

Міністерство освіти і науки України
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації,
робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова

**Кафедра автоматизації технологічних, електромеханічних і
робототехнічних систем**



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

**на тему «УНІВЕРСАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА VLDC ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА З
РЕАЛІЗАЦІЄЮ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ»**

Здобувач СВО «Бакалавр»: Цихов Гліб Олександрович
Студент групи АЕМзт-31

Керівник: Москалюк Андрій Юрійович,
к.т.н., доцент

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 16.06.2026 р., протокол № 8.

в.о. Завідувач кафедри АТЕіРС
(назва кафедри)

(підпис)

Олексій Жигайло
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут: *Комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім. П.М.Платонова*

Кафедра: *Електромеханіки та мехатроніки*

Рівень ВО: *перший*

Ступень ВО: *бакалавр*

Галузь знань: *14 – Електрична інженерія*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

Освітня програма: *Інтелектуально-керовані електромеханічні системи*

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри ЕтаМ

Осадчук П.І.

«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

здобувача СВО «Бакалавр» АЕМзт – 31 Цихов Гліб Олександрович

1. Тема роботи: **«Універсалізація систем керування двигунами постійного струму та BLDC для лабораторного стенда з реалізацією рекуперативного гальмування»**

Керівник роботи: Москалюк Андрій Юрійович, к.т.н., доцент.

Затверджено наказом ОНТУ № 641-03 від 21.12.2025 р.

2. Строк подання студентом роботи: 15.06.2026 р.

3. Вхідні дані до проекту: технічні характеристики... номінальна потужність..., напруга живлення ... частота нСту! Стру постійний
номінальна швидкість обертання 2950 об/хв, номінальний струм статора 78.07 А.

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

аналіз двигунів постійного струму у системах електроприводу; існуючі способи керування електродвигунами BLDC та DC, розгляд принципів ШІМ-регулювання та електронної комутації, розрахунок основних параметрів електропривода та силової частини, розробка структурної схеми універсальної системи керування, моделювання режимів роботи DC та BLDC двигунів, техніко-економічне обґрунтування, охорона праці

5. Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації:

1. Титульний слайд. 2. Актуальність теми, об'єкт проектування, мета і завдання роботи. 3. аналіз двигунів постійного струму у системах електроприводу. 4 Існуючі способи керування електродвигунами BLDC та DC; 5. Розгляд принципів ШІМ-регулювання та електронної комутації; 6. Розрахунок основних параметрів електропривода та силової частини; 7. Розробка структурної схеми універсальної системи керування; 8. Моделювання режимів роботи DC та BLDC двигунів; 9.техніко-економічне обґрунтування, 10. охорона праці.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Москалюк А.Ю., доц.		
Економічна частина	Москалюк А.Ю., доц.		

7. Дата видачі завдання: 15.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ
ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим
1	1. Загальна характеристика роботи: вибір об'єкта проектування, опис і аналіз роботи тягового електроприводу електропоїзда та його основного обладнання. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.	05.03.2026	
2	2. Аналіз роботи двигунів постійного струму та BLDC . Розгляд основних елементів конструкції BLDC-двигунів, аналіз способів керування та гальмування електродвигунів.	10.04.2026	
3	3. Теоретичні основи керування DC та BLDC двигунами. Принцип ШІМ-регулювання двигуна DC та електронної комутації BLDC-двигуна. Трифазний інвертор як силовий перетворювач електропривода	10.05.2026	
4	4. Універсалізація систем керування двигунами постійного струму ТА BLDC. Теоретичні основи рекуперативного гальмування. Розгляд необхідності універсалізації системи керування. Використання трифазного інвертора та двох його фаз.	25.05.2026	
5	5. Розробка та дослідження лабораторного стенда. Вибір основних елементів лабораторного стенда та розробка структурної схеми. Розрахунок параметрів електропривода та силової частини. Аналіз результатів дослідження та оцінка ефективності стенда.	01.09.2026	
6	5. Економічна частина: розрахунок витрат на створення лабораторного стенда та оцінка економічного ефекту від використання універсальної системи.	13.06.2026	
7	6. Частина з охорони праці: Аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час роботи зі стендом. Вимоги електробезпеки при експлуатації лабораторного обладнання. Пожежна безпека та організація робочого місця.	15.06.2026	
7	Перевірка роботи на доброчинність. Рецензування роботи	19.06.2026	
8	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра.	23.06.2026	

Здобувач: Цихов Г.О. _____

Керівник: Москалюк А.Ю. _____

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ. Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник _____ Цихов Г.О.

АНОТАЦІЯ

ЦИХОВ Г. О. «УНІВЕРСАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА BLDC ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА З РЕАЛІЗАЦІЄЮ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ». Кваліфікаційна робота бакалавра. – Одеса: ОНТУ, 2026. – 79 с. Бібліогр.: 15 найм. Слайдів презентаційної частини – 14.

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання універсалізації систем керування двигунами постійного струму. Основна увага приділена використанню трифазного силового інвертора як єдиної апаратної платформи для керування різними типами електричних машин. Трифазний інвертор використовується як стандартний перетворювач для електронної комутації фаз, а при підключенні двигуна постійного струму до двох фаз отримується класичний H-мост.

Результати роботи можуть бути використані для модернізації навчально-лабораторної бази, проведення лабораторних робіт з електропривода, силової електроніки та систем автоматичного керування, а також для подальшого дослідження енергоефективних режимів роботи електричних машин.

Ключові слова: двигун постійного струму, BLDC-двигун, трифазний інвертор, H-міст, рекуперативне гальмування, система керування.

ABSTRACT

TSYKHOV H. O. “UNIVERSALIZATION OF CONTROL SYSTEMS FOR DC AND BLDC MOTORS FOR A LABORATORY STAND WITH IMPLEMENTATION OF REGENERATIVE BRAKING”. Bachelor’s Qualification Work. – Odesa: ONTU, 2026. – 79 p. Bibliography: 15 items. Presentation slides – 14.

The qualification work considers the problem of universalization of control systems for direct current (DC) motors and BLDC motors. The main focus is on the use of a three-phase power inverter as a single hardware platform for controlling different types of electric machines. The three-phase inverter is used as a standard converter for electronic commutation of phases, while connecting a DC motor to two phases of the inverter forms a classical H-bridge.

The results of the work can be used for modernization of educational laboratory facilities, conducting laboratory work in electric drives, power electronics, and automatic control systems, as well as for further research of energy-efficient operating modes of electric machines.

Keywords: DC motor, BLDC motor, three-phase inverter, H-bridge, regenerative braking, control system.

ЗМІСТ

	стр.
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА BLDC У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	9
1.1 Особливості конструкції та принцип роботи двигунів постійного струму	9
1.2 Особливості конструкції та принцип роботи BLDC-двигунів	12
1.3 Порівняння характеристик двигунів постійного струму та BLDC	14
1.4 Аналіз способів керування та гальмування електродвигунів	16
1.5 Постановка задачі роботи.	20
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КЕРУВАННЯ DC ТА BLDC ДВИГУНАМИ	21
2.1 Основні рівняння електромеханічного перетворення енергії	21
2.2 ШІМ-регулювання двигуна постійного струму	23
2.3 Електронної комутації BLDC-двигуна	27
2.4 Трифазний інвертор як силовий перетворювач електропривода	30
2.5 Рекуперативне гальмування електродвигунів	35
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК УНІВЕРСАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	38
3.1 Вибір структури універсальної системи керування	39
3.2 Розрахунок силової частини універсального інвертора	44
3.3 Розрахунок режиму роботи BLDC-двигуна	48
3.4 Розрахунок режиму роботи двигуна постійного струму	50
3.5 Розрахунок параметрів рекуперативного гальмування	58

					КРБ.АТЕРС.141.641-03.3.3			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Цихов Г.О.			УНІВЕРСАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА BLDC ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА З РЕАЛІЗАЦІЄЮ	Літ	Аркуш	Аркушів
Керівни		Москалюк А.Ю					5	89
						ОНТУ, АЕМзт - 31		
Консульт.								
Зав.кафедри		Жигайло О.М.						

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА	59
4.1 Вибір основних елементів лабораторного стенда	59
4.2 Розрахунок параметрів електропривода та силової частини	65
4.3 Моделювання режимів роботи DC та BLDC двигунів	70
4.4 Моделювання рекуперативного гальмування	76
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	80
5.1 Обґрунтування економічної доцільності	80
5.2 Розрахунок вартості розробки	80
5.3 Оцінка економічного ефекту	81
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ	82
6.1 Організація та управління охороною праці	84
6.2 Аналіз умов праці та розрахунок пристрою заземлення	86
6.3 Заходи з охорони праці	89
ВИСНОВКИ	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	93

ВСТУП

Сучасні системи електропривода повинні забезпечувати точне регулювання швидкості та моменту, високу енергоефективність і можливість реалізації різних режимів роботи, зокрема рекуперативного гальмування. Значне поширення отримали двигуни постійного струму та безщіткові двигуни постійного струму (BLDC), які застосовуються у промисловості, транспорті, робототехніці й навчально-дослідних установках.

Актуальність роботи полягає у створенні універсальної системи керування, яка дозволяє використовувати єдину силову частину для двох типів двигунів. У запропонованій системі трифазний інвертор застосовується як силовий перетворювач для BLDC-двигуна, а при використанні двох його фаз — як H-міст для щіткового двигуна постійного струму. Це зменшує кількість силових модулів, спрощує конструкцію стенда та розширює його функціональні можливості.

Об'єктом дослідження є електропривод з двигунами постійного струму та BLDC.

Предметом дослідження є система керування електроприводом на базі трифазного силового інвертора.

Метою роботи є розробка та дослідження універсальної системи керування двигунами постійного струму та BLDC для лабораторного стенда з реалізацією рекуперативного гальмування.

Для досягнення поставленої мети виконано аналіз особливостей двигунів постійного струму та BLDC, розглянуто принципи їх керування, обґрунтовано можливість застосування трифазного інвертора як універсального силового перетворювача, визначено параметри електропривода та виконано моделювання основних режимів роботи.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованого рішення при створенні та модернізації лабораторних стендів з електропривода. Один універсальний стенд може застосовуватися для дослідження двох типів двигунів і режимів рекуперативного гальмування.

					КРБ. АТЕІРС.141.641-03.3.3	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

1 АНАЛІЗ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА BLDC У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Електродвигуни є одними з основних елементів сучасної техніки, що забезпечують перетворення електричної енергії в механічну. Вони широко застосовуються у промисловості, транспорті, побутових пристроях та системах автоматизації. Розвиток електропривода безпосередньо пов'язаний із підвищенням ефективності виробничих процесів, енергоефективності та рівня автоматизації технологічних систем.

Серед різних типів електричних машин важливе місце займають двигуни постійного струму, які тривалий час використовувалися як основні привідні двигуни завдяки простоті керування, можливості плавного регулювання швидкості та високому пусковому моменту. Незважаючи на появу сучасних безщіткових двигунів та частотно-керованих електроприводів, двигуни постійного струму залишаються важливим об'єктом дослідження, оскільки їх принцип роботи лежить в основі багатьох сучасних систем керування, у тому числі BLDC-двигунів.

1.1 Особливості конструкції та принцип роботи двигунів постійного струму

Двигуни постійного струму широко застосовуються в системах електропривода завдяки простоті керування, можливості плавного регулювання швидкості та високому пусковому моменту. Їх конструкція сформована таким чином, щоб забезпечити перетворення електричної енергії постійного струму в механічну енергію обертання при збереженні сталого напрямку електромагнітного моменту.

Конструктивно двигун постійного струму складається зі статора, ротора (якоря), обмотки якоря, колектора та щіткового вузла. Статор створює магнітне поле, яке може формуватися як обмоткою збудження, так і постійними магнітами. Ротор містить обмотку, у провідниках якої протікає струм, що взаємодіє з магнітним полем статора. Колектор разом із щітками

забезпечує механічну комутацію струму, змінюючи його напрям у провідниках обмотки якоря під час обертання.

Принцип роботи двигуна постійного струму полягає у виникненні електромагнітних сил у провідниках обмотки якоря, які розташовані в магнітному полі. Сукупність цих сил створює обертовий момент, що приводить ротор у рух. Завдяки роботі колектора напрямок струму в провідниках змінюється таким чином, щоб обертання залишалось безперервним і в одному напрямку.

Важливою особливістю конструкції є наявність щітково-колекторного вузла, який виконує функцію механічного комутатора. Саме ця особливість визначає як переваги двигуна — простоту керування, так і його недоліки — зношування щіток, іскріння та обмеження за швидкістю обертання. Крім того, конструкція двигуна передбачає наявність повітряного зазору між статором і ротором, який впливає на магнітні параметри та енергетичні характеристики машини.

До конструктивних особливостей двигунів постійного струму також належать складна будова якоря з обмоткою, необхідність використання ізоляційних матеріалів, а також організація системи охолодження для відведення тепла, що виділяється в процесі роботи.

Основними конструктивними елементами двигуна постійного струму є статор, ротор (якір), обмотка якоря, колектор і щітки. Статор призначений для створення магнітного поля. У його склад входять магнітопровід, полюси та обмотка збудження. У двигунах малої потужності замість обмотки збудження можуть використовуватися постійні магніти, що спрощує конструкцію та зменшує втрати. Ротор (якір) є обертовою частиною машини і складається з магнітопроводу та обмотки, розміщеної в пазах. Провідники обмотки якоря підключені до колектора, що дозволяє змінювати напрямок струму в процесі обертання. Колектор являє собою циліндричний набір мідних пластин, ізольованих одна від одної. Він забезпечує механічне перемикання струму в обмотці якоря, що необхідно для підтримання сталого напрямку

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електромагнітного моменту. Щітки виконані з графітових або металографітових матеріалів і забезпечують електричний контакт між нерухомою частиною (джерелом живлення) та обертовим колектором. Через щітки струм подається в обмотку якоря. На рисунку 1.1 наведено конструкцію та принцип дії двигуна постійного струму.

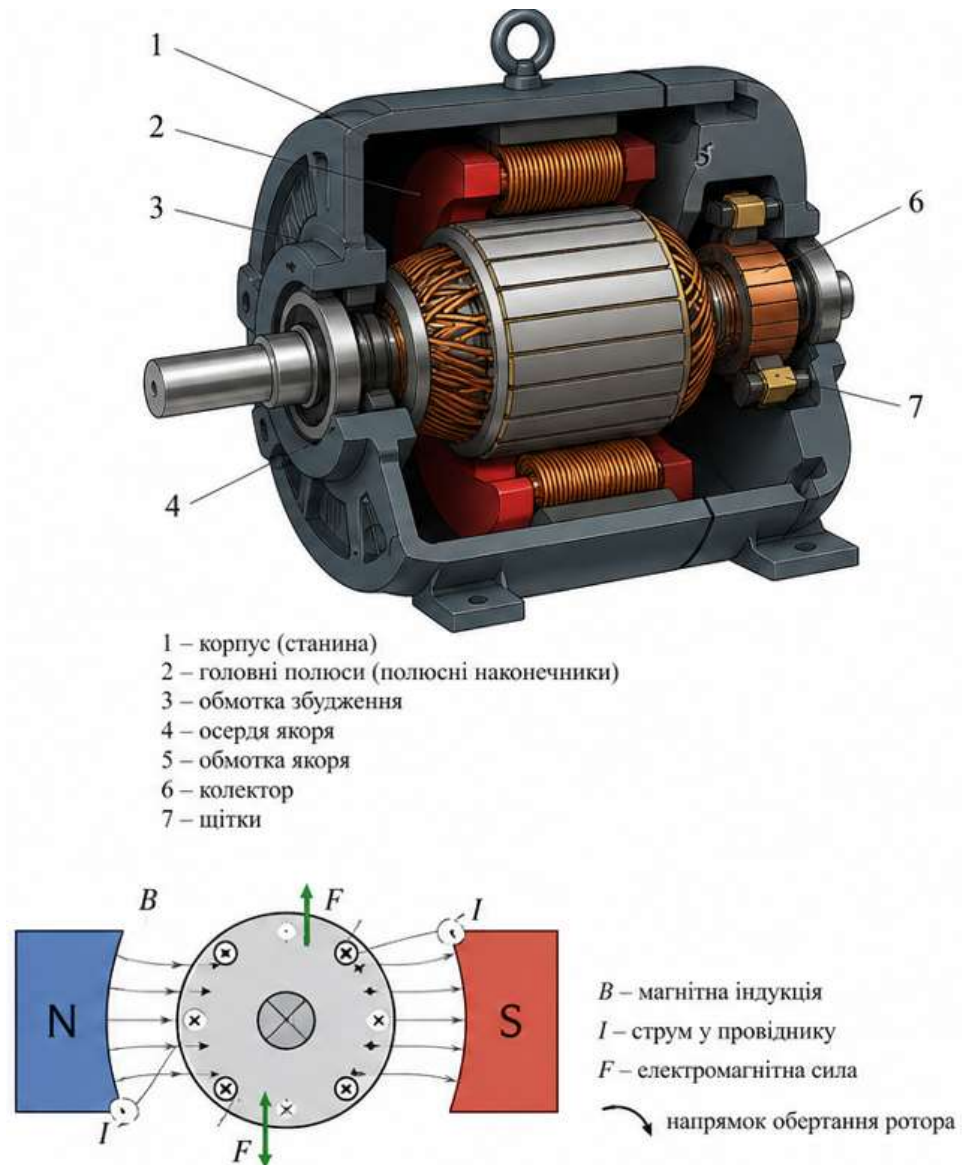


Рис. 1.1 Конструкція електродвигуна постійного струму

Отже, двигун постійного струму є зручним об'єктом для дослідження основ електропривода, оскільки його момент безпосередньо пов'язаний зі струмом якоря, а швидкість може регулюватися зміною напруги живлення. Водночас наявність щітково-колекторного вузла обмежує ресурс, швидкість

обертання та надійність машини. Саме ці недоліки стали однією з причин розвитку безщіткових двигунів постійного струму — BLDC.

