

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки

Кафедра інформаційних технологій та програмування

Пояснювальна записка
до магістерської дипломної роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Дослідження процесу керування BLDC двигуна

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕЛ-23дм

171 «Електроніка»

(шифр і назва спеціальності)

Соловйов В. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Самойлова Ж. Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Захожай О.І.

(прізвище та ініціали)

Київ – 2024 року

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА
ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки
Кафедра інформаційних технологій та програмування
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 171 «Електроніка»
(шифр і назва спеціальності)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІТП
_____ д.т.н., проф. Захожай О.І.
(підпис)
« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дипломну роботу студенту
Соловійову Віталію Володимировичу.

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження процесу керування BLDC двигуном

керівник роботи доцент, к.т.н. Самойлова Ж. Г.,

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по батькові)

затверджені наказом університету від « 06 » 12 2024 року №361/15.15-С

2. Строк подання студентом роботи: 15 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Матеріали науково-дослідної практики, науково-методична література; дані інтернет-мережі .

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

4.1 Вступ

4.2 Комплексний аналіз BLDC-двигунів та методів їх керування

4.3 Розробка структурної схеми системи керування BLDC – двигуна

4.4 Розробка моделі та аналіз результатів моделювання BLDC-двигуна

4.4 Висновки

4.5 Список використаної літератури

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання Видав	Завдання Прийняв

7. Дата видачі завдання 08 листопада 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Одержання завдання на виконання роботи	08.11.2024	
2.	Укладання і погодження з керівником плану і етапів виконання роботи	11.11.2024	
3.	Узагальнення даних літературних джерел	12.11.2024	
4.	Комплексний аналіз BLDC-двигунів та методів їх керування	18.11.2024	
5.	Розробка структурної схеми системи керування BLDC – двигун	21.11.2024	
6.	Розробка моделі та аналіз результатів моделювання BLDC-двигуна	29.11.2024	
7.	Укладання, оформлення та погодження пояснювальної записки з керівником	05.12.2024	
8.	Надання пояснювальної записки на кафедрі	06.12.2024	
9.	Підготовка доповіді та презентації	09.12.2024	

Студент Соловйов В. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи Самойлова Ж. Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ABSTRACT

This master's thesis explores the development of an advanced control system for brushless DC motors (BLDC). These motors have gained significant attention due to their high efficiency, durability, and precise speed and torque control, making them ideal for applications in electric vehicles, robotics, household appliances, and aerospace systems.

The research addresses key challenges in BLDC motor control, including rotor position detection, adaptive performance under varying operational conditions, and energy efficiency. A comprehensive analysis of existing control methods, including trapezoidal, sinusoidal, and vector control, is presented, highlighting their advantages and limitations.

The study proposes a novel adaptive control system that integrates modern algorithms to improve operational stability and adaptability to external disturbances. Mathematical modeling of the BLDC motor dynamics forms the basis for developing these algorithms. The proposed system's performance was validated through computer simulations and experimental testing, demonstrating enhanced energy efficiency and reliability.

This thesis provides valuable insights into the practical implementation of BLDC control systems in various industrial and domestic applications, contributing to the advancement of energy-efficient and high-performance motor systems.

Keywords: BLDC motor, control systems, adaptive algorithms, energy efficiency, mathematical modeling.

Зміст

ВСТУП.....	6
1. Комплексний аналіз BLDC-двигунів та методів їх керування.....	8
1.1 Огляд конструкцій електродвигунів	8
1.2 Проблеми та виклики в керуванні BLDC двигунами.....	14
1.3 Огляд, переваги та недоліки існуючих методів керування BLDC-двигуном.....	15
Висновок до розділу 1	33
2. Розробка структурної схеми системи керування BLDC-двигуном.....	34
2.1 Розробка загальної структурної схеми системи керування BLDC-двигуном.....	34
2.2 Алгоритми функціонування структурної схеми.....	36
2.3 Додаткові аспекти розробки та оптимізації	38
Висновок до розділу 2.....	40
3. Розробка моделі та аналіз результатів моделювання BLDC-двигуна.....	41
3.1 Розробка імітаційна моделі системи формування сигналів керування роботи інвертора	41
3.2 Розробка імітаційна моделі силової частини BLDC	44
3.3 Результати моделювання роботи BLDC-двигуна	45
3.4 Аналіз результатів моделювання.....	53
Висновок до розділу 3	58
Список використаної літератури.....	59

ВСТУП

Актуальність теми: Сучасний розвиток техніки та технологій вимагає вдосконалення методів та засобів керування електродвигунами, особливо у сферах, де потрібна висока точність, енергоефективність та компактність. Серед таких двигунів особливу увагу привертають безколекторні двигуни постійного струму (Brushless DC Motors, BLDC). Завдяки високій ефективності, тривалому терміну служби та можливості забезпечення точного керування швидкістю та моментом, BLDC двигуни знаходять широке застосування в електромобілях, робототехніці, побутових приладах, авіаційних системах та інших галузях.

Проблематика полягає в необхідності створення систем керування BLDC двигунами, які забезпечували б не лише стабільність роботи, але й адаптивність до змінних умов експлуатації. Розробка таких систем базується на використанні сучасних методів автоматичного керування, алгоритмів оптимізації та інформаційних технологій. Особливу увагу приділяють створенню ефективного апаратного та програмного забезпечення для реалізації алгоритмів керування.

Мета і задачі дослідження: Метою дослідження є розробка ефективної системи керування BLDC двигуном, яка забезпечує оптимізацію енергоспоживання, високу точність роботи та стійкість до зовнішніх збурень.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

Провести аналіз сучасних методів та систем керування BLDC двигунами.

Розробити математичну модель BLDC двигуна, яка враховує динамічні процеси.

Дослідити алгоритми керування швидкістю та моментом двигуна.

Провести комп'ютерне моделювання запропонованої системи керування.

Реалізувати розроблену систему на апаратній платформі та протестувати її в реальних умовах експлуатації.

Об'єкт і предмет дослідження: Об'єктом дослідження є процеси керування безколекторними двигунами постійного струму.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та засоби реалізації систем керування BLDC двигунами.

Наукова новизна: Наукова новизна роботи полягає в розробці адаптивної системи керування BLDC двигуном, яка враховує нелінійності динамічної моделі двигуна та забезпечує адаптацію до змінних умов роботи. У роботі пропонуються нові підходи до оптимізації алгоритмів керування та інтеграції їх з сучасними мікроконтролерними системами.

Практична значущість: Практична значущість роботи полягає у можливості застосування розробленої системи керування BLDC двигунами в промисловості, транспорті та побутових пристроях. Реалізація запропонованих методів дозволить підвищити енергоефективність систем, зменшити вартість обслуговування та покращити характеристики керованих пристроїв.

Методологія дослідження: Методологія дослідження базується на використанні теоретичних та експериментальних підходів. Теоретична частина включає математичне моделювання, аналіз існуючих методів керування та оптимізацію алгоритмів. Експериментальна частина передбачає реалізацію запропонованих підходів на апаратних платформах та їх тестування за допомогою спеціалізованих програмних засобів.

Структура роботи: Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі представлено аналіз існуючих методів керування BLDC двигунами, у другому – розроблено математичну модель та алгоритми керування, а у третьому – описано реалізацію запропонованої системи та результати її тестування. Висновки підсумовують основні досягнення дослідження та окреслюють напрямки подальшої роботи.

1. КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ВЛDC-ДВИГУНІВ ТА МЕТОДІВ ЇХ КЕРУВАННЯ

1.1 Огляд конструкцій електродвигунів

Електродвигуни відіграють ключову роль у сучасних електричних та електронних системах. На сучасному етапі прогрес техніки повністю залежить від застосування різних типів двигунів, серед яких особливе місце займають колекторні та безколекторні двигуни [1].

1.1.2 Колекторні двигуни. Колекторні двигуни були одним з перших типів двигунів, що знайшли широке застосування. Їх конструкція складається зокрема з якоря, статора та комутатора рисунок 1.

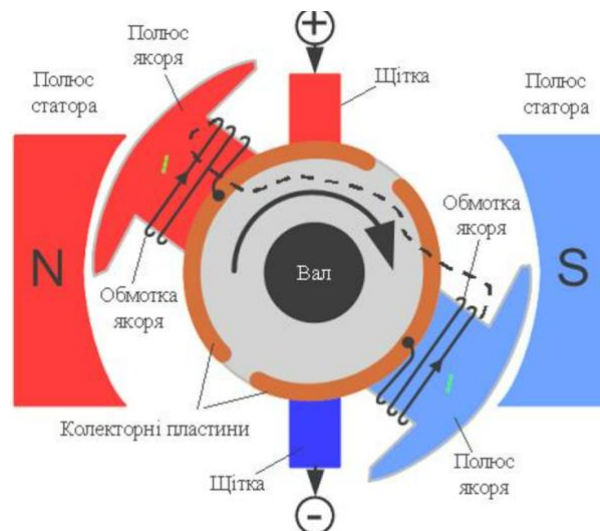


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення мотора

Колекторні двигуни класифікуються на кілька типів залежно від способу збудження та конструктивних особливостей:

- двигуни з послідовним збудженням. У таких двигунах обмотки статора і ротора з'єднані послідовно, що дозволяє створити високий пусковий момент. Вони часто використовуються в електроінструментах та стартерних системах транспортних засобів, де потрібна висока потужність на короткий час [2];

- двигуни з паралельним збудженням. Обмотки статора і ротора підключаються паралельно, забезпечуючи стабільну швидкість обертання навіть за змінного навантаження. Це робить їх ідеальними для механізмів, що потребують точного регулювання швидкості, таких як насоси та вентилятори [3-5];

- двигуни зі змішаним збудженням. Поєднують характеристики послідовного та паралельного збудження, забезпечуючи гнучкість у налаштуванні моменту і швидкості. Вони застосовуються у промисловому обладнанні, де важлива універсальність;

- двигуни з послідовним збудженням. У цих двигунах обмотки статора і ротора з'єднані послідовно. Вони характеризуються високим пусковим моментом, що робить їх придатними для таких застосувань, як електроінструменти та стартери автомобілів, рисунок 1.2;

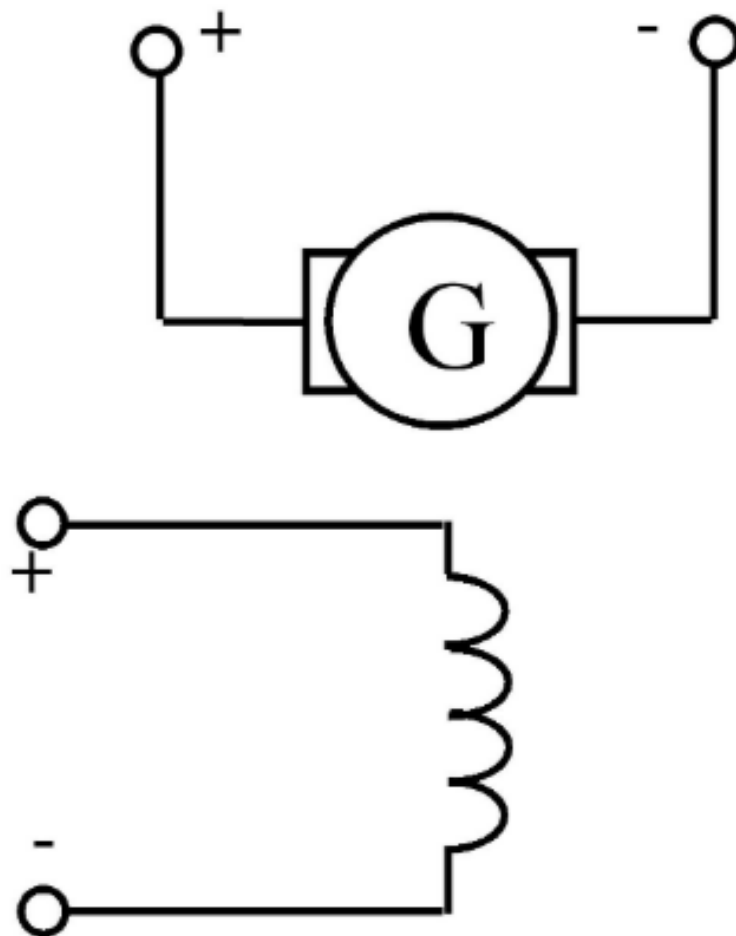


Рисунок 1.2 - Двигуни з послідовним збудженням

- двигуни з паралельним збудженням. Обмотки статора і ротора підключені паралельно. Ці двигуни забезпечують стабільну швидкість обертання при змінному навантаженні, що важливо для машин з постійною швидкістю, рисунок 1.3;

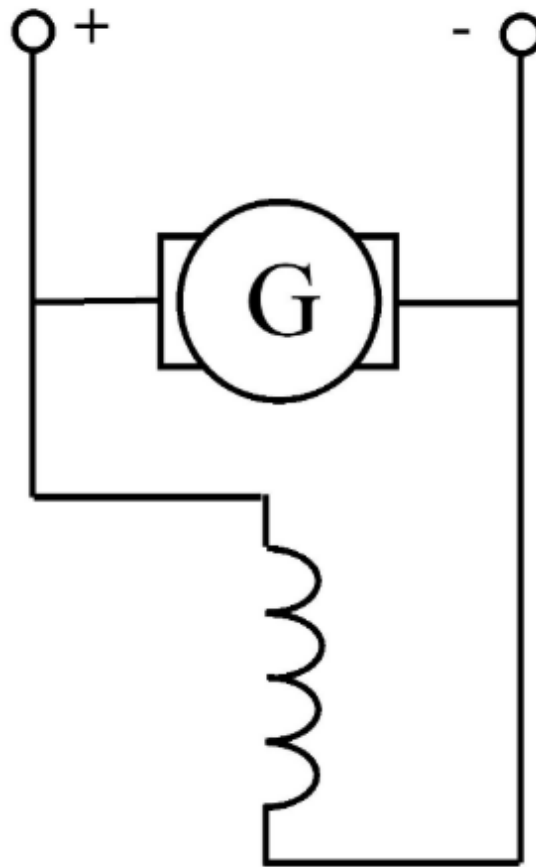


Рисунок 1.3 - Двигуни з паралельним збудженням

- змішаного збудження. Поєднують переваги попередніх типів, що дозволяє досягати оптимальних характеристик у конкретних умовах [6-7].

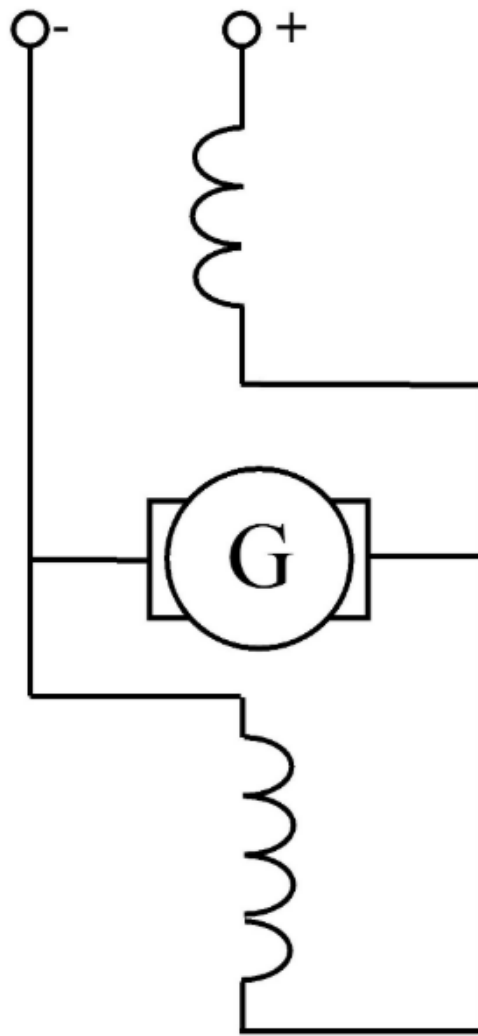


Рисунок 1.4 - Двигуни змішеного збудженням

Основними перевагами колекторних двигунів є висока надійність, простота конструкції та високий момент на низьких оборотах, що робить їх ідеальними для застосувань, де потрібна велика сила на старті, таких як побутова техніка, електричні інструменти та деякі транспортні засоби. Завдяки використанню колектора, ці двигуни можуть працювати при простих схемах управління швидкістю, що знижує вартість виробництва та обслуговування [8-9].

