунів (А) з двома магнітними полями і (Б) взаємодія одного магнітного поля та магнітного матеріалу

1.1.3.1 Двигун постійного струму

Проста концепція обертання двигуна постійного струму полягає в тому, що ротор обертається за допомогою сили, що виробляється на струмопровідних провідниках, розміщених в магнітному полі, створеному статором, як показано на рисунку 1.5, А. Як варіант, ми можемо розглядати принцип роботи двигуна постійного струму з точки зору двох магнітних полів, як показано на рисунку 1.4, Б, наступним чином. У двигуні постійного струму є два нерухомих магнітних поля, як показано на рисунку 1.5, В.

Одне стаціонарне магнітне поле – це магнітне поле статора, яке створюється магнітами або обмоткою поля. Інший - магнітне поле ротора, яке створюється струмом у провідниках ротора. Важливо зазначити, що магнітне поле ротора також нерухомо, незважаючи на обертання ротора. Це пов'язано з дією щіток і комутаторів, завдяки яким розподіл струму в провідниках ротора завжди робиться однаковим, незалежно від обертання ротора, як показано на рисунку 1.5, А. Таким чином, магнітне поле ротора не буде обертатися разом з ротором. Послідовна взаємодія між цими двома нерухомими магнітними полями створює крутний момент, який змушує ротор безперервно обертатися.

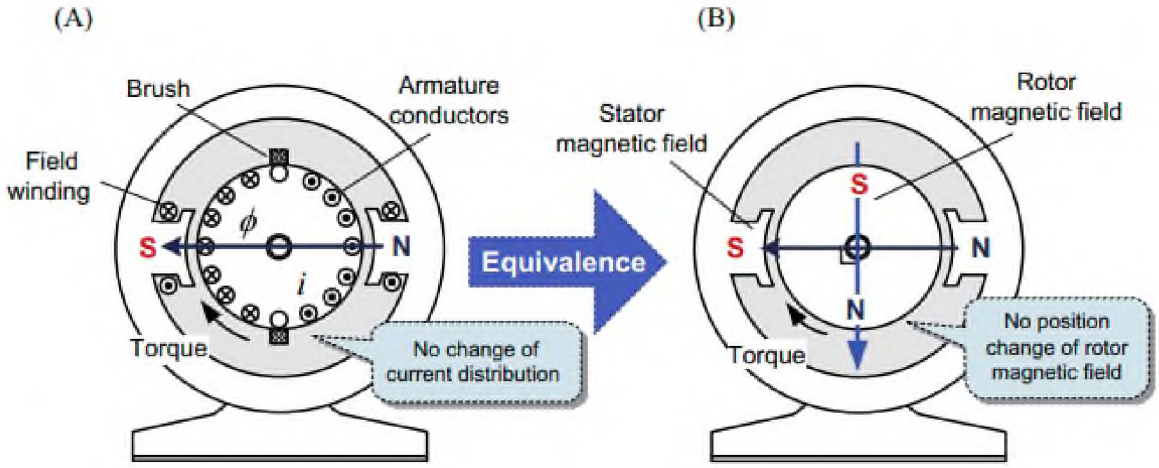


Рисунок 1.5 – Принцип роботи двигуна постійного струму
(А) Струм в обмотці ротора та магнітному полі статора
та (В) на двох магнітних полях

1.1.3.2 Двигун змінного струму

На відміну від двигунів постійного струму, які обертаються через силу між двома нерухомими магнітними полями, двигуни змінного струму використовують силу між двома обертовими магнітними полями. У двигунах змінного струму як магнітне поле статора, так і магнітне поле ротора обертаються, як показано на рисунку 1.6.

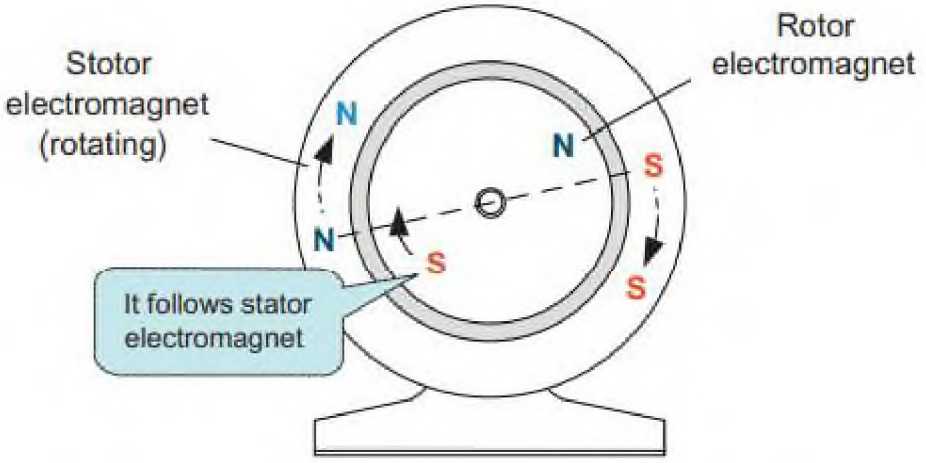


Рисунок 1.6 – Принцип роботи двигуна змінного струму

У двигунах змінного струму обертове магнітне поле на статорі створюється трьома фазовими струмами. Коли до трифазних обмоток статора двигуна змінного струму подається трифазне джерело змінного струму, трифазні струми, що протікають у цих вітрових затворах, створюють обертове магнітне поле.

Існує два типи двигунів змінного струму: синхронний двигун та асинхронний (асинхронний) двигун. Вони генерують магнітне поле ротора порізному, тоді як генерують магнітне поле статора таким же чином. У синхронному двигуні, як показано на рисунку 1.2, В, магнітне поле на роторі генерується або постійним магнітом, або обмоткою поля, що живиться від джерела постійного струму, відокремленого від джерела змінного струму статора. У цьому двигуні магнітне поле ротора є основним відносно ротора. Отже, для створення крутного моменту ротор повинен обертатися з тією ж швидкістю, що обертається магнітним полем статора. Ця швидкість називається синхронною швидкістю. Ось чому цей двигун називають синхронним двигуном.

З іншого боку, в асинхронному двигуні, як показано на рисунку 1.2, С, магнітне поле ротора генерується потужністю змінного струму. Потужність змінного струму, яка використовується при збудженні ротора, передається від статора електромагнітною індукцією. Через цю вирішальну особливість цей двигун називають асинхронним. В асинхронному двигуні магнітне поле ротора обертається відносно ротора з деякою швидкістю. Для створення крутного моменту статор і ротор, що обертаються магнітні поля, повинні обертатися з однаковою швидкістю. Це вимагає, щоб сам ротор обертався з різницею швидкостей між статором і ротором, що обертаються магнітними полями. Точніше, обертається магнітне поле ротора обертається з різницею швидкості між обертовим магнітним полем статора та ротором. Для використання збудження ротора електромагнітною індукцією частота обертання ротора повинна бути завжди меншою за синхронну. Таким чином, асинхронний двигун також називають асинхронним двигуном. Серед двигунів двигуни постійного струму в основному використовувались для регулювання швидкості та крутного моменту через їх простоту. Їх простота полягає в тому, що швидкість двигуна постійного струму

пропорційна напрузі, а його крутний момент пропорційний струму. Однак, оскільки двигуни постійного струму потребують періодичного обслуговування щіток і комутаторів, останнім часом ця тенденція рухається до використання необслуговуваних двигунів змінного струму, оскільки вони можуть запропонувати високу продуктивність за розумну ціну. Як вже згадувалося раніше, електродвигуни можуть працювати за принциповим принципом, згідно з яким крутний момент, що виникає внаслідок взаємодії між магнітними полями, утвореними в статорі, та ротором, призводить до роботи двигуна. Тепер ми розглянемо вимоги, що забезпечують постійне виробництво крутного моменту двигуном.

Ці два магнітні поля завжди обертаються з однаковою швидкістю і, таким чином, перебувають у простої відносно один одного і підтримують певний кут. В результаті між ними створюється постійна сила, завдяки чому двигун змінного струму повинен працювати безперервно. Принцип роботи двигуна змінного струму полягає в тому, що сила, що виникає внаслідок взаємодії двох обертових магнітних полів, змушує ротор обертатися. У двигунах змінного струму обертове магнітне поле на статорі створюється трьома фазовими струмами. Коли до трифазних обмоток статора двигуна змінного струму подається трифазне джерело змінного струму, трифазні струми, що протікають у цих обмотках, створюють обертове магнітне поле.

1.2 Складові елементи електричного привода

1.2.1. При заданому механічному навантаженню необхідна відповідна конструкція системи приводу двигуна, яка необхідна для задоволення відповідних критеріїв продуктивності, таких як характеристика швидкісно-обертального моменту, діапазон роботи швидкостей, регулювання швидкості, ефективність, вартість, час робочого циклу, тощо.

Система приводу двигуна зазвичай складається з п’яти частин, як показано на рисунку 1.7.

У межах доступного джерела живлення ми повинні вибирати компоненти відповідним чином для досягнення вимог для продуктивності приводу. Коротко розглянемо ці п’ять частин.

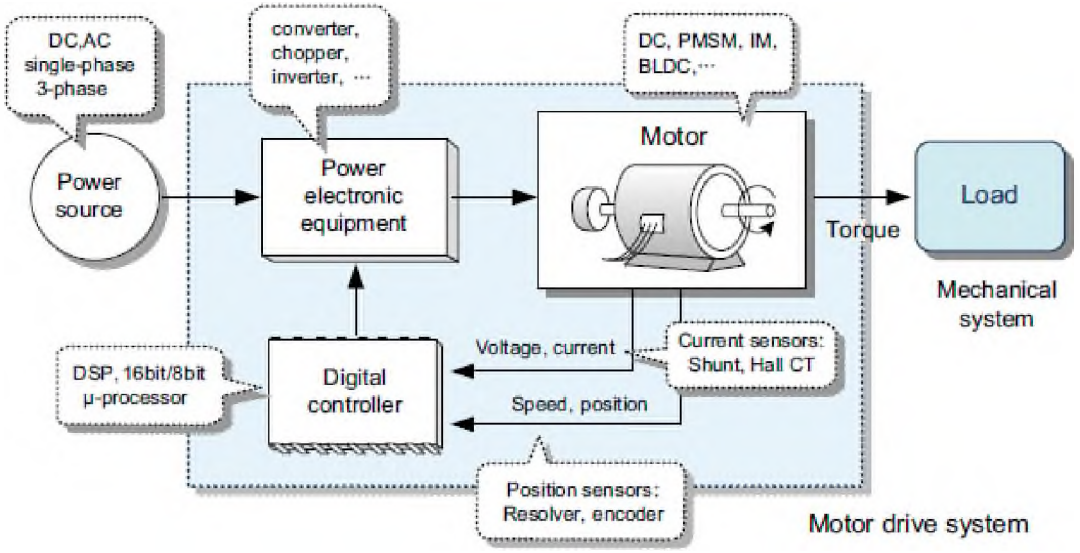


Рисунок 1.7 – Конфігурація системи приводу двигуна

1.2.2 Джерело живлення

Однофазні або трифазні джерела змінного струму найчастіше використовують як джерело живлення, що забезпечує електричну енергію для приводів двигуна. Трифазний змінний струм джерела напруги, як правило, використовується для двигунів потужністю від декількох кіловат або вище. В багатьох випадках джерела змінного струму перетворюються на джерела постійного струму, що перетворюється в енергію, необхідної двигуну, за допомогою силових електронних перетворювачів, такі як інвертор або подрібнювач. Останнім часом постійне живлення постійного струму забезпечуються відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні елементи та паливні елементи.

1.2.3 Електродвигуни

Для приводних двигунів ми повинні вибрати той, який відповідає необхідній характеристиці обертового моменту веденого механічного навантаження. Крім того, важливо враховувати такі важливі критерії продуктивності, як ефективність, розмір, вартість, робочий цикл та робоче середовище. Як зазна-

чалося раніше, існує два основних типу приводних двигунів: двигун постійного струму та двигун змінного струму. Деякі програми використовують спеціальні типи, такі як двигун BLDC або кроковий двигун, які не можна класифікувати на основні типи.

Двигуни постійного струму мають перевагу простого регулювання швидкісно-обертальним моментом для їх відмінних характеристик. Однак через знос, пов'язаний з їх комутаторами та щітками, двигуни постійного струму менш надійні та непридатні для експлуатації, що не потребує обслуговування. З іншого боку, двигуни змінного струму менші, легші та мають більшу щільність потужності, ніж двигуни постійного струму. Двигуни змінного струму також практично не потребують технічне обслуговування і, отже, краще підходять для високих швидкостей. Однак двигуни змінного струму з високопродуктивними можливостями є більш складними та дорогими, ніж двигуни постійного струму.

1.2.4 Силові електроні перетворювачі

Силові електронні перетворювачі відіграють роль відбору електричної енергії від системи живлення та перетворення її у відповідну форму, необхідну двигуну. Силовий електронний перетворювач може бути визначений у відповідності з даним джерелом живлення та позиційним двигуном.

Для приводів постійного струму, силові електронні перетворювачі, такі як керований випрямляч або подрібнювач, можуть використовуватися для регулювання потужності постійного струму. На відміну від цього, приводи змінного струму здебільшого використовують інвертор для регулювання напруги та частоти в мережі змінного струму.

У цьому випадку часто включається випрямляч для перетворення потужності змінного струму в системі електроживлення від мережі в потужність постійного струму. В таких силових електронних перетворювачах використовують напівпровідникові пристрої, такі як тиристор вимкнення затвору (GTO), інтегрований тиристор з комутацією затвору (IGCT), ізольований біполярний транзистор із затвором (IGBT), напівпровідниковий польовий транзистор з оксидом металу (MOSFET) і силовий біполярний транзистор (BJT). Ці комутаційні при-

строї визначаються відповідно до їх можливостей керування потужністю та їх комутаційними характеристиками. Можливості керування потужністю може бути ранжирувана за зростаючому порядку: MOSFET, IGBT та тиристор GTO, тоді як швидкість перемикання може бути ранжирувана в наступному порядку: GTO, IGBT та MOSFET. Всі ці комутаційні пристрої, описані вище, засновані на кремнієвому (Si) напівпровідниковому матеріалі. Останнім часом комутаційні пристрої на основі широкосмугових матеріалів, таких як карбід кремнію (SiC) або нітрид галію (GaN) визнано перспективним майбутнім пристроєм.