1.2 Особливості конструкції та принцип роботи BLDC-двигунів

BLDC-двигун (Brushless Direct Current Motor) — це безщітковий двигун постійного струму, в якому процес комутації струмів у фазах здійснюється електронно за допомогою силового перетворювача. Незважаючи на використання джерела постійної напруги, за принципом формування магнітного поля та керування такий двигун є ближчим до машин змінного струму.

Конструктивно BLDC-двигун складається зі статора з трифазною обмоткою та ротора з постійними магнітами. Обмотки розміщені на статорі, що забезпечує кращі умови охолодження та спрощує конструкцію ротора. Ротор, у свою чергу, виконується з постійними магнітами, які створюють магнітне поле без необхідності підведення струму.

На відміну від двигуна постійного струму, у BLDC-двигуні відсутні щітки та колектор. Їх функцію виконує електронна система керування, яка здійснює перемикання струмів у фазах відповідно до положення ротора. Таким чином, комутація переноситься з механічної частини в електронну.

Принцип роботи BLDC-двигуна полягає у створенні обертового магнітного поля в статорі, яке взаємодіє з магнітним полем ротора. Система керування подає напругу на певні фази статора, формуючи електромагнітний момент, що обертає ротор. Для визначення положення ротора використовуються датчики Холла або бездатчикові методи на основі аналізу протидіючої ЕРС.

Електромагнітний момент у загальному вигляді залежить від струму:

$$M = k_t \cdot I \quad (1.1)$$

де M — електромагнітний момент; k_t — коефіцієнт моменту; I — струм у фазі.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Керування BLDC-двигуном здійснюється за допомогою трифазного інвертора, який формує необхідну послідовність перемикання фаз. Найбільш поширеним способом керування є шестиступенева комутація, при якій у кожний момент часу живляться дві фази, а третя залишається відключеною. Перемикання фаз відбувається відповідно до положення ротора, яке визначається за допомогою датчиків Холла або бездатчиковими методами.

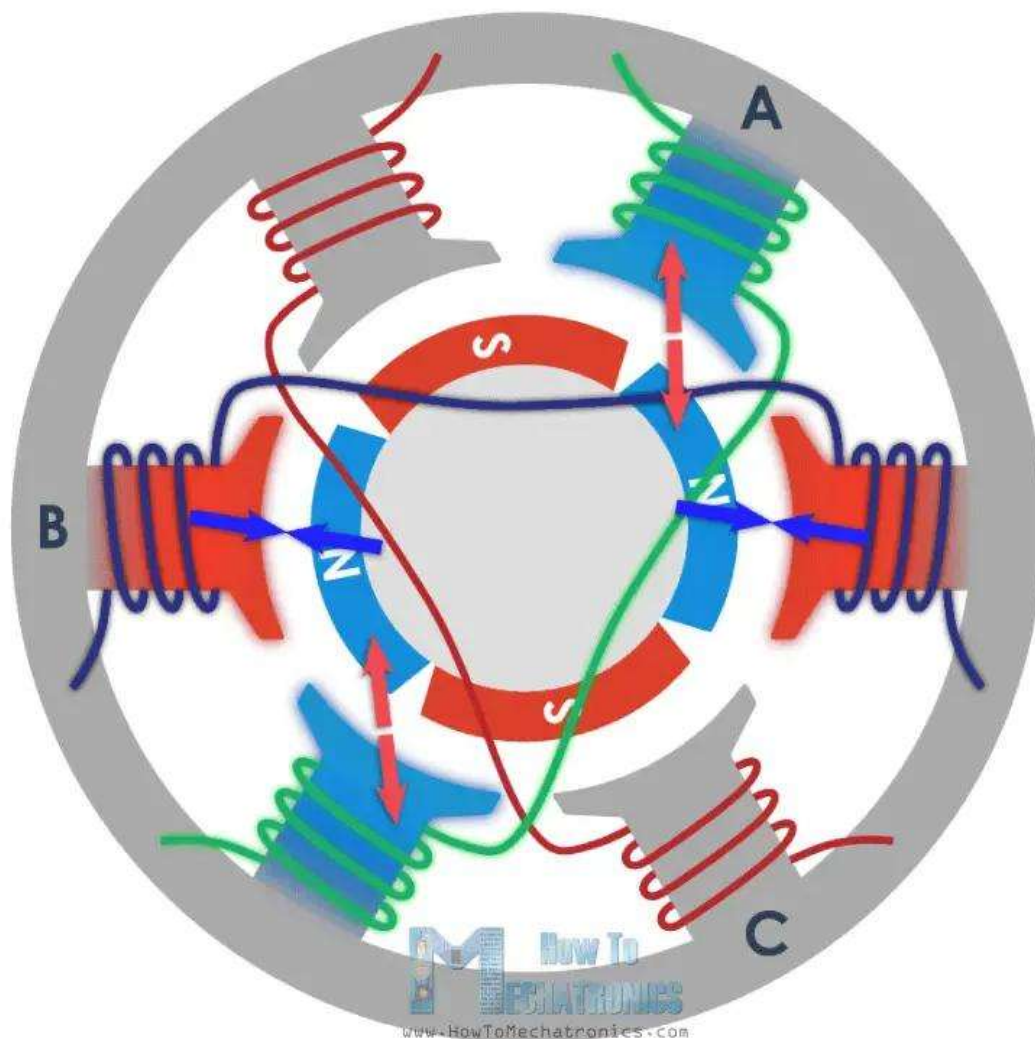


Рис. 1.2 – Конструкція та принцип дії BLDC-двигуна

Як видно з рисунка, обертання ротора забезпечується формуванням обертового магнітного поля в статорі, яке створюється за рахунок послідовної комутації фаз інвертором. Відсутність механічного комутатора є ключовою

особливістю BLDC-двигуна та визначає необхідність використання електронної системи керування.

1.3 Порівняння характеристик двигунів постійного струму та BLDC
Двигуни постійного струму та BLDC-двигуни мають спільну основу — використання джерела постійної напруги та подібний характер формування електромагнітного моменту. Водночас їх конструкція, спосіб комутації та принцип керування суттєво відрізняються, що визначає їх експлуатаційні характеристики.

Для двигуна постійного струму електромагнітний момент визначається залежністю:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I \quad (1.2)$$

де Φ — магнітний потік, I — струм якоря.

Для BLDC-двигуна при сталому магнітному полі (постійні магніти ротора) момент можна подати у вигляді:

$$M = k_t \cdot I \quad (1.3)$$

Таким чином, в обох випадках момент прямо залежить від струму, що є важливою спільною характеристикою з точки зору керування електроприводом.

Швидкість двигуна постійного струму визначається співвідношенням:

$$\omega = \frac{U - IR}{k_e \cdot \Phi} \quad (1.4)$$

У BLDC-двигуні швидкість також визначається балансом напруги та протидіючої ЕРС, тобто зі зростанням швидкості збільшується протидіюча ЕРС, що обмежує струм.

Основною відмінністю є спосіб комутації. У двигуні постійного струму вона здійснюється механічно за допомогою колектора і щіток, тоді як у BLDC — електронно за допомогою трифазного інвертора. Це впливає на надійність, втрати та складність системи керування. Для узагальнення основних відмінностей наведено порівняльну таблицю.

					КРБ. АТЕІРС.141.641-03.3.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик двигунів постійного струму та BLDC

Ознака	Двигун постійного струму	BLDC-двигун
Тип комутації	Механічна (щітки, колектор)	Електронна (інвертор)
Розташування обмоток	Ротор (якір)	Статор
Ротор	Обмотка, колектор	Постійні магніти
Залежність моменту	($M \sim I$)	($M \sim I$)
Джерело живлення	Постійна напруга	Постійна напруга через інвертор
Необхідність перетворювача	Необов'язкова	Обов'язкова
ККД	Нижчий (через втрати на щітках)	Вищий
Надійність	Нижча	Вища
Обслуговування	Потрібне (щітки)	Мінімальне
Складність керування	Невисока	Вища

З таблиці видно, що двигуни постійного струму є простішими з точки зору керування та реалізації, однак мають обмеження, пов'язані з механічною комутацією. BLDC-двигуни, навпаки, потребують складнішої системи керування, але забезпечують вищу ефективність, надійність і довговічність. Незважаючи на відмінності, обидва типи двигунів мають важливу спільну властивість — залежність моменту від струму, що дозволяє використовувати подібні підходи до керування. Це створює передумови для побудови універсальної системи керування на базі єдиного силового перетворювача.

1.4 Аналіз способів керування та гальмування електродвигунів

Ефективність роботи електропривода значною мірою визначається способами керування електродвигуном та реалізацією режимів гальмування.

Для двигунів постійного струму та BLDC-двигунів ці способи мають як спільні риси, так і суттєві відмінності, що обумовлено їх конструкцією та принципом комутації.

Керування електродвигуном у загальному випадку спрямоване на регулювання таких параметрів, як швидкість обертання, електромагнітний момент та струм. У сучасних системах електропривода ці задачі вирішуються за допомогою силових електронних перетворювачів, які дозволяють формувати необхідні закони зміни напруги та струму.

Для двигунів постійного струму найбільш поширеним способом керування є регулювання напруги на якорі. У сучасних системах це реалізується за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), при якій середнє значення напруги визначається коефіцієнтом заповнення імпульсів:

$$U_{\text{ср}} = D \cdot U_{dc} \quad (1.5)$$

де D — коефіцієнт заповнення; U_{dc} — напруга джерела.

Зміна напруги дозволяє плавно регулювати швидкість обертання двигуна. Для зміни напрямку обертання застосовується Н-міст, який забезпечує зміну полярності напруги на якорі. Крім того, у системах керування двигунами постійного струму часто використовується обмеження струму, що дозволяє захистити двигун у режимах пуску та перевантаження.

Керування BLDC-двигунами є більш складним, оскільки потребує електронної комутації фаз. Для цього використовується трифазний інвертор, який формує послідовність перемикання фаз відповідно до положення ротора. Найпростішим методом є шестиступенева комутація, при якій у кожний момент часу живляться дві фази, а третя відключена. У більш складних системах застосовується широтно-імпульсна модуляція для підвищення якості керування та зменшення пульсацій моменту.

Керування BLDC-двигуном може здійснюватися з використанням датчиків положення ротора або бездатчиковими методами. У першому

випадку використовуються датчики Холла, які визначають положення ротора і дозволяють точно синхронізувати комутацію. У другому випадку положення ротора оцінюється за сигналами протидіючої ЕРС.

Окрім керування швидкістю та моментом, важливим аспектом є реалізація режимів гальмування. У електроприводах розрізняють кілька основних способів гальмування: механічне, електричне та рекуперативне.

Механічне гальмування здійснюється за допомогою гальмівних пристроїв і не пов'язане з електричними процесами в двигуні. У даній роботі основна увага приділяється електричним способам гальмування.

Електричне гальмування двигунів постійного струму може реалізовуватися кількома способами. При динамічному гальмуванні обмотка якоря відключається від джерела живлення і підключається до гальмівного резистора. У цьому випадку двигун працює як генератор, а енергія розсіюється у вигляді тепла. Іншим способом є противмикання, при якому змінюється полярність напруги на якорі, що створює гальмівний момент.

Рекуперативне гальмування є найбільш ефективним з енергетичної точки зору. У цьому режимі двигун переходить у генераторний режим, і електрична енергія повертається до джерела живлення або накопичувача.

Для BLDC-двигунів реалізація гальмування також здійснюється через силовий інвертор. Динамічне гальмування може виконуватися шляхом замикання фаз або підключення гальмівного резистора. Рекуперативне гальмування реалізується за рахунок зміни режиму роботи інвертора, який у цьому випадку працює як випрямляч, повертаючи енергію до джерела живлення.

Слід зазначити, що у BLDC-двигунах електричне гальмування більш гнучке, оскільки керування струмами у фазах здійснюється електронно. Це дозволяє точно регулювати гальмівний момент та реалізовувати складні алгоритми керування.

Таким чином, способи керування та гальмування двигунів постійного струму та BLDC мають спільну основу, але відрізняються реалізацією. Двигуни постійного струму характеризуються простішими схемами керування, тоді як BLDC-двигуни потребують складніших електронних систем. Водночас використання силових перетворювачів дозволяє реалізувати подібні режими роботи для обох типів двигунів, що створює передумови для побудови універсальної системи керування.

Для узагальнення способів керування та гальмування доцільно розглядати силовий перетворювач як основний елемент, що визначає можливості електропривода. У випадку двигуна постійного струму таким перетворювачем найчастіше є Н-міст, який забезпечує зміну полярності напруги на якорі, реверс і електричне гальмування. Для BLDC-двигуна використовується трифазний інвертор, який виконує функцію електронного комутатора фаз.

Особливістю теми даної роботи є те, що трифазний інвертор може бути використаний не тільки для керування BLDC-двигуном, але й для керування двигуном постійного струму. Якщо двигун постійного струму підключити до двох фаз інвертора, наприклад А і В, то ці два плеча утворюють еквівалентну схему Н-моста. Це дозволяє реалізувати двигунний режим, реверс, динамічне та рекуперативне гальмування без застосування окремої силової схеми.

На рисунку 1.3 наведено узагальнену схему використання трифазного інвертора для керування BLDC-двигуном та двигуном постійного струму.

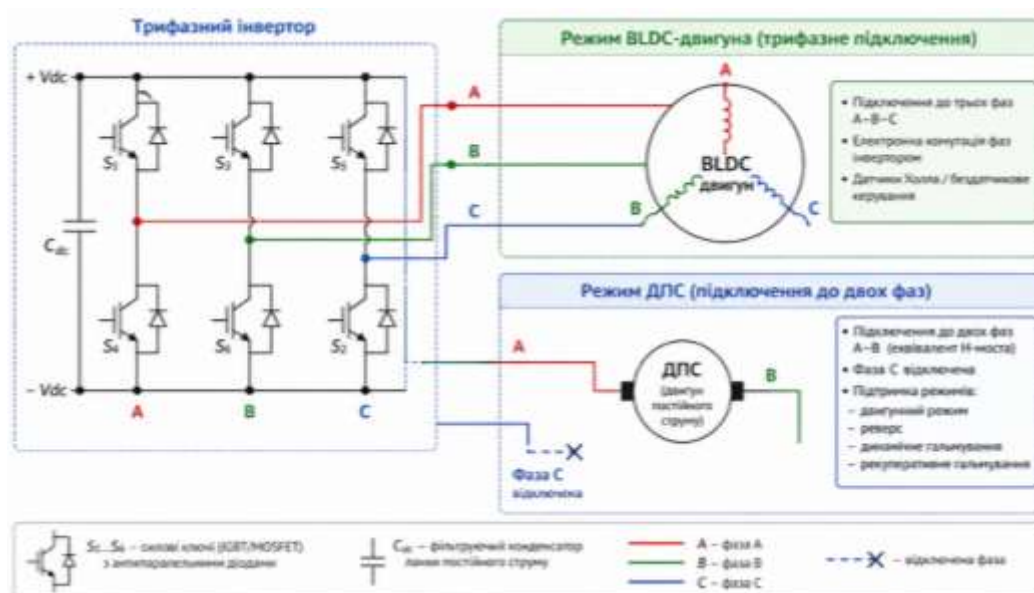


Рис. 1.3 Використання трифазного інвертора для керування BLDC-двигуном та двигуном постійного струму

Як видно з рисунка, одна і та сама силова частина може працювати у двох режимах: як трифазний інвертор для BLDC-двигуна та як H-міст для двигуна постійного струму. Відмінність між режимами полягає не у зміні апаратної схеми, а у зміні алгоритму керування силовими ключами.