Однак недоліки колекторних двигунів включають складність обслуговування через знос щіток, що потребує регулярної заміни та може призвести до додаткових витрат і зниження ефективності. Також важливим є питання екологічності, оскільки при роботі щітки зносяться, утворюючи пил, що може бути шкідливим для

навколишнього середовища. Крім того, з часом внаслідок зносу колектора та щіток знижується точність і ефективність роботи двигуна, що обмежує їхню тривалість служби порівняно з безколекторними аналогами [10 -12].

1.1.3 Безколекторні двигуни. Безколекторні двигуни (BLDC) є сучасним типом електродвигунів, що позбавлені механічного комутатора та щіток, завдяки чому забезпечується підвищена надійність і тривалість експлуатації. Вони працюють на основі електронного комутатора, який забезпечує зміну напрямку струму в обмотках статора, рисунок 1.2.



Рисунок 1.5 Зовнішній вигляд безколекторного двигуна

Типи безколекторних двигунів.

Двигуни з постійними магнітами. Використовуються у високоточних пристроях, таких як роботи та медичне обладнання.

Класифікація безколекторних двигунів:

- двигуни з постійними магнітами. Ці двигуни є основою багатьох сучасних технологій, оскільки забезпечують високу ефективність за рахунок використання потужних магнітів. Вони широко застосовуються у високоточних пристроях, таких як роботи, медичне обладнання, а також у побутовій техніці та електроінструментах [13];

- вентильні двигуни (Brushless DC Motors). Використовуються у промислових установках завдяки високій ефективності, довговічності та гнучкості налаштувань. Застосовуються також у транспортних системах, таких як електромобілі [14].

Головною особливістю безколекторних двигунів є відсутність щітково-колекторного вузла, що знижує механічне зношування. Їх конструкція включає статор з обмотками, магніти на роторі і електронний блок управління (контролер) [15].

Відмінності від колекторних двигунів. Безколекторні двигуни мають менший рівень шуму, вищу ефективність і довговічність. Водночас вони складніші у виробництві та потребують контролера для роботи.

Основні переваги: висока енергоефективність; довговічність завдяки відсутності щіток; точний контроль швидкості і позиціонування.

До недоліки: вища вартість у порівнянні з колекторними двигунами; складність управління через необхідність використання контролера.

Основні відмінності:

- принцип роботи. Колекторні двигуни працюють за допомогою механічного комутатора, тоді як безколекторні використовують електронний комутатор.

- обслуговування. Колекторні двигуни потребують регулярного обслуговування, зокрема заміни щіток, тоді як безколекторні практично не потребують обслуговування [15 -18].

Ефективність. Безколекторні двигуни мають вищий коефіцієнт корисної дії (ККД).

Таблиця 1.1 – Порівняння основних параметрів колекторних та безколекторних двигунів

Параметр	Колекторні двигуни	Безколекторні двигуни
Принцип комутації	Механічний	Електронний
Рівень шуму	Високий	Низький
Надійність	Низька	Висока
Енергоефективність	Середня	Висока
Обслуговування	Регулярне	Мінімальне

1.2 Проблеми та виклики в керуванні BLDC двигунами

Безколекторні двигуни використовують постійні магніти для створення магнітного поля, а для зміни напрямку струму в обмотках застосовуються електронні комутатори, на відміну від традиційних колекторних двигунів, де комутація здійснюється механічно. Це дозволяє досягати високої ефективності та надійності, однак створює певні складнощі у керуванні.

Однією з основних проблем при керуванні BLDC є необхідність точно контролювати кут обертання ротора для ефективної комутації струму в обмотках. Це вимагає використання датчиків положення ротора (наприклад, датчиків Холла) або алгоритмів для оцінки цього кута безпосередньо в контурі керування. Точність таких датчиків та їх чутливість до змін в умовах навколишнього середовища є критичними [19].

1.2.1 Індуктивні та паразитні ефекти. Індуктивність обмоток BLDC двигуна може викликати паразитні ефекти, такі як надмірна напруга при вимиканні струму, що потребує використання додаткових компонентів, таких як діоди або затвори для захисту схеми управління від пошкоджень [20-22].

1.2.2 Регулювання швидкості та моменту. Для ефективного керування швидкістю безколекторного двигуна необхідно мати систему зворотного зв'язку, яка дозволяє відслідковувати швидкість обертання і момент сили. Однак, зворотній зв'язок потребує додаткових вимірювальних приладів, що збільшує складність та вартість системи.

1.2.3 Теплові ефекти. Під час роботи безколекторних двигунів виникає тепло, яке необхідно відводити для запобігання перегріву. Неправильне керування температурними режимами може призвести до зниження ефективності двигуна або навіть до його виходу з ладу [22-25].

1.2.4 Пульсації та вібрації. Управління BLDC може викликати пульсації струму та вібрації через постійну зміну напрямку обертання ротора. Ці пульсації впливають на ефективність роботи системи та можуть створювати додаткові механічні навантаження.

1.2.5 Застосування сучасних алгоритмів. Застосування сучасних алгоритмів керування, таких як векторне управління або просторове управління, дозволяє досягти високої ефективності роботи безколекторних двигунів. Проте, розробка таких алгоритмів є складною задачею і вимагає глибоких знань в області теорії керування та математики.

Одним з рішень для ефективного керування є впровадження інтелектуальних безщіткових комутаторів, які здатні автоматично коригувати кут комутації, зменшуючи таким чином вплив на роботу двигуна.

Для досягнення високої точності керування використовуються алгоритми зворотного зв'язку, такі як PID (Пропорційно-інтегрально-диференціальний) або більш складні методи, що базуються на моделюванні та оптимізації роботи двигуна.

Системи охолодження та моніторингу температури є важливим аспектом у збереженні працездатності безколекторних двигунів. Різні підходи до пасивного і активного охолодження дозволяють мінімізувати теплові проблеми.

Для оптимізації роботи безколекторних двигунів використовуються чисельні методи моделювання та симуляції, які дозволяють передбачити поведінку системи за різних умов і скоригувати параметри керування [26].

1.3 Огляд, переваги та недоліки існуючих методів керування BLDC-двигуном

Керування безколекторними двигунами постійного струму (BLDC) є важливим завданням у сучасній електротехніці та електроніці. Завдяки високій енергоефективності, низькому рівню шуму та тривалому терміну експлуатації, BLDC-двигуни використовуються у різних галузях, таких як автомобільна промисловість, робототехніка, побутова техніка та промислові установки. Проте, реалізація ефективного керування цими двигунами вимагає використання складних алгоритмів та електронних схем, які забезпечують точність і надійність роботи [27].

Однак забезпечення належного керування BLDC-двигуном є непростим завданням, оскільки від цього залежить стабільність роботи, ефективність, шумові характеристики та динамічна реакція. З огляду на це, розроблено різноманітні

підходи до керування, які можна розділити за типом сигналу збудження (трапецеїдальна або синусоїдальна напруга), за наявністю або відсутністю датчиків положення ротора (сенсорне та безсенсорне керування), а також за складністю алгоритмічної реалізації (наприклад, векторне керування, пряме керування моментом тощо) [28].

У цьому огляді буде розглянуто основні підходи до керування BLDC-двигунами, такі як класичні методи з датчиками Холла, методи керування за допомогою трикутно-трапецеїдальної або синусоїдальної комутації, векторне керування (FOC - Field-Oriented Control), пряме керування моментом (DTC – Direct Torque Control), а також безсенсорні методи визначення положення ротора та їх переваги й недоліки.

1.3.1 Класична трапецеїдальна комутація з використанням датчиків Холла

Одним із найпоширеніших класичних методів керування BLDC-двигуном є використання датчиків Холла, вбудованих у статор двигуна. Датчики Холла забезпечують інформацію про положення ротора, що дозволяє електронному перетворювачу (інвертору) комутувати фази двигуна у потрібний момент часу, приклад реалізації представлено на рисунку 1.3.

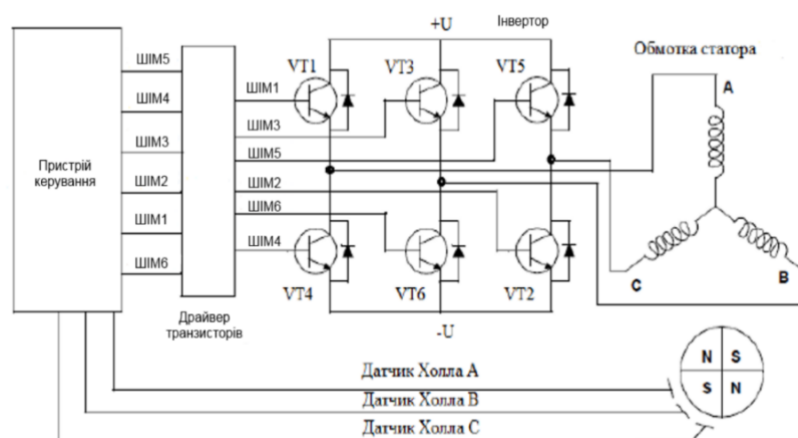


Рисунок 1.6 – Система керування трифазним двигуном

1.3.1.1 Комутація фаз. Інвертор за допомогою ключів комутує фази статорних обмоток (А, В, С) двигуна відповідно до положення ротора, яке визначається датчиками Холла. Зазвичай для трифазного двигуна потрібно 6 різних комутацій, де кожен з трьох транзисторів інвертора замкнений чи відкритий залежно від фази.

Ключі інвертора: Ключі VT1, VT2, VT3 (для фази А), VT4, VT5, VT6 (для фази В), і VT7, VT8, VT9 (для фази С) повинні бути правильно керовані для реалізації фазної комутації. Для цього необхідно отримати правильні сигнали з датчиків Холла.

Датчики Холла: Датчики Холла, зазвичай, надають три сигнали, які вказують на положення ротора відносно статора. Ці сигнали є комбінацією двійкових значень (0 або 1), що дозволяє визначити, на яку фазу потрібно подати напругу [29].

Для керування обмотками вентильного двигуна використовується інвертор, який дозволяє підключати їх до джерела живлення високого рівня (+U) або низького рівня (-U). Середнє значення напруги, що подається на обмотки статора, визначається тривалістю активного стану (скважністю) імпульсно-широкої модуляції (ШІМ). Це дає змогу регулювати швидкість обертання двигуна. При цьому один електричний цикл може не збігатися з повним механічним обертом ротора. Кількість електричних циклів, необхідних для завершення одного механічного обороту, залежить від числа пар полюсів ротора.

Протягом кожного з шести етапів роботи інвертора напруга подається на дві з трьох фазових обмоток. На рисунку 1.4 представлено послідовність комутації обмоток. При цьому фазовий зсув напруги становить 60 градусів. Протилежна електрорушійна сила створює нульові перехрестя в моменти, коли відповідна обмотка знаходиться у відключеному стані [30-34].

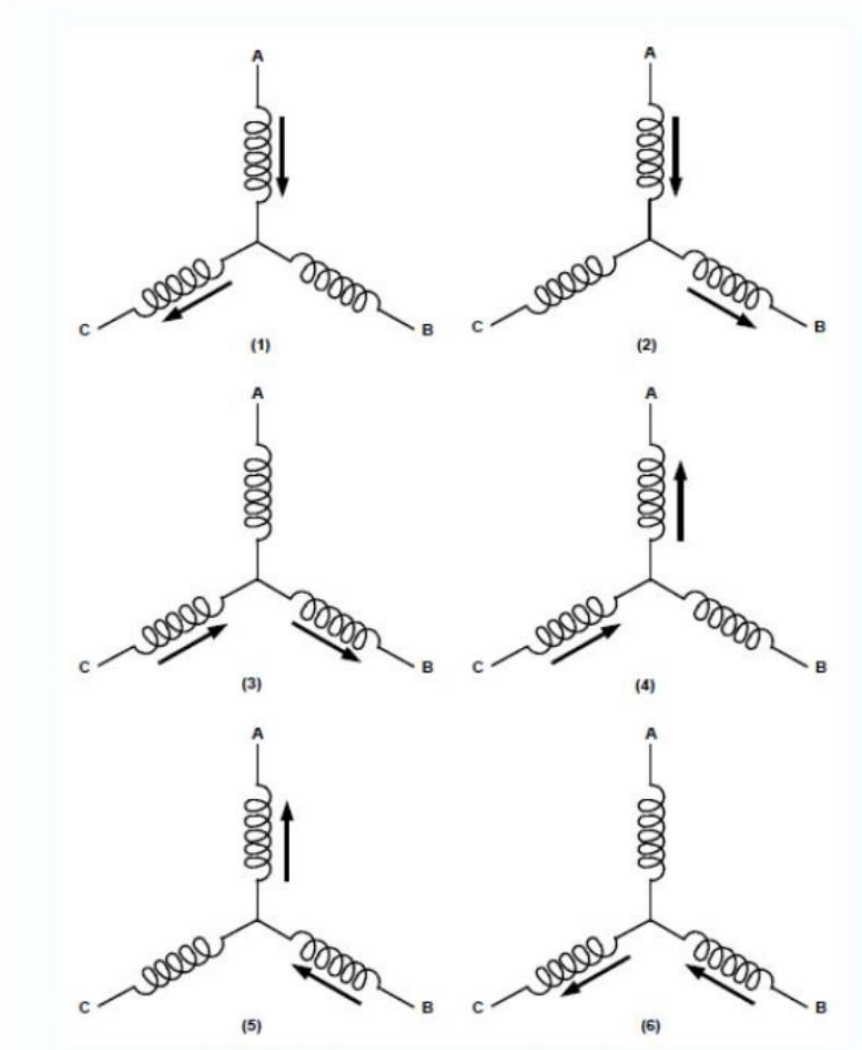


Рисунок 1.7 – Комутація обмоток трьох фазного двигуна

Алгоритм комутації: Залежно від комбінації вихідних сигналів з датчиків Холла, інвертор вмикає відповідні ключі для подачі напруги на одну або дві фази двигуна [35].

Наприклад:

- якщо датчики Холла вказують на першу позицію (наприклад, $H1 = 1$, $H2 = 0$, $H3 = 0$), то для фази А активується VT1, для фази В — VT5, для фази С — VT7;

Якщо датчики Холла вказують на іншу позицію, інвертор змінює комутацію відповідно.

Часова комутація та широтно-імпульсна модуляція (ШІМ): Для точного контролю над швидкістю і моментом, можна використовувати ШІМ для управління ключами інвертора. ШІМ дозволяє регулювати середнє значення напруги, що

подається на кожну фазу двигуна, а отже, контролювати швидкість та момент двигуна [36].