1.2.5 Цифрові контролери

Контролер, відповідальний за виконання алгоритмів керування двигуном, є найбільш важливою частиною в системах приводу двигуна. Цей контролер керує роботою силового електронного перетворювача для регулювання частоти, напруги або струму, що надаються до мотора. У наш час зазвичай використовують цифрові контролери. Цифровий контролер базується на мікропроцесорі, мікроконтролері або цифровому процесорі сигналів (DSP), який може бути 16-розрядним або 32-розрядним, а також як з фіксованою, так і з плаваючою точкою.

Існує компроміс між ефективністю контролю та вартістю. Двигун постійного струму і двигуни BLDC, що вимагають відносно простого управління, можуть використовувати 16-розрядні процесори, в той час як двигуни змінного струму вимагають складних засобів управління, таких як індукційні чи синхронні двигуни з векторним керуванням, для яких можуть знадобитися високопродуктивні 32-розрядні процесори або DSP.

1.2.6 Сенсори та інші допоміжні схеми

Для досягнення високоефективного моторного приводу, частіше використовується замкнутий контур керування положенням, швидкістю чи струмом, і в цьому випадку необхідна інформація о швидкості / положенню або струму. Датчики необхідні для отримання цієї інформації. В якості датчика струму частіше використовуються шунтові опори, датчики ефекту Холла чи трансформатори струму. Шунтовий опір є найбільш рентабельним, тоді як датчики ефекту

Холла зазвичай забезпечують високу роздільну здатність та ізоляцію між контролером та системою. Енкодери та резольвери широко використовуються в якості датчиків швидкості / положення. На додаток до цих компонентів, для покращення надійності і якості, можуть знадобитися декілька схем захисту, фільтрації, корекції коефіцієнту потужності чи зменшення гармонік.

1.3 Порівняльний аналіз електричних двигунів

1.3.1 Порівняння між безколекторним двигуном та двигуном постійного струму

Двигуни BLDC не мають вирішального недоліку двигунів постійного струму, оскільки функція щіток і комутаторів замінена напівпровідниковими перемикачами, що працюють на основі інформації з положення ротора. В результаті цієї заміни конфігурація двигуна BLDC стає ліпшою від конфігурації двигуна постійного струму, але схожою на конфігурацію синхронного двигуна з постійним магнітом (PMSM). Як показано на рисунку 1.8, двигун BLDC має конфігурацію, в якій обмотки розміщені на стороні статора, а магніти на стороні ротора. Це призводить до зміни конфігурації двигуна постійного струму, як показано на рисунку 1.8. Натомість його конфігурація нагадує конфігурацію PMSM, показану на рисунку 1.8.

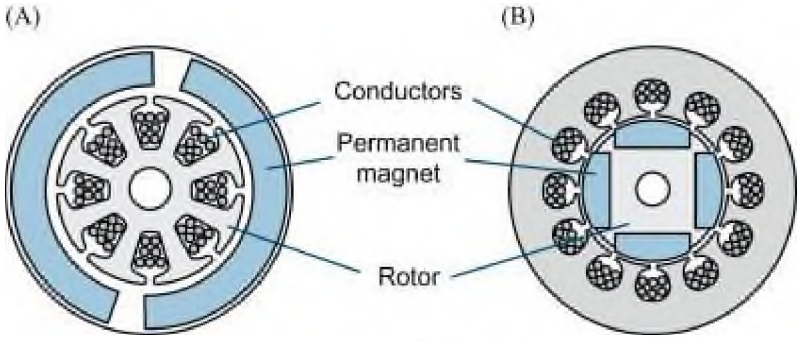


Рисунок 1.8 – Конфігурація двигунів

Однак, подібно до струму, що протікає в обмотках якоря двигуна постійного струму, струм, що протікає в обмотках двигуна з BLDC, має квазіквадрат-

ну форму хвилі. Така конфігурація двигунів BLDC має наступні переваги перед двигунами постійного струму. У порівнянні з важким ротором двигунів постійного струму, що складається з безлічі провідників, двигуни з BLDC мають низько інерційний ротор. Таким чином, двигуни BLDC можуть забезпечувати швидкий відгук. Більш того, обмотки, розміщені на стороні статора, можуть легко розсіювати тепло, що дозволяє двигунів BLDC мати більш досяжний максимальний крутний момент у порівнянні з двигунами постійного струму, максимальний струм яких обмежений, щоб уникнути розмагнічування магнітів. Крім того, двигуни BLDC можуть працювати на більш високій швидкості через немеханічних комутаційних пристроїв.

1.3.2 Порівняння безколекторних двигунів і синхронних двигунів з постійним магнітом

Через структурні подібності двигуни BLDC часто плутають з PMSM. Зазвичай двигуни BLDC можна відрізнити від PMSM по їх формі протидії електрорушійної сили (проти-ЕРС). Двигун BLDC розроблений для вироблення трапецеподібної форми хвилі зворотного ЕРС, як показано на рисунку 1.9, А. Таким чином, амплітуда щільності магнітного потоку, створюваного магнітами ротора, залишається постійною уздовж повітряного зазору. Цього можна домогтися, використовуючи магніти з паралельним намагнічуванням.

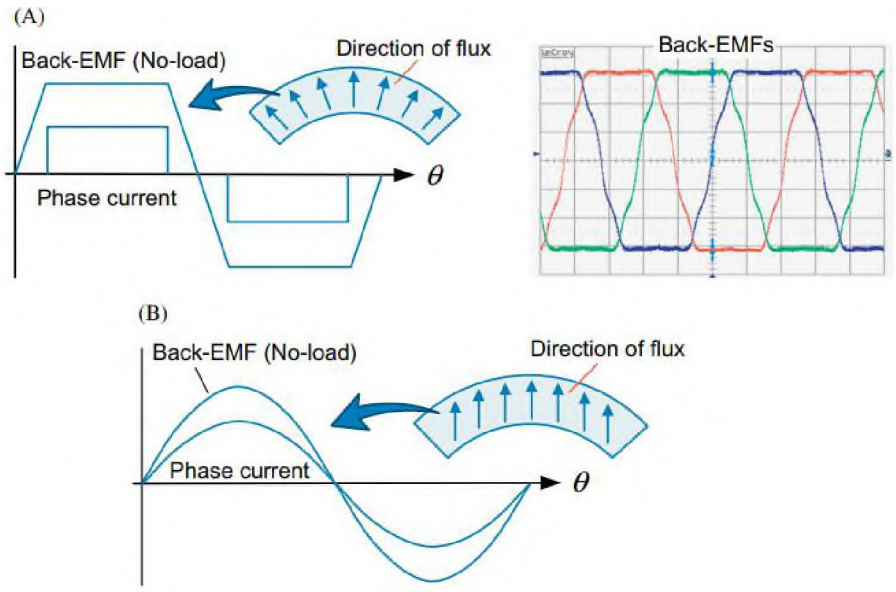


Рисунок 1.9 – Порівняння між (А) BLDC двигунами та (В) PMSM

Коли на двигун BLDC з трапецеїдальною формою хвилі зворотної ЕРС подається струм статора прямокутної форми, може розвиватися постійний крутний момент. З іншого боку, PMSM – це тип двигуна змінного струму з синусоїдальною формою сигналу зворотної ЕРС, і, отже, його струм повинен бути синусоїдальної формою хвилі для створення постійного крутного моменту, як показано на рисунку 1.9, В.

Синусоїдальна форма сигналу зворотної ЕРС вимагає, щоб щільність магнітного потоку, що генерується магнітами ротора, була розподілена синусоїдально уздовж повітряного зазору. PMSM часто називають двигуном BLAC, на відміну від двигунів BLDC.

Щільність потужності двигуна BLDC з трапецеїдальною формою хвилі зворотної ЕРС на 15% вище, ніж у двигуна PMSM. Це пов'язано з тим, що трапецеїдальний сигнал має більш високий фундаментальний компонент, ніж синусоїдальний сигнал, навіть якщо вони мають однакове пікове значення. Крім форми сигналу зворотної ЕРС, існує декілька відмінностей між двигунами BLDC і PMSM. Порівняння наведено в таблиці 1.1.

Як показано на рисунку 1.10, в двигуні BLDC зазвичай використовуються концентровані обмотки статора, і в них тече струм квазіквадратної форми. Навпаки, в PMSM зазвичай використовуються розподілені обмотки статора, в які протікає струм синусоїдальної форми. Однак останнім часом в модулях PMSM часто використовуються концентровані обмотки через їх коротких кінцевих обмоток і простої конструкції, що підходить для автоматизованого виробництва.

Таблиця 1.1 – Порівняння між BLDC та PMSM

	BLDC	PMSM
Зворотна ЕРС	Трапецієвидна форма сигналу	Синусоїдальна форма сигналу
Обмотка статора	Концентрована обмотка	Розподілена обмотка
Струм статора	Квадратична форма сигналу	Синусоїдальна форма сигналу
Схема керування	Інвертор (120° провідників)	Трифазний інвертор (180° провідників)
Метод привода	Простий, використовуючи недорогі датчики на ефекті Холла	Складний (з використанням датчика положення з високою роздільною здатністю, такого як енкодер або резольвер)
Пульсація крутного моменту	Значна пульсація крутного моменту	Майже постійний крутний момент
Вартість системи	Низька вартість	Висока вартість

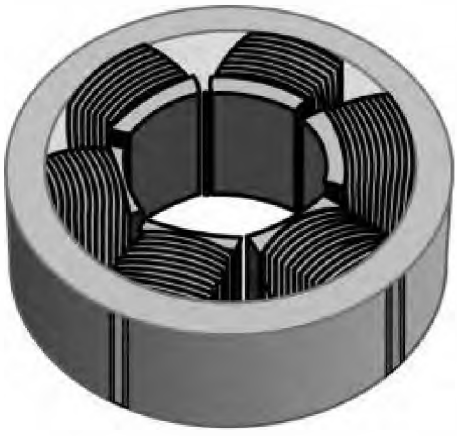


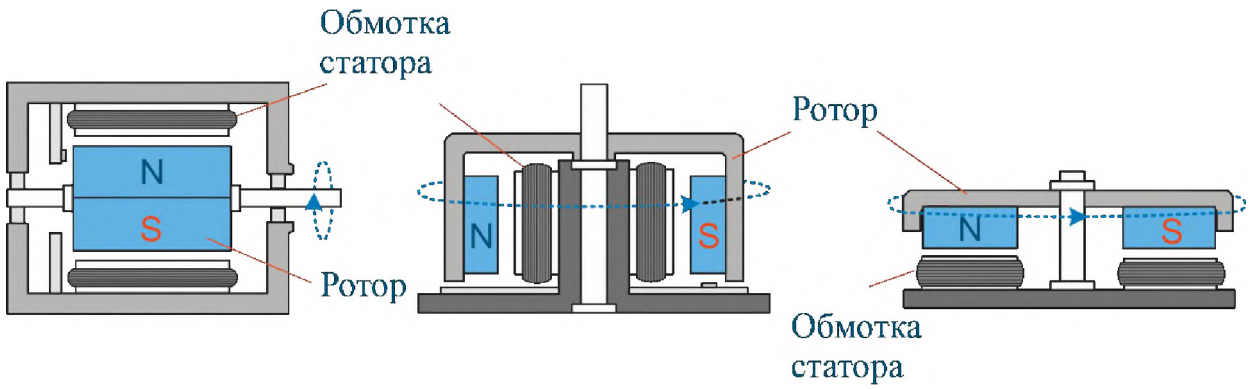
Рисунок 1.10 – Концентровані обмотки статора двигунів BLDC

Електропривод BLDC простий і недорогий в порівнянні з приводом PMSM, який вимагає складного методу векторного управління. Проте двигуни BLDC мають значну пульсацію крутного моменту під час перемикання фаз при зміні активного перемикача.

1.4 Конструктивні особливості та принцип дії безколекторних двигунів з постійними магнітами

1.4.1 Серед електродвигунів з постійними магнітами широке поширення набули системи на основі електричних машин з трапецеїдальною формою ЕРС. Такі електродвигуни в зарубіжній літературі називають безколекторними двигунами постійного струму (БДПС, від англ. Brushless DC motor або BLDC motor).

Безколекторний двигун постійного струму має подібні електричні характеристики до колекторного двигуна, але він має підвищену надійність через заміну механічної комутації електронною. У БДПС для усунення щіток обмотки якоря розміщують на стороні статора, а магніти – на стороні ротора (рисунок 1.11).



а) б) в)

Рисунок 1.11 – Конструкції БДПС:

а – з внутрішнім ротором; б – із зовнішнім ротором (радіальний потік);

в – із зовнішнім ротором (осьовий потік)

Безколекторний двигун постійного струму складається з ротора з постійними магнітами і статора з обмотками. Розрізняють два типи двигунів: «Inrunner», у яких магніти ротора знаходяться всередині статора з обмотками, і «Outrunner», у яких магніти розташовані зовні і обертаються навколо нерухомого статора з обмотками.

Схему «Inrunner» зазвичай використовують для високошвидкісних двигунів з невеликою кількістю полюсів. «Outrunner» при необхідності отримати високомоментний двигун з порівняно невеликими оборотами. Конструктивно «Inrunners» простіше з-за того, що нерухомий статор може служити корпусом. У нього можуть бути вмонтовані кріпильні пристосування. В разі «Outrunners» обертається вся зовнішня частина.

БДПС мають багато переваг, таких як висока ефективність, велика питома потужність, високе співвідношення крутного моменту та моменту інерції, висока швидкість, простий алгоритм керування та низька вартість. Таким чином, в наш час вони широко використовуються як економічно ефективне рішення у приводах малої та середньої потужності.

1.4.2 Функціональну схему системи керування безколекторного двигуна постійного струму наведено на рисунку 1.12. Збудження відповідних обмоток БДПС відбувається послідовно для безперервного обертання ротора двигуна (рисунки 1.13, 1.14).