Таблиця 1.2 – Способи керування та гальмування двигунів постійного струму і BLDC

Параметр	Двигун постійного струму	BLDC-двигун
Основний силовий перетворювач	H-міст	Трифазний інвертор
Спосіб регулювання швидкості	Зміна середньої напруги на якорі за допомогою ШІМ	Електронна комутація фаз та ШІМ-регулювання
Реверс	Зміна полярності напруги на якорі	Зміна послідовності комутації фаз
Динамічне гальмування	Підключення якоря до гальмівного резистора або замикання через ключі	Замикання фаз або підключення гальмівного резистора
Рекуперативне гальмування	Перехід у генераторний режим із поверненням енергії в джерело	Робота інвертора у режимі повернення енергії до джерела
Можливість універсализації	Реалізується через дві фази трифазного інвертора	Реалізується через повну трифазну схему інвертора

З таблиці видно, що режими керування та гальмування обох типів двигунів можуть бути реалізовані на основі силової електроніки. Це є

важливим аргументом на користь універсалізації лабораторного стенда, оскільки одна силова схема може забезпечувати дослідження різних типів електродвигунів і різних режимів їх роботи. Саме тому подальша розробка повинна базуватися на використанні трифазного інвертора як єдиної апаратної платформи.

1.5 Постановка задачі роботи

Проведений аналіз показує, що двигуни постійного струму та BLDC-двигуни мають різну конструкцію і різний спосіб комутації, однак можуть керуватися за допомогою силових електронних перетворювачів. Для класичного двигуна постійного струму основним перетворювачем є Н-міст, який забезпечує зміну полярності напруги, реверс і режими електричного гальмування. Для BLDC-двигуна необхідним елементом є трифазний інвертор, що виконує електронну комутацію фаз.

Основна ідея дипломного проекту полягає у використанні трифазного інвертора як універсальної силової частини. У режимі роботи з BLDC-двигуном використовуються всі три фази інвертора А, В і С. У режимі роботи з двигуном постійного струму двигун підключається до двох фаз інвертора, наприклад А і В, а третя фаза С не використовується. У такому випадку два плеча трифазного інвертора працюють як еквівалент класичного Н-моста.

Таким чином, задача дипломного проекту полягає у розробці універсальної системи керування, яка дозволяє на одній апаратній платформі досліджувати роботу двигуна постійного струму та BLDC-двигуна, а також реалізовувати режими пуску, регулювання швидкості, реверсу, електричного і рекуперативного гальмування.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати конструктивні особливості та принцип роботи двигунів постійного струму і BLDC-двигунів;
- порівняти їх основні характеристики, способи керування та режими гальмування;

- обґрунтувати можливість використання трифазного інвертора як універсальної силової частини;
- розробити структуру системи керування лабораторного стенда;
- визначити режими роботи інвертора при керуванні BLDC-двигуном і двигуном постійного струму;
- виконати розрахунок основних параметрів електропривода та силової частини;
- розглянути реалізацію рекуперативного гальмування;
- виконати дослідження режимів роботи системи керування;

Розв’язання цих завдань дозволить обґрунтувати доцільність створення лабораторного стенда з універсальною силовою частиною, яка може використовуватися для дослідження різних типів електродвигунів та режимів їх роботи. Такий підхід зменшує апаратну складність стенда, розширює його функціональні можливості та створює основу для подальшого вивчення сучасних систем керування електроприводами.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КЕРУВАННЯ DC ТА BLDC ДВИГУНАМИ

2.1 Основні рівняння електромеханічного перетворення енергії

Електромеханічне перетворення енергії є фундаментальним процесом, що лежить в основі роботи всіх електричних машин. Воно полягає у перетворенні електричної енергії, яка підводиться до обмоток машини, в механічну енергію обертання за рахунок взаємодії електричних струмів і магнітного поля. Даний процес має універсальний характер і описується єдиними фізичними законами, незалежно від типу двигуна.

Історично основи електромеханічного перетворення енергії були закладені в XIX столітті у працях М. Фарадея, який відкрив явище електромагнітної індукції, та А. Ампера, що досліджував взаємодію струмів і магнітних полів. Подальший розвиток теорії електричних машин пов'язаний із узагальненням цих явищ у вигляді рівнянь, що описують процеси перетворення енергії. У класичних підручниках і довідниках з електричних машин зазначається, що незалежно від конструкції машини, електромеханічне перетворення описується однаковими базовими співвідношеннями.

Для електропривода, що базується на двигунах постійного струму або BLDC-двигунах, математичний опис зручно подавати через систему взаємопов'язаних рівнянь, які відображають електричні, магнітні та механічні процеси.

Основним електричним рівнянням є рівняння рівноваги напруг у колі обмотки:

$$U = E + I \cdot R \quad (2.1)$$

Це рівняння показує, що напруга джерела витрачається на створення протидіючої електрорушійної сили та на падіння напруги на активному опорі обмотки. Таким чином, струм у двигуні визначається різницею між прикладеною напругою та ЕРС.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Протидіюча електрорушійна сила виникає внаслідок обертання провідників у магнітному полі і визначається співвідношенням:

$$E = k_e \quad (2.2)$$

де k_e є конструктивним коефіцієнтом, що залежить від параметрів машини, а ω — кутова швидкість обертання. З цього співвідношення видно, що зі збільшенням швидкості зростає ЕРС, яка протидіє струму і обмежує його значення. Це є важливою властивістю електропривода, що забезпечує саморегулювання.

Електромагнітний момент двигуна визначається залежністю:

$$M = k_t \cdot I \quad (2.3)$$

Механічні процеси в електроприводі описуються рівнянням руху:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - M_H \quad (2.4)$$

де J — момент інерції, M_H — момент навантаження. Це рівняння показує, що різниця між електромагнітним моментом і моментом навантаження визначає прискорення ротора.

Важливою характеристикою електропривода є потужність. Електрична потужність, що підводиться до двигуна, визначається:

$$P_{\text{ел}} = U \cdot I \quad (2.5)$$

Різниця між цими величинами визначає втрати енергії, які включають втрати в обмотках, магнітні втрати та механічні втрати.

З урахуванням наведених рівнянь можна простежити причинно-наслідковий зв'язок у роботі електропривода: $U \rightarrow I \rightarrow M \rightarrow \omega \rightarrow E$

Напруга визначає струм, струм визначає момент, момент визначає швидкість, а швидкість формує протидіючу ЕРС, яка, у свою чергу, впливає на струм. Такий взаємозв'язок лежить в основі роботи систем керування електроприводом.

У класичних джерелах підкреслюється, що незалежно від типу електричної машини, саме ці рівняння є базовими для побудови математичних моделей і систем керування. Відмінності між двигунами постійного струму та

BLDC-двигунами проявляються не в самих рівняннях, а у способі формування струмів і напруг, що реалізується за допомогою відповідних силових перетворювачів.

Таким чином, наведені співвідношення формують теоретичну основу для подальшого розгляду способів керування електродвигунами, а також для аналізу роботи силових перетворювачів, що використовуються в універсальних системах електропривода.

Для теми даної роботи особливо важливо, що наведені рівняння однаково використовуються як для аналізу класичного двигуна постійного струму, так і для BLDC-двигуна. У першому випадку комутація струму здійснюється механічно за допомогою щітково-колекторного вузла, а у другому — електронно за допомогою трифазного інвертора. Проте з позиції електромеханічного перетворення енергії обидва типи двигунів мають спільну основу: струм створює момент, швидкість формує протидіючу ЕРС, а взаємодія цих величин визначає режим роботи електропривода.

Саме тому подальший розгляд систем керування доцільно будувати не окремо для кожного двигуна, а через спільну силову та математичну основу. Такий підхід дозволяє перейти від загальних рівнянь електромеханічного перетворення до практичної реалізації універсальної системи керування, у якій трифазний інвертор використовується як єдина апаратна платформа для DC та BLDC-двигунів.

2.2 ШІМ-регулювання двигуна постійного струму

Широтно-імпульсне регулювання є одним із найбільш поширених способів керування двигунами постійного струму в сучасних електроприводах. Його застосування дозволяє змінювати середнє значення напруги, що подається на якір двигуна, без використання громіздких і малоефективних реостатних схем. Завдяки цьому ШІМ-регулювання забезпечує плавну зміну швидкості, високий ККД та можливість реалізації цифрового керування.

					КРБ. АТЕІРС.141.641-03.3.3	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Принцип ШІМ полягає в тому, що напруга джерела живлення подається на двигун не безперервно, а у вигляді послідовності імпульсів. При цьому амплітуда імпульсів залишається сталою, а змінюється їх тривалість. Чим довше силовий ключ перебуває у відкритому стані протягом одного періоду, тим більше середнє значення напруги отримує двигун.

Основним параметром ШІМ є коефіцієнт заповнення імпульсів:

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.6)$$

де D — коефіцієнт заповнення; t_{on} — час увімкненого стану ключа; T — період ШІМ-сигналу.

Середнє значення напруги на двигуні визначається:

$$U_{сер} = D \cdot U_{dc} \quad (2.7)$$

де $U_{сер}$ — середнє значення напруги на двигуні; U_{dc} — напруга джерела постійного струму.

Отже, при збільшенні коефіцієнта заповнення зростає середня напруга на якорі, а разом з нею збільшується швидкість обертання двигуна. При зменшенні коефіцієнта заповнення середня напруга зменшується, і швидкість двигуна знижується.

Принцип широтно-імпульсного регулювання двигуна постійного струму базується на періодичному вмиканні та вимиканні напруги живлення з високою частотою. При цьому середнє значення напруги, що подається на двигун, визначається співвідношенням тривалості увімкненого та вимкненого станів сигналу. Для наочного пояснення цього процесу на рисунку 2.1 наведено структурну схему ШІМ-регулювання та часові діаграми сигналів при різних значеннях коефіцієнта заповнення.



Рис. 2.1 Принцип ШІМ-регулювання напруги двигуна постійного струму

Як видно з рисунка 2.1, при малому коефіцієнті заповнення двигун отримує низьке середнє значення напруги, що відповідає малим обертам. При збільшенні коефіцієнта заповнення зростає середня напруга, і відповідно підвищується швидкість обертання двигуна. Завдяки індуктивності обмотки та механічній інерції ротора імпульсний характер напруги згладжується, і двигун працює так, ніби до нього прикладена постійна напруга, рівна середньому значенню ШІМ-сигналу. Це забезпечує ефективне та плавне регулювання швидкості без значних енергетичних втрат.

Особливістю двигуна постійного струму є наявність індуктивності обмотки якоря та механічної інерції ротора. Завдяки цьому двигун не реагує на кожен окремий імпульс напруги миттєво. Струм у якорному колі змінюється згладжено, а механічна швидкість змінюється ще повільніше. У результаті двигун працює так, ніби до нього прикладена постійна напруга, що дорівнює середньому значенню ШІМ-сигналу.

Для керування напрямом обертання двигуна постійного струму ШІМ-регулювання найчастіше реалізується у складі Н-моста. Н-міст складається з чотирьох силових ключів, які дозволяють змінювати полярність напруги на двигуні. При відкриванні однієї діагональної пари ключів двигун обертається в одному напрямку, а при відкриванні іншої пари — у протилежному.

У системі з Н-мостом ШІМ може подаватися на один або декілька силових ключів. Це дає змогу не тільки регулювати швидкість, а й реалізовувати реверс, електричне гальмування та обмеження струму. Саме тому Н-міст є типовою силовою схемою для керування колекторними двигунами постійного струму.

У контексті даної роботи важливо, що Н-міст може бути отриманий не тільки як окрема силова схема, але й як частина трифазного інвертора. Якщо двигун постійного струму підключити до двох фаз трифазного інвертора, наприклад А та В, то два плеча інвертора утворюють еквівалентний Н-міст. Третя фаза С у такому режимі не використовується. Це є однією з основних передумов універсалізації системи керування.

Для узагальнення основних режимів ШІМ-регулювання двигуна постійного струму наведено таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні режими ШІМ-регулювання двигуна постійного струму

Режим роботи	Стан силової схеми	Результат для двигуна
Малий коефіцієнт заповнення	Ключ відкритий короткий час протягом періоду	Низька середня напруга, мала швидкість
Середній коефіцієнт заповнення	Час відкритого і закритого стану приблизно співмірний	Середня швидкість обертання
Великий коефіцієнт заповнення	Ключ відкритий більшу частину періоду	Висока середня напруга, велика швидкість
Ревверс	Змінюється активна діагональ Н-моста	Зміна напрямку обертання
Електричне гальмування	Ключі формують режим замикання або повернення енергії	Зменшення швидкості двигуна
Обмеження струму	Зменшується коефіцієнт заповнення при перевищенні струму	Захист двигуна і силових ключів

Як видно з таблиці 2.1, зміна коефіцієнта заповнення ШІМ-сигналу є основним способом впливу на середню напругу двигуна, а через неї — на швидкість та струм. При цьому Н-міст забезпечує не тільки регулювання швидкості, але й зміну напрямку обертання та реалізацію гальмівних режимів. Важливим параметром ШІМ-регулювання є частота перемикання. Якщо частота занадто мала, у струмі двигуна виникають значні пульсації, що може призводити до нерівномірності моменту, вібрацій та шуму. Якщо частота занадто велика, зростають втрати на перемикання силових ключів. Тому частоту ШІМ вибирають як компроміс між якістю регулювання та енергетичними втратами у силовій частині.

Таким чином, ШІМ-регулювання є ефективним методом керування двигуном постійного струму, оскільки дозволяє плавно змінювати середню напругу на якорі, регулювати швидкість, обмежувати струм і реалізовувати гальмівні режими. Для даної роботи особливо важливо, що принцип ШІМ може бути використаний у двох фазах трифазного інвертора, які в режимі керування двигуном постійного струму виконують функцію Н-моста.

2.3 Електронної комутації BLDC-двигуна

У BLDC-двигунах (Brushless Direct Current Motor) механічна комутація, притаманна класичним двигунам постійного струму, замінена електронною. Це означає, що процес перемикання струмів у фазах обмотки статора здійснюється за допомогою силових електронних ключів, які керуються відповідно до положення ротора. Такий підхід дозволяє усунути щітково-колекторний вузол, підвищити надійність двигуна та розширити можливості керування.

Принцип електронної комутації базується на створенні обертового магнітного поля в статорі. У кожний момент часу система керування підключає певні обмотки статора до джерела живлення таким чином, щоб магнітне поле статора було зсунуте відносно магнітного поля ротора. У

результаті цього виникає електромагнітний момент, який змушує ротор рухатися у напрямку поля.

Електронна комутація реалізується за допомогою трифазного інвертора, який складається з трьох напівмостів. Кожен напівміст відповідає за одну фазу статора. Керуючи станом силових ключів, інвертор формує необхідні комбінації напруг на фазах А, В та С.

У типовому режимі електронної комутації використовується так званий шестиступеневий алгоритм. У цьому режимі за один електричний оберт ротора відбувається шість перемикачів. У кожний момент часу активними є дві фази, одна з яких підключена до позитивної шини живлення, а інша — до негативної. Третя фаза залишається відключеною або використовується для вимірювання сигналу протидіючої ЕРС.