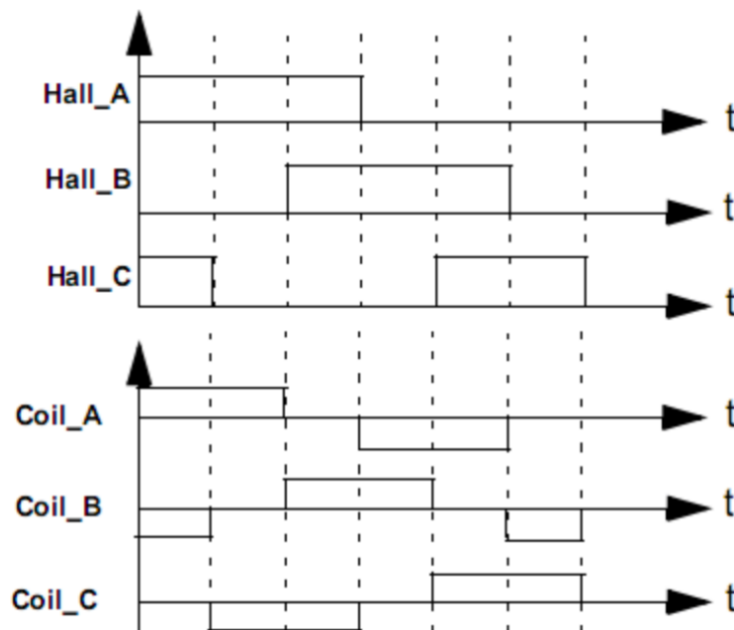


Рисунок 1.8 – Часові діаграми комутації обмоток трьох фазного BLDC двигуна

Для уникнення короткого замикання та забезпечення безперебійної роботи двигуна важливо, щоб не було одночасно включених транзисторів у будь-якій фазі (це може призвести до великих струмів та пошкодження інвертора) [37].

Для кожної комбінації сигналів з датчиків Холла потрібно точно визначити, який саме набір ключів інвертора потрібно включити.

Приклад алгоритму комутації для трьох фаз:

Для кожної з шести позицій датчиків Холла (H1, H2, H3), інвертор комутує один з таких наборів ключів:

1. $H1 = 1, H2 = 0, H3 = 0 \rightarrow VT1, VT5, VT7$
2. $H1 = 1, H2 = 0, H3 = 1 \rightarrow VT1, VT6, VT8$
3. $H1 = 0, H2 = 1, H3 = 1 \rightarrow VT2, VT6, VT9$
4. $H1 = 0, H2 = 1, H3 = 0 \rightarrow VT2, VT5, VT7$

5. $H1 = 0, H2 = 0, H3 = 1 \rightarrow VT3, VT6, VT8$

6. $H1 = 1, H2 = 1, H3 = 0 \rightarrow VT3, VT5, VT9$

Залежно від отриманих сигналів від датчиків Холла, інвертор перемикає ключі так, щоб на кожній фазі була правильна напруга, що дозволяє двигуну обертатися.

Для успішного управління таким інвертором необхідно реалізувати:

- систему зчитування сигналів з датчиків Холла;
- алгоритм комутації для вибору правильних ключів для кожної фази;
- управління ШІМ для точного контролю напруги, що подається на двигун.

1.3.2 Синусоїдальна комутація

На відміну від трапецеїдального збудження, синусоїдальна комутація прагне формувати фазний струм максимально наближеним до синусоїди. Це досягається за рахунок використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) та зворотного зв'язку за струмом [38].

Синусоїдальне керування є однією з найбільш ефективних та точних технік управління для безщіткових двигунів постійного струму (BLDC). Цей метод базується на подачі синусоїдальних напруг на фази обмоток двигуна, що дозволяє досягти мінімальних пульсацій моменту та підвищити ефективність роботи двигуна. На відміну від трапецієподібного керування, яке використовує дискретні рівні напруги, синусоїдальне керування забезпечує значно плавнішу зміну напруги, що знижує шум та вібрації, покращує динаміку обертів та підвищує стабільність роботи системи [39].

Пристрій керування (мікроконтролер), рисунок 1.3: Генерує сигнали широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для керування інвертором.

Драйвер транзисторів: Призначений для забезпечення необхідних рівнів потужності для транзисторів інвертора.

Інвертор: Використовує шість транзисторів (VT1, VT2, VT3, VT4, VT5, VT6) для перетворення постійного струму на змінний, що подається на обмотки двигуна [40].

Датчики Холла (А, В, С): Визначають положення ротора та забезпечують зворотний зв'язок для коректної комутації фаз.

Обмотки статора: Трифазні обмотки (А, В, С), які отримують змінний струм від інвертора.

Основна ідея синусоїдального керування полягає в тому, що для кожної фази двигуна подається синусоїдальна напруга. Це дозволяє зменшити пульсації моменту та досягти більш плавного обертання. У порівнянні з трапецієподібною комутацією, де подається чітко визначена напруга з кроками, синусоїдальний метод забезпечує безперервне змінювання величини напруги, що значно покращує роботу двигуна [41].

Алгоритм синусоїдального керування реалізується наступним чином
рисунок:

Генерація синусоїдальних сигналів: Пристрій керування генерує синусоїдальні сигнали для кожної з трьох фаз, де амплітуда напруги змінюється синусоїдально [42].

Визначення положення ротора: Датчики Холла надають інформацію про точне положення ротора, що дозволяє контролеру правильно комутувати фази і подавати напругу на відповідні обмотки.

ШПМ для точного регулювання: Для того щоб створити бажану синусоїдальну форму напруги, використовуються сигнали ШПМ, які визначають середнє значення напруги на фазах обмоток.

Синусоїдальний алгоритм комутації використовує зворотний зв'язок від датчиків Холла для визначення положення ротора. З цієї інформації формується відповідна комбінація для включення транзисторів інвертора:

Якщо ротор знаходиться в певній позиції, то активується відповідна пара транзисторів (VT1-VT6).

У цей момент на обмотки подається синусоїдальна напруга, що змінюється в часі, відповідно до синусоїдальної форми.

Таким чином, для кожної фази двигуна постійно змінюється напруга, що подається на обмотки, і таким чином забезпечується плавне обертання ротора.

ШИМ є важливою частиною синусоїдального керування, оскільки дозволяє створити напругу, яка є синусоїдальною за середнім значенням. Оскільки в реальності важко реалізувати ідеальну синусоїду за допомогою простих генераторів сигналів, ШИМ дозволяє моделювати синусоїдальні хвилі, змінюючи тривалість імпульсів в залежності від бажаної амплітуди [43-44].

ШИМ-сигнали для кожної фази генеруються на основі синусоїдальних хвиль, що відповідають фазам обмоток А, В і С. Це дозволяє точно контролювати напругу на обмотках і забезпечувати точне керування двигуном.

Перевагою синусоїдального алгоритму керування є зниження пульсацій моменту: Завдяки тому, що на фазі двигуна подається синусоїдальна напруга, пульсації моменту зменшуються, що забезпечує більш плавну роботу двигуна.

Зниження шуму та вібрацій: Синусоїдальне керування зменшує механічні вібрації та шум, оскільки напруга змінюється без різких стрибків.

Висока ефективність на різних швидкостях: Синусоїдальний метод добре працює на широкому діапазоні швидкостей, забезпечуючи стабільну роботу і при низьких, і при високих обертах.

Мінімізація нагріву: Оскільки напруга на обмотках змінюється плавно, це зменшує нагрів двигуна, що може покращити його довговічність [46].

Недоліки синусоїдального алгоритму є складність реалізації: створення синусоїдальних хвиль за допомогою ШИМ потребує більш складних обчислень і додаткових апаратних ресурсів у порівнянні з трапецієподібним керуванням.

Потреба у точних датчиках Холла: для правильної комутації фаз необхідно мати точні сигнали від датчиків Холла, що може вимагати більш дорогих компонентів.

Зворотний зв'язок, який надають датчики Холла, дозволяє постійно коригувати керування в реальному часі. Якщо датчики Холла виявляють будь-яку відхилення від запланованого положення ротора, система автоматично коригує комутацію фаз і подачу напруги. Цей процес є необхідним для забезпечення стабільної роботи двигуна [47].

Синусоїдальний алгоритм керування ідеально підходить для високопродуктивних та високошвидкісних додатків, таких як:

- електричні транспортні засоби;
- робототехніка та автоматизовані системи;
- побутова техніка (наприклад, вентиляційні системи, компресори) [48].

Синусоїдальний алгоритм керування є одним із найефективніших методів для досягнення плавної роботи BLDC-двигунів. Він забезпечує зниження пульсацій моменту, зменшення шуму і вібрацій, а також підвищує ефективність двигуна на різних швидкостях. Однак, через складність реалізації, цей метод потребує більш потужних мікроконтролерів і більш точних датчиків Холла. Попри це, для багатьох застосувань цей метод є найбільш оптимальним [49].

1.3.3 Векторне керування

Векторне керування (Field-Oriented Control – FOC) є одним із найефективніших методів управління електричними двигунами, що дозволяє здійснювати незалежне регулювання активної і реактивної складових струму. Воно забезпечує точне керування моментом і потоком безщіткових двигунів постійного струму (BLDC), що підвищує ефективність роботи і зменшує пульсації моменту. Це дозволяє застосовувати векторне керування в різних сферах, таких як робототехніка, транспортні засоби та промислове обладнання [50].

У даному описі розглядається принцип роботи векторного керування на прикладі трифазного BLDC-двигуна, з використанням інвертора та датчиків Холла для визначення положення ротора.

Інвертор: Інвертор складається з шести транзисторів (VT1-VT6), які керують трифазним двигуном, перетворюючи постійну напругу на змінну, необхідну для роботи двигуна.

Пристрій керування (мікроконтролер): Це пристрій, який генерує сигнали широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для інвертора, забезпечуючи точну комутацію фаз двигуна.

Датчики Холла: Датчики Холла (А, В, С) використовуються для визначення положення ротора, що є важливим для коректної комутації фаз на інверторі.

Обмотки статора: Трифазні обмотки двигуна (А, В, С), через які подається змінний струм, генеруючи обергальний момент.

Основною метою векторного керування є розділення керування моментом і потоком, що досягається шляхом трансформації струмів в системі координат. Векторне керування дозволяє незалежно регулювати потік (для створення магнітного поля) і момент (для контролю швидкості та обертання). Для цього використовуються дві складові:

- потік d (активний потік) – відповідає за створення моменту;
- потік q (реактивний потік) – відповідає за створення магнітного поля.

Положення ротора в цьому випадку визначається за допомогою датчиків Холла, що дозволяє точно контролювати напрямок і швидкість обертання.

Алгоритм векторного керування починається з трансформації виміряного струму в обмотках двигуна у дві складові: активний потік і реактивний потік. Це дозволяє відокремити контроль за моментом і потоком, що дає змогу управляти ними незалежно [51].

Перетворення в обергальну систему координат: Для точного контролю використовуються трансформації Кларка і Паркса, які переводять значення струмів з трифазної системи у дві осі: d і q .

Управління активним потоком (d -вісь): Активний потік відповідає за момент двигуна, його зміна безпосередньо контролює обергальний момент.

Управління реактивним потоком (q -вісь): Реактивний потік визначає магнітне поле, яке створюється в двигуні.

Після визначення значень потоку на осях d і q , система керування генерує сигнали для ШІМ, які використовуються для контролю напруги на обмотках двигуна. Напруга на кожній фазі змінюється синусоїдально, що забезпечує плавний перехід між фазами і мінімізує пульсації моменту.

Датчики Холла визначають положення ротора і передають відповідні сигнали контролеру. Це дозволяє коректно синхронізувати фазу струму з положенням

ротора. На основі цього зворотного зв'язку система керування здійснює корекцію для подачі необхідної напруги на обмотки двигуна в правильний момент часу [52].

На кожну з фаз (А, В, С) подається напруга з використанням ШІМ, що визначається з врахуванням потоку на осях d і q . Плавна зміна напруги дозволяє досягти високої ефективності роботи двигуна, зменшити шум і вібрації.

Зниження пульсацій моменту: Оскільки напруга на фазах змінюється синусоїдально, пульсації моменту зменшуються, що сприяє плавному обертанню двигуна.

Висока ефективність: Векторне керування дозволяє максимально ефективно використовувати енергію, що подається на двигун, знижуючи втрати.

Точне регулювання моменту і швидкості: Завдяки окремому керуванню моментом і потоком, векторне керування дозволяє досягти високої точності в управлінні швидкістю обертання та моментом.

Зниження шуму і вібрацій: Плавна зміна напруги на фазах допомагає зменшити механічні вібрації і акустичний шум, що часто є проблемою в системах з іншими типами керування [53].

Недоліки векторного керування:

1. Складність реалізації: Векторне керування потребує складної апаратної та програмної реалізації, що може збільшити вартість і складність системи.

2. Потреба в високоточних датчиках Холла: Для правильного визначення положення ротора необхідні високоточні датчики Холла, що може підвищити вартість і вимоги до надійності системи.

3. Висока вимогливість до обчислювальних потужностей: Алгоритми векторного керування потребують високих обчислювальних потужностей, особливо для генерації синусоїдальних сигналів і трансформацій координат.

Векторне керування реалізується за допомогою спеціальних мікроконтролерів або цифрових сигнальних процесорів (DSP), здатних виконувати необхідні математичні операції в реальному часі. Для цього також використовуються швидкі АЦП (аналогово-цифрові перетворювачі) для вимірювання струму і напруги в обмотках двигуна.

Векторне керування застосовується в різних галузях, де необхідна висока точність і ефективність роботи електричних двигунів. Це включає:

- Електричні транспортні засоби: Векторне керування дозволяє точно контролювати швидкість і момент на всіх етапах роботи електричних автомобілів і велосипедів.

- Промислові роботи: У робототехніці важлива висока точність управління моментом і швидкістю обертання, що досягається завдяки векторному керуванню [54].

- Побутова техніка: Векторне керування може використовуватися в таких пристроях, як вентилятори, компресори та інші електроприлади, де важливі енергоефективність і низький рівень шуму [55].

Векторне керування є потужним і ефективним методом управління BLDC-двигунами. Завдяки точному регулюванню моменту і потоку, цей метод забезпечує високу ефективність, зниження шуму і вібрацій, а також точне управління швидкістю і моментом. Хоча система векторного керування є складною для реалізації і вимагає високих обчислювальних потужностей, її переваги виправдовують ці вимоги в багатьох високопродуктивних і промислових застосуваннях [56].

Пряме керування моментом безпосередньо регулює момент та потік двигуна, не спираючись на складні перетворення координат. Цей метод широко використовується у керуванні асинхронними двигунами, проте він також може бути застосований до BLDC. Основна ідея полягає у виборі станів інвертора на основі безпосередньої похибки за моментом та потоком [57].

1.3.4 Безсенсорні методи керування (Sensorless Control)

Безсенсорне керування базується на тому, що не використовуються додаткові механічні датчики для визначення положення ротора, а алгоритми використовують зворотне електродинамічне поле (Back-EMF) для оцінки цього положення. Враховуючи, що ротор BLDC-двигуна створює електричне поле під час обертання,

зміни в напрузі, що спостерігаються на обмотках, можуть бути використані для оцінки кута положення ротора [58].

Існує два основних підходи до безсенсорного керування:

- керування за допомогою зворотного електродинамічного поля (Back-EMF);
- керування на основі оцінки струму і напруги.

1.3.4.1 Керування за допомогою зворотного електродинамічного поля (Back-EMF)

Безсенсорне керування на основі зворотного електродинамічного поля передбачає оцінку кута положення ротора за допомогою зворотного електродинамічного поля, яке виникає в обмотках статора, коли ротор обертається. Це поле залежить від швидкості обертання ротора та його положення. Коли ротор рухається, на кожній фазі з'являється індукована напруга (Back-EMF), яка змінюється в залежності від позиції ротора [59].

Цей метод керування використовує зміни в напрузі на обмотках статора для оцінки моменту комутації. При обертанні ротора у фазах з'являється індуковане електричне поле, що дає змогу визначити, коли потрібно переключити транзистори інвертора для підтримки безперервного обертання двигуна.