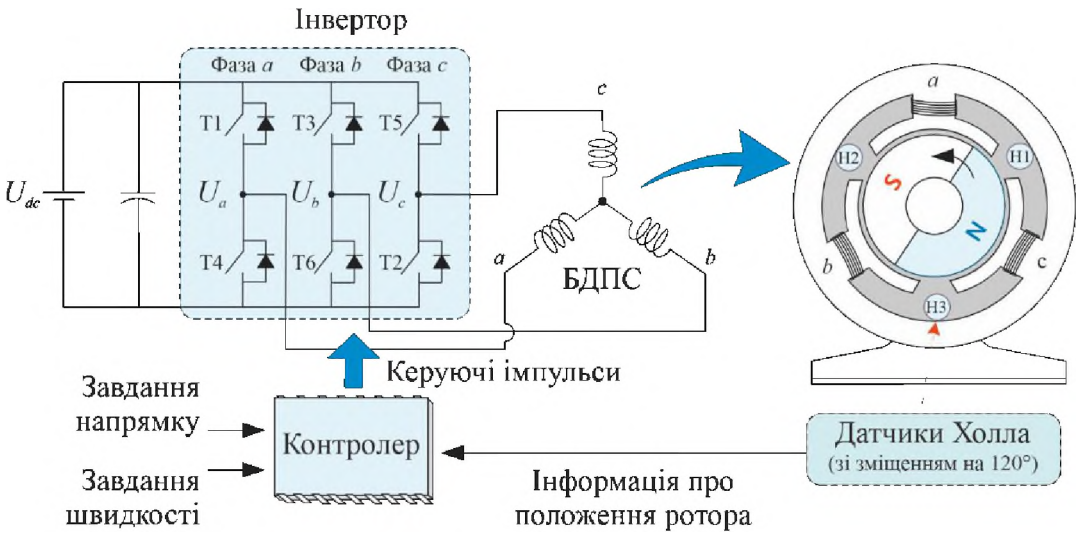


Рисунок 1.12 – Функціональна схема системи керування БДПС

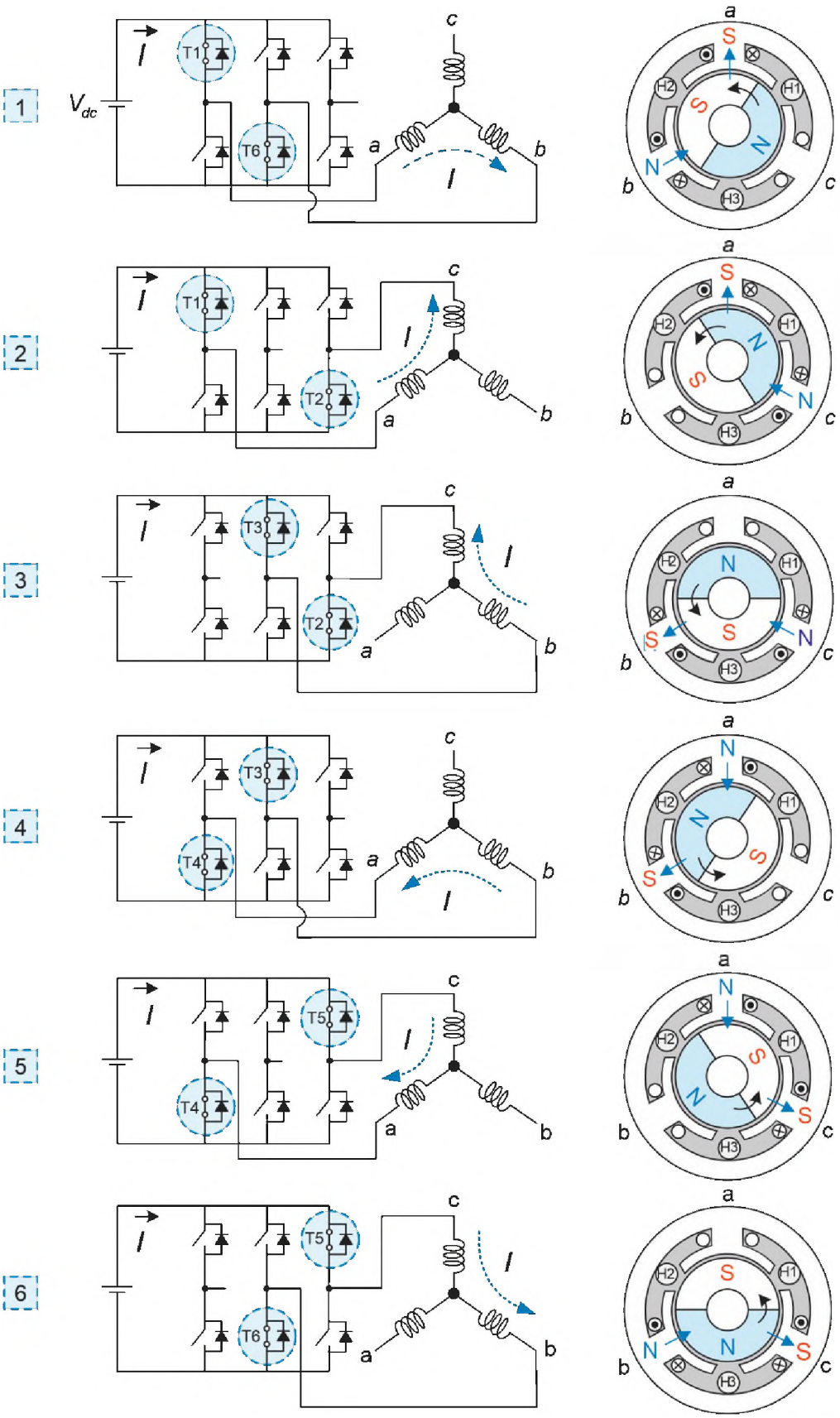


Рисунок 1.13 – Послідовність перемикання обмоток для двополюсного трифазного БДПС

Для здійснення електронної комутації обмоток безколекторного двигуна постійного струму використовують датчики положення ротора та спеціальні контролери (драйвери). Використовуючи інформацію про положення ротора, сигнали завдання швидкості та напрямку обертання, драйвери формують сигнали керування ключами інвертора.

Як видно з рисунку 1.13 у будь-який момент часу працюють лише дві фази БДПС. Відповідно, кожен комутаційний пристрій має інтервал провідності 120°.

Рисунок 1.14 ілюструє залежності між сигналами від датчиків Холла (H_1, H_2, H_3), протиЕРС (e_a, e_b, e_c) та струмів (i_a, i_b, i_c) обмоток статора для двополюсного трифазного БДПС. Датчики Холла виводять цифрові сигнали високого рівня для північного полюса *N*, і низького рівня – для південного полюса *S*. В залежності від сигналів датчиків Холла, збуджена фазова обмотка, тобто активна фазова обмотка, змінюється кожні 60 електричних градусів обертання для отримання безперервного крутного моменту. Перемикання активної фазової обмотки називається комутацією. Для зміни напрямку обертання послідовність перемикання щодо сигналів датчиків Холла повинна бути змінена.

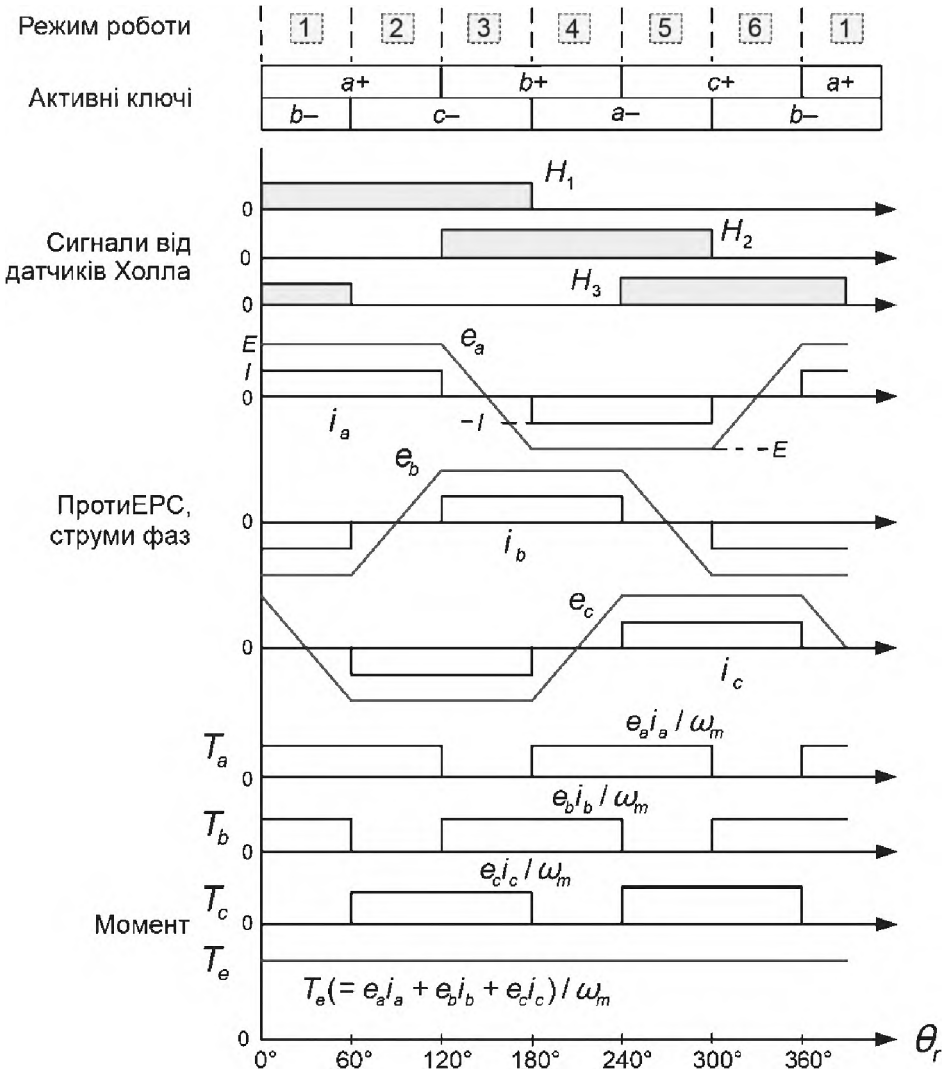


Рисунок 1.14 – Принцип керування трифазним БДПС

1.5 Математичний опис безколекторного двигуна постійного струму

1.5.1 Рівняння напруги. Розглянемо двополюсний трифазний БДПС, який показано на рисунку 1.15. Рівняння напруги для статора БДПС можуть бути виражені як

$$\boldsymbol{U}_{abcs} = \boldsymbol{R}_s \boldsymbol{i}_{abcs} + \frac{d\boldsymbol{\psi}_{abcs}}{dt}, \tag{1.1}$$

де $\boldsymbol{U}_{abcs} = [U_{as} U_{bs} U_{cs}]^T$ – напруга статора;

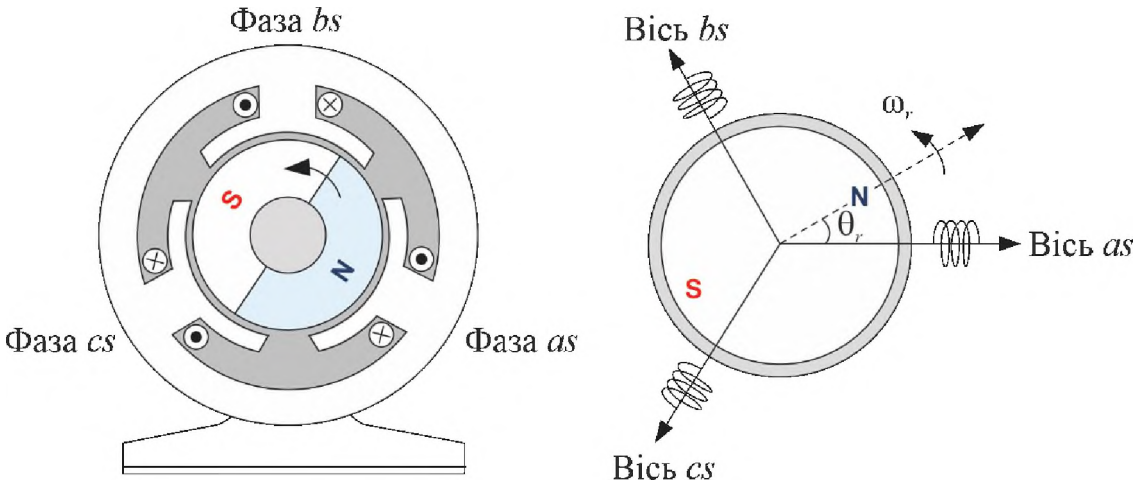
$\boldsymbol{R}_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$ – опір статора;

$\boldsymbol{i}_{abcs} = [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T$ – струм статора;

$\boldsymbol{\psi}_{abcs} = [\lambda_{as} \lambda_{bs} \lambda_{cs}]^T$ – потокозчеплення статора.

Потокозчеплення $\boldsymbol{\psi}_{abcs}$ обмоток статора складається з $\boldsymbol{\psi}_{abcs(s)}$ від струмів статора $\boldsymbol{i}_{abcs}$ та $\boldsymbol{\psi}_{abcs(f)}$ від постійного магніту ротора

$$\boldsymbol{\psi}_{abcs} = \boldsymbol{\psi}_{abcs(s)} + \boldsymbol{\psi}_{abcs(f)}. \tag{1.2}$$



а) б)

Рисунок 1.15 – Двополюсний трифазний БДПС (а)
та його узагальнений вигляд (б)

Підставивши рівняння (1.2) у рівняння (1.1) отримаємо рівняння напруги статора

$$\boldsymbol{U}_{abcs} = \boldsymbol{R}_s \boldsymbol{i}_{abcs} + \frac{d\boldsymbol{\psi}_{abc(s)}}{dt} + \boldsymbol{e}_{abcs}, \tag{1.3}$$

де $\boldsymbol{e}_{abcs} = \frac{d\boldsymbol{\psi}_{abc(f)}}{dt}$ – протиЕРС.

$$\boldsymbol{e}_{abcs} = \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} = \omega_m \begin{bmatrix} \psi_{asf} \\ \psi_{bsf} \\ \psi_{csf} \end{bmatrix} = \omega_m \psi_f \begin{bmatrix} f_{as}(\theta_r) \\ f_{bs}(\theta_r) \\ f_{cs}(\theta_r) \end{bmatrix}, \tag{1.4}$$

де $\psi_f = N\Phi_f$;

Φ_f – магнітний потік витка обмотки статора;

N – число витків обмотки статора;

$f_{as}(\theta_r)$, $f_{bs}(\theta_r)$,$f_{cs}(\theta_r)$ – одиничні функції, що повторюють форму сигналів протиЕРС e_{as}, e_{bs} таe_{cs} із максимальною амплітудою ±1;

θ_r – положення ротора.

Потокозчеплення статора $\boldsymbol{\psi}_{abcs(s)}$, яке обумовлене струмами статора, визначається як

$$\boldsymbol{\psi}_{abcs(s)} = L_s i_{abcs} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}. \quad (1.5)$$

При симетрії трифазних обмоток самоіндуктивності однакові, взаємні індуктивності однакові

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_s = L_{ls} + L_m, \quad (1.6)$$

$$L_{ab} = L_{ac} = L_{ba} = L_{bc} = L_{ca} = L_{cb} = -\frac{1}{2} L_m = M, \quad (1.7)$$

де $L_{ab} = \frac{\psi_a}{i_b}$ – взаємна індуктивність обмотки;

ψ_a – потокозчеплення обмотки a;

i_b – струм фазиb;

L_{ls} – індуктивність розсіювання;

L_m – індуктивність намагнічування.