Комутація фаз відбувається відповідно до положення ротора. Це положення може визначатися двома основними способами:

- за допомогою датчиків Холла, які встановлюються у статорі та формують дискретні сигнали про положення ротора;
- бездатчиковим методом, при якому положення ротора визначається за формою та моментом переходу через нуль протидіючої ЕРС у відключеній фазі.

Застосування датчиків Холла спрощує реалізацію системи керування та забезпечує надійний запуск двигуна з нульової швидкості. Бездатчикові методи дозволяють зменшити кількість елементів системи, але потребують більш складних алгоритмів обробки сигналів.

Важливою особливістю електронної комутації є її дискретний характер. На відміну від синусоїдального живлення, шестиступенева комутація створює ступінчасту зміну магнітного поля. Це призводить до появи пульсацій моменту, які можуть впливати на плавність обертання. Для зменшення цих ефектів у сучасних системах застосовується широтно-імпульсна модуляція, яка дозволяє згладжувати струми у фазах.

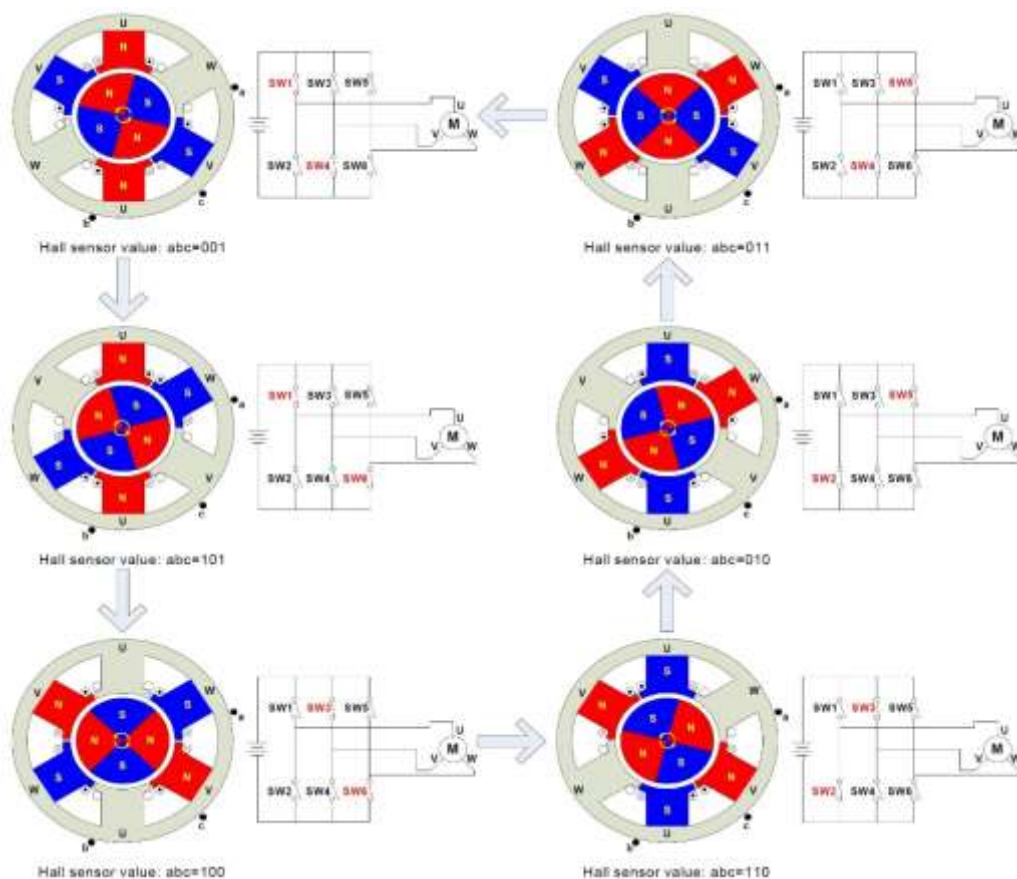


Рис. 2.2 – Принцип електронної комутації BLDC-двигуна

Як видно з рисунка, у кожному інтервалі часу активні дві фази, які формують напрям магнітного поля, а третя фаза залишається вільною. Перемикання фаз здійснюється у визначеній послідовності, що забезпечує безперервне обертання ротора. Для узагальнення процесу комутації наведено таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Послідовність електронної комутації фаз BLDC-двигуна

Крок	Активні фази	Напрямок струму	Стан третьої фази
1	A – B	$A \rightarrow B$	Відключена
2	A – C	$A \rightarrow C$	Відключена
3	B – C	$B \rightarrow C$	Відключена
4	B – A	$B \rightarrow A$	Відключена
5	C – A	$C \rightarrow A$	Відключена
6	C – B	$C \rightarrow B$	Відключена

З таблиці видно, що перемикання фаз відбувається циклічно, забезпечуючи безперервне обертання ротора. Напрямок обертання змінюється шляхом зміни порядку комутації фаз.

У практичних системах електронна комутація тісно пов'язана з алгоритмами керування. Зокрема, використовується поєднання комутації з ШІМ-регулюванням, що дозволяє одночасно керувати як напрямком обертання, так і величиною струму. Це дає змогу реалізовувати різні режими роботи, включаючи пуск, регулювання швидкості, гальмування та рекуперацію.

Важливо підкреслити, що електронна комутація є ключовою ланкою між електричною машиною та силовим перетворювачем. Саме вона визначає, як формується струм у фазах і як реалізується електромагнітний момент. У цьому контексті BLDC-двигун не може працювати без інвертора, що принципово відрізняє його від класичного двигуна постійного струму.

У межах даної роботи особливе значення має те, що трифазний інвертор, який використовується для електронної комутації BLDC-двигуна, може бути частково використаний для керування двигуном постійного струму. Якщо задіяти лише два плеча інвертора, вони утворюють еквівалент H-моста. Це означає, що один і той самий силовий перетворювач може забезпечувати керування різними типами двигунів.

Таким чином, електронна комутація є не тільки принципом роботи BLDC-двигуна, але й ключовим елементом побудови універсальних систем керування електроприводами. Вона забезпечує гнучкість керування, можливість реалізації складних алгоритмів та інтеграцію різних режимів роботи в єдиній апаратній структурі.

2.4 Трифазний інвертор як силовий перетворювач електропривода

Трифазний інвертор є ключовим елементом сучасних систем електропривода, оскільки саме він забезпечує формування напруги та струму

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

необхідної форми для живлення електродвигуна. У контексті електропривода під цим поняттям розуміється сукупність технічних засобів, що забезпечують керований рух робочого механізму за рахунок електродвигуна. Таким чином, інвертор виступає проміжною ланкою між джерелом електричної енергії та електродвигуном, визначаючи режим його роботи.

Інвертор як силовий перетворювач призначений для перетворення постійної напруги джерела живлення у змінну напругу з регульованими параметрами. У системах електропривода це означає можливість формування напруги необхідної амплітуди, частоти та форми, що безпосередньо впливає на швидкість, момент і енергетичні характеристики електродвигуна.

У класичних електроприводах двигун постійного струму міг підключатися безпосередньо до джерела живлення, а керування здійснювалося шляхом зміни напруги або введення додаткових елементів у коло. Проте сучасні системи керування передбачають використання силових електронних перетворювачів, які дозволяють значно підвищити ефективність, точність та гнучкість керування. У цьому контексті інвертор є універсальним засобом формування електричних параметрів, необхідних для роботи електродвигуна.

Конструктивно трифазний інвертор складається з трьох напівмостів, кожен з яких містить два силові ключі — верхній та нижній. Як силові ключі використовуються напівпровідникові прилади (MOSFET або IGBT), що працюють у ключовому режимі. Кожна пара ключів формує одну фазу, а керування ними здійснюється таким чином, щоб забезпечити формування необхідних напруг на виході та уникнути короткого замикання джерела живлення.

Вихідна напруга інвертора формується шляхом швидкого перемикавання силових ключів відповідно до заданого алгоритму керування. Найчастіше для цього використовується широтно-імпульсна модуляція, яка дозволяє змінювати середнє значення напруги та струму у фазах двигуна. Таким чином,

інвертор забезпечує не тільки живлення двигуна, але й виконує функцію регулятора його параметрів.

У трифазному інверторі формуються фазні напруги U_a, U_b, U_c на обмотки двигуна подаються лінійні напруги, що визначаються як різниця між фазними. Саме ці напруги створюють електромагнітне поле у статорі електродвигуна, яке визначає його роботу.

У системах електропривода BLDC-двигунів трифазний інвертор виконує функцію електронного комутатора. Він забезпечує послідовне перемикання фаз відповідно до положення ротора, що дозволяє створювати обертове магнітне поле. У цьому випадку інвертор є невід'ємною частиною системи керування і без нього робота двигуна неможлива.

У той же час у системах керування двигунами постійного струму інвертор може використовуватися частково. Якщо двигун підключити до двох фаз інвертора, наприклад А та В, то відповідні плечі утворюють еквівалент Н-моста. Це дозволяє реалізувати керування двигуном постійного струму за допомогою тієї ж силової частини, що використовується для BLDC-двигуна. інвертор формує три незалежні канали керування фазами, що дозволяє реалізувати різні алгоритми роботи електропривода. Керуючи станом силових ключів, можна формувати різні комбінації напруг і, відповідно, впливати на режим роботи електродвигуна.

Для узагальнення ролі інвертора у системах електропривода наведено таблицю 2.3.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.3 – Функції трифазного інвертора у системах електропривода

Функція інвертора	Реалізація в електроприводі	Результат
Перетворення напруги	DC → змінна напруга	Живлення електродвигуна
Регулювання напруги	ШІМ	Зміна швидкості
Формування струмів	Комутація фаз	Створення моменту
Реверс	Зміна послідовності перемикавання	Зміна напрямку обертання
Гальмування	Керування ключами	Зменшення швидкості
Рекуперація	Зворотний потік енергії	Повернення енергії в джерело
Універсалізація	Використання 2 або 3 фаз	Керування DC та BLDC

Силовий перетворювач є невід’ємною складовою сучасного електропривода та виконує функцію узгодження параметрів електричної енергії джерела живлення з вимогами електродвигуна. У загальному випадку силовий перетворювач забезпечує зміну напруги, струму, частоти та форми електричних сигналів, що подаються на електродвигун, з метою реалізації заданих режимів його роботи.

Електропривод як технічна система включає три основні елементи: джерело живлення, силовий перетворювач та електродвигун. Якщо джерело визначає доступну енергію, а електродвигун виконує перетворення електричної енергії в механічну, то силовий перетворювач є ланкою, яка керує цим процесом. Саме він визначає, яким чином енергія буде подана на двигун і в якому режимі той буде працювати.

У класичних системах електропривода силові перетворювачі були відсутні або мали обмежені можливості. Наприклад, двигуни постійного струму могли живитися безпосередньо від джерела постійної напруги, а регулювання здійснювалося за рахунок введення додаткових опорів або зміни напруги. Такі методи характеризувалися значними втратами енергії та низькою ефективністю.

З розвитком силовій електроніки силові перетворювачі стали основою сучасних електроприводів. Вони дозволяють реалізувати ефективне регулювання параметрів двигуна за рахунок використання напівпровідникових ключів, які працюють у режимі швидкого перемикання. Це дає можливість формувати напругу та струм заданої форми без значних втрат енергії.

Основними типами силових перетворювачів, що використовуються в електроприводах, є:

- випрямлячі (перетворення змінної напруги в постійну);
- інвертори (перетворення постійної напруги в змінну);
- перетворювачі постійної напруги (DC-DC);
- частотні перетворювачі.

У системах керування двигунами постійного струму широко використовуються перетворювачі типу DC-DC або H-міст, які забезпечують регулювання напруги та зміну її полярності. У системах з BLDC-двигунами застосовуються трифазні інвертори, які формують послідовність напруг на фазах статора.

З функціональної точки зору силовий перетворювач виконує такі основні задачі:

- формування необхідного рівня напруги;
- регулювання струму в обмотках двигуна;
- забезпечення пуску та розгону двигуна;
- реалізація реверсу обертання;

- забезпечення режимів гальмування;
- реалізація рекуперативного повернення енергії.

Важливою особливістю сучасних силових перетворювачів є використання широтно-імпульсної модуляції. Завдяки цьому забезпечується висока ефективність перетворення енергії, точність регулювання та можливість реалізації складних алгоритмів керування.

У контексті даної роботи силовий перетворювач розглядається як універсальна платформа для керування різними типами електродвигунів. Зокрема, трифазний інвертор може використовуватися як для керування BLDC-двигуном, так і для керування двигуном постійного струму. У другому випадку використовується лише частина інвертора, що еквівалентна H-мосту. Таким чином, силовий перетворювач у системі електропривода виконує роль активного керуючого елемента, який визначає характер взаємодії між джерелом живлення та електродвигуном. Його застосування дозволяє підвищити ефективність роботи електропривода, розширити діапазон регулювання та реалізувати універсальні системи керування, що є ключовою ідеєю даного дипломного проекту.

Окрім значення для роботи електропривода має здатність інвертора забезпечувати не тільки передавання енергії від джерела до електродвигуна, але й керування зворотним потоком енергії. У звичайному двигунному режимі електрична енергія надходить від джерела живлення через силовий перетворювач до обмоток двигуна, де перетворюється в механічну енергію обертання. Проте під час гальмування або при дії зовнішнього механічного навантаження напрям енергетичного процесу може змінюватися.

У такому режимі електродвигун починає працювати як генератор, а механічна енергія обертання перетворюється назад в електричну. У цьому випадку інвертор уже не лише формує напругу для живлення двигуна, а й забезпечує можливість повернення енергії до джерела живлення або

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

накопичувача. Саме ця властивість силового перетворювача є основою рекуперативного гальмування.

Таким чином, трифазний інвертор у складі електропривода слід розглядати як двонапрямлений енергетичний елемент. Він забезпечує роботу електродвигуна у двигунному режимі, режимі електричного гальмування та режимі рекуперації. Це безпосередньо пов'язує розгляд трифазного інвертора з теоретичними основами рекуперативного гальмування, які розглядаються у наступному підрозділі.

2.5 Рекуперативне гальмування електродвигунів

Гальмування в електроприводі є процесом зменшення швидкості обертання електродвигуна або повної зупинки механізму. У загальному випадку гальмування може здійснюватися механічним або електричним способом. Механічне гальмування виконується за допомогою фрикційних гальмівних пристроїв, а електричне — за рахунок керування електродвигуном і силовим перетворювачем. Для сучасних систем електропривода електричне гальмування є особливо важливим, оскільки дозволяє не тільки зменшувати швидкість, але й керувати енергетичними процесами в системі.

Гальмування у електродвигуні пов'язане з тим, що електрична машина може працювати не лише в двигунному, але й у генераторному режимі. У двигунному режимі електрична енергія надходить від джерела живлення до електродвигуна і перетворюється в механічну енергію обертання. У генераторному режимі напрям перетворення змінюється: механічна енергія обертання, яка накопичена в рухомих частинах або надходить від навантаження, перетворюється в електричну енергію.

Умовно двигунний режим можна подати так:

$$P_{\text{ел}} \rightarrow P_{\text{мех}} \quad (2.7)$$

Генераторний режим має протилежний напрям енергетичного процесу:

$$P_{\text{мех}} \rightarrow P_{\text{ел}} \quad (2.8)$$

Саме генераторний режим є фізичною основою електричного гальмування. Якщо електродвигун створює момент, напрямлений проти обертання ротора, то він сповільнює рух механізму. Такий момент називають гальмівним моментом. Його дія визначається не механічним контактом, а електромагнітними процесами в машині.

Гальмування за допомогою електродвигуна має важливі переваги порівняно з механічним гальмуванням. Воно зменшує зношування механічних гальмівних елементів, дозволяє точніше керувати процесом зупинки, забезпечує плавне сповільнення та може бути інтегроване в систему автоматичного керування. У лабораторному стенді такий режим є корисним для дослідження взаємозв'язку між швидкістю, струмом, моментом і напрямом потоку енергії.

У електроприводах розрізняють кілька основних видів електричного гальмування: динамічне, гальмування противмиканням і рекуперативне гальмування. При динамічному гальмуванні електродвигун переходить у генераторний режим, але отримана електрична енергія розсіюється у гальмівному резисторі у вигляді тепла. При гальмуванні противмиканням на двигун подається напруга такої полярності або послідовності фаз, яка створює момент, протилежний напрямку обертання. Такий режим забезпечує інтенсивне гальмування, але супроводжується значними струмами та втратами.