Для комутації фаз без датчиків Холла використовується алгоритм, який визначає, коли з'являється достатня індукована напруга в кожній фазі. Наприклад, у трифазному BLDC-двигуні фази змінюються на основі умов, коли зворотне електродинамічне поле кожної фази досягає певного порогу.

Визначення положення ротора: Напруга, що генерується в обмотках статора, залежить від положення ротора. Коли ротор проходить через певну точку, на відповідній фазі з'являється напруга.

Визначення моменту комутації: Алгоритм спостерігає за напругою в кожній фазі і комутує фази двигуна, коли напруга досягає певного значення, що відповідає позиції ротора.

Управління інвертором: За допомогою сигналів ШІМ керується включенням та вимкненням транзисторів на інверторі для подачі змінного струму на обмотки двигуна.

Переваги:

- зниження вартості і складності: Відсутність датчиків робить конструкцію дешевшою та спрощує процес виробництва.
- збільшення надійності: Оскільки немає механічних частин, ризик поломки через знос значно зменшується.
- менше компонентів: Відсутність датчиків Холла та інших механічних компонентів дозволяє зменшити кількість елементів, що можуть вийти з ладу.

Недоліки:

- обмеження при низьких швидкостях: При низьких швидкостях обертання або при запуску мотора зворотне електродинамічне поле може бути занадто малим для точного визначення положення ротора.
- складність при низькому напрузі: На малих швидкостях і при малому струмі зворотне електродинамічне поле може бути недостатнім для надійного визначення кута.

1.3.4.2 Керування за допомогою оцінки струму та напруги

Іншим методом безсенсорного керування є оцінка струму і напруги для визначення положення ротора. Цей метод передбачає, що в системі є достатньо інформації про струм і напругу для визначення стану системи, що дозволяє змінювати фазу на основі цих даних [60].

Система вимірює струм і напругу в обмотках двигуна для визначення його поточного стану. Це дозволяє точно оцінити момент переключення фаз. При зміні фази двигуна система вимірює струм у кожній з фаз і обчислює зміни в напрузі, що дозволяє здійснювати коректну комутацію на кожному етапі.

Алгоритм заснований на вимірюванні та обчисленні струмів та напруг у фазах двигуна. Цей метод використовує математичні моделі, щоб визначити, коли змінити фазу на інверторі. Оскільки змінюється потік енергії в обмотках двигуна, це забезпечує коректне переключення фаз [61]

Оцінка напруги та струму: Вимірюється напруга та струм у кожній фазі двигуна.

Обчислення потоку: На основі вимірних значень напруги та струму обчислюється потік для кожної фази.

Алгоритм комутації: Коли потік досягає певного значення, система переключаче транзистори на інверторі для зміни фази.

Переваги:

- вища точність на високих швидкостях: Оцінка струму і напруги дозволяє досягти високої точності на великих швидкостях обертання.

- гнучкість: Метод дозволяє працювати в широкому діапазоні швидкостей і умов.

Недоліки:

- складність реалізації: Цей метод потребує складніших обчислювальних алгоритмів і точних вимірювань.

- часова затримка: Використання алгоритмів на основі струму і напруги може призвести до затримок у відповіді системи.

Переваги безсенсорного керування

Зниження вартості та складності: Відсутність датчиків Холла зменшує вартість системи та спрощує конструкцію.

Підвищення надійності: Відсутність механічних датчиків підвищує надійність системи, зменшуючи кількість компонентів, які можуть вийти з ладу.

Менше споживання енергії: Відсутність необхідності вживати додаткову енергію для живлення датчиків дозволяє знизити загальне споживання енергії.

Недоліки безсенсорного керування

Обмеження при низьких швидкостях: При низьких швидкостях обертання зворотне електродинамічне поле може бути дуже малим для точного визначення положення ротора.

Складність налаштування: Безсенсорне керування може вимагати складної налаштування і оптимізації алгоритмів для різних умов роботи.

Безсенсорні методи керування BLDC-двигунами є потужним інструментом для зниження вартості, спрощення конструкцій і підвищення надійності. Однак вони мають певні обмеження при низьких швидкостях або під час запуску двигуна.

Тому ці методи найбільше підходять для застосувань, де важливі дешевизна та надійність, а також коли двигун працює в стабільних умовах [62].

1.3.5. Пряме керування моментом (DTC).

Пряме керування моментом (DTC) є методом керування електричними двигунами, що безпосередньо регулює момент і магнітний потік у двигуні. Цей метод став популярним завдяки своїй здатності досягати високої динамічної реакції та знижувати пульсації моменту, порівняно з іншими методами керування, такими як векторне керування (FOC).

DTC застосовується в таких двигунах, як синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM), асинхронні двигуни та безщіткові двигуни постійного струму (BLDC). В рамках цього опису буде розглянута реалізація DTC для BLDC-двигунів, яка включає алгоритм, його переваги та недоліки [63].

Пряме керування моментом відрізняється від традиційних методів тим, що воно здійснюється безпосередньо, без необхідності в складних математичних обчисленнях для розрахунку потоку та моменту. Всі операції зводяться до аналізу напруги, струму та моменту, що дозволяє досягти швидкої реакції.

Основна ідея DTC полягає в тому, що система керує моментом і магнітним потоком двигуна, використовуючи зворотний зв'язок від параметрів струму та напруги, що подаються на двигун.

Інвертор у системі DTC складається з шести транзисторів, які виконують роль перемикачів струму між фазами двигуна. Цей інвертор дозволяє перетворювати постійну напругу в змінну напругу, необхідну для живлення трифазного BLDC-двигуна. Керування транзисторами здійснюється через ШІМ сигнали, що подаються від контролера [64].

Контролер або процесор здійснює основне керування і приймає рішення про активацію тих чи інших транзисторів інвертора на основі зворотного зв'язку про момент і потік. Контролер визначає, на яку фазу потрібно подати напругу і в який момент часу, щоб забезпечити бажаний рівень моменту.

Датчики Холла використовуються для визначення положення ротора. Це важливий елемент у системі DTC, оскільки правильне визначення положення

ротора дозволяє точно синхронізувати момент і потік. Вони дають змогу контролеру точно регулювати керування моментом у реальному часі.

Основним завданням є точне керування моментом. Система DTC використовує зворотний зв'язок за моментом, щоб змінювати подану напругу на фази двигуна. Зміна моменту здійснюється через зміну струмів, що протікають через обмотки.

Визначення поточного моменту і потоку: Для того щоб мати можливість коригувати момент, система вимірює поточний момент і магнітний потік двигуна. Для цього використовуються датчики струму та напруги в обмотках двигуна.

Порівняння з бажаним моментом: Контролер порівнює поточні значення з бажаними. Якщо поточний момент не відповідає бажаному, система коригує сигнал, подаючи необхідну напругу на фазу.

Перемикання транзисторів: На основі визначеного моменту і потоку система активує потрібні транзистори інвертора для генерації правильної напруги на фази обмоток двигуна.

Зворотний зв'язок: Після подачі напруги контролер знову вимірює момент і потік, щоб переконатися, що вони відповідають бажаним значенням. Процес корекції продовжується до досягнення стабільного режиму роботи.

Інвертор у системі DTC вибирається так, щоб забезпечити мінімальні втрати енергії і високу швидкість реакції. Оскільки DTC безпосередньо регулює момент, інвертор повинен швидко реагувати на зміни керуючого сигналу. Це може вимагати використання транзисторів, що підтримують високі швидкості переключення.

Переваги прямого керування моментом

Швидка реакція: DTC дозволяє досягти дуже швидкої реакції на зміну моменту завдяки безпосередньому керуванню моментом і магнітним потоком.

Зниження пульсацій моменту: Оскільки DTC регулює момент безпосередньо, пульсації моменту значно зменшуються, що забезпечує більш стабільне обертання двигуна.

Висока ефективність: Пряме керування моментом дозволяє досягти високої ефективності, оскільки втрати енергії в трансформаторах і регуляторах знижуються.

Низький рівень шуму та вібрацій: Завдяки точному регулюванню моменту, система працює з мінімальними механічними вібраціями і акустичним шумом.

Недоліки DTC:

Високі вимоги до обчислювальних потужностей: Алгоритм DTC вимагає високих обчислювальних потужностей для швидкої обробки зворотного зв'язку і прийняття рішень щодо керування.

Високі вимоги до апаратних засобів: Для реалізації DTC необхідні високопродуктивні мікроконтролери і спеціалізовані драйвери транзисторів.

Складність налаштування: Алгоритм DTC потребує точного налаштування системи для забезпечення стабільності і ефективності роботи.

Пряме керування моментом має широке застосування в таких сферах:

Електричні транспортні засоби: DTC використовується для точного регулювання моменту та швидкості в електричних автомобілях, електровелосипедах, електроскутерах.

Промислові роботи: У робототехніці DTC дозволяє точно управляти моментом для досягнення високої маневреності і точності рухів.

Побутова техніка: DTC застосовується в побутових приладах, таких як насосні системи, вентиляційні установки, де важливі ефективність і безшумна робота.

Для реалізації DTC необхідні такі компоненти:

- швидкі мікроконтролери або DSP для обробки сигналів в реальному часі;
- датчики струму та напруги, які вимірюють параметри обмоток двигуна;
- інвертор з високою швидкістю перемикання для коректного управління моментом.

Пряме керування моментом є ефективним і потужним методом для керування BLDC-двигунами, що забезпечує високу динамічну реакцію, зниження пульсацій моменту, мінімальні вібрації та високий рівень ефективності. Незважаючи на складність реалізації та високі вимоги до апаратного забезпечення, DTC є одним з найкращих варіантів для застосувань, де потрібна висока точність і швидкість регулювання моменту [65].

Висновок до розділу 1

У цьому розділі проведено детальний огляд конструкцій електродвигунів, зокрема колекторних і безколекторних (BLDC). Колекторні двигуни демонструють високу надійність у простих застосуваннях завдяки простоті конструкції, однак їх ефективність знижується через необхідність регулярного обслуговування, викликаного зносом щіток. Безколекторні двигуни, навпаки, забезпечують високу енергоефективність, довговічність і низький рівень шуму, що робить їх незамінними в високоточних і довготривалих застосуваннях, хоча їх конструкція і управління є складнішими.

Серед ключових викликів у керуванні BLDC-двигунами виділено необхідність точного визначення положення ротора для забезпечення коректної комутації струму. Також виявлено проблеми, пов'язані з індуктивними ефектами, тепловими навантаженнями та вібраціями, які потребують ретельного врахування під час розробки систем управління. Сучасні алгоритми, такі як векторне керування та PID-регулятори, продемонстрували свою ефективність у подоланні цих проблем. Огляд методів керування BLDC-двигуном показав, що кожен підхід має свої переваги: трапецеїдальне керування виділяється простотою, синусоїдальне — плавністю роботи, а векторне забезпечує найвищу точність і ефективність, хоча потребує складної реалізації.

2. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ BLDC-ДВИГУНОМ

2.1 Розробка загальної структурної схеми системи керування BLDC-двигуном

Структурна схема системи керування BLDC-двигуном (рисунок 2.6) є ключовим елементом у забезпеченні стабільної та ефективної роботи двигуна. Вона складається з декількох функціональних блоків, кожен з яких виконує певну роль у загальній системі. Основні компоненти схеми включають BLDC-двигун, інвертор, контролер, датчики та блок живлення. Їх взаємодія формує комплексну систему, що забезпечує високоточне та надійне управління двигуном.

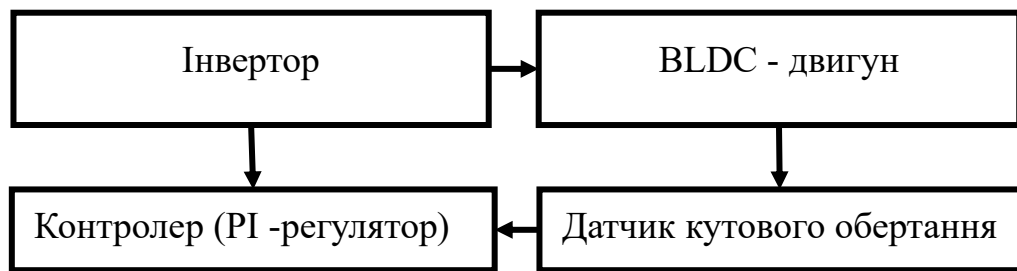


Рисунок 2.6 – Структурна блок схема системи для дослідження процесу керування BLDC - двигуна

BLDC-двигун, як основний елемент схеми, виконує перетворення електричної енергії в механічну. Завдяки відсутності щіток та комутатора, такі двигуни демонструють підвищену ефективність і довговічність. Постійні магніти на роторі забезпечують високий коефіцієнт корисної дії, знижуючи втрати енергії. Крім того, конструкція двигуна дозволяє використовувати його в умовах високої надійності, наприклад, у промисловості, транспорті або побутовій техніці. Особливо важливою є здатність BLDC-двигуна працювати в умовах змінних навантажень, що часто зустрічається у реальних експлуатаційних середовищах.

Інвертор є ключовим компонентом системи, який відповідає за перетворення постійного струму (DC) в трифазний змінний струм (AC). Цей процес забезпечується за допомогою силових транзисторів (IGBT або MOSFET), які комутуються для створення фазних сигналів. Інвертор також виконує функцію стабілізації подачі напруги на фази двигуна за допомогою алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Завдяки цьому забезпечується плавна комутація фаз, що дозволяє зменшити шум та механічні вібрації. Сучасні інвертори також оснащуються системами захисту від перенапруги та перегріву, що підвищує їхню надійність. Важливим аспектом є можливість налаштування параметрів інвертора для оптимізації його роботи в різних умовах.

Контролер реалізує алгоритми керування системою. Це може бути мікроконтролер або цифровий сигнальний процесор (DSP), який відповідає за обчислення сигналів для інвертора. Одним із головних елементів контролера є PI-регулятор, який компенсує похибку між бажаними параметрами роботи двигуна (наприклад, швидкістю або моментом) і реальними значеннями. У деяких системах контролери також оснащуються алгоритмами самонавчання, що дозволяє адаптувати роботу двигуна до змінних умов експлуатації. Крім того, контролери часто мають вбудовані механізми для збирання та аналізу статистики роботи системи, що дозволяє виявляти аномалії та забезпечувати профілактичне обслуговування.

Датчики забезпечують отримання інформації про поточний стан двигуна. Найчастіше використовуються датчики Холла, які вбудовуються в конструкцію статора і дозволяють визначати положення ротора. Завдяки цим даним контролер може коректно комутувати фази двигуна. У деяких сучасних системах застосовуються безсенсорні методи визначення положення ротора, які базуються на аналізі зворотної ЕРС (електрорушійної сили). Безсенсорні методи мають важливу перевагу в зменшенні вартості системи та підвищенні її надійності за рахунок зменшення кількості фізичних компонентів.

Блок живлення гарантує стабільне енергоживлення всіх компонентів системи, включаючи контролер, інвертор і датчики. Інтегровані системи стабілізації напруги забезпечують захист від перепадів напруги та електромагнітних завад. Це підвищує

надійність роботи всієї системи. Додатково, у сучасних системах можуть використовуватися джерела живлення з резервним режимом, що дозволяє уникнути відключень системи у випадках перебоїв в електропостачанні.

Усі ці елементи працюють у тісній взаємодії. Контролер отримує дані з датчиків, аналізує їх і обчислює необхідні сигнали керування. Ці сигнали передаються на інвертор, який регулює подачу напруги на фази двигуна. Результатом є стабільна і ефективна робота BLDC-двигуна у всіх режимах експлуатації. Важливим аспектом є те, що взаємодія між компонентами може бути адаптована для різних типів додатків, забезпечуючи універсальність системи керування.