З рівнянь (1.5)-(1.7) перепишемо рівняння напруги статора (1.3)

$$\boldsymbol{U}_{abcs} = \boldsymbol{R}_s \boldsymbol{i}_{abcs} + \boldsymbol{L}_{abcs} \frac{d\boldsymbol{i}_{abc(s)}}{dt} + \boldsymbol{e}_{abcs}, \quad (1.8)$$

$$\begin{bmatrix} U_{as} \\ U_{bs} \\ U_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix}, \quad (1.9)$$

оскільки $i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0$, тоді середину рівняння (1.9) можна записати як

$$\frac{d}{dt}[L_s i_{as} + M i_{bs} + M i_{cs}] = \frac{d}{dt}[L_s i_{as} - M i_{as}]. \quad (1.10)$$

Таким чином, рівняння (1.9) приймає вигляд

$$\begin{bmatrix} U_{as} \\ U_{bs} \\ U_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s - M & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M & 0 \\ 0 & 0 & L_s - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix}. \quad (1.11)$$

Рівняння напруги безколекторного двигуна постійного струму

$$U_{as} = R_s i_{as} + (L_s - M)\frac{d\boldsymbol{i}_{as}}{dt} + \boldsymbol{e}_{as}, \quad (1.12)$$

$$U_{bs} = R_s i_{bs} + (L_s - M)\frac{d\boldsymbol{i}_{bs}}{dt} + \boldsymbol{e}_{bs}, \quad (1.13)$$

$$U_{cs} = R_s i_{cs} + (L_s - M)\frac{d\boldsymbol{i}_{cs}}{dt} + \boldsymbol{e}_{cs}. \quad (1.14)$$

На відміну від двигунів змінного струму, які використовують систему координат d-q для полегшення їх керування, БДПС безпосередньо використовують трифазні величини abc для свого керування. Перетворення d-q необхідне для синусоїдальних величин. Оскільки струми, потік і протиЕРС БДПС є несинусоїдальними величинами, d-q перетворення для БДПС не має сенсу.

1.5.2 Рівняння моменту. Вихідний крутний момент T_e трифазного двигуна, як правило, розраховується з вихідної потужності P_e та механічної кутової швидкості ω_m

$$P_e = e_{as} i_{as} + e_{bs} i_{bs} + e_{cs} i_{cs}, \quad (1.15)$$

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{e_{as} i_{as} + e_{bs} i_{bs} + e_{cs} i_{cs}}{\omega_m}, \quad (1.16)$$

де $\omega_m = \frac{\omega_r}{P}$ – механічна кутова швидкість;

ω_r – електрична кутова швидкість; P – число пар полюсів.

З рівняння крутного моменту (1.16) можна побачити, що для отримання максимального крутного моменту потрібно щоб фазовий струм був у фазі із протиЕРС. Вимозі щодо максимального крутного моменту відповідає алгоритм керування, який представлено на рисунку 1.4.

Тепер розглянемо вихідний крутний момент трифазного БДПС, що приводиться в дію з інтервалом провідності 120°. У БДПС струми двофазних обмоток однакові за величиною, але течуть у зворотному напрямку, за винятком періоду комутації. Як приклад, розглянемо режим роботи 1, який показано на рисунку 1.4. В режимі 1, $i_{as} = I$, $i_{bs} = -I$, $i_{cs} = 0$ та $e_{as} = E$, $e_{bs} = -E$. Оскільки фазний струм знаходиться у фазі із протиЕРС, рівняння крутного моменту (1.16) можна виразити як добуток величин фазного струму та протиЕРС

$$T_e = \frac{e_{as}i_{as}+e_{bs}i_{bs}+e_{cs}i_{cs}}{\omega_m} = 2\frac{EI}{\omega_m}. \quad (1.17)$$

Для будь-якого з режимів роботи (1-6, див. рисунок 1.14) ми можемо отримати той самий результат.

Якщо I і E – сталі значення, вихідний крутний момент рівняння (1.17) є сталим значенням. Однак, якщо форма сигналу протиЕРС не є ідеальною трапецієподібною, існує пульсація крутного моменту, навіть якщо струми статора БДПС сталі. Для БДПС з довільними формами сигналів протиЕРС рівняння для вихідного крутного моменту (1.4), може бути представлено у вигляді

$$T_e = \psi_f[i_{as}f(\theta) + i_{as}f(\theta - 240°) + i_{as}f(\theta - 120°)]. \quad (1.18)$$

1.6 Система керування швидкістю електропривода на базі безколекторного двигуна

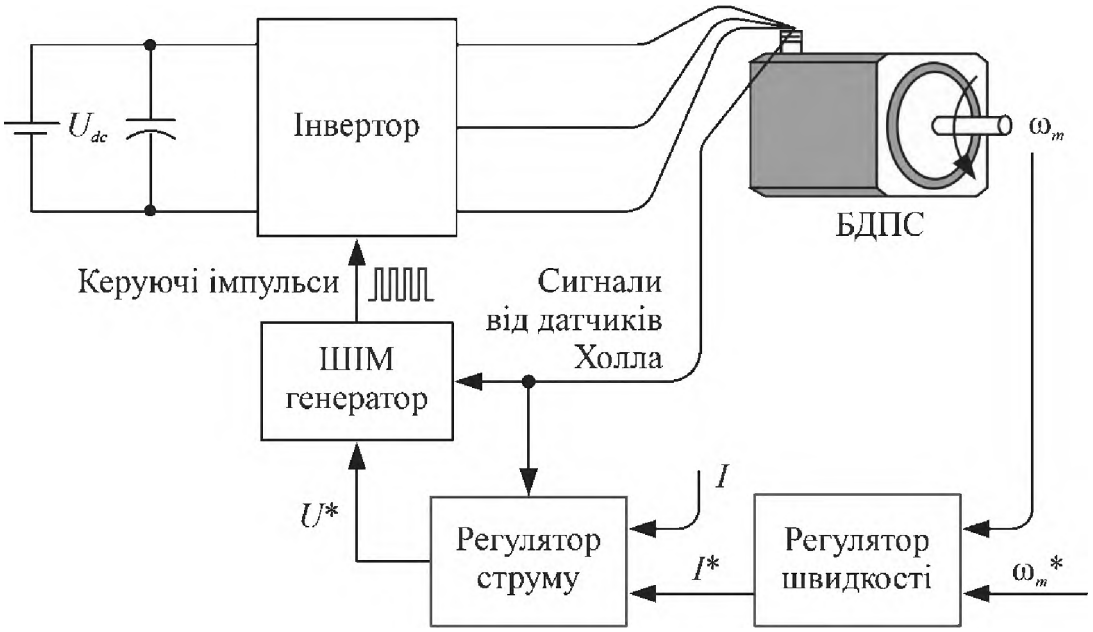
На рисунку 1.6 представлено функціональні схеми електропривода на базі безколекторного двигуна. Система керування швидкістю являє собою регульований електропривод з вихідною координатою – швидкістю ω_m та вхідною координатою – сигналом завдання швидкості ω_m*.

Електропривод містить двигун, інвертор, ШІМ генератор, датчики струму та кутової швидкості, і регулятори координат електропривода.

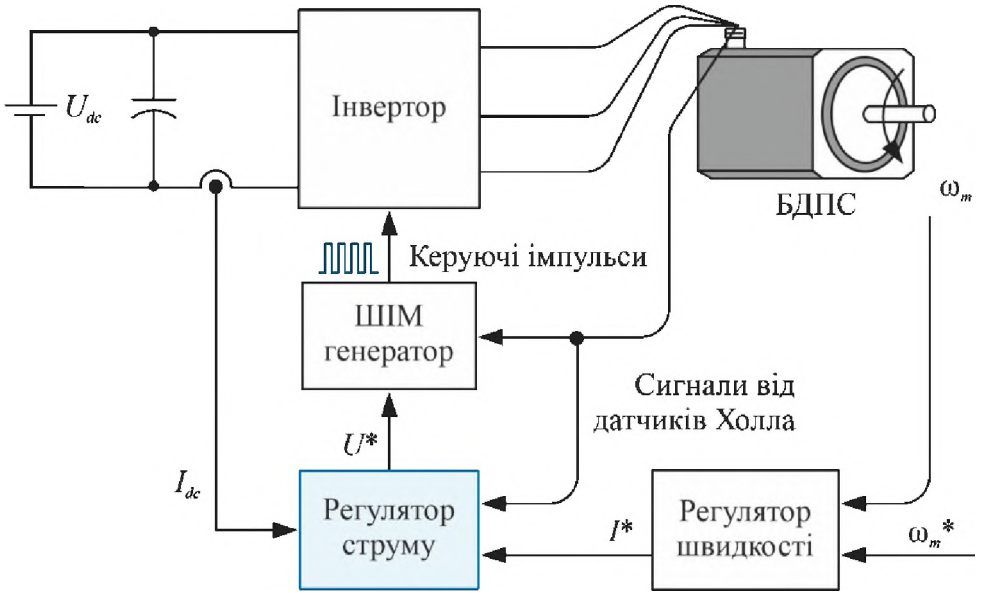
Трифазний БДПС підключено до інвертора. Напруга живлення U_{dc} подається на інвертор від джерела постійного струму.

Функціональна схема системи керування на рисунку 1.6містить регулятор струму для керування струмом (таким чином, крутним моментом). В цьому випадку сигнал на виході ПІ-регулятора швидкості є опорним значенням струму двигуна I*, а датчик струму необхідний для вимірювання фактичного струму двигуна I.

Без контуру струму важко контролювати струм двигуна в межах припустимого діапазону, оскільки при зміні завдання на швидкість опорне значення напруги може бути змінено в значній мірі. В такому випадку не можна розраховувати на якісне регулювання швидкості. Більше того, це може призвести до відключення системи привода через великий перехідний струм.



а)



б)

Рисунок 1.16 – Система керування швидкістю електропривода на базі безколекторного двигуна із постійними магнітами:
а – з датчиками фазних струмів; б – з датчиком струму в колі постійного струму

Для привода на базі безколекторного двигуна потрібно контролювати лише амплітуду фазних струмів. Це відбувається через те, що створюваний крутний момент пропорційний саме амплітуді фазного струму (див. рівняння (10.18)). Крім того, при вимірюванні амплітуди струму, можна контролювати трифазні струми індивідуально, як при керуванні струмом двигунів змінного

струму (див. рисунок 1.16, а). Однак, оскільки амплітуда фазного струму безколекторного електродвигуна пропорційна струму I_{dc} ланки постійного струму, отже амплітуду фазного струму можна контролювати вимірюванням I_{dc} (див. рисунок 1.16, б). У цьому випадку потрібен лише один датчик струму на стороні кола постійного струму, і, отже, такий варіант є більш економічним.

2 АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Функціональна схема позиційного електропривода на базі безколекторного двигуна постійного струму

2.1.1 В позиційних електроприводах на відміну від електроприводів зі швидкісним технологічним режимом роботи, вхідний сигнал системи керування задає не значення швидкості, а значення повороту/переміщення робочого органу. Електропривод здійснює поворот робочого органу з деякої початкової позиції в деяку кінцеву позицію з необхідною точністю зупинки в ній. Режим відпрацювання електроприводом заданого повороту/переміщення називається позиціонуванням.

Основним показником якості позиційного електропривода є точність позиціонування, тобто різниця між заданим і відпрацьованим переміщеннями в даний момент часу. Цей показник називається також неузгодженістю, або помилкою. Для кутової координати робочого органу це різниця між заданим кутом $\gamma_з$ і кутом виконавчого валу γ: $\delta=\Delta\gamma=\gamma_з-\gamma$.

Структурною ознакою позиційного електропривода є наявність зворотного негативного зв'язку за положенням.

На рисунку 2.1 представлено функціональну схему позиційного електропривода на базі безколекторного двигуна. Утворений за допомогою зворотного зв'язку замкнений контур регулювання положення складається з двох частин: системи керування положенням і об'єкта керування – швидкісної підсистеми (див. рисунок 1.6, а).

Механічні та електромеханічні характеристики БДПС аналогічні характеристикам двигуна постійного струму з незалежним збудженням. Це дозволяє реалізувати в БДПС принцип підпорядкованого регулювання координат з контурами струму якоря, швидкості обертання та кута повороту.

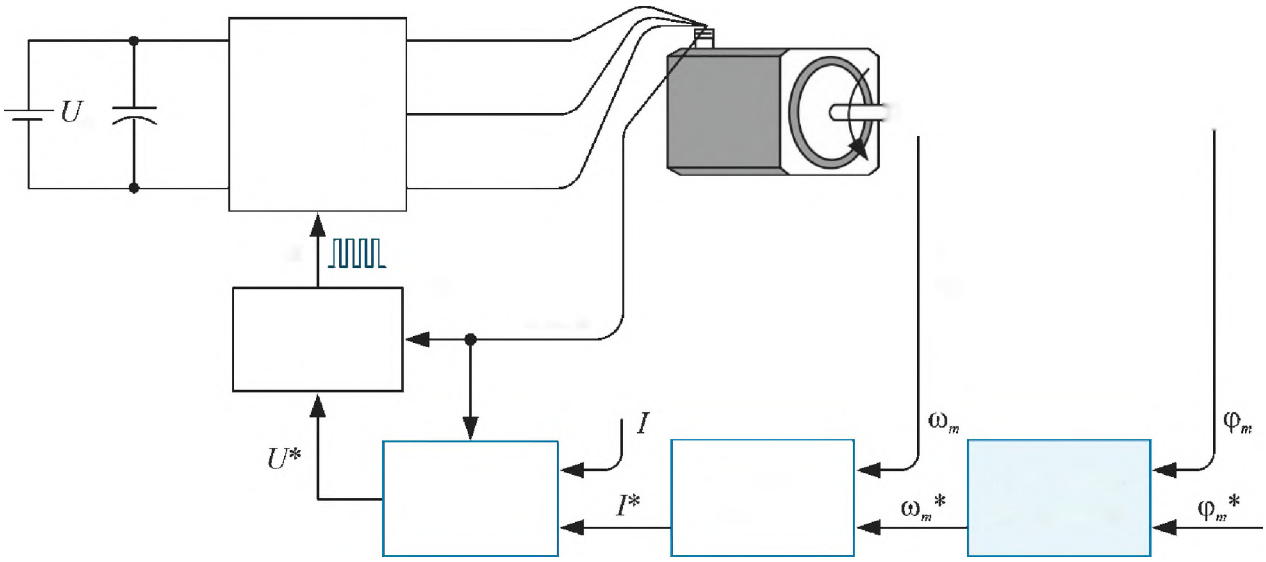


Рисунок 2.1 – Функціональна схема позиційного електропривода на базі БДПС

2.1.2 Розглянемо принцип роботи схеми.Задавальний пристрій формує сигнал завдання положення ротора φ_m^* відповідно вимогам технологічного процесу. Цей сигнал порівнюється із сигналом зворотного зв'язку за положенням φ_m, який відповідає поточному значенню кута повороту. Таким чином обчислюється сигнал неузгодженості φ_m^*-φ_m. Далі регулятор положення обробляє похибку та відповідно закладеного алгоритму керування формує на своєму виході сигнал завдання швидкості ω_m^*, який надходить на вхід регулятора швидкості. Сигнал ω_m^* порівнюється із сигналом зворотного зв'язку за швидкістю ω_m. Регулятор швидкості обчислює сигнал похибки і формує сигнал завдання струму I^*. Контур струму в системі керування призначений для виключення пульсації моменту та нерівності обертання ротора двигуна.