Рекуперативне гальмування є більш енергоефективним видом електричного гальмування. Його сутність полягає в тому, що електродвигун під час гальмування працює як генератор, а вироблена електрична енергія не розсіюється у вигляді тепла, а повертається до джерела живлення або накопичувача. Тобто рекуперація означає повернення частини енергії, яка в інших режимах була б втрачена.

У найпростішому вигляді умову рекуперативного режиму можна записати так: $E > U$

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

де E — протидіюча ЕРС електродвигуна; U — напруга джерела живлення.

Якщо протидіюча ЕРС перевищує напругу джерела, струм може змінити напрям, і енергія починає передаватися від двигуна до джерела. У цьому випадку електродвигун створює гальмівний момент, а силовий перетворювач забезпечує необхідний шлях для зворотного потоку енергії.

Потік енергії при рекуперації можна подати так:

$$P_{\text{мех}} \rightarrow P_{\text{ел}} \rightarrow P_{\text{джерело}} \quad (2.9)$$

Для двигуна постійного струму рекуперативне гальмування можливе тоді, коли двигун переходить у генераторний режим, а силова схема дозволяє повернути енергію в ланку постійного струму. У системі з Н-мостом це реалізується відповідним керуванням силовими ключами. У випадку використання трифазного інвертора для двигуна постійного струму два його плеча виконують роль Н-моста, тому режим рекуперації також може бути реалізований на тій самій силовій базі.

Для BLDC-двигуна рекуперативне гальмування реалізується через трифазний інвертор. Під час гальмування ротор з постійними магнітами продовжує обертатися, у фазах статора індукується ЕРС, а система керування формує такий режим перемикання ключів, при якому енергія передається назад у ланку постійного струму.

Гальмування з рекуперацією відрізняється від звичайного електричного гальмування саме напрямом використання енергії. При динамічному гальмуванні енергія рухомих частин перетворюється в електричну, а потім розсіюється в резисторі. При рекуперативному гальмуванні ця енергія повертається до джерела або накопичувача. Тому рекуперація підвищує енергетичну ефективність електропривода і зменшує теплове навантаження на силові елементи.

Для порівняння основних способів гальмування електродвигуна доцільно навести таблицю.

Таблиця 2.4 – Порівняння способів гальмування електродвигуна

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Спосіб гальмування	Принцип дії	Використання енергії	Особливості
Механічне гальмування	Гальмівний момент створюється фрикційним пристроєм	Енергія розсіюється у вигляді тепла	Просте, але супроводжується зношуванням
Динамічне гальмування	Двигун працює як генератор, енергія подається на резистор	Енергія розсіюється у гальмівному резисторі	Надійне, але не енергоефективне
Гальмування противмиканням	Створюється момент, протилежний напрямку обертання	Енергія переважно втрачається у вигляді тепла	Швидке гальмування, але великі струми
Рекуперативне гальмування	Двигун працює як генератор, енергія повертається в джерело	Енергія частково повертається	Енергоефективне, потребує відповідного перетворювача

З таблиці видно, що рекуперативне гальмування є найбільш доцільним з точки зору енергетичної ефективності. Його реалізація потребує силового перетворювача, здатного забезпечити зворотний потік енергії. Саме тому трифазний інвертор у складі електропривода є важливим елементом не тільки для пуску та регулювання швидкості, але й для організації гальмівних режимів.

У контексті даної роботи рекуперативне гальмування розглядається як один із функціональних режимів універсальної системи керування. Використання трифазного інвертора дозволяє досліджувати цей режим як для BLDC-двигуна, так і для двигуна постійного струму. Для BLDC-двигуна застосовуються всі три фази інвертора, а для двигуна постійного струму використовуються дві фази, які утворюють еквівалент Н-моста.

Таким чином, теоретична основа рекуперативного гальмування полягає у переході електродвигуна в генераторний режим, створенні гальмівного електромагнітного моменту та організації зворотного потоку енергії через силовий перетворювач. Саме поєднання електродвигуна, інвертора та системи керування дозволяє реалізувати гальмування з поверненням енергії, що є важливою складовою сучасного енергоефективного електропривода.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК УНІВЕРСАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ DC ТА BLDC ДВИГУНІВ

3.1 Обґрунтування структури універсального лабораторного стенда

Під час розробки лабораторного стенда для дослідження електроприводів необхідно забезпечити можливість роботи з двома типами електродвигунів: двигуном постійного струму та BLDC-двигуном. Обидва типи двигунів широко застосовуються в малопотужних електроприводах, навчальних установках, робототехніці, транспортних системах та лабораторних дослідженнях.

У традиційному варіанті для кожного типу двигуна застосовується окремий силовий перетворювач. Для двигуна постійного струму використовується Н-міст, який дозволяє змінювати полярність напруги на якорі, регулювати швидкість обертання та виконувати реверс. Для BLDC-двигуна використовується трифазний інвертор, який забезпечує електронну комутацію фазних обмоток.

Такий підхід є технічно правильним, однак для навчального лабораторного стенда він не є достатньо раціональним. Використання двох окремих перетворювачів збільшує кількість силових ключів, драйверів, датчиків струму, датчиків напруги, елементів захисту та керуючих каналів. Також зростає складність стенда, його вартість, габарити та кількість з'єднань на передній панелі.

Тому в роботі прийнято універсальну структуру лабораторного стенда, у якій одна силова частина використовується для керування двома типами електродвигунів. Основою такої структури є трифазний мостовий інвертор із загальною DC-шиною живлення.

У режимі роботи з BLDC-двигуном використовуються всі три фази інвертора: А, В і С. У цьому випадку інвертор працює як стандартний трифазний комутатор, що формує послідовність живлення фаз BLDC-двигуна.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Керування виконується за допомогою широтно-імпульсної модуляції та електронної комутації фаз.

У режимі роботи з двигуном постійного струму використовуються тільки дві фази інвертора, наприклад А і В. Якір двигуна підключається між цими фазами, а третя фаза С не використовується. У такому режимі дві гілки трифазного інвертора працюють як Н-міст. Це дозволяє регулювати середню напругу на якорі, змінювати напрям струму та реалізовувати реверс двигуна. До складу стенда входять: джерело постійної напруги, DC-шина, трифазний інвертор, система керування, драйвери силових ключів, двигун постійного струму, BLDC-двигун, датчики струму і напруги, датчик швидкості, блок захисту та вузол рекуперації енергії.

Окремою особливістю стенда є можливість дослідження рекуперативного гальмування. Під час гальмування двигун переходить у генераторний режим, а частина механічної енергії повертається до DC-шини. У лабораторному стенді ця енергія може спрямовуватися до акумулятора або буферного накопичувача.

Таким чином, обрана структура дозволяє реалізувати на одному стенді два режими роботи: керування двигуном постійного струму та керування BLDC-двигуном. Це зменшує кількість обладнання, спрощує конструкцію стенда та дозволяє студентам порівнювати роботу двох типів електроприводів на одній силовій платформі.

Структура лабораторного стенда повинна забезпечувати підключення та дослідження двох типів електродвигунів: двигуна постійного струму та BLDC-двигуна. Для цього до складу стенда вводиться одна універсальна силова частина, яка працює у двох режимах залежно від типу підключеного двигуна.

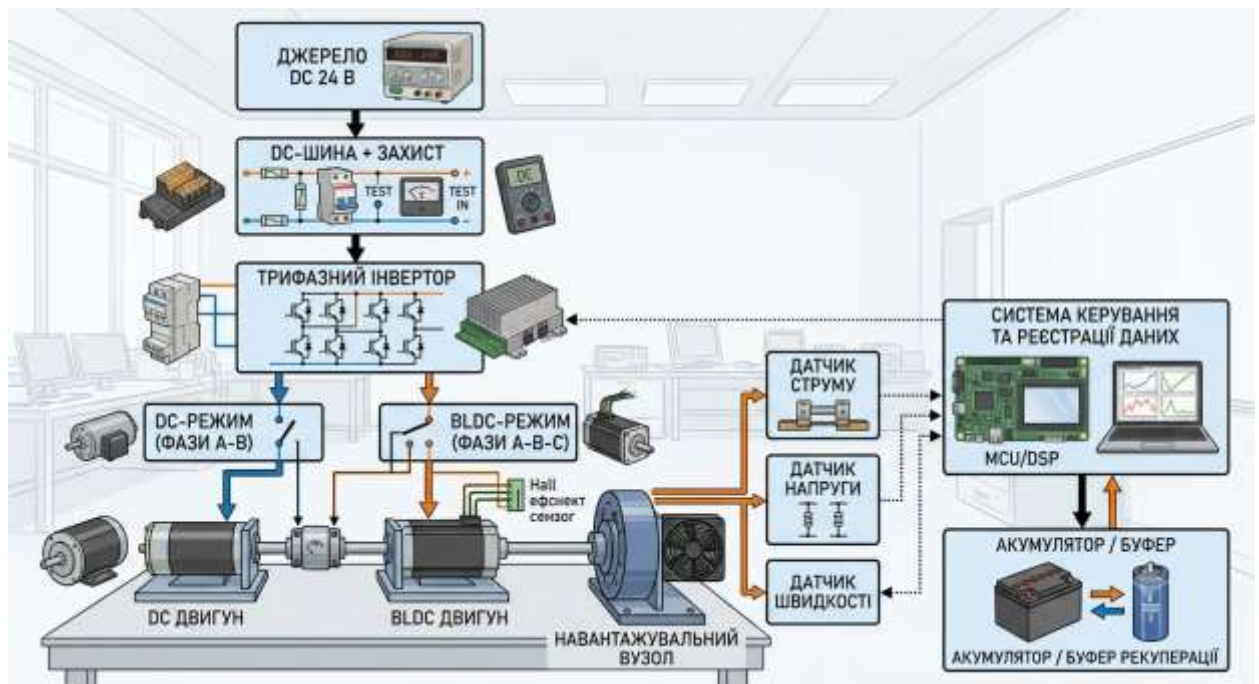


Рис. 3.1 Сутність універсального лабораторного стенда для дослідження dc та BLDC двигунів

Основними елементами стенда є:

- джерело живлення постійного струму;
- DC-шина живлення;
- трифазний мостовий інвертор;
- мікроконтролерна система керування;
- драйвери силових ключів;
- двигун постійного струму;
- BLDC-двигун;
- блок перемикання режиму роботи стенда;
- датчики струму;
- датчики напруги;
- датчик швидкості обертання;

- навантажувальний вузол;
- акумулятор або буферний накопичувач для рекуперації;
- блок захисту;
- система відображення та реєстрації результатів.

Живлення стенда здійснюється від джерела постійної напруги. Напруга подається на DC-шину, від якої живиться трифазний мостовий інвертор. Інвертор є основним елементом універсалізації, оскільки саме він використовується і для керування BLDC-двигуном, і для керування двигуном постійного струму.

У режимі BLDC-двигуна використовуються всі три фази інвертора: А, В і С. У цьому випадку інвертор працює як трифазний електронний комутатор. Система керування формує сигнали перемикання силових ключів, завдяки чому струм послідовно подається до фазних обмоток BLDC-двигуна.

У режимі двигуна постійного струму використовуються тільки дві фази інвертора, наприклад А та В. Якір двигуна підключається між цими фазами, а третя фаза С не використовується. У такому режимі дві гілки трифазного інвертора виконують функцію Н-моста. Це дозволяє змінювати полярність напруги на якорі, регулювати швидкість двигуна та виконувати реверс.

Блок перемикання режиму роботи стенда забезпечує вибір типу двигуна, який досліджується. Перехід між режимами не потребує заміни силового перетворювача, а виконується шляхом зміни підключення двигуна та алгоритму керування інвертором.

Для контролю роботи стенда використовуються датчики струму, напруги та швидкості обертання. Вони дозволяють реєструвати основні параметри електропривода під час пуску, усталеного режиму, зміни навантаження та гальмування. Навантажувальний вузол призначений для створення механічного навантаження на валу двигуна.

					КРБ. АТЕІРС.141.641-03.3.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Окремо у структурі стенда передбачено вузол рекуперації. Під час гальмування двигун переходить у генераторний режим, а енергія обертових частин повертається до DC-шини. Ця енергія може накопичуватися в акумуляторі або буферному накопичувачі та використовуватися для живлення малопотужної частини стенда.

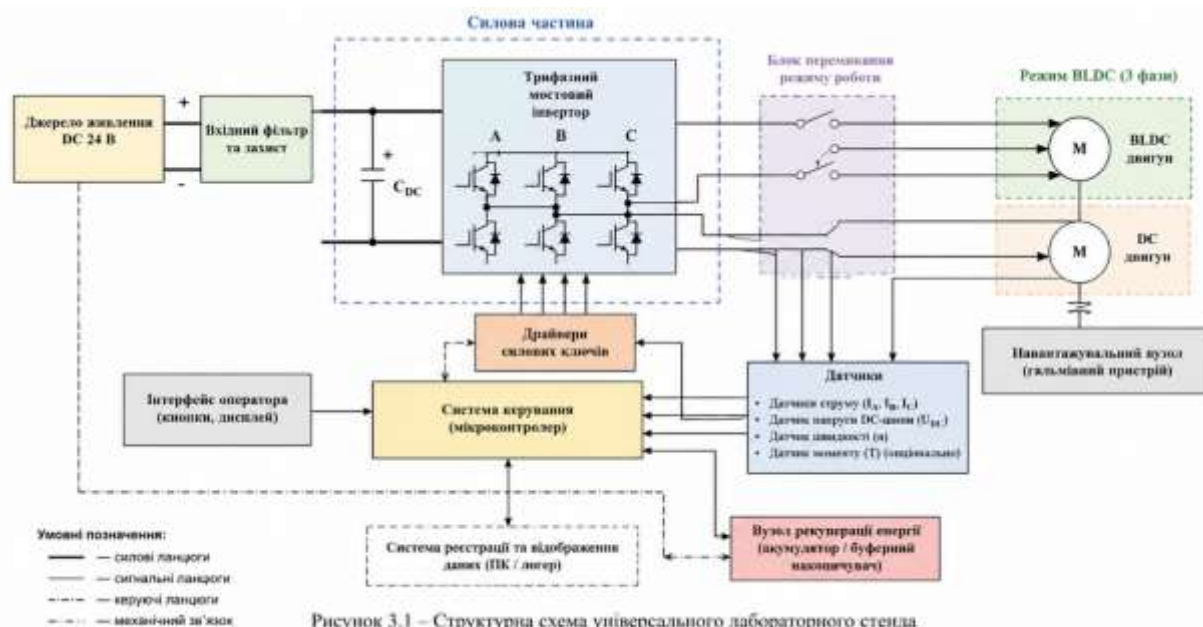


Рисунок 3.1 – Структурна схема універсального лабораторного стенда для дослідження DC та BLDC двигунів

Рис. 3.2 Схема лабораторного стенда

Таким чином, структура стенда побудована за принципом універсальної силової платформи. Один трифазний інвертор використовується для двох типів електродвигунів, що зменшує кількість силових елементів, спрощує конструкцію стенда та робить його зручним для використання у навчальній лабораторії.

3.2 Вибір вихідних даних для розрахунку стенда

Для подальшого розрахунку універсального лабораторного стенда необхідно прийняти вихідні дані, які визначають параметри джерела живлення, силового інвертора, двигуна постійного струму, BLDC-двигуна та вузла рекуперації. Оскільки стенд призначений для навчальної лабораторії,

його потужність приймається невеликою, а напруга живлення — низьковольтною.

У якості основного джерела живлення приймається джерело постійної напруги з напругою DC-шини 24 В. Таке значення є доцільним для лабораторного стенда, оскільки забезпечує достатню потужність для дослідження малопотужних електроприводів і одночасно зменшує небезпеку ураження електричним струмом під час виконання лабораторних робіт.

Для розрахунку приймається двигун постійного струму з номінальною напругою 24 В та потужністю 100 Вт. Такий двигун дозволяє досліджувати режими пуску, регулювання швидкості, реверсу та електричного гальмування при підключенні до двох фаз універсального інвертора.