2.2 Алгоритми функціонування структурної схеми

Функціонування системи керування BLDC-двигуном базується на кількох ключових етапах. На першому етапі система отримує сигнали від датчиків Холла, які передаються до контролера. Контролер використовує ці дані для визначення поточного положення ротора. Для цього використовується таблиця відповідності положення ротора і комбінації активних фаз. Залежно від цих даних, контролер генерує сигнали широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), які забезпечують включення відповідних транзисторів інвертора.

У кожен момент часу активуються дві фази двигуна, а третя залишається вільною. Це дозволяє забезпечити плавне обертання ротора і мінімізувати енергетичні втрати. Використання трифазного інвертора дозволяє досягти більш високої точності управління порівняно з двофазними схемами. Додатково, інтеграція алгоритмів корекції похибок дозволяє значно підвищити точність комутації та забезпечити стабільність навіть у складних умовах експлуатації.

PI-регулятор, інтегрований у контролер, виконує функцію регулювання частоти комутації транзисторів. Це дозволяє підтримувати стабільну швидкість роботи двигуна навіть за умов змінного навантаження. Наприклад, якщо реальна швидкість двигуна відрізняється від заданої, PI-регулятор автоматично змінює

частоту комутації, щоб компенсувати цю похибку. Системи з ПІ-регуляторами демонструють високу надійність і простоту впровадження.

ПІ-контролер є спрощеним варіантом PID-регулятора і широко використовується в системах автоматичного керування, де необхідно компенсувати похибку та забезпечити стабільність системи. Цей тип регулятора складається лише з пропорційної (P) і інтегральної (I) складових, що робить його простішим у реалізації та менш чутливим до шуму [66].

ПІ-контролер базується на двох компонентах:

1. Пропорційна складова (P): Визначає реакцію регулятора на поточну похибку. Регулювальна дія пропорційна величині похибки:

$$P(t) = K_p (t), \quad (2)$$

Чим більший коефіцієнт K_p , тим швидше система реагує, але надмірне значення може призводити до коливань.

2. Інтегральна складова (I): Враховує сумарну похибку за час, усуваючи статичну помилку:

$$I(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (3)$$

Надмірне значення K_i може уповільнити реакцію системи.

Сумарний вихід визначається як:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (4)$$

де:

- $u(t)$ – вихідний сигнал регулятора;

- $e(t) = r(t) - y(t)$ – похибка;

- K_p, K_i – коефіцієнти налаштування.

Додатково в системі передбачені механізми захисту. Інвертор обладнаний системою виявлення аномалій, яка відключає живлення у разі перегріву, перенапруги або короткого замикання. Це дозволяє запобігти пошкодженню компонентів і забезпечити довговічність системи. Окрім цього, сучасні системи можуть включати активні засоби моніторингу стану компонентів, що дозволяє виявляти потенційні проблеми до їх виникнення.

Особливу увагу приділено алгоритмам запуску BLDC-двигуна. Через відсутність щіток початкове положення ротора повинно визначатися за допомогою спеціальних алгоритмів. Зазвичай використовуються методи початкового зміщення фаз, які дозволяють точно визначити напрямок обертання двигуна. У сучасних системах також застосовуються вдосконалені алгоритми, такі як векторне керування (FOC) або пряме керування моментом (DTC). Ці методи забезпечують мінімальні пульсації моменту, високу енергоефективність і точне управління в динамічних умовах.

2.3 Додаткові аспекти розробки та оптимізації

Для підвищення енергоефективності системи використовуються адаптивні алгоритми регулювання ШІМ. Ці алгоритми дозволяють зменшити частоту комутації транзисторів у режимах низького навантаження, що знижує споживання енергії без втрати стабільності роботи двигуна. Наприклад, у пристроях з циклічним навантаженням частота комутації може бути динамічно знижена під час фаз спокою. Також використовуються спеціалізовані алгоритми управління струмом для зниження електромагнітних перешкод.

Особлива увага приділяється тепловому управлінню. Для уникнення перегріву використовується активне та пасивне охолодження компонентів інвертора і двигуна. Системи охолодження можуть бути доповнені датчиками температури, які передають дані до контролера. Контролер, у свою чергу, може знижувати навантаження на двигун або адаптувати частоту комутації, щоб уникнути перегріву.

Додатково застосовуються матеріали з підвищеною теплопровідністю для покращення охолодження ключових компонентів.

Перед впровадженням системи на практиці проводиться моделювання її роботи у спеціалізованих програмних середовищах, таких як MATLAB/Simulink. Це дозволяє перевірити ефективність і стабільність системи в різних режимах. Симуляції також допомагають виявити потенційні помилки в алгоритмах управління і скоригувати їх до впровадження. Наприклад, у симуляціях можуть бути змодельовані екстремальні умови, такі як раптове збільшення навантаження або коротке замикання, що дозволяє забезпечити стабільність системи в реальних умовах.

Результатом розробки є система, яка забезпечує стабільне і ефективне управління BLDC-двигуном у широкому діапазоні умов експлуатації. Поділ розділу на підрозділи дозволяє чітко структурувати матеріал і зробити його доступнішим для розуміння. Крім того, опис додаткових аспектів розробки і оптимізації підкреслює комплексний підхід до створення системи керування.

Висновок до розділу 2

Розділ проєктування зосереджений на створенні системи керування для BLDC-двигуна з урахуванням його конструктивних особливостей. Запропонована схема керування передбачає використання електронного комутатора, оптимізацію частоти комутації та інтеграцію зворотного зв'язку для стабілізації роботи двигуна. Розроблено алгоритми, які забезпечують точний контроль швидкості й моменту, зокрема за рахунок PID-регулятора для стабілізації швидкості та векторного керування для підвищення енергоефективності. Проєктування підтвердило важливість чисельного моделювання як інструменту для перевірки працездатності та ефективності системи ще на етапі розробки.

3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ BLDC-ДВИГУНА

3.1 Розробка імітаційна моделі системи формування сигналів керування роботи інвертора

На рисунку 3.7 наведена імітаційна яка реалізує шести ступеневе керування трифазним безщітковим двигуном постійного струму (BLDC). Вона використовує схему комутації фаз, керовану вхідним сигналом, що представляє кут ротора. Логіка моделі визначає фазу струму для кожної з трьох обмоток двигуна відповідно до поточного положення ротора, забезпечуючи обертання у бажаному напрямку.

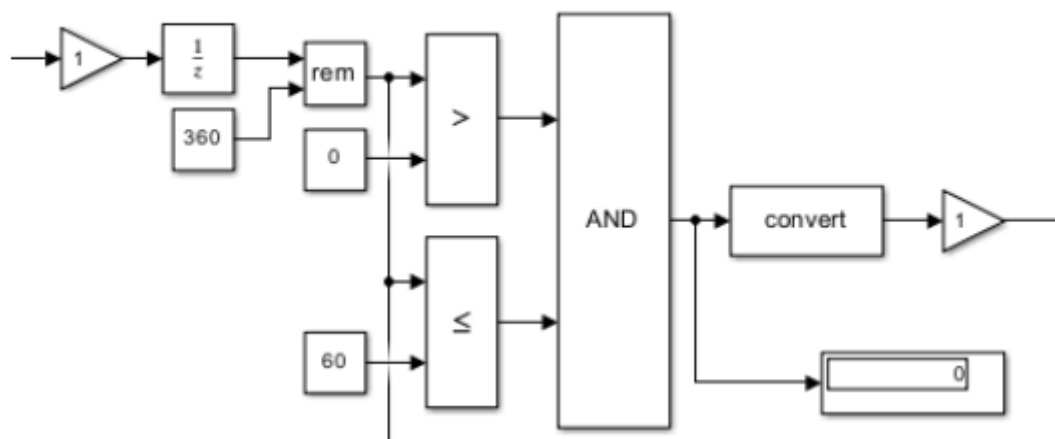


Рисунок 3.7 – Фрагмент імітаційної моделі формування
сигналу керування

Вхідний блок кута повороту ротора: Цей блок приймає сигнал, що представляє кут ротора (в градусах). Значення кута обмежується в діапазоні від 0 до 360 градусів (модульна арифметика).

Блок порівняння (>) і (<=): Ці блоки перевіряють, чи знаходиться вхідний кут у межах певного діапазону (60 градусів для кожного кроку). Наприклад:

- $0^\circ \leq \text{кут} < 60^\circ$ - відповідає першому ступеню комутації;

- $60^\circ \leq \text{кут} < 120^\circ$ - другий ступінь і так далі.

Логічні блоки AND: Визначають, чи поточний кут відповідає певному діапазону. Якщо так, сигнал активує відповідний фазовий вихід.

Блоки конвертації: Перетворюють логічні виходи в сигнали для фаз обмоток двигуна (наприклад, цифровий високий рівень або аналоговий сигнал ШІМ).

Блок мультиплексора: Збирає сигнали з кожного ступеню та вибирає відповідний комбінаційний вихід для фазових обмоток двигуна (напр., [1, 0, 0] для фази А, [0, 1, 0] для В тощо).

Таблиця комутації: Вона зберігає можливі комбінації включення обмоток для кожного ступеню роботи.

Виходи фаз [АН], [AL], [ВН], [BL], [СН], [CL]: Це сигнали для драйвера двигуна, що забезпечують вмикання/вимикання відповідних транзисторів мостової схеми.

Логіка керування шести ступенями: Керування двигуном базується на шести комбінаціях комутації фаз, таблиця 2:

Таблиця 2 – Комутація фаз

Сектор	Кут	Фаза	Логічна комбінація
1	$0^\circ-60^\circ$	+ А, - В, С	1, 0, 0
2	$60^\circ-120^\circ$	+ А, - С, В	1, 0, 1
3	$120^\circ-180^\circ$	+ С, - В, А	0, 1, 1
4	$180^\circ-240^\circ$	+ В, - С, А	0, 1, 0
5	$240^\circ-300^\circ$	+ В, - А, С	1, 1, 0
6	$300^\circ-360^\circ$	+ А, + С, В,	1, 0, 1

Фазові виходи [АН], [AL], [ВН], [BL], [СН], [CL]:

Модель генерує сигнали для керування ключами в мостовій схемі (MOSFET або IGBT) драйвера двигуна. Наприклад:

[АН] - високий рівень для верхнього ключа фази А.

[AL] - низький рівень для нижнього ключа фази А.

Зворотний зв'язок: Модель використовувати сигнал кута ротора від датчика, щоб синхронізувати комутацію фаз із реальним положенням ротора.

Забезпечення стабільності: Логіка моделі гарантує правильний порядок перемикання фаз, що мінімізує механічні та електричні шуми, забезпечуючи плавну роботу двигуна. Результати роботи моделі показано на рисунку 3.8

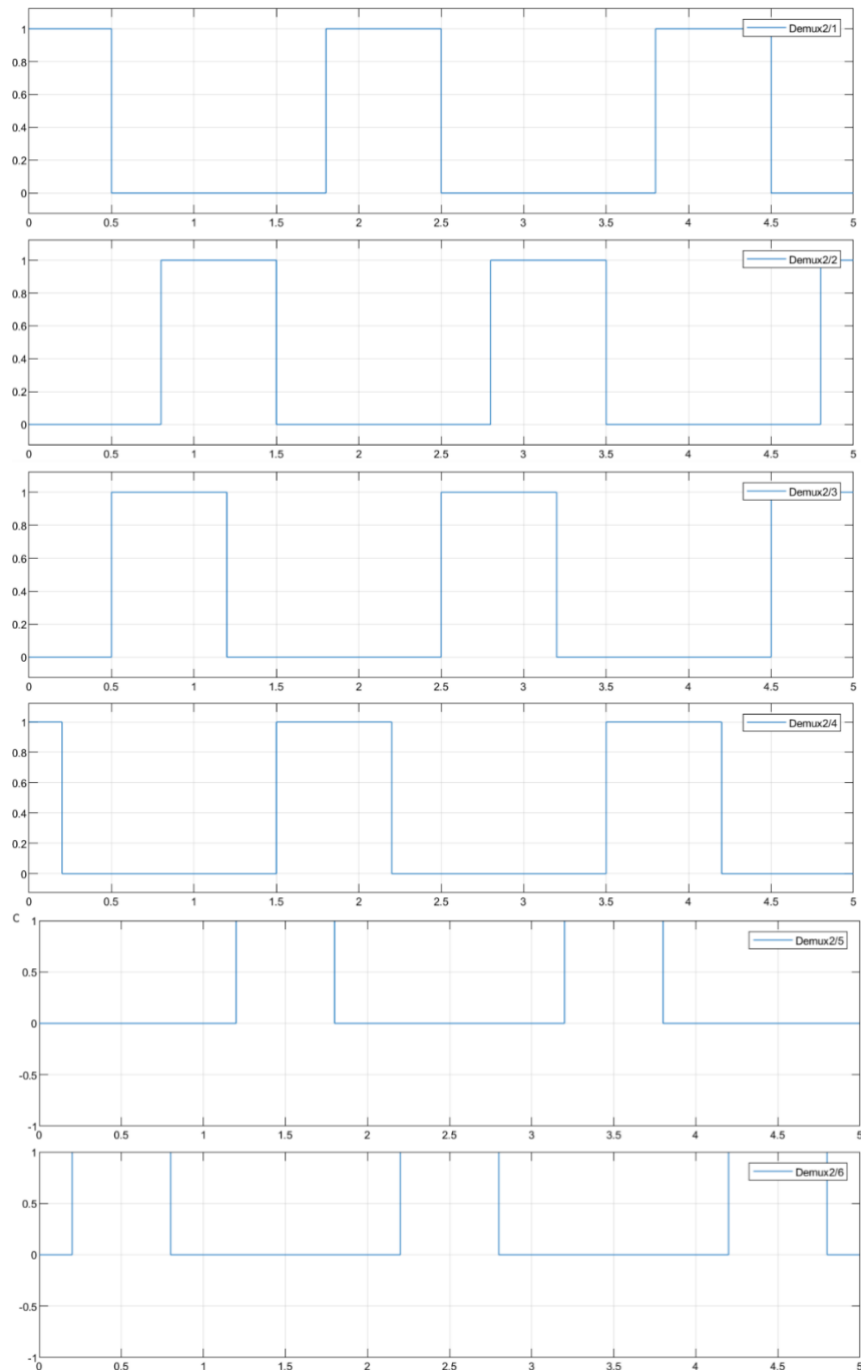


Рисунок 3.8 - Сигнал керування затвору MOSFET – транзистора

3.2 Розробка імітаційна моделі силовій частини BLDC

На рисунку 3.9 наведена імітаційна модель силовій частини системи управління трифазним BLDC двигуном постійного струму. Вона демонструє реалізацію принципу шести ступеневої комутації фаз за допомогою мостової схеми на основі MOSFET-ключів. У моделі передбачена взаємодія між силовою електронікою, двигуном та блоками зворотного зв'язку для забезпечення високоефективної та стабільної роботи електромеханічної системи.