Сигнали з виходів регулятора швидкості I^* і датчика струму I надходять на регулятор струму. Виходи датчиків положення ротора (датчиків Холла) також пов'язано з регулятором струму.

Вихідний сигнал регулятора струмуU^* надходить до ШІМ генератора, який формує імпульси керування силовими ключами інвертора у відповідності з сигналами з датчиками положення ротора.

2.2 Побудова імітаційної моделі позиційного електропривода на базі безколекторного двигуна в MATLABSimulink

У відповідності з функціональною схемою системи (див. рисунок 2.1) в роботі побудовано імітаційну модель для середовищаMATLAB Simulink. Модель представлено на рисунку 2.2.До складу даної моделі входить: ідеальне джерело постійної напруги; напівпровідниковий перетворювач; безколекторний двигун, підсистема керування Control та вимірювальна підсистема Scopes.

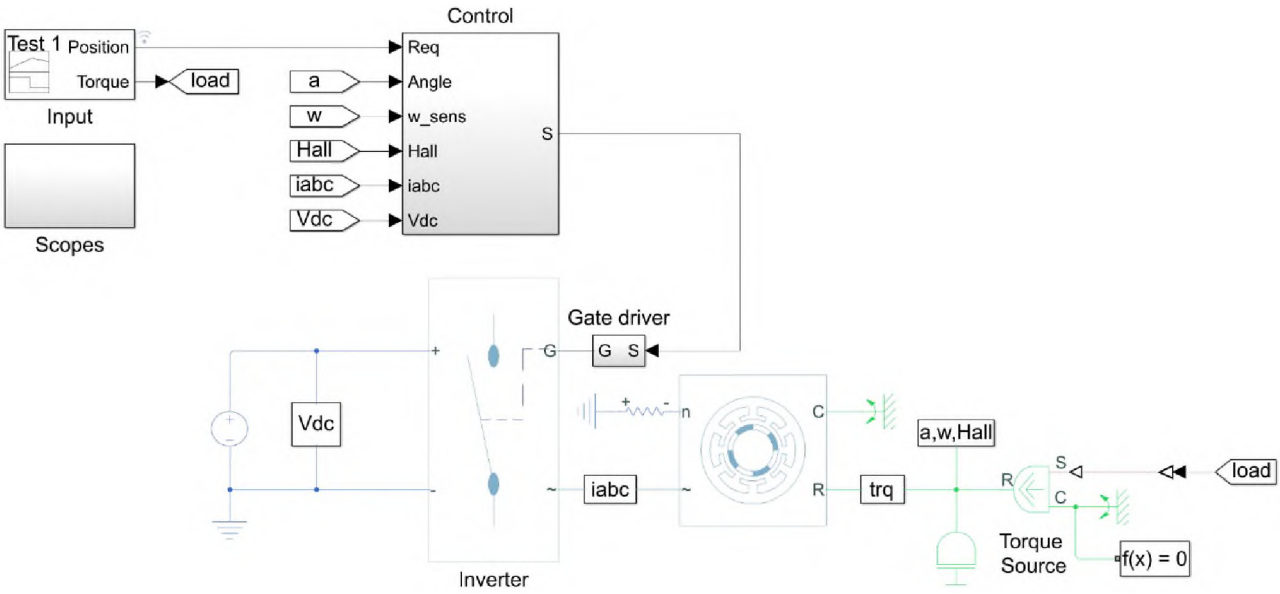


Рисунок 2.2 – Імітаційна модель позиційного електропривода на базі безколекторного двигуна в MATLAB Simulink

В роботі використано модель БДПС як електромеханічної системи з урахуванням наступних припущень: обмотки статора розташовані під кутом 120 градусів одна відносно іншої, їх опір і індуктивність сталі; не враховуються насичення магнітного ланцюга, гістерезис і вихрові струми; не враховується взаємодія сталі статора з постійними магнітами; проміжок електричної машини вважається рівномірним; обмотки статора вважаються симетричними і з'єднаними в зірку.

Блок Input призначений для завдання кута повороту ротора БДПС (Position) та моменту опору (Torque) та являє собою стандартний блок Signal Builder (рисунок 2.3).

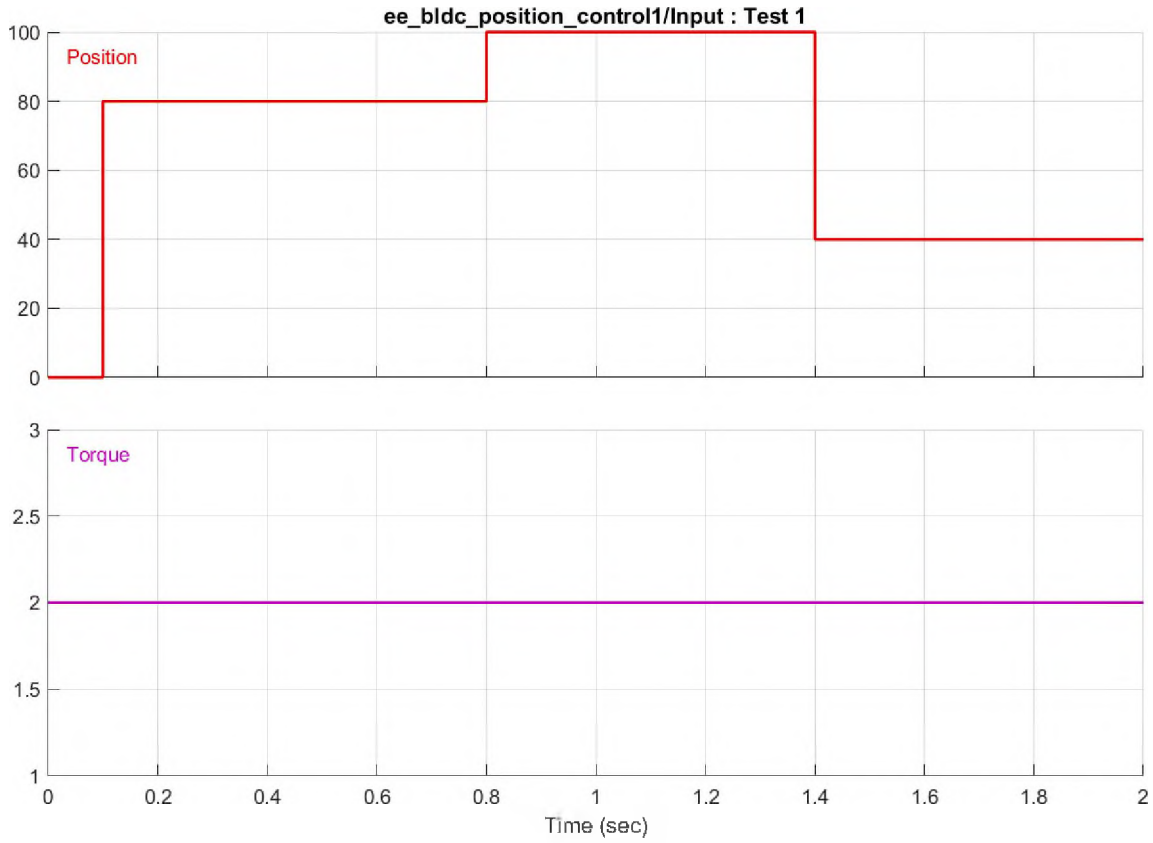


Рисунок 2.3 – Вікно Signal Builder

Підсистема керування Control використовує каскадну структуру керування на основі ПІ-регуляторів з трьома контурами керування (рисунок 2.4), зовнішнім контуром керування положення, контуром регулювання швидкості та внутрішнім контуром регулювання струму. На рисунку 2.4 прийняті наступні позначення: Position controller – регулятор положення (кута повороту), Speed controller – регулятор швидкості, BLDC Current Controller – регулятор струму, PWM – генератор ШІМ, Vdc filter – фільтр.

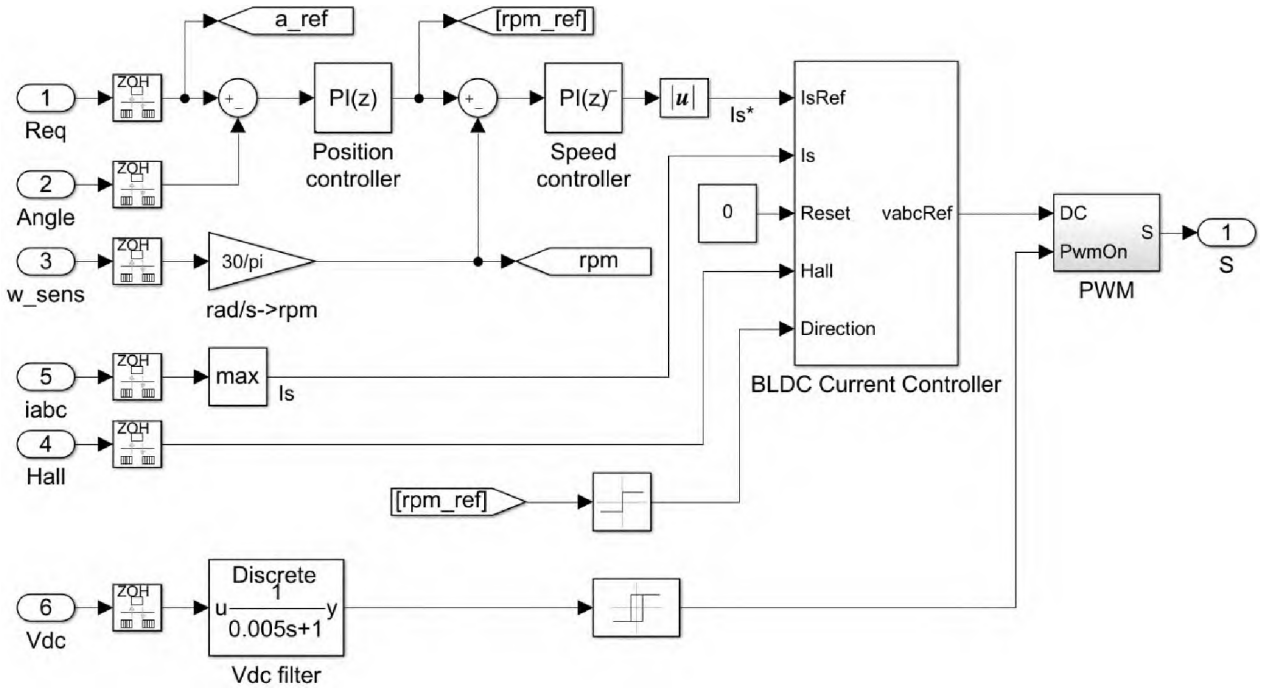


Рисунок 2.4 – Підсистема Control

Підсистема BLDC Current Controller представлена на рисунку 2.5. Регулятор струму на схемі позначено як PI controller.

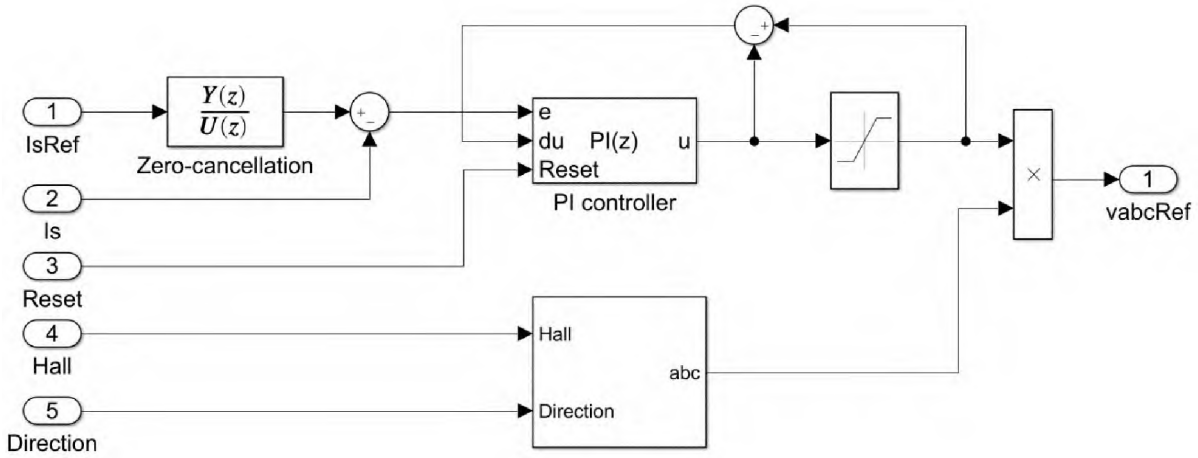


Рисунок 2.5 – Підсистема BLDC Current Controller

БДПС живиться від керованого трифазного інвертора Inverter (див. рисунок 2.2). Блок являє собою шестиімпульсний трифазний керований перетворювач, що складається з трьох мостових плечей, кожен з двома комутаційними пристроями. Доступний вибір комутаційних пристроїв: GTO, Ideal Semiconductor Switch, IGBT, MOSFET, тиристор або усереднений комутатор.

Реалізація на основі усередненого комутатора використовує сигнали затвора від 0 до 1, які можуть бути усереднені протягом певного періоду. Ця реалізація дозволяє субдискретизувати модель або використовувати сигнали модуляції замість ШІМ-сигналів. Єдиний вектор G, що необхідний для керування трифазним перетворювачем, формується за допомогою блока Gate driver. В основу цього блоку покладено стандартний Six-Pulse Gate Multiplexer.

Безколекторний двигун постійного струму в моделі представлено блоком BLDC. Цей блок являє собою трифазний безколекторний двигун постійного струму з трапецієподібною формою сигналу протиЕРС. При цьому залишається можливість визначити інші варіанти форми протиЕРС за допомогою табличних значень.