Для дослідження BLDC-двигуна приймається безщітковий двигун постійного струму з номінальною напругою 24 В та потужністю 120 Вт. Його підключення виконується до трьох фаз інвертора, що дозволяє досліджувати електронну комутацію, зміну швидкості та режим рекуперативного гальмування.

Таблиця 3.1. Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення
Напруга DC-шини	U _{dc}	24 В
Номінальна потужність двигуна постійного струму	P _{DC}	100 Вт
Номінальна напруга двигуна постійного струму	U _{DC}	24 В
Номінальна частота обертання двигуна постійного струму	n _{DC}	3000 об/хв
ККД двигуна постійного струму	η _{DC}	0,78
Опір якорного кола двигуна постійного струму	R _a	1,2 Ом

Номінальна потужність BLDC-двигуна	PBLDC	120 Вт
Номінальна напруга BLDC-двигуна	UBLDC	24 В
Номінальна частота обертання BLDC-двигуна	nBLDC	3000 об/хв
ККД BLDC-двигуна	η_{BLDC}	0,85
Кількість фаз BLDC-двигуна	m	3
Коефіцієнт запасу за струмом	kI	1,5
Коефіцієнт запасу за напругою	kU	2
Частота ШІМ	fPWM	20 кГц
Момент інерції ротора та навантаження	J	0,0008 кг·м ²
ККД рекуперації	η_{rec}	0,6
Час гальмування	t _г	3 с

Прийняті параметри відповідають малопотужному навчальному стенду. Вони дозволяють виконати розрахунок силової частини універсального інвертора, режимів роботи двигуна постійного струму та BLDC-двигуна, а також оцінити параметри рекуперативного гальмування.

3.3 Розрахунок параметрів силової частини трифазного інвертора

Силова частина лабораторного стенда будується на основі трифазного мостового інвертора. Такий інвертор містить шість силових ключів, які утворюють три півмости: фази А, В та С. У режимі роботи з BLDC-двигуном використовуються всі три фази інвертора, а в режимі роботи з двигуном постійного струму — тільки дві фази, які працюють як Н-міст.

Основними параметрами для вибору інвертора є напруга DC-шини, максимальний струм навантаження, допустима напруга силових ключів та розрахункова потужність перетворювача.

Номінальний струм двигуна постійного струму визначається за формулою:

$$I_{DC} = \frac{P_{DC}}{U_{DC} \cdot \eta_{DC}} \quad (3.1)$$

Підставимо числові значення:

$$I_{DC} = \frac{100}{24 \cdot 0,78} = 5,34 \text{ A}$$

Номінальний струм BLDC-двигуна визначається аналогічно:

$$I_{BLDC} = \frac{P_{BLDC}}{U_{BLDC} \cdot \eta_{BLDC}} \quad (3.2)$$

$$I_{BLDC} = \frac{120}{24 \cdot 0,85} = 5,88 \text{ A}$$

Для вибору інвертора приймається більший із розрахованих струмів:

$$I_{\max} = \max(I_{DC}; I_{BLDC}) \quad (3.3)$$

Підставимо числові значення:

$$I_{\max} = \max(5,34; 5,88) = 5,88 \text{ A}$$

З урахуванням коефіцієнта запасу за струмом розрахунковий струм інвертора становить:

$$I_{inv} = k_I \cdot I_{\max} \quad (3.4)$$

$$I_{inv} = 1,5 \cdot 5,88 = 8,82 \text{ A}$$

Отже, для лабораторного стенда необхідно прийняти трифазний інвертор з допустимим струмом не менше 8,82 А. З урахуванням стандартного ряду елементів приймаємо інвертор на струм не менше 10 А.

Допустима напруга силових ключів визначається з урахуванням запасу за напругою:

$$U_{\text{key}} = k_U \cdot U_{\text{dc}} \quad (3.5)$$

Підставимо числові значення:

$$U_{\text{key}} = 2 \cdot 24 = 48 \text{ В}$$

Отже, силові ключі повинні мати допустиму напругу не менше 48 В. Для практичної реалізації доцільно обрати MOSFET-транзистори з допустимою напругою 60 В або більше.

Розрахункова потужність силового інвертора визначається за формулою:

$$P_{\text{inv}} = U_{\text{dc}} \cdot I_{\text{inv}} \quad (3.6)$$

Підставимо числові значення:

$$P_{\text{inv}} = 24 \cdot 8,82 = 211,68 \text{ Вт}$$

Таким чином, потужність трифазного інвертора повинна бути не менше 211,68 Вт. Для лабораторного стенда приймаємо інвертор потужністю 200–250 Вт.

Частота широтно-імпульсної модуляції приймається:

$$f_{\text{PWM}} = 20 \text{ кГц}$$

Таке значення є типовим для малопотужних електроприводів, оскільки воно дозволяє зменшити пульсації струму та вивести основну частину комутаційного шуму за межі добре чутого діапазону.

У результаті розрахунку для силової частини лабораторного стенда приймаємо такі параметри:

- напруга DC-шини — 24 В;
- кількість фаз інвертора — 3;
- кількість силових ключів — 6;
- допустимий струм інвертора — не менше 10 А;
- допустима напруга силових ключів — не менше 60 В;

- розрахункова потужність інвертора — близько 212 Вт;
- рекомендована потужність інвертора — 200–250 Вт;
- частота ШІМ — 20 кГц.

Отримані параметри забезпечують можливість роботи інвертора у двох режимах: як трифазного перетворювача для BLDC-двигуна та як Н-моста для двигуна постійного струму.

3.4 Розрахунок режиму роботи двигуна постійного струму при підключенні до двох фаз інвертора

У режимі роботи з двигуном постійного струму використовується не весь трифазний інвертор, а тільки дві його фази, наприклад А та В. Якір двигуна підключається між цими фазами. Третя фаза С у цьому режимі не використовується. Таким чином, дві гілки трифазного інвертора працюють як Н-міст.

Для розрахунку приймаємо такі вихідні дані:

$$U_{DC} = 24 \text{ В}$$

$$P_{DC} = 100 \text{ Вт}$$

$$\eta_{DC} = 0,78$$

$$n_{DC} = 3000 \text{ об/хв}$$

$$R_a = 1,2 \text{ Ом}$$

Номінальний струм якоря двигуна постійного струму:

$$I_a = \frac{P_{DC}}{U_{DC} \cdot \eta_{DC}} \quad (3.7)$$

$$I_a = \frac{100}{24 \cdot 0,78} = 5,34 \text{ А}$$

Кутова швидкість двигуна:

					КРБ. АТЕІРС.141.641-03.3.3	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\omega_{DC} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{DC}}{60} \quad (3.8)$$

$$\omega_{DC} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314 \text{ рад}$$

Момент на валу двигуна:

$$M_{DC} = \frac{P_{DC}}{\omega_{DC}} \quad (3.9)$$

$$M_{DC} = \frac{100}{314} = 0,32 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Проти-ЕРС двигуна визначається з рівняння якірного кола:

$$E = U_{DC} - I_a \cdot R_a \quad (3.10)$$

$$E = 24 - 5,34 \cdot 1,2 = 17,59 \text{ В}$$

Втрати потужності в якірному колі:

$$P_{loss} = I_a^2 \cdot R_a \quad (3.11)$$

$$P_{loss} = 5,34^2 \cdot 1,2 = 34,22 \text{ Вт}$$

Електрична потужність, що споживається двигуном:

$$P_{el} = U_{DC} \cdot I_a \quad (3.12)$$

$$P_{el} = 24 \cdot 5,34 = 128,16 \text{ Вт}$$

Механічна потужність з урахуванням втрат у якірному колі:

$$P_m = P_{el} - P_{loss} \quad (3.13)$$

$$P_m = 128,16 - 34,22 = 93,94 \text{ Вт}$$

Отримане значення близьке до прийнятої номінальної потужності 100 Вт. Це підтверджує придатність вибраних параметрів для лабораторного стенда.

У режимі ШІМ-регулювання середня напруга на якорі двигуна визначається як:

					КРБ. АТЕІРС.141.641-03.3.3	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U_{a. avg} = D \cdot U_{DC} \quad (3.14)$$

$$U_{a. avg} = 0,6 \cdot 24 = 14,4 \text{ В}$$

Отже, зміною коефіцієнта заповнення ШІМ-сигналу можна регулювати середню напругу на якорі двигуна, а відповідно і швидкість його обертання. Для реверсу двигуна система керування змінює напрям струму через якір шляхом перемикання силових ключів двох фаз інвертора.

3.5 Розрахунок режиму роботи BLDC-двигуна при підключенні до трьох фаз інвертора

У режимі роботи з BLDC-двигуном використовуються всі три фази універсального інвертора: А, В та С. Інвертор виконує функцію електронного комутатора, який послідовно підключає обмотки двигуна до DC-шини. На відміну від двигуна постійного струму, комутація струму в BLDC-двигуні виконується не механічним колектором, а силовими ключами інвертора.

Для розрахунку приймаємо такі вихідні дані:

$$U_{BLDC} = 24 \text{ В}$$

$$P_{BLDC} = 120 \text{ Вт}$$

$$\eta_{BLDC} = 0,85$$

$$n_{BLDC} = 3000 \text{ об/хв}$$

$$m = 3$$

Номінальний струм BLDC-двигуна:

$$I_{BLDC} = \frac{P_{BLDC}}{U_{BLDC} \cdot \eta_{BLDC}} \quad (3.15)$$

$$I_{BLDC} = \frac{120}{24 \cdot 0,85} = 5,88 \text{ А}$$

Кутова швидкість BLDC-двигуна:

$$\omega_{BLDC} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{BLDC}}{60} \quad (3.16)$$

$$\omega_{BLDC} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Номинальний момент BLDC-двигуна:

$$M_{BLDC} = \frac{P_{BLDC}}{\omega_{BLDC}} \quad (3.17)$$

$$M_{BLDC} = 120/314 = 0,38 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Електрична потужність, що споживається BLDC-двигуном:

$$P_{el. BLDC} = \frac{P_{BLDC}}{\eta_{BLDC}} \quad (3.18)$$

$$P_{el. BLDC} = \frac{120}{0,85} = 141,18 \text{ Вт}$$

Втрати потужності у двигуні:

$$P_{loss. BLDC} = P_{el. BLDC} - P_{BLDC} \quad (3.19)$$

$$P_{loss. BLDC} = 141,18 - 120 = 21,18 \text{ Вт}$$

У режимі ШІМ-регулювання середня напруга, що формується інвертором для живлення BLDC-двигуна, залежить від коефіцієнта заповнення ШІМ:

$$U_{avg} = D \cdot U_{dc} = 0,7 \cdot 24 = 16,8 \text{ В}$$

Отже, при збільшенні коефіцієнта заповнення ШІМ збільшується середня напруга на обмотках двигуна, що приводить до збільшення швидкості обертання. При зменшенні коефіцієнта заповнення середня напруга зменшується, і швидкість двигуна знижується.

Для роботи BLDC-двигуна інвертор повинен забезпечувати послідовну комутацію фаз. У кожний момент часу дві фази двигуна підключаються до DC-шини, а третя фаза може бути відключена або використовуватись для контролю проти-ЕРС. Такий принцип відповідає типовому шестикроковому керуванню BLDC-двигуном.

Таким чином, розрахований режим роботи BLDC-двигуна показує, що при напрузі живлення 24 В двигун потужністю 120 Вт споживає струм близько 5,88 А та розвиває момент приблизно 0,38 Н·м. Отримані параметри

відповідають можливостям обраного трифазного інвертора з допустимим струмом не менше 10 А.

3.6 Розрахунок параметрів рекуперативного гальмування

Одним із режимів роботи універсального лабораторного стенда є рекуперативне гальмування. У цьому режимі електродвигун переходить у генераторний режим, а частина механічної енергії обертових мас перетворюється в електричну енергію та повертається до DC-шини.

У лабораторному стенді ця енергія може бути використана для заряджання акумулятора або живлення малопотужної логічної частини системи керування.

Для розрахунку приймаємо:

$$J = 0,0008 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$n = 3000 \text{ об/хв}$$

$$\eta_{\text{rec}} = 0,6$$

$$t_{\text{r}} = 3 \text{ с}$$

Кутова швидкість двигуна:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Кінетична енергія обертових частин:

$$W_k = \frac{J \cdot \omega^2}{2} = \frac{0,0008 \cdot 314^2}{2} = 39,44 \text{ Дж}$$

Енергія, яка може бути повернена до DC-шини:

$$W_{\text{rec}} = \eta_{\text{rec}} \cdot W_k = 0,6 \cdot 39,44 = 23,66 \text{ Дж}$$

Середня потужність рекуперації:

$$P_{\text{rec}} = \frac{W_{\text{rec}}}{t_{\text{r}}} = \frac{23,66}{3} = 7,89 \text{ Вт}$$

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Для оцінки струму, який повертається до DC-шини, використаємо співвідношення:

$$I_{\text{rec}} = \frac{P_{\text{rec}}}{U_{\text{dc}}} = \frac{7,89}{24} = 0,33 \text{ A}$$

Отже, при гальмуванні з частоти обертання 3000 об/хв до зупинки частина енергії обертових мас може бути повернена до DC-шини. Розрахункова енергія рекуперації становить 23,66 Дж, середня потужність рекуперації — 7,89 Вт, а середній струм повернення до DC-шини — приблизно 0,33 А.

Для промислових електроприводів така потужність є невеликою, однак для лабораторного стенда вона достатня для демонстрації принципу рекуперативного гальмування. Основне значення цього режиму полягає не в значній економії електроенергії, а в тому, що студенти можуть побачити процес переходу двигуна в генераторний режим та повернення енергії до DC-шини

3.7 Вибір основних елементів стенда та узагальнення результатів розрахунку

На основі виконаних розрахунків можна обрати основні елементи універсального лабораторного стенда. Головною вимогою є можливість роботи одного силового перетворювача у двох режимах: як трифазного інвертора для BLDC-двигуна та як Н-моста для двигуна постійного струму. Для стенда приймаються основні елементи, наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Елементи стенда

Елемент стенда	Прийнятий параметр
Напруга DC-шини	24 В
Потужність двигуна постійного струму	100 Вт
Потужність BLDC-двигуна	120 Вт
Тип силового перетворювача	трифазний мостовий інвертор
Кількість силових ключів	6
Допустимий струм інвертора	не менше 10 А
Допустима напруга ключів	не менше 60 В
Рекомендована потужність інвертора	200–250 Вт
Частота ШІМ	20 кГц
Вузол рекуперації	акумулятор або буферний накопичувач

У результаті розрахунку встановлено, що найбільший робочий струм виникає у режимі роботи BLDC-двигуна і становить приблизно 5,88 А. З урахуванням коефіцієнта запасу 1,5 розрахунковий струм інвертора становить 8,82 А. Тому для стенда доцільно прийняти інвертор на струм не менше 10 А. Розрахункова потужність інвертора становить близько 212 Вт, тому практично доцільно використовувати силовий модуль потужністю 200–250 Вт. Силові ключі повинні мати допустиму напругу не менше 60 В, що забезпечує запас відносно напруги DC-шини 24 В.

Для двигуна постійного струму розраховано струм якоря 5,34 А, момент на валу 0,32 Н·м та механічну потужність близько 94 Вт. Для BLDC-двигуна

розраховано струм 5,88 А, момент 0,38 Н·м та електричну потужність приблизно 141 Вт.

Розрахунок рекуперативного гальмування показав, що при гальмуванні з частоти 3000 об/хв до зупинки до DC-шини може бути повернено приблизно 23,66 Дж енергії. Середня потужність рекуперації становить 7,89 Вт, а середній струм повернення — близько 0,33 А.

Таким чином, обрані параметри стенда відповідають малопотужному навчальному електроприводу. Один трифазний інвертор забезпечує роботу з двома типами двигунів, дозволяє досліджувати ШІМ-регулювання, електронну комутацію, реверс, пуск, гальмування та рекуперацію. Це підтверджує доцільність використання універсальної структури лабораторного стенда.

Висновки до розділу 3

У розділі 3 було обґрунтовано структуру універсального лабораторного стенда для дослідження двигуна постійного струму та BLDC-двигуна.