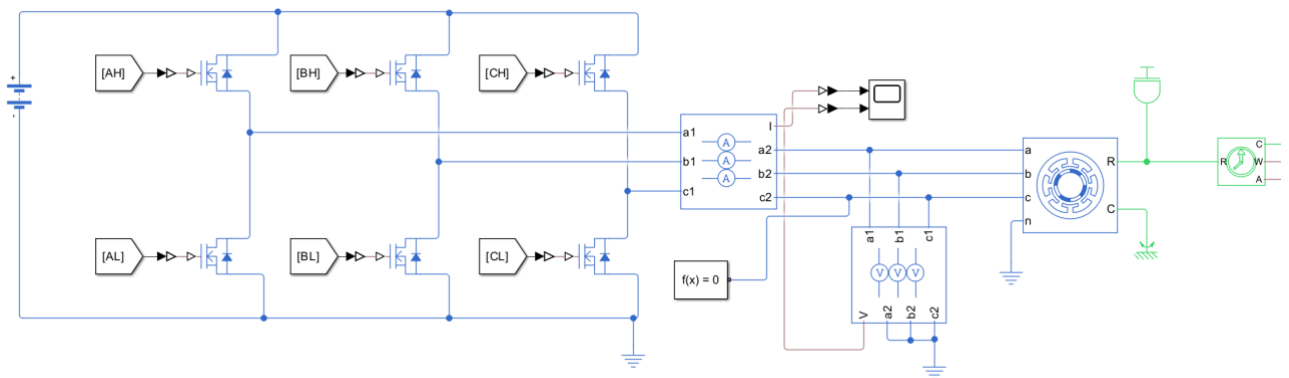


Рисунок 3.9 – Імітаційна модель силовій частини системи керування BLDC –
двигуна

Джерело постійного струму забезпечує напругу для живлення мостової схеми. Ця напруга є основним джерелом енергії для обмоток двигуна. Елемент заземлення служить референтною точкою для системи, що забезпечує стабільність роботи силових компонентів.

Силова частина моделі реалізована у вигляді трифазної мостової схеми на основі MOSFET-ключів. Кожна фаза складається з верхнього (високого рівня) та нижнього (низького рівня) ключів:

- Фаза А: [AH] (верхній ключ), [AL] (нижній ключ).
- Фаза В: [BH] (верхній ключ), [BL] (нижній ключ).
- Фаза С: [CH] (верхній ключ), [CL] (нижній ключ).

Інтегровані діоди у MOSFET забезпечують захист від зворотного струму під час комутації фаз. Ця схема генерує потрібну послідовність напруг для створення обертового магнітного поля у двигуні.

Сигнали [AH], [AL], [BH], [BL], [CH], [CL] формуються логічною схемою комутації на основі положення ротора. Ці сигнали забезпечують по чергове ввімкнення фаз для створення потрібної траєкторії обертового магнітного поля.

Модель двигуна включає три обмотки фаз (A, B, C). Входи фаз (a, b, c) підключені до мостової схеми, а нейтральний провідник n заземлений. Подача напруги на обмотки створює магнітне поле, яке обертає ротор. Модель двигуна також враховує електромеханічні характеристики, такі як електрорушійну силу (ЕРС), індуктивність та момент інерції.

Для стабілізації та корекції роботи системи передбачено блок вимірювання:

- Струм обмоток: вимірюється для кожної фази (A, B, C).
- Напруга фаз: забезпечує моніторинг стану обмоток.
- Ці сигнали можуть використовуватися для реалізації алгоритмів контролю, таких як векторне управління чи ШІМ-регулювання.

Двигун підключений до механічного навантаження через вихідний вал. Навантаження моделюється з урахуванням моменту інерції та фрикційного опору. Це дозволяє аналізувати динамічну поведінку системи при змінних умовах роботи.

Модель також містить блоки візуалізації, такі як осцилограф для відображення параметрів системи (струму, напруги).

Логіка шести ступеневого комутаційного управління забезпечує активацію фаз двигуна відповідно до положення ротора. Положення ротора визначається датчиками Холла, сигнал з яких інтерпретується блоками керування.

3.3 Результати моделювання роботи BLDC-двигуна

На рисунку 3.10 графік ілюструє зміну положення ротора BLDC-двигуна у часі, де еталонне положення (Reference) показано синьою лінією, а виміряне (Measured) — червоною. Він демонструє, наскільки точно виміряне положення ротора слідує за еталонним сигналом.

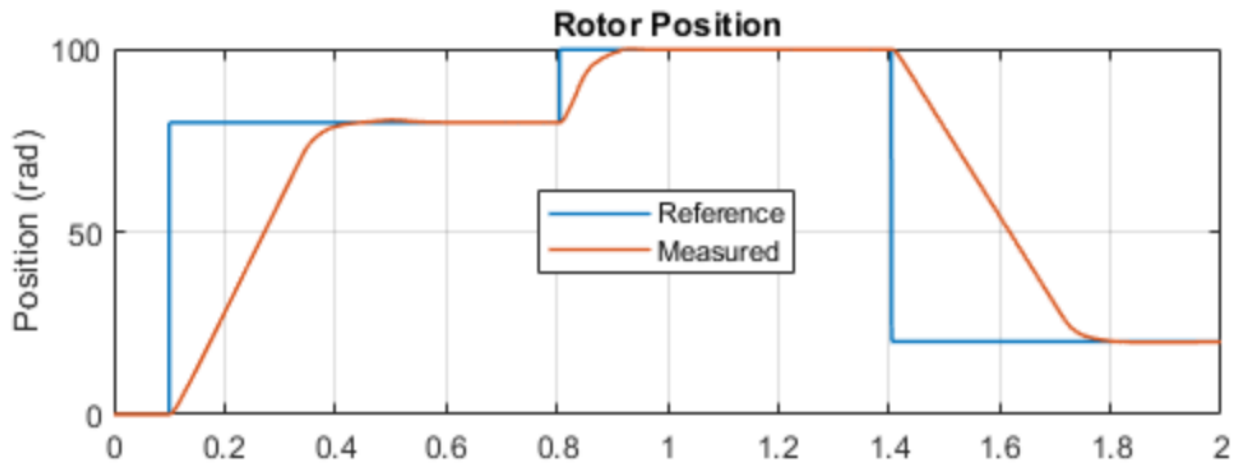


Рисунок 3.10 – Діаграма порівняння між еталонною (Reference) та вимірною (Measured) позиціями ротора в залежності від часу.

На початку спостерігається розбіжність між еталонним і вимірним положенням. Вимірне положення плавно наближається до еталонного, що вказує на інерційність системи та затримку в реакції двигуна. У період між 0.3 та 0.8 секунд вимірне положення близько слідує за еталонним, але спостерігається невелике перевищення на переходах, що може бути викликано недостатнім демпфуванням або швидкодією контролера.

На наступному етапі, коли еталонне положення різко зменшується (приблизно на 1.4 секунд), вимірне положення також слідує за зміною, але знову з деяким запізненням і плавним спадом, що свідчить про перехідний процес у системі.

Цей графік показує, що система управління позицією є ефективною, але має певні затримки та перевищення. Для покращення точності і швидкодії рекомендовано вдосконалити алгоритм контролера, наприклад, налаштувати PID-контролер для зменшення затримок і перевищень на переходах.

На рисунку 3.11 графік ілюструє динаміку зміни швидкості ротора BLDC-двигуна в обертах за хвилину (rpm) у часі. Видно кілька характерних етапів у роботі двигуна.

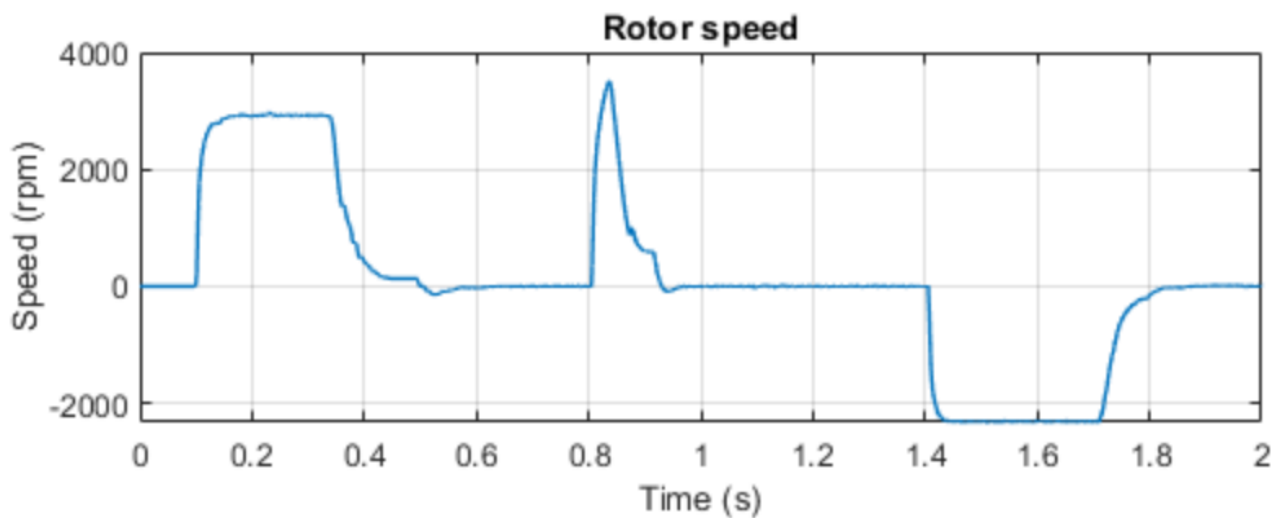


Рисунок 3.11 - Графік швидкості ротора BLDC-двигуна, яка показана в обертах за хвилину (rpm) у залежності від часу (s).

Спочатку швидкість ротора плавно зростає і стабілізується на рівні близько 2000 об/хв. Це свідчить про те, що система керування добре налаштована для забезпечення плавного розгону та стабілізації. Однак під час зниження швидкості (приблизно 0.4 секунд) відбувається різке падіння, після чого швидкість стає близькою до нуля. У перехідний момент між 0.8 і 1 секундою спостерігається пікове перевищення, що вказує на імпульсивну реакцію системи під час зміни умов.

Пізніше, при зміні напрямку обертання (приблизно 1.4 секунд), швидкість ротора стає негативною, досягаючи -2000 об/хв, а потім знову стабілізується. Зміна напрямку виконана з певними перехідними процесами, що видно як флуктуації у швидкості.

Загалом графік демонструє ефективну роботу системи управління, хоча присутні певні аспекти, які можна вдосконалити. Наприклад, зменшення пікових перевищень під час перехідних процесів та покращення демпфування дозволить зменшити коливання і зробити систему більш пальною.

На рисунку 3.12 показано графік зображено струм у фазі A BLDC-двигуна, де синя лінія представляє вимірний струм, а червона — еталонний. Спочатку вимірний струм значно відрізняється від еталонного, що може свідчити про перехідний процес запуску двигуна. Цей етап характеризується великими коливаннями та нерівномірністю.

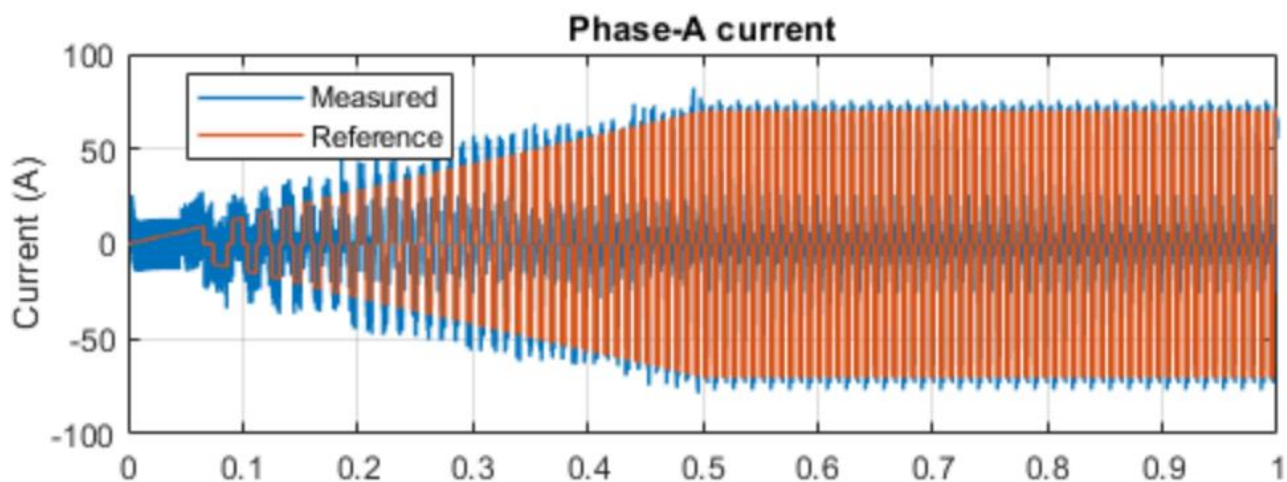


Рисунок 3.12 - Графік струму фази А BLDC-двигуна, що показує порівняння між вимірним (Measured) і еталонним (Reference) струмами у фазі А (Phase-A Current) протягом часу.

З часом, після приблизно 0.3 секунд, вимірний струм починає відповідати еталонному, хоча зберігаються незначні відхилення. Помітно, що амплітуда виміряного струму поступово наближається до еталонного значення, але все ще має невеликі флуктуації, які можуть бути спричинені шумами, особливостями системи керування або нелінійними властивостями двигуна.

Загалом, графік демонструє поступове вирівнювання виміряного струму з еталонним. Для покращення відповідності та зменшення флуктуацій рекомендується вдосконалити систему керування струмом, наприклад, налаштувавши PID-контролер або впровадивши фільтрацію шумів.

На рисунку 3.13 показано графік динаміки швидкості ротора BLDC-двигуна в обертах за хвилину (RPM) у залежності від часу. У перші 0.4 секунди спостерігається плавне збільшення швидкості ротора до приблизно 2000 об/хв. Цей етап характеризується рівномірним розгоном, що вказує на ефективну реалізацію

системи управління. Після досягнення цільової швидкості крива вирівнюється, демонструючи стабілізацію.

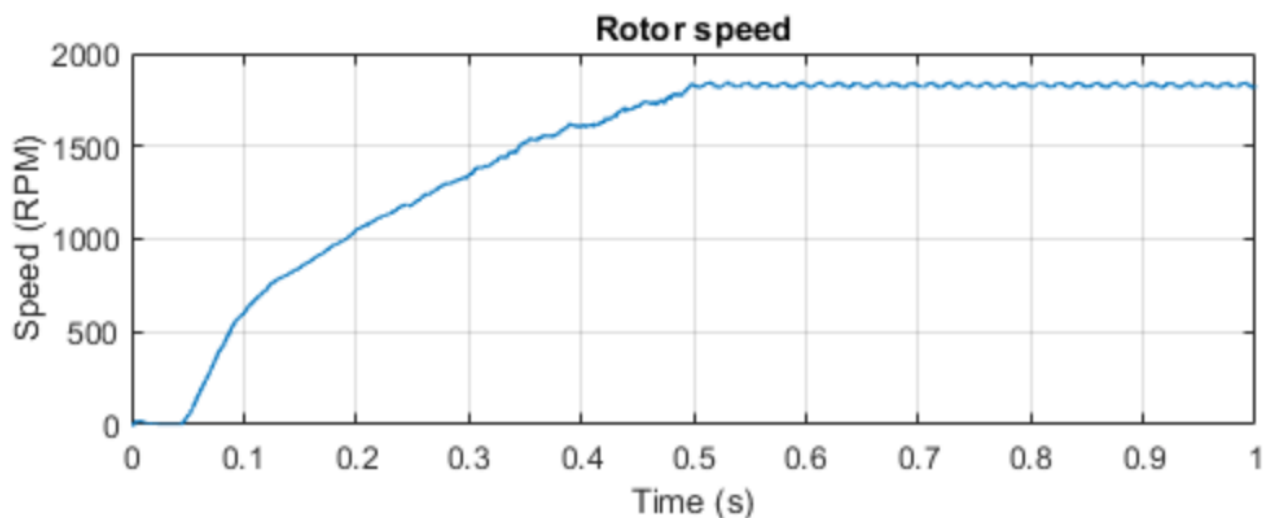


Рисунок 3.13 - Графік швидкості обертання ротора BLDC-двигуна у залежності від часу (Speed [RPM] vs. Time [s]).