Підсистема Scopes представлена на рисунку 2.6. Вона містить осцилографи, які дозволяють побачити результати моделювання: заданий a_ref та дійсний a кути повороту ротора (Angle); кутова швидкість ротора rpm (RPM); момент Tq_meas (Tq); фазні струми iabc (Iabc).

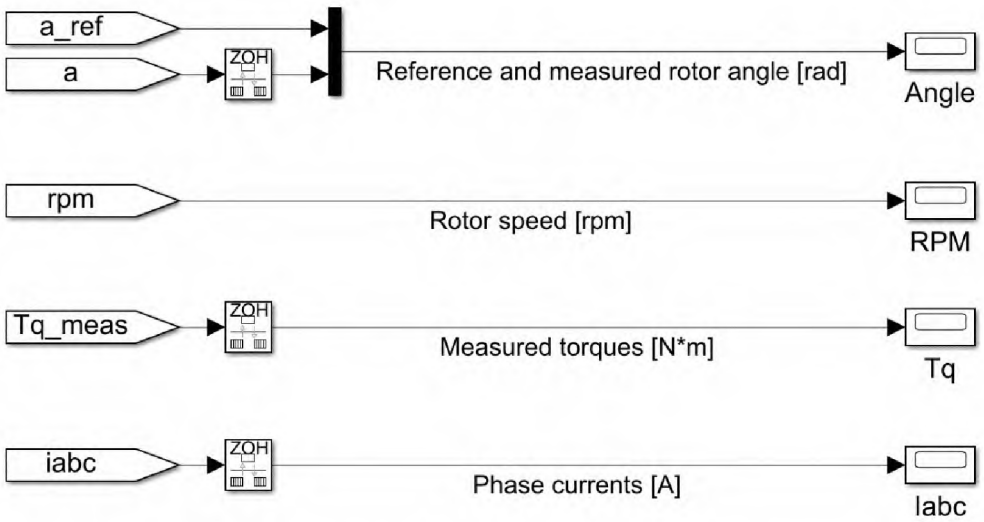


Рисунок 2.6 – Підсистема Scopes

В роботі проведено моделювання позиційного електропривода на базі БДПС з параметрами, які наведено в таблицях2.1 та 2.2.

Таблиця 2.1 – Параметри БДПС

Параметр	**Значення**
Кількість пар полюсів p	4
Опір фази статора R_s, Ом	0,1
Індуктивність фази статора L_s, Гн	0,0001
Взаємна індуктивність статора M, Гн	0,00001
Магнітний потік Φ_{max}, Вб	0,0175
Момент інерції ротора J_m, кг·м^2	0,0005
Напруга живлення U_{dc}, В	48

Таблиця 2.2 – Параметри регуляторів

Параметр	**Значення**		
	Регулятор струму	Регулятор швидкості	Регулятор положення
Коефіцієнт посилення пропорційної ланки k_P	0,01	0,1	250
Коефіцієнт посилення інтегруючої ланки k_I	0,08	15	0,5

2.3 Дослідження динаміки

У результаті моделювання системи керування БДПС були отримані перехідні характеристики системи керування, які представлені на рисунках 2.7-2.10. У більшості приводів найкращим вважається такий перехідний процес відпрацювання середніх/великих переміщень, коли швидкість двигуна в процесі відпрацювання заданого кута змінюється по трапецеїдальному графіку, оскільки це дозволяє в повній мірі використовувати перевантажувальну здатність двигуна і виключає виникнення перерегулювання в перехідному процесі.

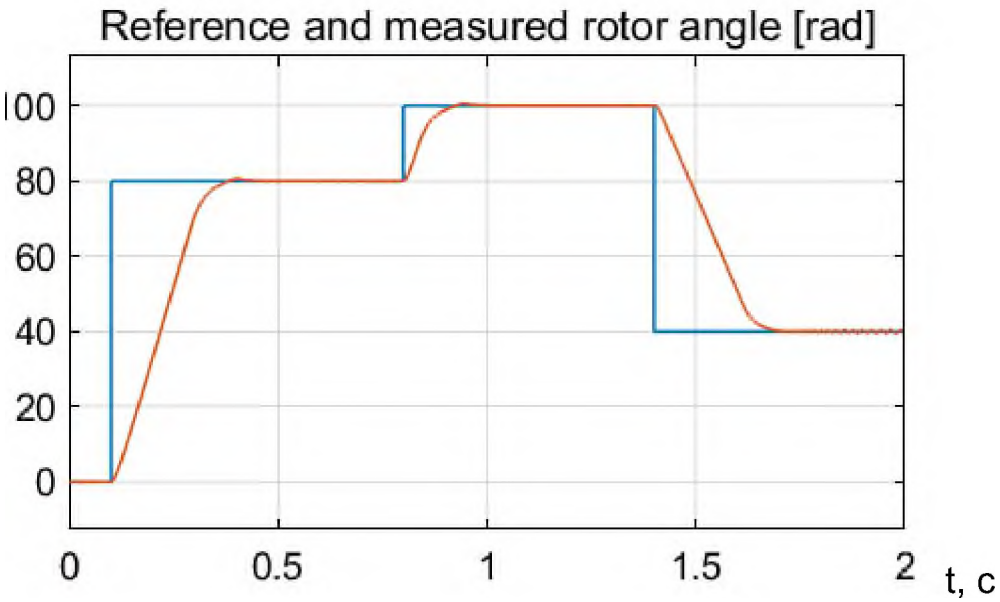


Рисунок 2.7 – Перехідна характеристика кута повороту

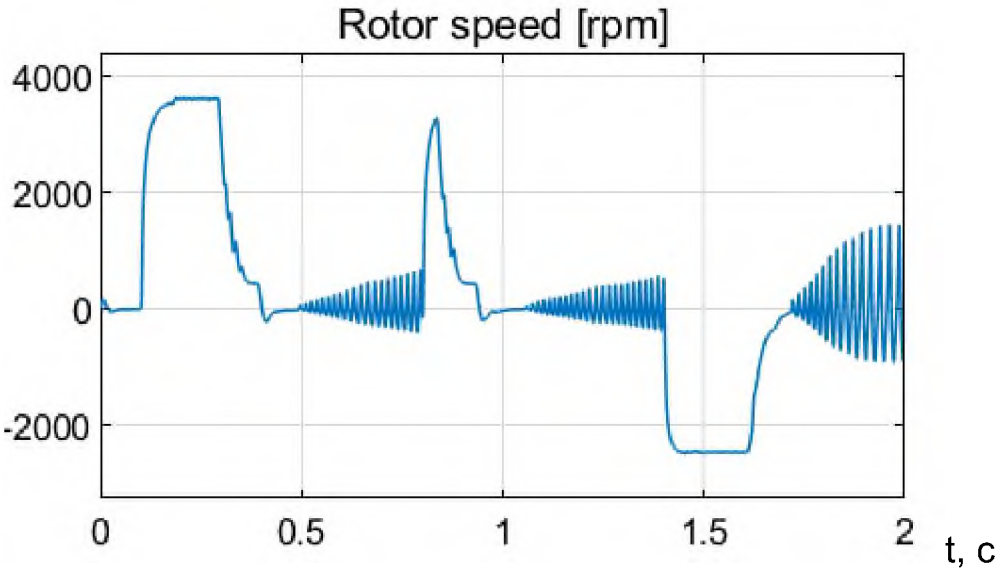


Рисунок 2.8 – Перехідна характеристика швидкості

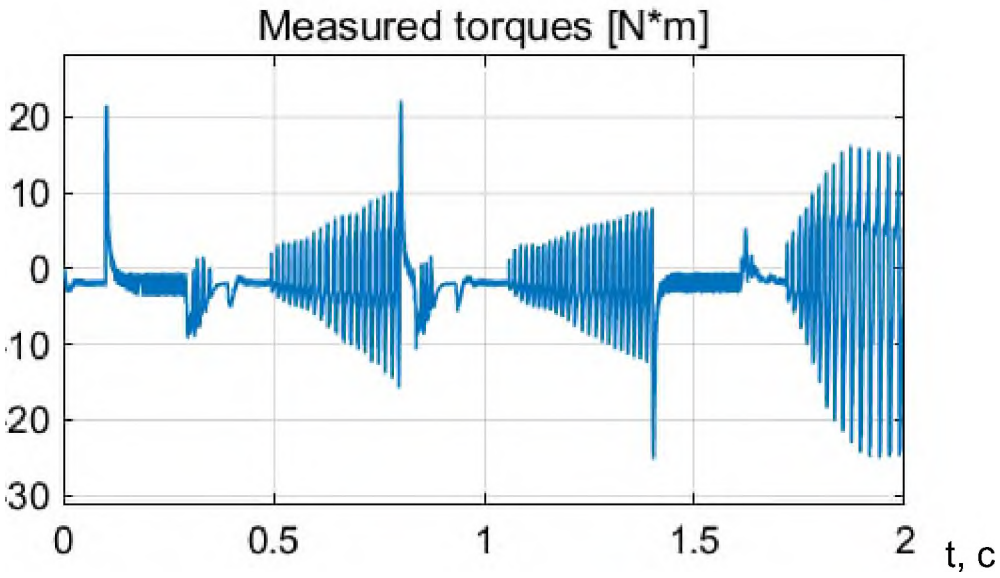


Рисунок 2.9 – Перехідна характеристика моменту

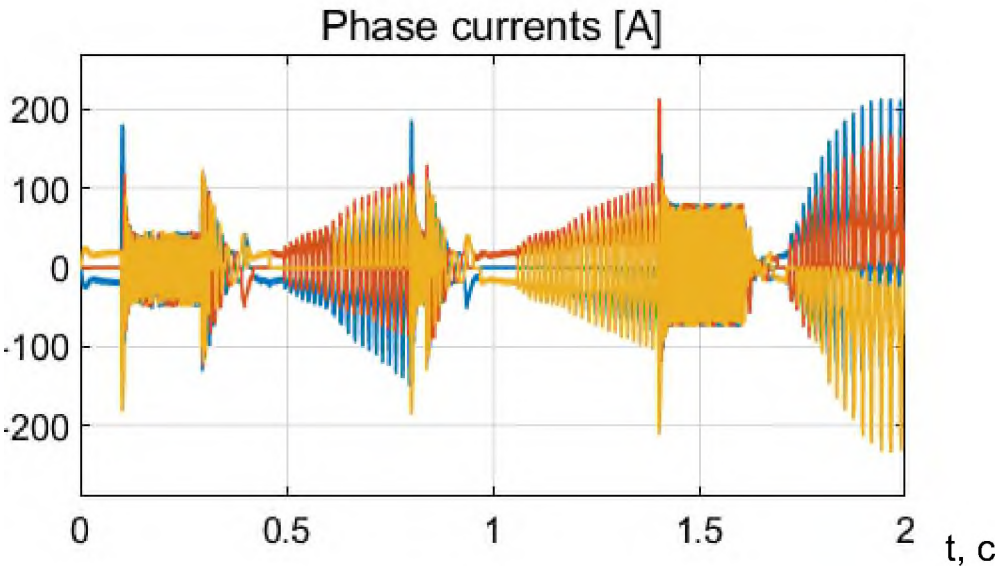


Рисунок 2.10 – Перехідні характеристика струмів фаз статора

В таблицю 2.3 зведено показники якості перехідних процесів, які отримано в результаті моделювання (рисунки 2.7 та 2.8).

Таблиця 2.3 – Показники якості

Параметр	Відносне перерегулювання σ, %	Час встановлення$t_Р$, с	Час наростання $t_Н$, с	Усталена похибка $\varepsilon_{уст}$
Кутова швидкість	0	0,065	0,03	0
Кут повороту	0,65	-	-	0,035 рад

Аналіз перехідних процесів показав, що система працездатна і має порівняно високі показники якості. Виявлено, що при відпрацюванні середніх/великих кутів повороту швидкість двигуна змінюється по трапецеїдальному графіку, отже в повній мірі використовується перевантажувальна здатність двигуна. Пульсації крутного моменту обумовлені пульсаціями струму, що виникають під час комутації фаз. Через коливання моменту погіршуються характеристики регулювання швидкості, особливо на низьких швидкостях.

Виділяють дві основні причини пульсацій моменту, викликаних безпосередньо системою керування безколекторним двигуном. Перша обумовлена пульсаціями струму, викликаними ШІМ на періоді між комутаціями фаз. Друга – процесами, що відбуваються при комутації струму з однієї фази двигуна на іншу.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів

3.1.1 Опис і класифікація небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Виробничі фактори залежно від наслідків, до яких може привести їх дія, прийнято підрозділяти на небезпечні та шкідливі.

Небезпечний виробничий фактор – фактор, вплив якого на працюючого у певних умовах приводить до травми або різкого погіршення здоров'я.

Шкідливий виробничий фактор – фактор, вплив якого на працюючого у певних умовах приводить до захворювання або зниження працездатності.

В залежності від рівня та тривалості впливу шкідливий фактор може стати небезпечним. За природою дії на організм людини небезпечні та шкідливі виробничі фактори підрозділяються на чотири групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

До фізичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів відносяться фактори, що характеризують технологічний процес (рухомі машини та механізми, рухомі частини обладнання, вироби, заготовки та матеріали, що пересуваються, гострі кромки, заусениці; підвищена або знижена температура поверхонь обладнання або матеріалів; підвищене значення електричної напруги, підвищений рівень статичної електрики), та фактори, що характеризують повітря виробничих приміщень (підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони, метеорологічні умови, підвищений рівень шуму, ультразвукових коливань, вібрації на робочому місці, недостатня освітленість робочої зони і т. п.).

Хімічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори підрозділяються:

– за характером впливу на людину на: токсичні (викликають отруєння організму), дратівні, сенсибілізуючі (викликають алергію), канцерогенні (викликають злоякісні утворення), мутагенні (впливають на зміну спадковості), репродуктивні;

– за шляхом проникнення у організм людини: проникаючі через органи дихання, шлунково-кишковий тракт, шкіру та слизові оболонки.

Біологічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори містять такі біологічні об'єкти: мікроорганізми (бактерії, віруси та ін.) та продукти їх життєдіяльності, макроорганізми (рослини та тварини).

Психофізіологічні – фізичні та нервово-психічні перевантаження.

Класифікацію небезпечних та шкідливих виробничих факторів потрібно навести лише для конкретного виробничого приміщення, для якого в подальших структурних частинах розділу буде проводитись аналіз умов праці.

3.1.2 Можливі причини виникнення небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Для кожного із визначених в попередньому пункті небезпечних та шкідливих виробничих факторів необхідно вказати можливі причини їх виникнення. Наприклад, недостатність природного освітлення може бути спричинена невідповідністю геометричних розмірів та кількості світлових прорізів характеристиці зорових робіт, що виконуються в даному виробничому приміщенні.