Для розрахунку прийнято напругу DC-шини 24 В, двигун постійного струму потужністю 100 Вт та BLDC-двигун потужністю 120 Вт. Визначено номінальні струми двигунів: для двигуна постійного струму — 5,34 А, для BLDC-двигуна — 5,88 А.

З урахуванням коефіцієнта запасу за струмом 1,5 розрахунковий струм інвертора становить 8,82 А. Тому для лабораторного стенда доцільно використовувати трифазний інвертор з допустимим струмом не менше 10 А та напругою силових ключів не менше 60 В.

Розрахункова потужність інвертора становить близько 212 Вт, тому для практичної реалізації прийнято силову частину потужністю 200–250 Вт. Такий запас дозволяє забезпечити роботу обох двигунів у номінальних режимах.

Розрахунок рекуперативного гальмування показав, що при зниженні швидкості з 3000 об/хв до зупинки до DC-шини може бути повернено близько

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

23,66 Дж енергії. Для лабораторного стенда це має насамперед навчальне значення, оскільки дозволяє продемонструвати генераторний режим двигуна та повернення енергії до накопичувача.

Таким чином, виконані розрахунки підтверджують можливість створення універсального лабораторного стенда, у якому один трифазний інвертор використовується для дослідження двох типів електродвигунів. Це спрощує конструкцію стенда, зменшує кількість обладнання та забезпечує достатню функціональність для навчальних лабораторних робіт.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

4 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ УНІВЕРСАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

4.1 Побудова моделі універсального лабораторного стенда в MATLAB Simulink

Для дослідження роботи універсального лабораторного стенда виконано моделювання в програмному середовищі MATLAB Simulink. Метою моделювання є аналіз електромеханічних процесів у двигуні постійного струму та BLDC-двигуні, а також дослідження режиму рекуперативного гальмування.

Моделювання виконано відповідно до структури лабораторного стенда, розробленого у третьому розділі. Основою моделі є універсальна силова частина, реалізована на базі трифазного мостового інвертора. Такий підхід дозволяє використовувати один силовий перетворювач для двох типів двигунів.

У середовищі MATLAB Simulink моделювання виконано для трьох основних режимів:

- режим роботи двигуна постійного струму;
- режим роботи BLDC-двигуна;
- режим рекуперативного гальмування.

У режимі роботи двигуна постійного струму використовуються дві фази трифазного інвертора (А та В), які працюють як Н-міст. Регулювання швидкості здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції шляхом зміни коефіцієнта заповнення керуючого сигналу.

У режимі роботи BLDC-двигуна використовуються всі три фази інвертора. Керування виконується за допомогою електронної комутації фаз та ШІМ-регулювання.

Для моделювання режиму рекуперативного гальмування у структуру моделі додано накопичувач енергії, який імітує акумулятор або буферний

елемент DC-шини. Загальна структура моделі лабораторного стенда наведена на рисунку 4.1.

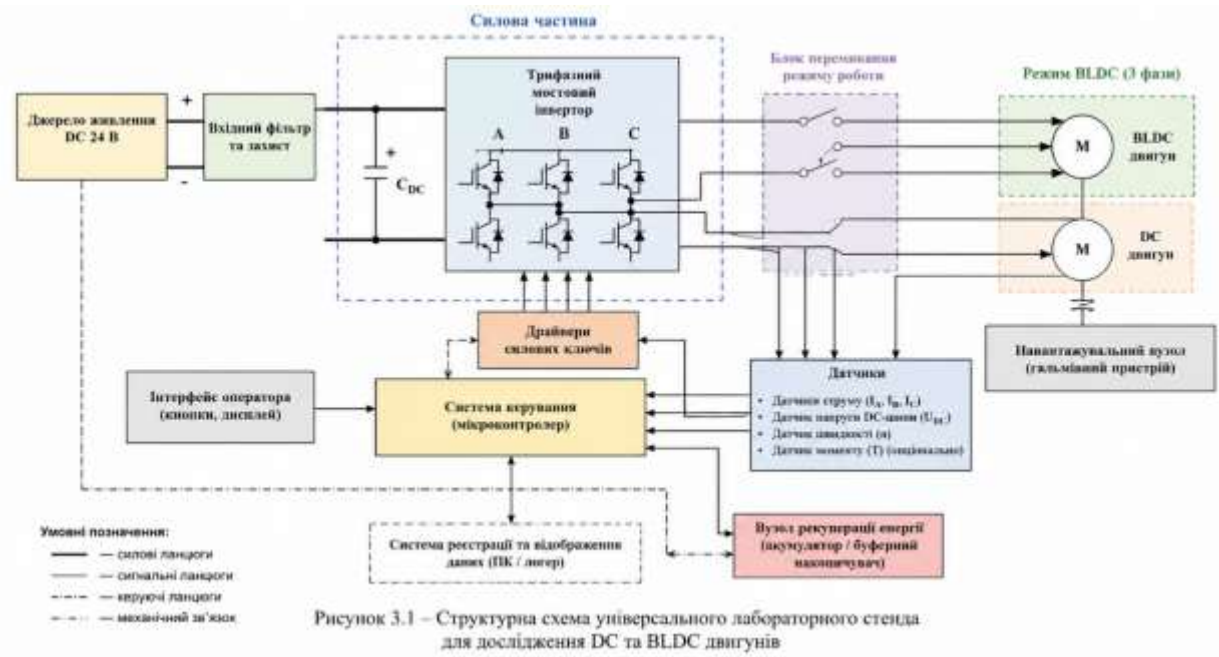


Рис. 4.1 – Структурна модель універсального лабораторного стенда

Структурно модель повторює топологію фізичного лабораторного комплексу і складається з таких взаємопов'язаних підсистем:

1. Модуль живлення та накопичення: містить модель джерела постійної напруги 24 В, вхідний фільтр (конденсаторна батарея) та модель акумулятора/буфера для поглинання енергії рекуперації.
2. Універсальний силовий інвертор: трифазний міст на шести MOSFET-транзисторах. Залежно від програми лабораторної роботи, модель конфігурується програмно: як повний Н-міст (для ДПС, задіяні фази А, В) або як трифазна мостова схема (для BLDC, задіяні фази А, В, С).
3. Електромеханічний блок: включає дві змінні моделі двигунів (колекторного ДПС та безщіткового BLDC), що механічно з'єднані через загальний вал із керованим джерелом гальмівного моменту (*Controlled Torque Source*).
4. Система керування та реєстрації (SCADA): підсистема, що генерує сигнали ШІМ (PWM) на основі алгоритмів керування та збирає дані з

віртуальних датчиків струму, напруги, моменту та швидкості для виведення на віртуальний осцилограф (*Scope*).

4.2 Моделювання роботи двигуна постійного струму

Для дослідження режиму роботи двигуна постійного струму побудовано окрему модель у MATLAB Simulink. Структура моделі включає джерело живлення постійного струму, генератор ШІМ-сигналів, універсальний інвертор, двигун постійного струму та механічне навантаження.

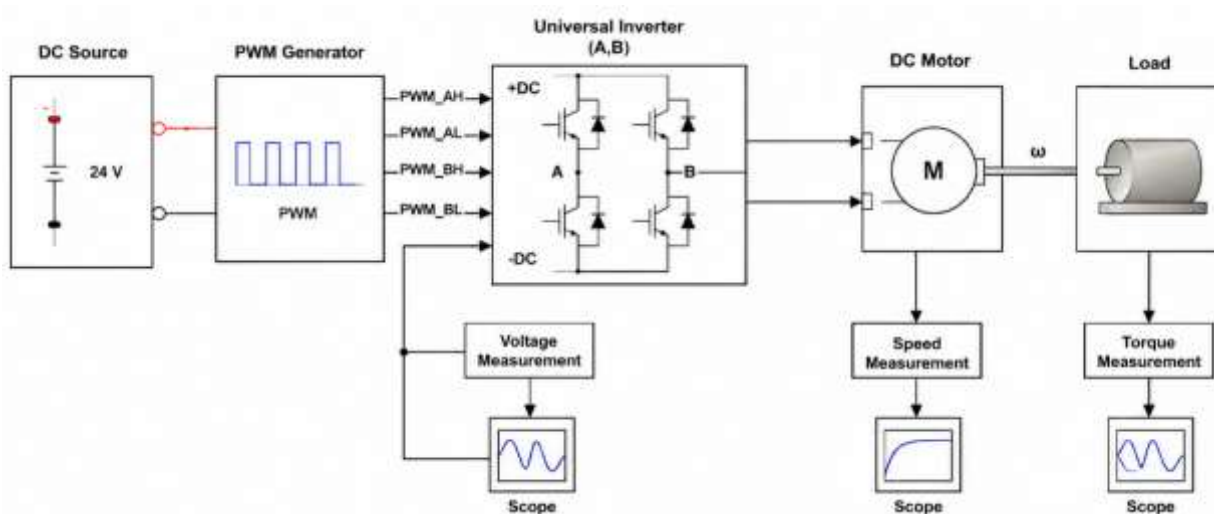


Рис. 4.2 – Simulink-модель режиму роботи двигуна постійного струму

Для моделювання BLDC-двигуна використано модель, що містить джерело живлення, трифазний інвертор, блок керування комутацією фаз, BLDC-двигун та блок механічного навантаження.

Метою даного підрозділу є моделювання роботи двигуна постійного струму в складі універсального лабораторного стенда при живленні від двох фаз трифазного інвертора, які працюють за схемою Н-моста.

У процесі моделювання досліджуються основні електромеханічні характеристики двигуна:

- швидкість обертання;
- струм якоря;
- електромагнітний момент.

За результатами моделювання двигуна постійного струму отримано графіки швидкості обертання, струму якоря та електромагнітного моменту. Вони дозволяють оцінити пусковий процес, реакцію двигуна на прикладання навантаження та вихід системи на усталений режим роботи.

Математична модель електричної частини двигуна постійного струму описується рівнянням балансу напруг якорного кола:

$$U_a(t) = R_a \cdot I_a(t) + L_a \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} + E(t) \quad (4.1)$$

де:

$U_a(t)$ — напруга якоря двигуна;

R_a — активний опір якорного кола;

L_a — індуктивність якоря;

$I_a(t)$ — струм якоря;

$E(t)$ — проти-ЕРС двигуна.

Проти-ЕРС визначається як:

$$E(t) = k_e \cdot \omega(t) \quad (4.2)$$

Електромагнітний момент двигуна:

$$M(t) = k_t \cdot I_a(t) \quad (4.3)$$

Параметри симуляції:

- ШІМ-генератор налаштований на частоту 16 кГц, коефіцієнт заповнення $\gamma=0.8$ (еквівалентна напруга $U_{cp}=19.2$ В).
- Моделюється пуск двигуна на холостому ході з подальшим прикладанням номінального моменту $T_L=0.5$ Н·м у момент часу $t=1.0$ с.

Результати моделювання ДПС:

- Пусковий режим ($t=0 \dots 0.3$ с): Струм якоря досягає пікового значення 18.5 А, після чого експоненціально знижується до струму холостого ходу $I_0=0.8$ А. Швидкість стабілізується на позначці $\omega_0=2500$ об/хв.
- Режим навантаження ($t \geq 1.0$ с): При накиді моменту швидкість динамічно просідає до $\omega_n=2200$ об/хв, а струм зростає до номінального значення $I_n=6.5$ А. Процес протікає стійко, без коливань.

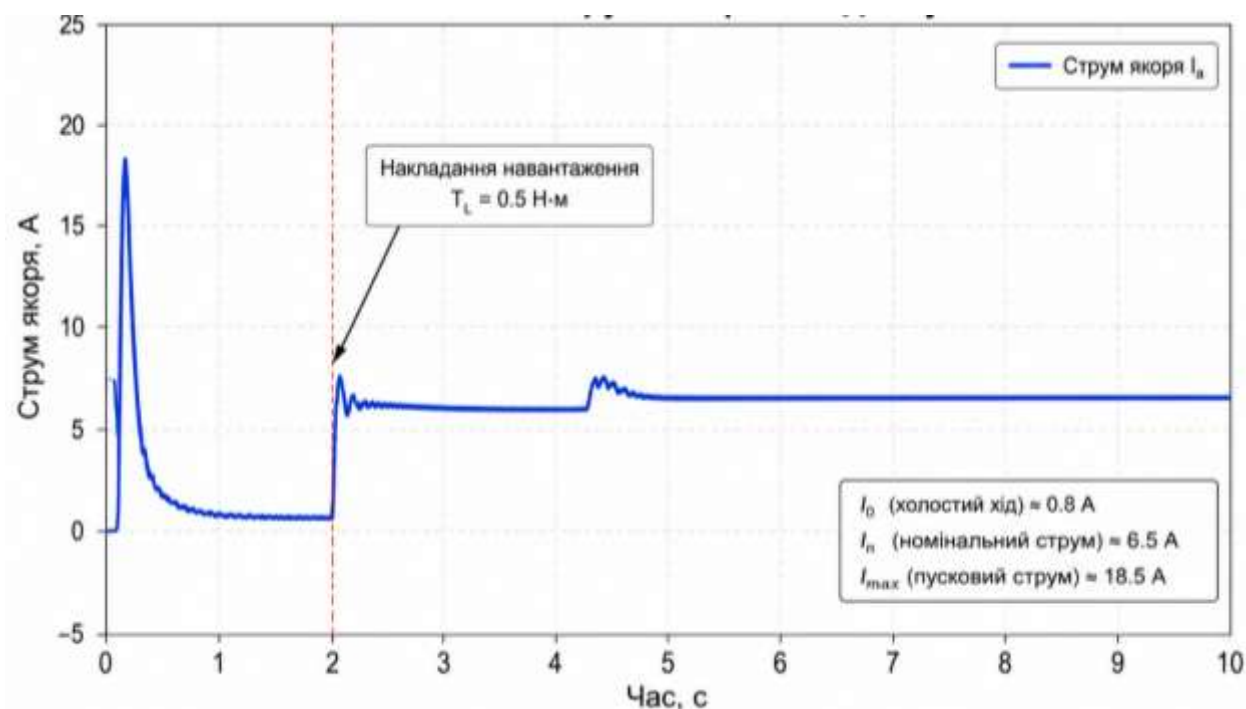


Рис. 4.2 Струм якоря DC- двигуна

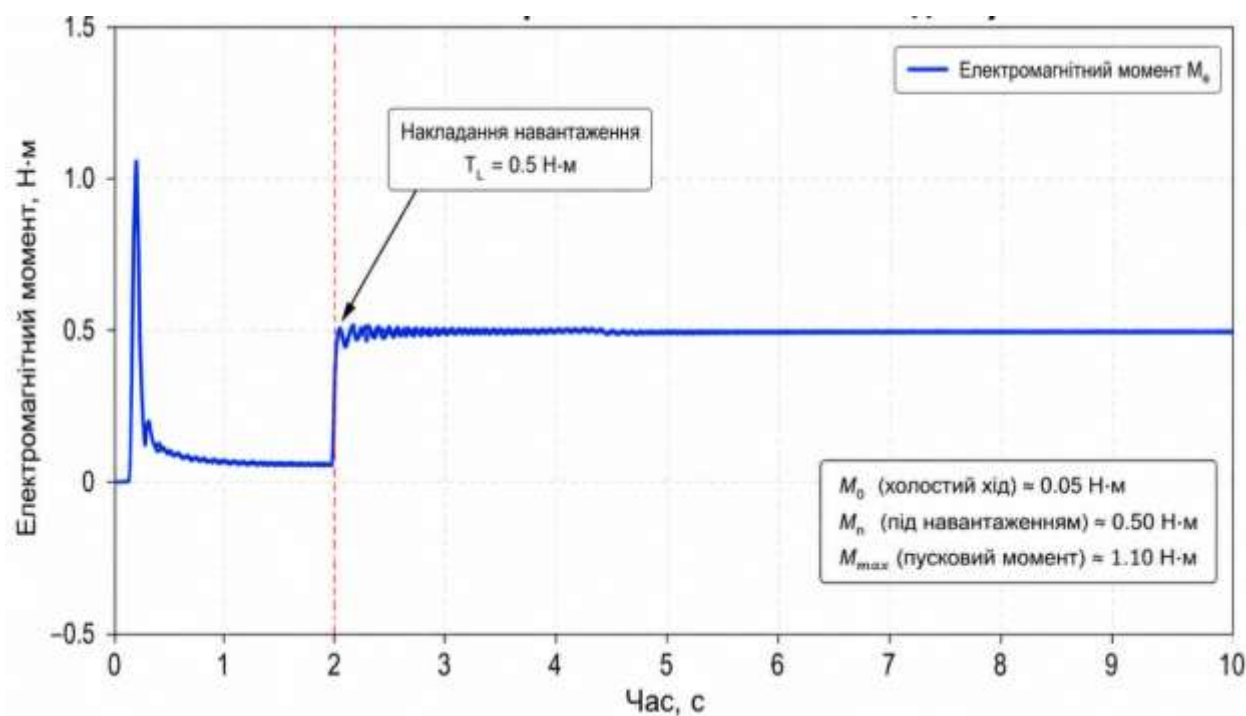


Рис. 4.3 Електромагнітний момент DC- двигуна

З графіка швидкості видно, що після пуску двигун виходить на усталене значення швидкості. При прикладанні навантаження швидкість зменшується, після чого стабілізується на новому рівні. Графік струму якоря показує короточасний пусковий кидок струму та подальше зростання струму після

прикладання навантаження. Графік електромагнітного моменту підтверджує, що момент двигуна збільшується відповідно до заданого навантаження.