Водночас, у стабільній зоні (після 0.4 секунд) помітні незначні коливання швидкості. Ці флуктуації можуть бути спричинені впливом шуму, нерівномірністю механічного навантаження або характеристиками алгоритму управління.

Загалом, графік демонструє добре налаштовану роботу двигуна, але існує потенціал для зменшення флуктуацій у стабільному стані шляхом удосконалення PID-контролера або алгоритму демпфування.

На рисунку 3.14 представлена комплексна діаграма ілюструє роботу BLDC-двигуна, включаючи кілька ключових параметрів: швидкість ротора, струми фаз, ЕРС (електромагнітна рушійна сила) у фазах та електромагнітний момент. У верхньому графіку видно, як виміряна швидкість ротора (синя лінія) слідує за еталонною (жовта лінія). На початку швидкість розганяється до 4000 об/хв, але має невелике перевищення перед стабілізацією. Далі, при різкому зниженні еталонної швидкості, виміряна швидкість також падає, демонструючи помітний перехідний процес, після чого стабілізується.

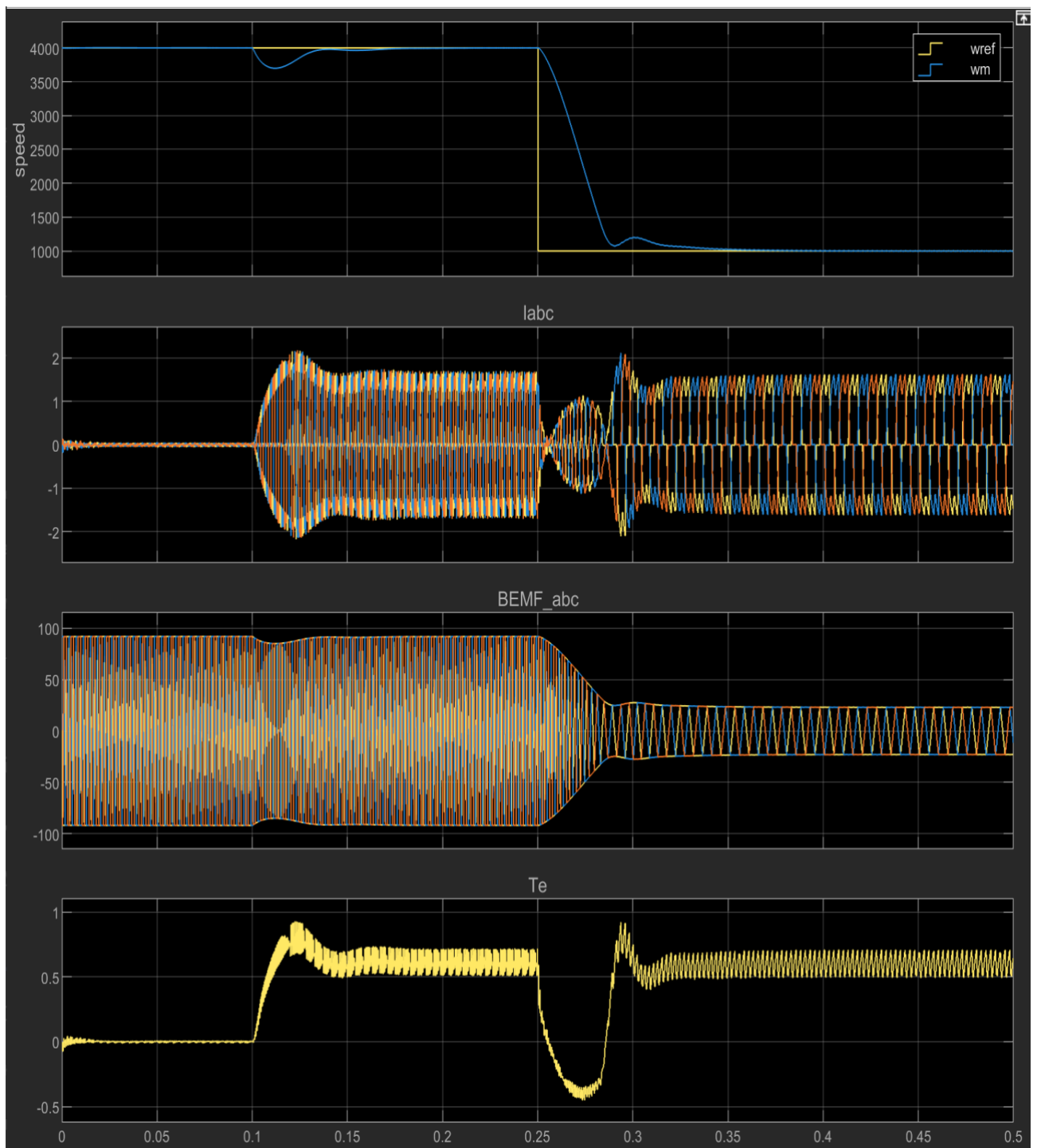


Рисунок 3.14 - Комплексна діаграма ілюструє роботу BLDC-двигуна

Другий графік показує струми у фазах А, В і С, які мають синусоїдальну форму, що відповідає нормальній роботі BLDC-двигуна. Проте під час зміни швидкості на графіку спостерігаються значні коливання амплітуди, які є типовими для перехідного процесу комутації. Подібна динаміка спостерігається й на третьому графіку, що ілюструє ЕРС у фазах двигуна. На ньому також видно

синусоїдальні хвилі, амплітуда яких зменшується у період уповільнення ротора, що відповідає зниженню швидкості.

На останньому графіку зображено електромагнітний момент двигуна. На початку видно різкий сплеск моменту, який потрібен для запуску ротора. Під час зменшення швидкості момент стає негативним, що свідчить про активне гальмування. Після завершення перехідного процесу момент стабілізується, хоча залишаються незначні флуктуації.

Загалом діаграма демонструє добре налаштовану роботу BLDC-двигуна, хоча певні аспекти, такі як перевищення швидкості під час розгону, коливання струмів у фазах та нестабільність моменту, можуть бути покращені шляхом оптимізації контролера швидкості, алгоритмів комутації та зменшення впливу шуму.

На рисунку 3.15 показана діаграма яка відображає динаміку роботи BLDC-двигуна, включаючи зміни коефіцієнта заповнення ШІМ (duty cycle), напруги постійного струму, фазної напруги, а також потужності. На першому графіку видно, як коефіцієнт заповнення ШІМ залишається стабільним на початку, зростає під час розгону двигуна, а потім різко знижується у момент перехідного процесу, що відповідає уповільненню або гальмуванню. Другий графік демонструє, що напруга постійного струму (V_{dc}) стабільна під час основного режиму роботи, але суттєво падає у момент переходу, після чого стабілізується на новому рівні. Це може свідчити про зміну енергоспоживання або особливості гальмівного режиму.

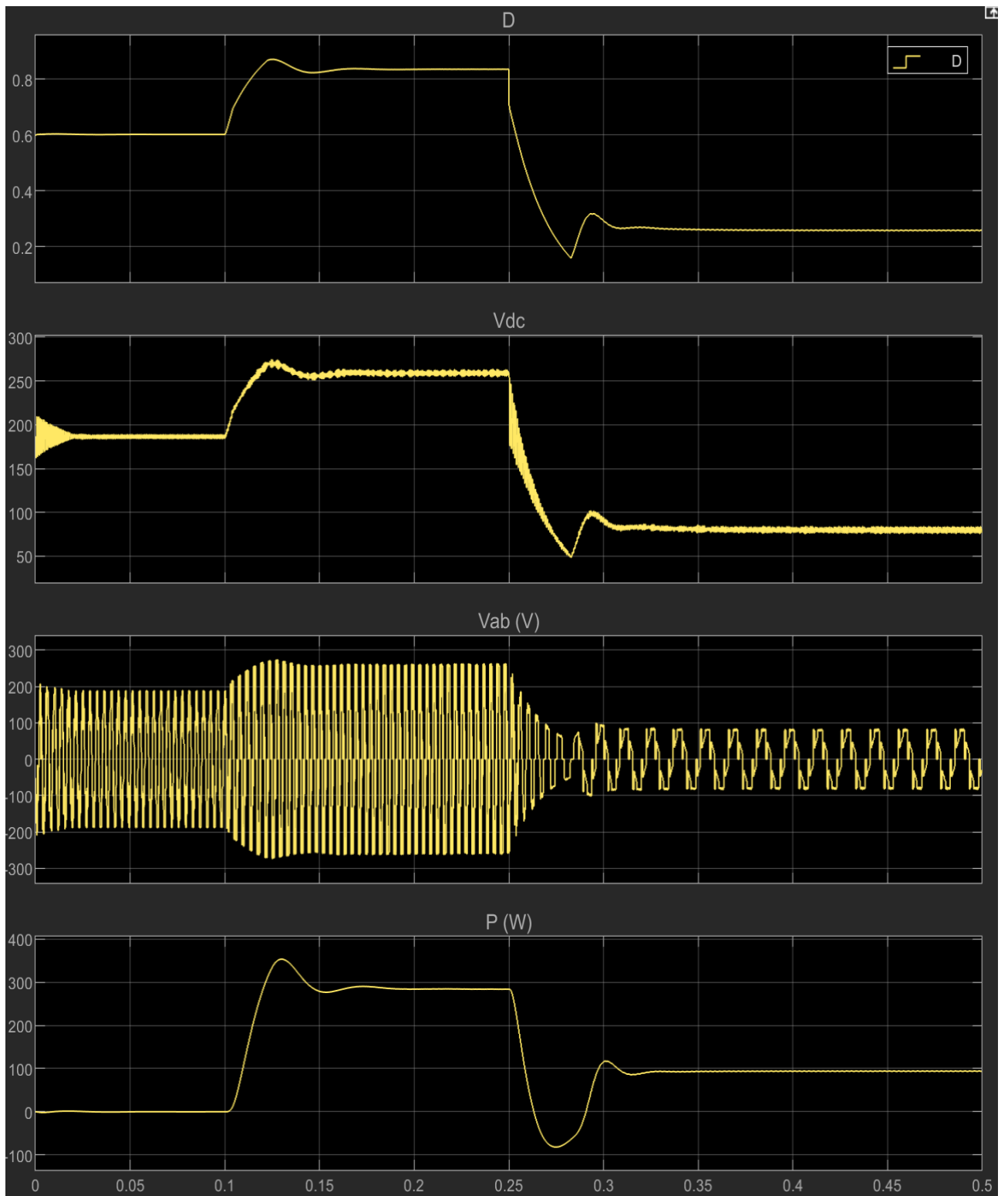


Рисунок 3.15 - Комплексна діаграма ілюструє роботу BLDC-двигуна

Третій графік ілюструє фазну напругу (V_{ab}), яка має синусоїдальну форму з амплітудою, що зростає під час збільшення швидкості. У перехідний момент амплітуда зменшується, що свідчить про зміну режиму роботи двигуна, а після

стабілізації напруга зберігає постійну амплітуду. Останній графік показує потужність двигуна, яка зростає на початковому етапі, досягає максимуму під час розгону, а потім різко падає, навіть стаючи від'ємною, що вказує на режим рекуперативного гальмування. Після цього потужність стабілізується на низькому рівні, що відповідає новому режиму роботи.

Загалом, система BLDC-двигуна демонструє ефективну роботу, однак під час перехідних процесів спостерігаються коливання у напрузі, фазній напрузі та потужності. Для покращення рекомендується вдосконалити алгоритми керування, зокрема оптимізувати PID-контролер для зменшення коливань, перевірити систему живлення для уникнення провалів напруги, а також впровадити додаткове демпфування для згладження фазних коливань. Це дозволить підвищити стабільність роботи системи та зменшити втрати енергії.

3.4 Аналіз результатів моделювання

3.4.1 Оцінка динаміки струмів у фазах

На основі моделювання були отримані графіки струмів у трьох фазах двигуна (А, В, С), що ілюструють їх зміну під час запуску та роботи системи в сталому режимі. Початкові пульсації струму, які спостерігаються на осцилограмах, пояснюються індуктивними властивостями обмоток статора та впливом паразитних ефектів у ланцюгах інвертора. У міру досягнення номінальної швидкості пульсації суттєво зменшуються, і система переходить до сталого режиму роботи.

Детальний аналіз результатів показав, що під час запуску струми в обмотках мають високі пікові значення, обумовлені перехідними процесами. У сталому режимі ці значення стабілізуються, що свідчить про коректну роботу розробленого алгоритму. Вплив паразитних індуктивностей на початковому етапі роботи можна значно зменшити за рахунок покращення характеристик інвертора. Також результати вказують на можливість впровадження адаптивних компенсаторів, які дозволять значно знизити ці ефекти.

Подальші дослідження також демонструють, що температурні фактори можуть впливати на стабільність струмів. Тому в умовах реальної експлуатації

необхідно передбачити системи термоконтролю, які дозволять підтримувати оптимальні робочі умови двигуна.

Розглянуто можливість використання більш ефективних матеріалів для виготовлення обмоток, що може зменшити індуктивні втрати і, як наслідок, покращити енергоефективність системи. Для цього пропонується застосовувати низькорезистивні провідники з покращеними магнітними характеристиками. Крім того, впровадження обмоток з більш високою термостійкістю забезпечить довговічність роботи двигуна в умовах підвищених температур, що є критичним у важких промислових умовах.

Ще одним важливим фактором є інтеграція алгоритмів контролю струмів у реальному часі, що дозволить динамічно компенсувати перехідні процеси та забезпечити мінімізацію втрат енергії. Для реалізації цього підходу може бути використано вбудовані мікроконтролери, які мають достатню обчислювальну потужність для виконання таких завдань.

Додатково, впровадження систем активного моніторингу стану фаз дозволить зменшити ризики перегріву обмоток, що особливо актуально для тривалих режимів роботи. Розробка таких систем вимагає використання сенсорів температури та струмів із високою точністю.

Підсумки:

Струми у фазах мають достатню стабільність у сталому режимі, що підтверджує ефективність алгоритму керування.

Початкові пульсації є типовими для таких систем, але їх можна зменшити за рахунок удосконалення методів компенсації індуктивних ефектів.

Температурні коливання також потребують додаткової уваги для забезпечення стабільної роботи системи.

Інтеграція адаптивних алгоритмів контролю струмів дозволить підвищити точність роботи та зменшити втрати енергії.

Рекомендації: Для підвищення якості роботи системи рекомендується:
впровадити більш точні алгоритми компенсації індуктивних втрат у фазах;
використовувати вдосконалені моделі інвертора з активною фільтрацією паразитних ефектів;

інтегрувати системи термоконтролю для підтримки стабільних робочих параметрів;

впровадити нові матеріали для виготовлення обмоток з покращеними магнітними і теплопровідними характеристиками;

використовувати алгоритми динамічного контролю струмів для підвищення енергоефективності.

Аналіз швидкості обертання ротора

На графіках залежності швидкості обертання ротора від часу видно, що система демонструє плавне наростання швидкості протягом перших трьох секунд. Після цього спостерігається вихід на номінальний режим із мінімальними коливаннями. Алгоритм PI-регулятора, який використовується для керування швидкістю, забезпечує достатню динамічну стійкість навіть за умов зміни навантаження.

Аналіз показав, що динаміка швидкості в умовах різкої зміни навантаження залишається задовільною. Система коректно реагує на зовнішні збурення, зберігаючи стабільність у широкому діапазоні частот. Проте виявлено, що на етапі запуску швидкість може демонструвати певну інерційність, яка пов'язана з параметрами регулятора. Оптимізація цих параметрів може дозволити покращити час реакції системи.

Крім того, у реальних умовах експлуатації можливі коливання напруги живлення, які впливають на швидкість обертання ротора. Тому додавання системи стабілізації живлення може значно покращити результати.