2.1.3 Можливі причини виникнення небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Для кожного із визначених небезпечних та шкідливих виробничих факторів стисло описати їхню дію на організм людини. Наприклад, недостатність природного освітлення може призвести до швидкої втоми органів зору, зменшення продуктивності праці, часткової втрати зору тощо.

3.2 Захист від ураження електричним струмом

3.2.1 Для забезпечення захисту людей від ураження електричним струмом використовуються окремо або в поєднанні один з одним такі технічні способи та засоби як: захисне заземлення, занулення, вирівнювання потенціалів, мала напруга, захисне відімкнення, ізоляція провідників із струмом, огороджувальні пристрої, попереджувальна сигналізація, блокування, знаки безпеки, засоби захисту та запобіжні пристрої.

Захисне заземлення – це навмисне електричне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих струмопровідних частин, що можуть опинитися під напругою. Заземлення здійснюється за допомогою природних, штучних або змішаних заземлювачів. Заземлення бувають виносні і контурні. В першому випадку заземлювачі розміщують на деякому віддаленні від обладнання, що заземлюється. Вони захищають за рахунок малого їх опору (максимальне значення опору заземлення 4 Ом). При контурному заземленні заземлювачі розміщують по контуру навколо заземленого обладнання на невеликій відстані один від одного.

3.2.2 В якості провідників для заземлення можуть бути використані металеві конструкції будівель, стальні труби, стальні оболонки кабелів, круглі провідники діаметром не менше 5 мм, голі мідні і алюмінієві провідники перерізом 4 і 6 мм2, жили кабелів перерізом для міді – 1 мм2, для алюмінію – 1,5 мм2, кутова сталь та ін. Вертикальні заземлювачі (довжиною 2,5-3 м) з'єднують стальною шиною, яку приварюють до кожного заземлювача. Захисне заземлення необхідно періодично переглядати і ремонтувати. Із застосованого обладнання необхідно заземлювати корпуси електродвигунів верстатів, електроплит, вторинні обмотки і корпуси трансформаторів, переносний електроінструмент, розрахований на напругу більше 42 В, рухоме і переносне електрообладнання, каркаси розподільних електрощитів, щитів керування, шаф, металеві оболонки дротів, стальні труби, в яких вміщений електродріт, інші металеві конструкції.

В лабораторіях та кабінетах по периметру кімнати прокладають заземлювальну лінію (стальний прут діаметром 7 мм) і з'єднують її шляхом зварювання з нульовим провідником, природним чи штучним заземлювачем. Від утвореного контуру зварюванням або жорстким болтовим з'єднанням виконують металеві відводи до каркасу електророзподільного щита, до корпусів електродвигунів.

Заземлення електроустановок необхідно виконувати у всіх випадках при напругах 500 В і вище, при напругах вище 42 В змінного струму і 110 В постійного струму – в приміщеннях з підвищеною небезпекою, особливо небезпечних і в зовнішніх електроустановках. Профілактичний огляд заземлених пристроїв вико-

нують не рідше 1 разу в рік. При цьому перевіряють стан заземлювального пристрою, наявність кола між контуром заземлення і заземлювальними пристроями.

Занулення – це навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих струмонепровідних частин, які можуть опинитися під напругою (корпуси електроустаткування, кабельні конструкції, сталеві труби, тощо). Занулення використовують при чотирьох провідній системі трьохфазного струму з глухо заземленою нейтраллю. Занулення перетворює замикання на корпус в однофазне коротке замикання. Внаслідок цього спрацьовує максимальний струмовий захист (перегорає запобіжник), який відключає пошкоджену ділянку мережі. Для збільшення безпеки нульовий провід заземлюють в декількох точках.

3.2.3 Можливе одночасне занулення і заземлення одного і того ж корпусу, але одночасне занулення одних і заземлення інших машин в одній і тій же мережі заборонено. Не потрібно додатково заземлювати занулені елементи електропристроїв. Заземлення і занулення забезпечують спрацювання приладів захисту, швидке автоматичне вимикання пошкодженої установки від мережі.

Захисне відімкнення – захист швидкої дії, що забезпечує автоматичне відімкнення електроустановки під час виникнення в ній небезпеки ураження людини струмом. Така небезпека може виникнути під час замикання фази на корпус, зниженні опору ізоляції мережі нижче відповідного рівня, а також у випадку дотику людини безпосередньо до струмоведучої частини, що знаходиться під струмом.

Для захисту від дотику до частин, що знаходяться під напругою, використовується ізоляція. Для захисту від дотику до частин, що знаходяться під напругою, використовується також подвійна ізоляція – електрична ізоляція, що складається з робочої та додаткової ізоляції. Опір електроізоляції ручних електричних машин повинен бути більше 2,5 МОм, силової і освітлювальної електропроводки – вище 0,5 МОм. Перевірку ізоляції електроінструменту слід проводити мегаометром не рідше 1 разу в квартал, електропроводки – не рідше 1 разу в 3 роки.

Блокування застосовується в електроустановках напругою вище 220 В, в яких часто ведуться роботи на струмоведучих частинах, що огороджуються. Бло-

кування забезпечує зняття напруги із струмоведучої частини і електроустановки під час проникнення до них без зняття напруги

Часто використовується звукова та світлова сигналізація, надписи, плакати та інші засоби інформації, що попереджують про небезпеку.

За призначенням електрозахисні засоби поділяються на ізолюючі (діалектричні рукавиці, боти, калоші, килимки, ізольовані підставки, інструмент з ізолюючими ручками, ізолюючі штанги, кліщі тощо), огороджувальні (переносні огородження, заземлення тощо) та запобіжні (пояси, захисні окуляри, каски, спеціальні рукавиці). Засоби індивідуального електрозахисту є захисні костюми, взуття і рукавиці.

3.3 Пожежна безпека

3.3.1 Забезпечення пожежної безпеки є першочерговим завданням кожного підприємства і організації, особливо, якщо в технологічному процесі застосовуються горючі речовини і існує небезпека виникнення пожежі та вибуху як всередині апаратури, так і поза нею, в приміщенні і на відкритих майданчиках. Так само причиною пожежі може служити наявність у повітрі робочої зони горючого пилу і волокон. Пожежна безпека являє собою комплекс дій щодо попередження небезпеки виникнення пожеж та вибухів, а також, в разі їх виникнення, заходів щодо їх ліквідації. Основним документом, який регламентує діяльність щодо забезпечення пожежної безпеки, є Закон України про пожежну безпеку 2009. Цей Закон визначає загальні правові, економічні та соціальні основи забезпечення пожежної безпеки на території України, регулює відносини державних органів, юридичних і фізичних осіб у цій галузі незалежно від виду їх діяльності та форм власності. (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1994, N 5, ст.21). Закон пред'являє загальні вимоги до пожежної безпеки організації (об'єкта), які конкретизуються в конкретних законодавчих актах (указах, постановах і т.д.) і в галузевих правилах пожежної безпеки. Важливу роль у забезпеченні пожежної безпеки грає персонал. Навчання персоналу проводиться шляхом його інструктування і

проходження пожежно-технічного мінімуму. Для цього наказом керівника необхідно визначити порядок і терміни проходження протипожежного інструктажу та пожежно-технічного мінімуму, а також призначити осіб, відповідальних за їх проведення. Проведення інструктажів з пожежної безпеки можливо проводити спільно з інструктажами з охорони праці. Для цього питання пожежної безпеки включаються до програми вступного та первинного інструктажів. При проведенні первинного інструктажу необхідно розповісти про виробничому обладнанні та установках з підвищеною пожежною небезпекою, про використовувані на робочому місці і ділянці пожежонебезпечних речовин і матеріалах, заходи запобігання пожеж і загорянь, вказати місце для куріння, ознайомити знову надходження з наявними в цеху засобами пожежогасіння, показати найближчий телефон (пожежний сповіщувач) і пояснити правила поведінки в разі виникнення пожежі. З метою підвищення загальних технічних знань робітників і службовців, ознайомлення їх з правилами пожежної безпеки, а також для більш детального навчання способам використання наявних засобів пожежогасіння проводиться навчання з пожежно-технічного мінімуму. Порядок проведення (теми занять, терміни проведення та особи відповідальні за проведення занять) з пожежно-технічного мінімуму відбивається в наказі керівника організації. Далі наведена приблизна програма пожежно-технічного мінімуму, яка більше орієнтована на пожежонебезпечне та вибухонебезпечне виробництво.

3.3.2 Пожежа – це неконтрольоване горіння поза спеціальним вогнищем, що заподіює матеріальну шкоду, шкоду життю і здоров'ю громадян. Пожежа характеризується утворенням відкритого вогню та іскор, підвищеною температурою повітря та оточуючих предметів, токсичних продуктів горіння і диму, зниженою концентрацією кисню, пошкодженням будинків і споруд. Найчастіше пожежі є причинами вибухів. Дані фактори є факторами виробничої небезпеки. Причинами виникнення пожеж є: порушення заходів пожежної безпеки, в тому числі при проектуванні і будівництві будівель і споруд; порушення протипожежного режиму; неправильне встановлення та експлуатація систем вентиляції та кондиціонування повітря. Виникнення пожежі в житлових приміщеннях обумовлено наступними

причинами: ігнорування основних правил пожежної безпеки; несправність електричної проводки; займання електроприладів - несправних, саморобних або залишених без нагляду; витік газу; необережне використання печей і камінів; необережне поводження з вогнем та пустощі дітей. Причинами загорянь на підприємствах відбуваються з наступного: будинок побудований без дотримання СНІПов і Правил пожежної безпеки; недотримання Норм Пожежної Безпеки персоналом підприємства; порушення технологічного процесу (зварювальні роботи, використання електрообладнання), яке призводить до виникнення пожежі; використання несправного обладнання в процесі роботи на підприємстві; будівля не зарахована необхідним пожежним обладнанням: пожежні шафи, пожежні щити, а також необхідні види вогнегасники. Пожежа на підприємстві має властивість поширюватися з величезною швидкістю. Цьому сприяє: відсутність або непридатність первинних засобів пожежогасіння; відсутність коштів перешкоджають поширенню пожежі, таких як протипожежні двері (вогнестійкі двері); зберігання великої кількості горючих, легкозаймистих речовин і матеріалів на складах і безпосередньо в приміщеннях; низька швидкість виявлення виник загоряння; відсутність коштів автоматичного гасіння пожежі; неправильне гасіння пожежі. У житлових будинки пожежа швидше поширюється через те, що в приміщення надходить кисень, підживлює полум'я. Тому не рекомендується при виникненні пожежі розбивати вікна, відкривати двері і т.п. Для того щоб попередити виникнення пожежі в приміщенні, зберегти життя і майно, необхідно: при виникненні пожежі - Оперативний дзвінок у пожежну частину за номером 101; укомплектувати приміщення необхідними засобами пожежогасіння та пожежним обладнанням. До такого обладнання відносяться: вогнегасники, пожежні шафи, укомплектовані пожежними рукавами, пожежні щити з інвентарем, плани евакуації та занки пожежної безпеки; не зберігати в будинку запаси легкозаймистих і горючих рідин і матеріалів поблизу відкритого вогню або сильно нагрітих електроприладів; бути обережними при використанні предметів побутової хімії, а також при їх утилізації. Заборонено тримати на сходових майданчиках меблі, легкозаймисті речовини, захаращувати горища і підвали. Не використовуйте електронагрівальні прилади поблизу горючих

речовин, та ін. Підвищена температура навколишнього середовища. Призводить до порушення теплового режиму тіла людини, викликає перегрів, погіршення самопочуття, порушення ритму дихання, діяльності серця і судин. Токсичні продукти горіння і дим. Склад продуктів згоряння залежить від складу палаючого речовини і умов, при яких відбувається його горіння. Перш за все виділяється велика кількість оксиду вуглецю (чадного газу), вуглекислого газу, оксидів азоту, які заповнюють об'єм приміщення, в якому відбувається горіння, і створюють небезпечні для життя людини концентрації. Знижена концентрація кисню. Вражаючі фактори при вибуху (повітряна ударна хвиля, теплове випромінювання, руйнування і т.п.).

Горіння – це швидкоплинна хімічна реакція перетворення хімічних речовин, що супроводжується виділенням великої кількості теплоти і яскравим світінням. Горіння буває повним і неповним. Повний горіння протікає при достатній кількості кисню і закінчується утворенням речовин, які не здатні до подальшого горіння. Якщо кисню недостатньо, то відбувається неповне горіння, що супроводжується утворенням горючих та токсичних продуктів.

Вогнестійкість – це здатність конструкцій зберігати свої робочі функції під дією високих температур пожежі. Умови виникнення пожежі в будівлях і спорудах багато в чому визначається ступенем їх вогнестійкості, яка в свою чергу залежить від займання і вогнестійкості будівельних матеріалів. За ступенем вогнестійкості будівлі і споруди поділяються на 5 ступенів, а за ступенем пожежонебезпеки та вибухонебезпечності на 5 категорій.

Вибух – це швидке перетворення речовин, що супроводжується виділенням енергії, здатної виробляти роботу. Пожежонебезпека і вибухонебезпечність речовин характеризується їх горючість і здатністю до займання від джерела запалювання і самозаймання. Джерела запалювання (імпульси) бувають теплові (відкрите полум'я, іскра, електрична дуга і ін.) Хімічні (екзотермічні хімічні реакції) і мікробіологічні (пов'язані з життєдіяльністю мікроорганізмів, які впливають на збільшення температури). За горючості всі речовини поділяються на: негорючі, важкогорючі, горючі (легкозаймисті, середньої займистості, важко займисті).

ВИСНОВКИ

В роботі представлені результати, які узагальнюють теоретичні дослідження позиційного електропривода суднових механізмів та пристроїв на базі безколекторного двигуна з постійними магнітами.

1. Визначено структуру електропривода та доведено, що БДПС поєднує високу надійність безколекторних синхронних машин із лінійними характеристиками колекторних двигунів, усуваючи проблему зносу й іскріння щіток.

2. Вивчено роботу трифазного БДПС із датчиками Холла, складено його математичну модель та обґрунтовано застосування підпорядкованого регулювання швидкістю з внутрішнім контуром струму для захисту від перевантажень.

3. Розроблено структуру позиційного привода, головною особливістю якої є введення негативного зворотного зв'язку за положенням для точного відпрацювання заданого кута повороту.

4. Побудовано комплексну імітаційную модель позиційного електропривода в середовищі MATLAB/Simulink, яка включає блоки ідеального джерела постійної напруги, напівпровідникового перетворювача, моделі БДПС (BLDC), а також підсистеми керування. Дослідження перехідних процесів підтвердило високу якість динаміки.