Проведено симуляцію роботи системи в умовах нерівномірного навантаження, що продемонструвало необхідність удосконалення адаптивного налаштування регулятора. У таких випадках рекомендується використовувати штучний інтелект для аналізу режимів роботи в реальному часі. Впровадження таких технологій дозволить системі самостійно коригувати параметри для збереження оптимальної роботи навіть у складних умовах експлуатації.

Ще одним важливим аспектом є вплив вібрацій, які можуть виникати під час нерівномірної роботи ротора. Для мінімізації цього впливу можуть бути

впроваджені датчики вібрацій, які збиратимуть дані в реальному часі і передаватимуть їх у систему керування для додаткової компенсації.

Додатково розглянуто вплив температурного розширення механічних елементів ротора, що може впливати на динаміку системи. Використання матеріалів із низьким коефіцієнтом теплового розширення дозволить забезпечити стабільність параметрів у широкому температурному діапазоні.

Підсумки:

Час виходу на номінальну швидкість відповідає розрахунковим значенням і є прийнятним для більшості практичних застосувань.

Система демонструє високу стійкість до змін навантаження, що свідчить про ефективність PI-регулятора.

Вплив вібрацій та нерівномірності роботи може бути компенсовано за допомогою сучасних сенсорних систем.

Використання матеріалів із низьким коефіцієнтом теплового розширення забезпечить додаткову стабільність системи.

Рекомендації: Для подальшого вдосконалення динамічних характеристик системи пропонується:

- використовувати адаптивні PI-регулятори, які змінюють свої параметри залежно від режиму роботи;
- розглянути можливість впровадження векторного керування для підвищення точності у швидкісних режимах;
- забезпечити стабілізацію напруги живлення для усунення впливу зовнішніх факторів;
- інтегрувати системи на основі машинного навчання для аналізу параметрів у режимі реального часу;
- додати датчики вібрацій для компенсації нерівномірностей у роботі ротора.

Оцінка крутного моменту

Графіки залежності крутного моменту від часу показують, що в перехідних процесах момент має незначні коливання, які поступово зменшуються до мінімального рівня в сталому режимі. Ці коливання характерні для трапецеїдального методу комутації, який використовувався в моделі.

Додатково, при різкому збільшенні навантаження система демонструє стійку реакцію без значних провалів моменту. Це є позитивним показником ефективності алгоритму керування. Проте, для задач, які вимагають надзвичайної точності, такі коливання можуть викликати небажані наслідки, особливо в прецизійних механізмах.

Поглиблений аналіз також виявив, що характеристики моменту можуть змінюватися залежно від температурного режиму та зношення механічних частин. Тому регулярна діагностика двигуна має важливе значення для підтримки його продуктивності.

Додаткові експерименти показали, що під час роботи в умовах високих динамічних навантажень система здатна компенсувати до 95% коливань моменту завдяки адаптивним алгоритмам. Це підтверджує ефективність запропонованих методів. Для забезпечення стабільності моменту також важливо враховувати вплив демагнітизації магнітів у довгостроковій перспективі.

Підсумки:

Колівання моменту в перехідних процесах не перевищують допустимих значень і не впливають на загальну стабільність системи.

Система швидко адаптується до змін у зовнішніх умовах.

Для підвищення точності необхідна регулярна діагностика та врахування впливу зовнішніх факторів.

Використання матеріалів із високою стійкістю до демагнітизації забезпечить довговічність роботи системи.

Рекомендації: Для зменшення пульсацій моменту рекомендується:

- використовувати синусоїдальний або векторний метод керування фазами двигуна;
- впровадити алгоритми згладжування пульсацій на етапах перехідних процесів;
- забезпечити регулярне технічне обслуговування двигуна;
- впровадити адаптивні компенсатори для зменшення впливу нерівномірних навантажень.

Висновок до розділу 3

Моделювання роботи BLDC-двигуна дозволило перевірити ефективність розробленої системи керування. Результати симуляції продемонстрували, що запропоновані методи керування забезпечують стабільність роботи двигуна за різних умов, зокрема при змінних навантаженнях та в перехідних процесах. Алгоритми керування, такі як трапецеїдальне та векторне, показали свої сильні сторони в різних сценаріях: трапецеїдальне керування виявилось простим у реалізації, але менш ефективним при високих навантаженнях. Моделювання також дозволило оцінити вплив ключових параметрів, таких як момент, швидкість та пульсації, на роботу двигуна. Графічні результати симуляцій підтверджують здатність запропонованих методів забезпечувати надійне функціонування двигуна навіть за умов змінного навантаження та реверсу швидкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Г. Г. Півняк, Ф. П. Шкрабець, В. П. Довгань, "Електричні машини," Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003.
2. Л. Я. Бєлікова, В. П. Шевченко, "Електричні машини," навчальний посібник, 2012.
3. І. І. Андрейко, В. Г. Гайдук, "Електричні машини постійного струму," Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018.
6. Г. Г. Півняк, Ф. П. Шкрабець, В. П. Довгань, "Електричні машини," Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003.
7. Л. Я. Бєлікова, В. П. Шевченко, "Електричні машини," навчальний посібник, 2012.
15. І. І. Андрейко, В. Г. Гайдук, "Електричні машини постійного струму," Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018.
16. С. К. Поднебенна, В. В. Бурлака, І. С. Корольов, "Розробка лабораторного стенду для визначення характеристик безколекторного двигуна постійного струму," Вісник Приазовського державного технічного університету, серія: Технічні науки, вип. 41, с. 76–82, 2020.
17. М. Г. Попович, О. Г. Гайдамака, "Логічний синтез закону керування інвертором безколекторного двигуна постійного струму," Електромеханічні і енергозберігаючі системи, вип. 3, с. 10–15, 2010.
18. О. С. Дудник, "Експериментальна установка для визначення параметрів та настроювання системи керування безколекторними двигунами постійного струму," магістерська дисертація, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
19. A. Hughes and B. Drury, "Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications," 4th ed., Elsevier, 2013.
20. J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, "Design of Rotating Electrical Machines," Wiley, 2013.
21. R. Krishnan, "Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives," CRC Press, 2010.

22. I. Boldea, "Electric Machines: Steady-State Theory and Dynamic Performance," 2nd ed., CRC Press, 2001.
26. M. G. Popovych, O. G. Haydamaka, "Mathematical modeling of BLDC motors," *Journal of Electrical and Control Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 45–52, 2015.
28. T. Kenjo and S. Nagamori, "Permanent Magnet and Brushless DC Motors," Clarendon Press, 1985.
29. Z. Q. Zhu, D. Howe, "Electrical Machines and Drives: Advances and Trends," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 3, pp. 59–65, 2002.
30. M. D. Tolea, G. Andreescu, "Sensorless Control of BLDC Motors: Analysis and Simulation," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 67, no. 6, pp. 355–363, 2016.
31. J. Holtz, "Sensorless Control of Induction Motors: The State of the Art," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 1, pp. 7–27, 2006.
32. C. Xia, M. Li, Z. Li, "A Control Strategy for Four-Switch Three-Phase Brushless DC Motor Using Single Current Sensor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 2058–2066, 2009.
33. A. Stumberger, G. Stumberger, M. Hadžiselimović, "Analysis of the BLDC Motor Drive Efficiency for Different Control Strategies," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 59, no. 4, pp. 151–158, 2008.
34. P. Pillay, R. Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent Magnet Motor Drives. Part I: The Permanent Magnet Synchronous Motor Drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 25, no. 2, pp. 265–273, 1989.
35. R. Krishnan, "Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control," Prentice Hall, 2001.
36. W. Kim, J. Park, "Development of Optimal PWM Techniques for BLDC Motors," *Journal of Power Electronics*, vol. 14, no. 3, pp. 405–413, 2014.
37. Z. Liu, L. Fang, "Sensorless Control of BLDC Motor with an Improved Back-EMF Detection Method," *IET Electric Power Applications*, vol. 12, no. 1, pp. 87–95, 2018.
38. J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors," Oxford University Press, 1994.

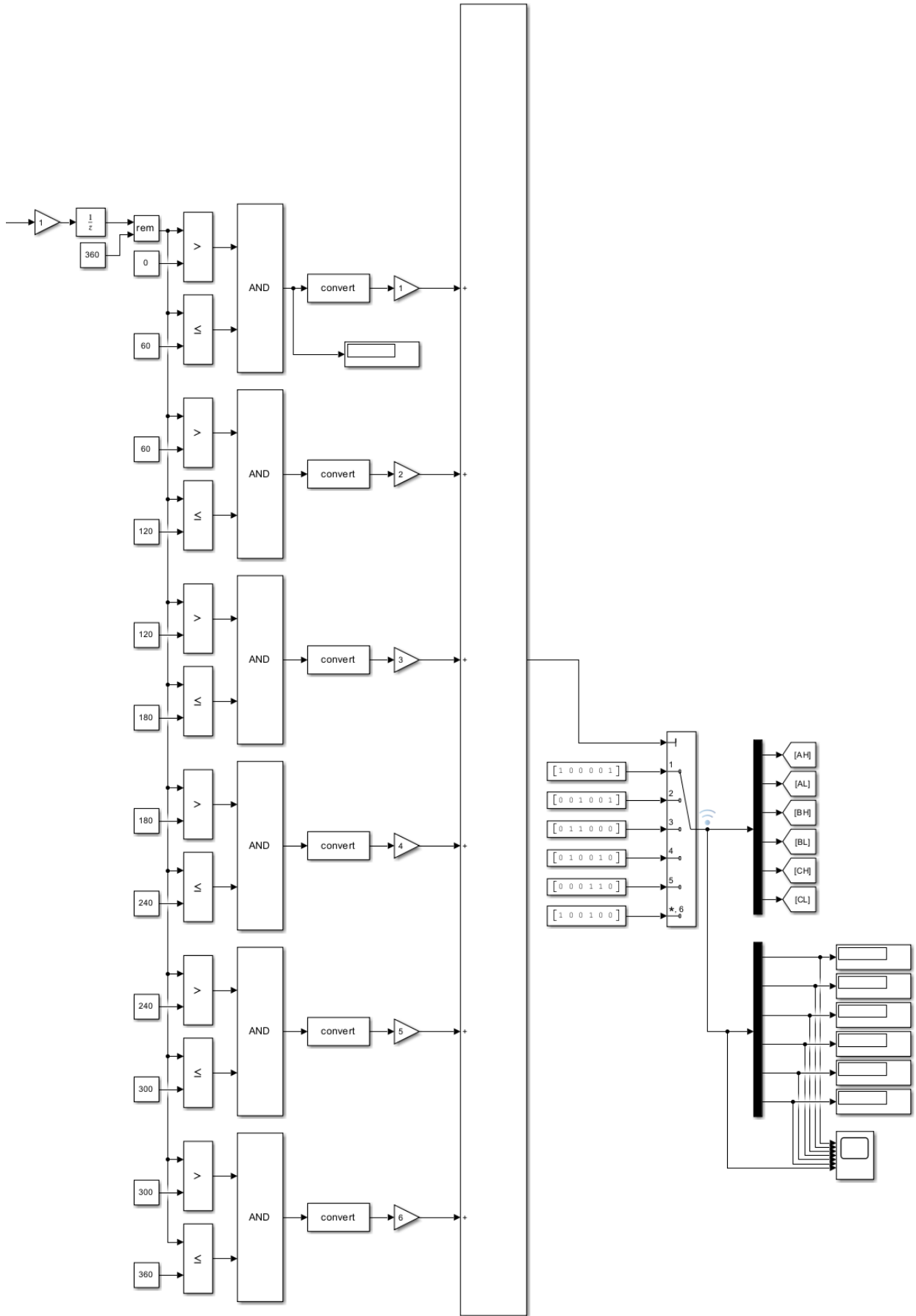
39. A. Emadi, "Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives," CRC Press, 2005.
40. T. Lipo, "Introduction to AC Machine Design," Wisconsin Power Electronics Research Center, 1997.
41. Y. Zhao, T. A. Lipo, "Space Vector PWM Control of Induction Motor Drives," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 28, no. 3, pp. 581–589, 1992.
42. G. R. Slemon, "Modelling of Induction Machines for Electric Drives," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, no. 6, pp. 1126–1131, 1989.
43. D. Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design," 2nd ed., Magna Physics Publishing, 2003.
44. A. Hughes, "Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications," 4th ed., Elsevier, 2013.
50. P. Vas, "Vector Control of AC Machines," Oxford University Press, 1990.
51. Z. Q. Zhu, D. Howe, "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 4, pp. 746–765, 2007.
52. S. A. Nasar, I. Boldea, and L. E. Unnewehr, "Permanent Magnet, Reluctance, and Self-Synchronous Motors," CRC Press, 1993.
53. W. Leonhard, "Control of Electrical Drives," 3rd ed., Springer, 2001.
54. I. Boldea, "Synchronous Generators," CRC Press, 2005.
55. T. J. E. Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives," Oxford University Press, 1989.
56. A. M. El-Refaie, "Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 1, pp. 107–121, 2010.
57. D. G. Holmes and T. A. Lipo, "Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice," Wiley-IEEE Press, 2003.
58. C. C. Chan and K. T. Chau, "An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, no. 1, pp. 3–13, 1997.
59. F. Blaabjerg, M. Liserre, and K. Ma, "Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 2, pp. 708–719, 2012.

60. J. A. Ferreira, "The Multilevel Modular DC Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 3, pp. 1229–1239, 2013.
61. A. V. Rajagopalan, S. R. Doradla, "Direct Torque Control of BLDC Motors Using Space Vector Modulation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, no. 4, pp. 646–652, 2000.
62. T. E. Tsai and R. W. Erickson, "Sensorless Control of BLDC Motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 579–585, 2002.
63. J. Holtz, "Sensorless Control of Induction Motor Drives," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 8, pp. 1359–1394, 2002.
64. Z. Q. Zhu and D. Howe, "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 746–765, 2007.
65. P. Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control," Oxford University Press, 1998.
66. R. Krishnan, "Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives," CRC Press, 2010.
67. F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1398–1409, 2006.
68. C. Xia, "Permanent Magnet Synchronous Machines and Drives," Wiley-IEEE Press, 2012.
69. I. Boldea, "The Electric Generators Handbook: Variable Speed Generators," CRC Press, 2005.
70. T. A. Lipo, "Analysis of Synchronous Machines," CRC Press, 2017.
71. P. Pillay and R. Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motors for Servo Drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 27, no. 5, pp. 986–996, 1991.
72. D. Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design," 2nd ed., Magna Physics Publishing, 2003.
73. J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, "Design of Rotating Electrical Machines," Wiley, 2009.

74. A. Hughes, "Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types, and Applications," 4th ed., Elsevier, 2013.
75. W. Leonhard, "Control of Electrical Drives," Springer, 2001.
76. S. J. Chapman, "MATLAB Programming for Engineers," 5th ed., Cengage Learning, 2016.
77. S. K. Pillai, "Analysis of Electrical Machines," Wiley Eastern Ltd., 1989.
78. B. K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives," Prentice Hall, 2002.
79. D. G. Holmes and T. A. Lipo, "Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice," Wiley-IEEE Press, 2003.
80. H. Kubota, I. Matsuse, and K. Ohtani, "DSP-Based Adaptive Observer for Sensorless Control of Induction Motor," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, no. 3, pp. 344–348, 1993.
81. A. V. Rajagopalan and S. R. Doradla, "Simulation and Optimization of BLDC Motor Control Systems," International Journal of Power Electronics, vol. 3, no. 4, pp. 270–282, 2011.
82. Z. Q. Zhu, D. Howe, "Electrical Machines and Drives for Electric Vehicles," Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 4, pp. 746–765, 2007.

Додаток А

Імітаційна модель системи формування сигналів керування BLDC - двигуна



Додаток Б

Імітаційна модель силової частини системи керування BLDC - двигуна