Встановлено, що при великих переміщеннях швидкість змінюється за оптимальним трапецеїдальним графіком, повністю використовуючи перевантажувальну здатність двигуна, хоча у системі присутні характерні комутаційні пульсації крутного моменту.

5. Проаналізовано шкідливі фактори; для електробезпеки обґрунтовано застосування захисного заземлення й занулення, а для пожежної безпеки – проведення інструктажів та оснащення робочих зон засобами пожежогасіння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник. Львів : Афіша, 2006. 352 с.

2. Загірняк М. В., Невзлін Б. І. Електричні машини : підручник. Київ : Знання, 2009. 399 с.

3. Клепіков В. Б. Вступ до спеціальності «Електромеханіка» : навч. посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2011. 188 с.

4. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 р. № 5403-VI. Відомості Верховної Ради України. 2013. № 34–35. Ст. 458.

5. Кудін В. Ф., Колесніков А. А. Системи підпорядкованого регулювання електроприводів : навч. посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 165 с.

6. Лозинський О. Ю., Садовой О. В., Соколова О. В. Позиційні електроприводи та системи підпорядкованого регулювання. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. 280 с.

7. Островерхов М. Я., Бурик М. П. Керування безколекторними двигунами постійного струму : монографія. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 212 с.

8. Попович М. Г., Лозинський О. Ю. Теорія електропривода : підручник. 2-ге вид. Київ : Вища школа, 2007. 511 с.

9. Ткачук К. Н., Халімовський М. О., Зацарний В. В. Основи охорони праці та промислової безпеки : навч. посібник. Київ : Каравела, 2016. 448 с.

10. Шкрабець Ф. П., Остапчук О. В. Моделювання електромеханічних систем у середовищі MATLAB/Simulink : навч. посіб. Дніпро : НТУ «ДП», 2018. 150 с.

11. Hanselman D. Brushless Permanent Magnet Motor Design. 2nd ed. Madison : Magna Physics Publishing, 2006. 434 p.

12. Hendershot J. R., Miller T. J. E. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Venice : Motor Design Books LLC, 2010. 822 p.

13. Krause P., Wasynczuk O., Sudhoff S., Pekarek S. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. 3rd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2013. 680 p.

14. Krishnan R. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. Boca Raton : CRC Press, 2010. 614 p.

15. MathWorks. Simscape Electrical User's Guide. Natick : The MathWorks, Inc., 2023. 1240 p. URL: https://www.mathworks.com (дата звернення: 01.06.2026).

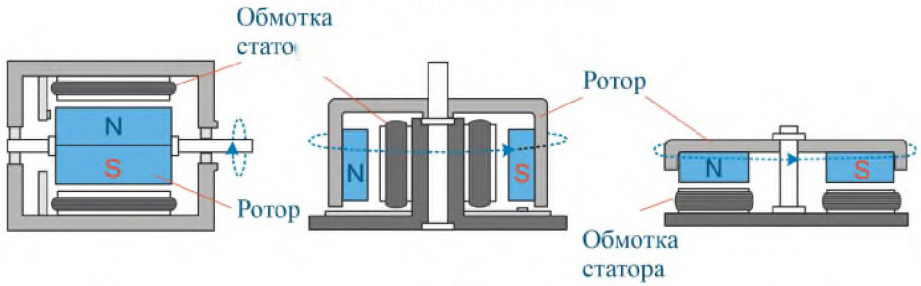
16. Mohan N. Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB/Simulink. Hoboken : John Wiley & Sons, 2014. 208 p.

17. Ong C.-M. Dynamic Simulation of Electric Machinery: Using MATLAB/SIMULINK. Upper Saddle River : Prentice Hall PTR, 1998. 626 p.

18. Pillay P., Krishnan R. Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. Part II: The brushless DC motor drive. IEEE Transactions on Industry Applications. 1989. Vol. 25, no. 2. P. 274–279.

Конструктивні особливості т принцип дії безколекторних двигунів з постійними магнітами

Конструкції БДПС



а) б) в)

а – з внутрішнім ротором; б – із зовнішнім ротором (радіальний потік);
в – із зовнішнім ротором (осьовий потік)

Функціональна схема системи керування БДПС

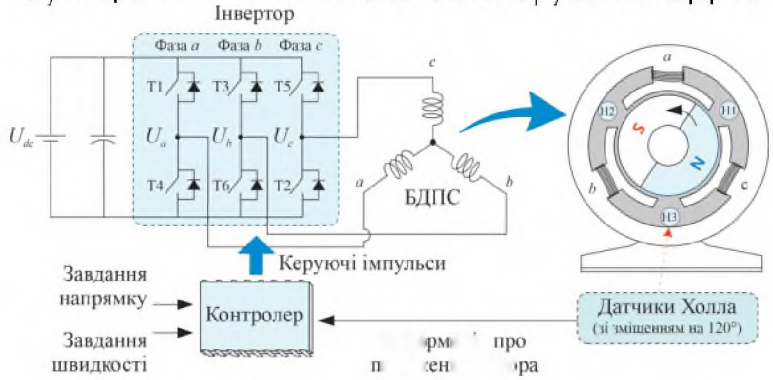


Рисунок А.1 – Слайд 1 мультимедійної презентації

Функціональна схема позиційного електропривода на базі БДПС

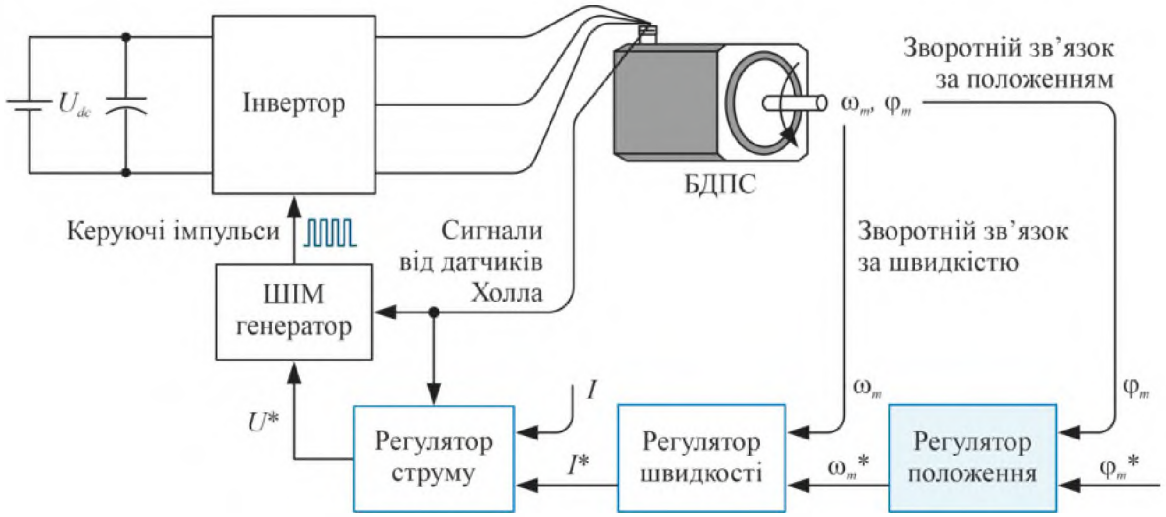


Рисунок А.2 – Слайд 2мультимедійної презентації

Імітаційна модель позиційного електропривода на базі безколекторного двигуна в MATLAB Simulink

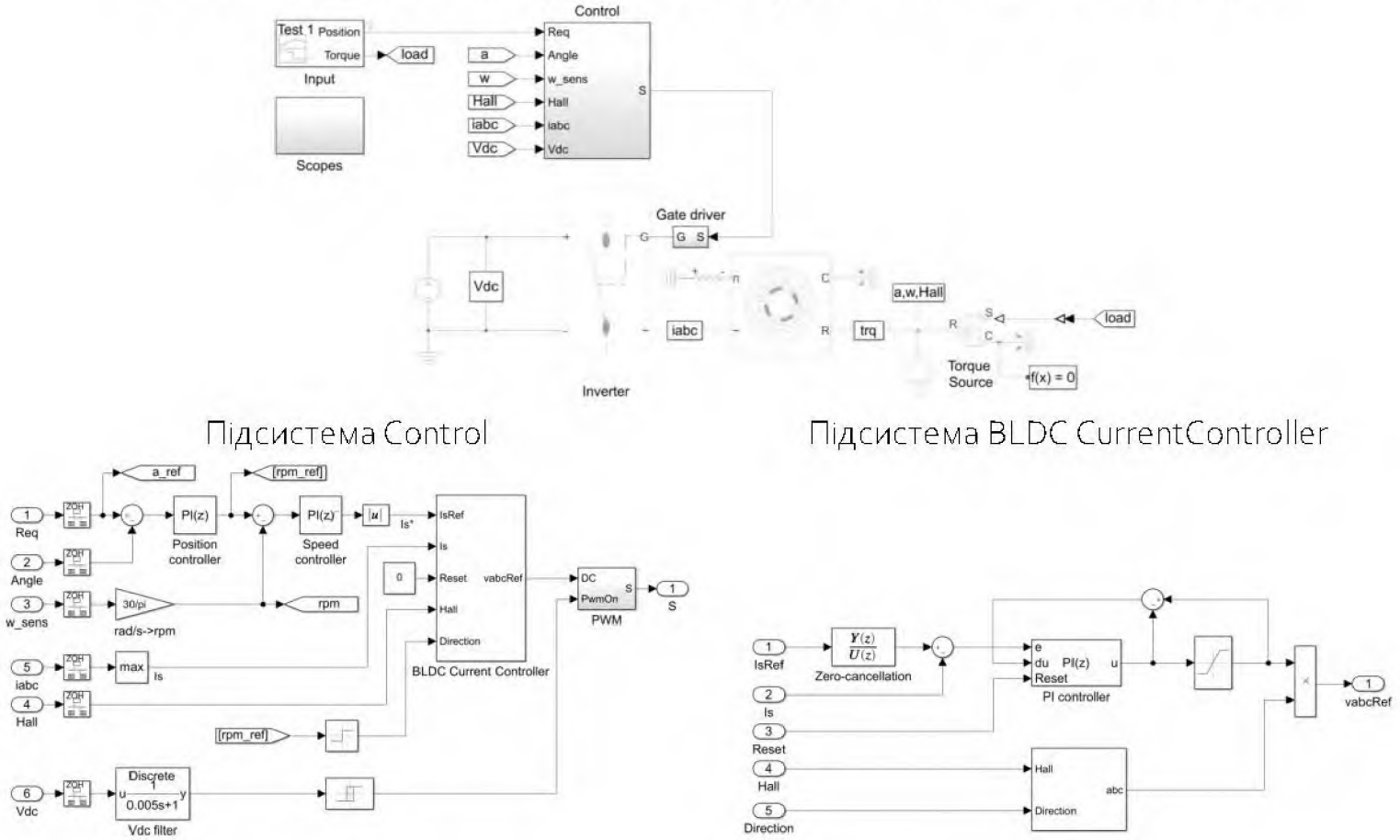
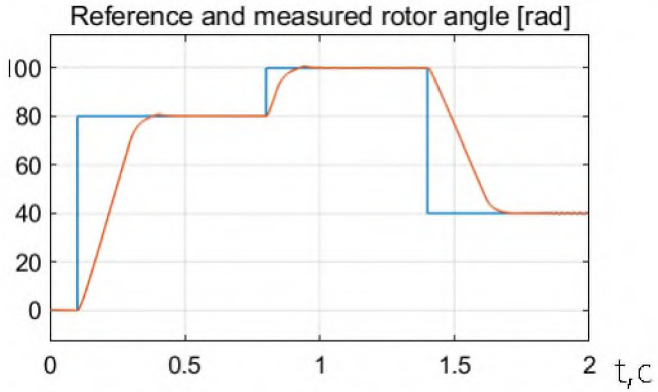


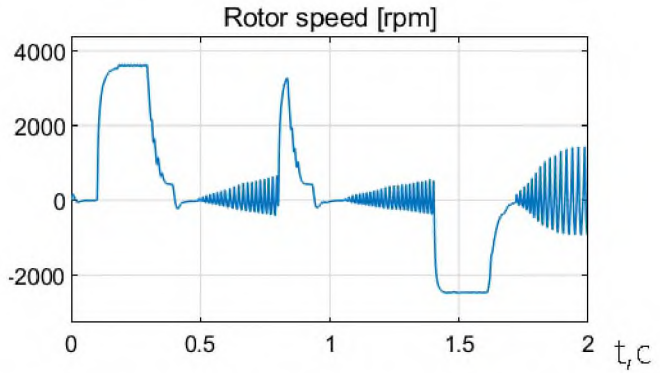
Рисунок А.3 – Слайд 3мультимедійної презентації

Дослідження динаміки

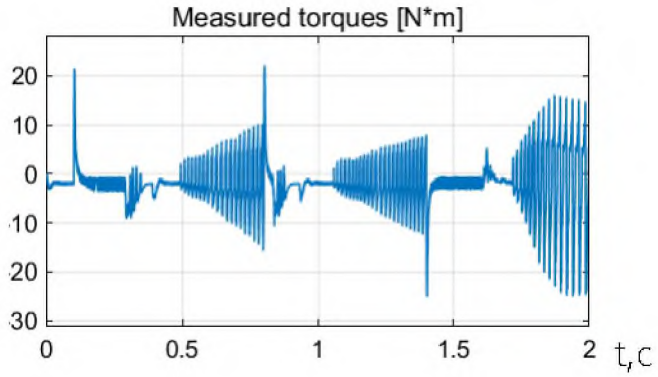
Перехідна характеристика кута повороту



Перехідна характеристика швидкості



Перехідна характеристика моменту



Перехідні характеристика струмів фаз статора

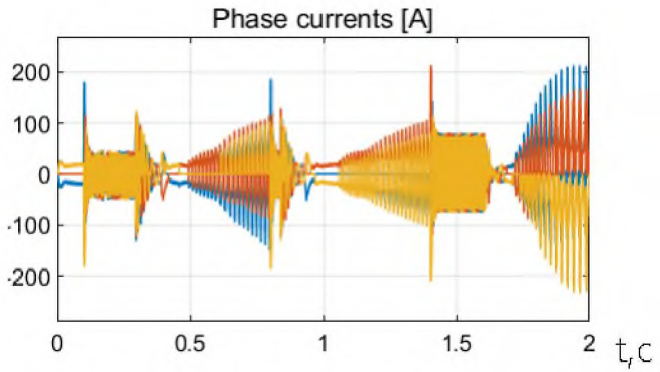


Рисунок А.4 – Слайд 4мультимедійної презентації