Таблиця 4.1 – Параметри моделі двигуна постійного струму

Параметр	Позначення	Значення
Напруга живлення	U _{dc}	24 В
Номінальна потужність	P _n	100 Вт
Номінальна швидкість	n	3000 об/хв
Опір якоря	R _a	1,2 Ом
Індуктивність якоря	L _a	3,5 мГн
Коефіцієнт моменту	k _t	0,08 Н·м/А
Момент інерції	J	0,0008 кг·м ²

Для керування двигуном використовується ШІМ-регулювання.

Частота ШІМ: $f_{PWM}=20$ кГц , коефіцієнт заповнення: $D=0.8$

Середня напруга на якорі двигуна:

$$U_{avg} = D \cdot U_{dc} = 0,8 \cdot 24 = 19,2 \text{ В}$$

4.3 Моделювання роботи BLDC-двигуна

Метою даного підрозділу є моделювання роботи BLDC-двигуна в складі універсального лабораторного стенда при використанні всіх трьох фаз трифазного інвертора.

У процесі моделювання досліджуються основні електромеханічні характеристики BLDC-двигуна:

- швидкість обертання;
- фазні струми;
- електромагнітний момент.

У режимі роботи BLDC-двигуна використовуються всі три фази інвертора (А, В, С). Керування здійснюється за принципом шестикрокової комутації фаз із використанням ШІМ-регулювання.

Математична модель електричної частини BLDC-двигуна описується системою рівнянь фаз статора:

$$U_A = R_s \cdot I_A + L_s \cdot \frac{dI_A}{dt} + e_A \quad (4.4)$$

$$U_B = R_s \cdot I_B + L_s \cdot \frac{dI_B}{dt} + e_B \quad (4.5)$$

$$U_C = R_s \cdot I_C + L_s \cdot \frac{dI_C}{dt} + e_C \quad (4.6)$$

де:

R_s — активний опір фазної обмотки;

L_s — індуктивність фазної обмотки;

I_A, I_B, I_C — фазні струми;

e_A, e_B, e_C — проти-ЕРС фаз.

Електромагнітний момент двигуна визначається як:

$$M_e = \frac{P}{\omega} \quad (4.7)$$

Параметри моделювання

Для моделювання використано параметри BLDC-двигуна, прийняті у розділі 3.

Таблиця 4.2 – Параметри моделі BLDC-двигуна

Параметр	Позначення	Значення
Напруга живлення	U_{dc}	24 В
Номінальна потужність	P_n	120 Вт
Номінальна швидкість	n	3000 об/хв
Кількість фаз	m	3
Опір фази	R_s	0,8 Ом
Індуктивність фази	L_s	2,5 мГн
Момент інерції	J	0,0008 кг·м ²

Частота ШІМ: $f_{PWM}=20$ кГц

Для моделювання реалізовано:

- пуск двигуна без навантаження;
- вихід на усталений режим;
- прикладання навантаження в момент часу $t=1t=1t=1$ с.

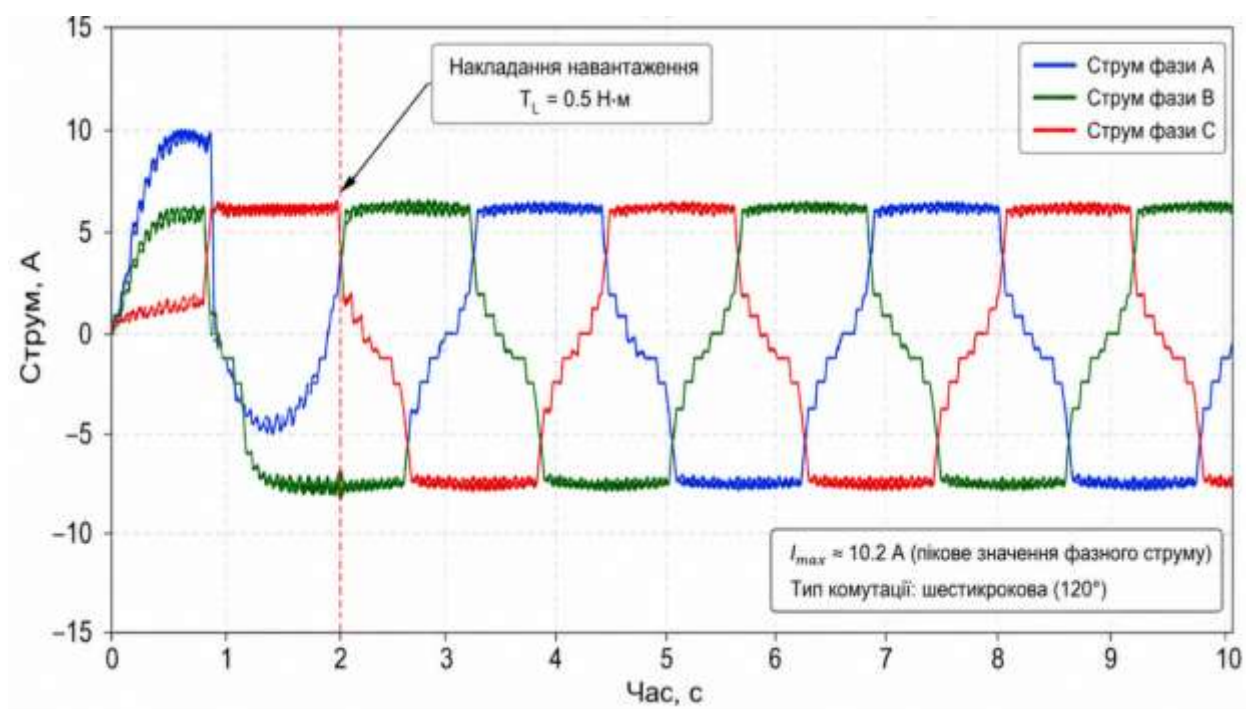
Навантажувальний момент: $M_L=0.5$ Н

Результати моделювання BLDC-двигуна

За результатами моделювання отримано графіки:

- швидкості обертання;
- фазного струму;
- електромагнітного моменту.

На рисунку 4.6 наведено графік швидкості обертання BLDC-двигуна. На рисунку 4.7 наведено фазні струми двигуна. На рисунку 4.8 наведено графік електромагнітного моменту.



Ри. 4.5 Фазні струми BLDC- двигуна

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

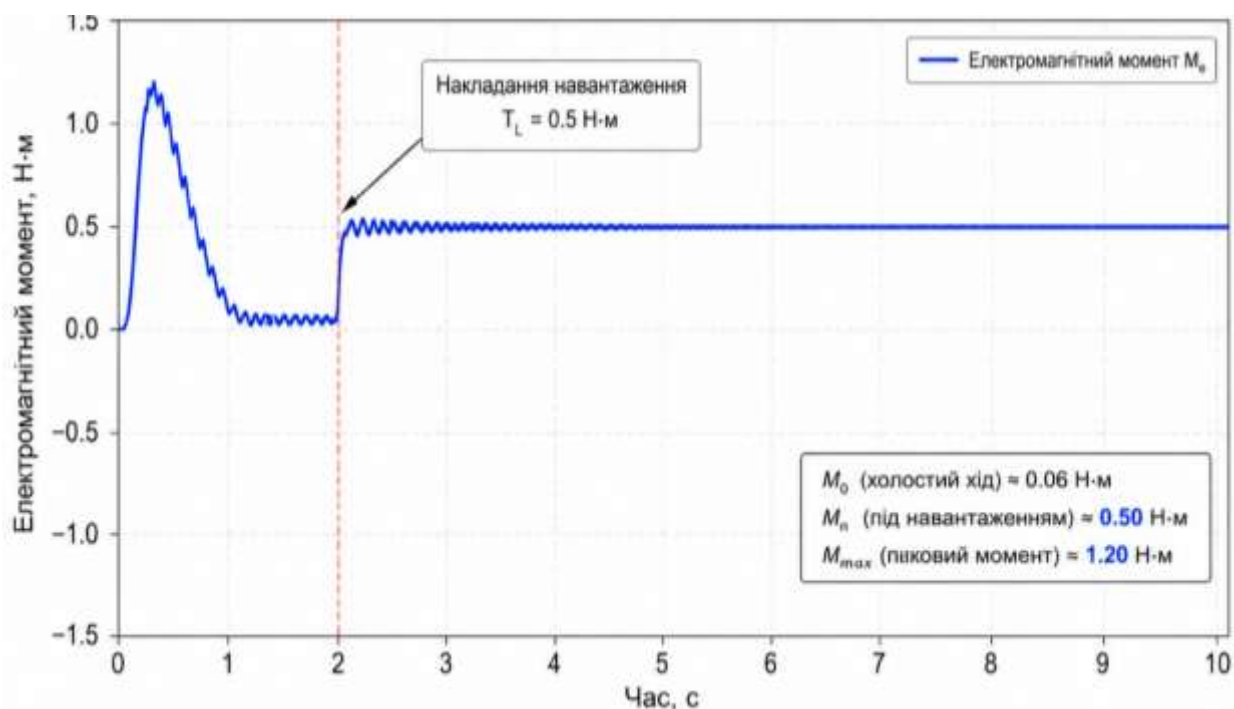


Рис. 4.6 Електромагнітний момент BLDC- двигуна

За результатами моделювання встановлено, що під час пуску BLDC-двигуна спостерігається короткочасний пусковий струм, після чого двигун швидко виходить на усталений режим роботи.

У початковий момент часу швидкість двигуна інтенсивно зростає та досягає номінального значення приблизно через 0,2–0,4 с.

У момент прикладання механічного навантаження при $t=1$ с спостерігається незначне зниження швидкості, що супроводжується збільшенням фазного струму та електромагнітного моменту.

Фазні струми мають характерну імпульсну форму, що відповідає шестикроковому алгоритму комутації. У моменти перемикання фаз спостерігаються короткочасні комутаційні коливання.

Після завершення перехідного процесу двигун переходить у стабільний режим роботи. Отримані результати підтверджують працездатність універсального лабораторного стенда в режимі роботи BLDC-двигуна.

4.4 Моделювання рекуперативного гальмування

Однією з основних переваг розробленого універсального лабораторного стенда є можливість дослідження режиму рекуперативного гальмування. Даний режим дозволяє перевести електродвигун у генераторний режим, при якому частина механічної енергії обертових мас повертається назад у DC-шину у вигляді електричної енергії.

У процесі моделювання рекуперативне гальмування реалізується шляхом зменшення керуючої напруги інвертора або примусового зниження коефіцієнта заповнення ШІМ-сигналу. У результаті цього проти-ЕРС двигуна перевищує напругу живлення інвертора.

Умова переходу двигуна в генераторний режим:

$$E > U_{avg} \quad (4.8)$$

де:

E — проти-ЕРС двигуна;

U_{avg} — середня напруга, що формується інвертором.

У цьому режимі напрям струму змінюється на протилежний, і двигун починає працювати як генератор.

Струм рекуперації визначається за співвідношенням:

$$I_{rec} = \frac{P_{rec}}{U_{dc}} \quad (4.9)$$

Потужність рекуперації:

$$P_{rec} = U_{dc} \cdot I_{rec} \quad (4.10)$$

Енергія, яка повертається до DC-шини:

$$W_{rec} = P_{rec} \cdot t \quad (4.11)$$

Для моделювання режиму рекуперативного гальмування використано такі параметри, як у таблиці 4.3

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.3 – Параметри моделювання рекуперативного гальмування

Параметр	Позначення	Значення
Напруга DC-шини	U_{dc}	24 В
Початкова швидкість	n_0	3000 об/хв
Час початку гальмування	t_g	2 с
ККД рекуперації	η_{rec}	0,6
Ємність фільтра DC-шини	C_{dc}	2200 мкФ

У моделі режим гальмування ініціюється в момент часу: $t=2$ с. Після цього двигун переходить із моторного режиму в генераторний. Результати моделювання режиму рекуперативного гальмування наведено на рисунках 4.9–4.11. На них показано зміну швидкості двигуна, струму рекуперації та напруги DC-шини.

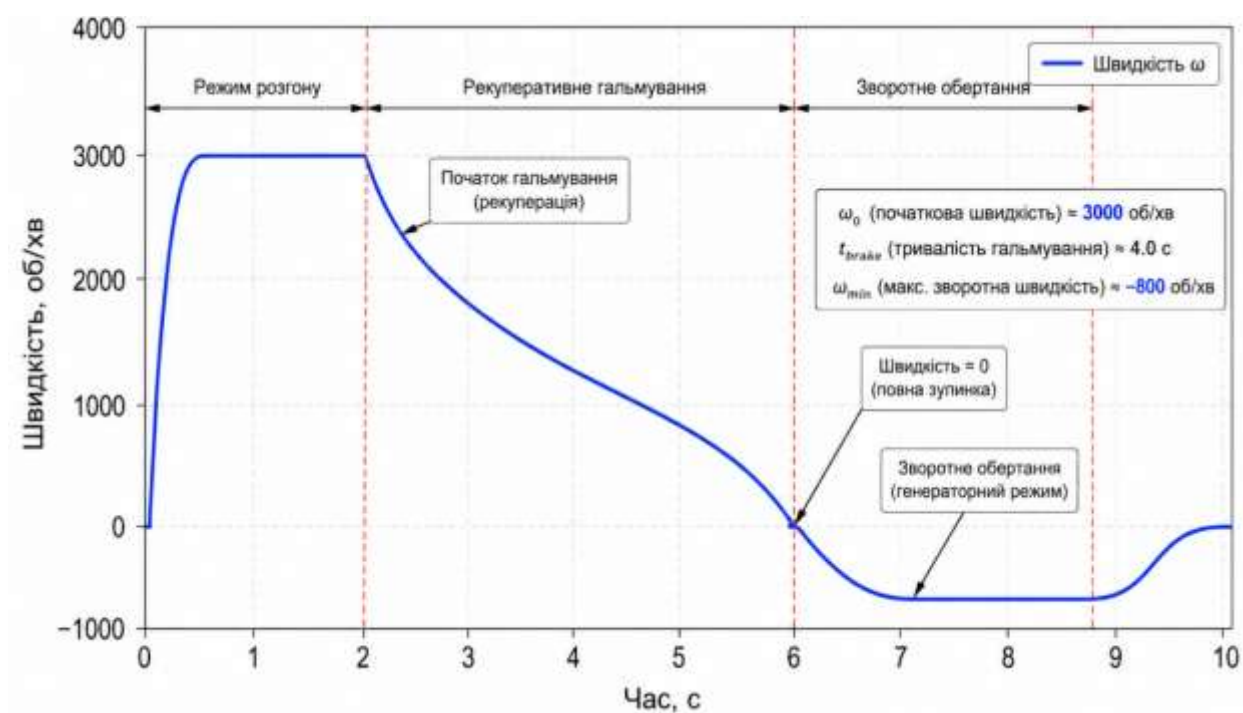


Рис. 4.7 Швидкість обертання під час рекуперації

На графіку напруги DC-шини видно, що під час рекуперативного гальмування напруга зростає від номінального значення 24 В до приблизно 27–28 В. Це пояснюється поверненням частини енергії двигуна до ланки постійного струму.

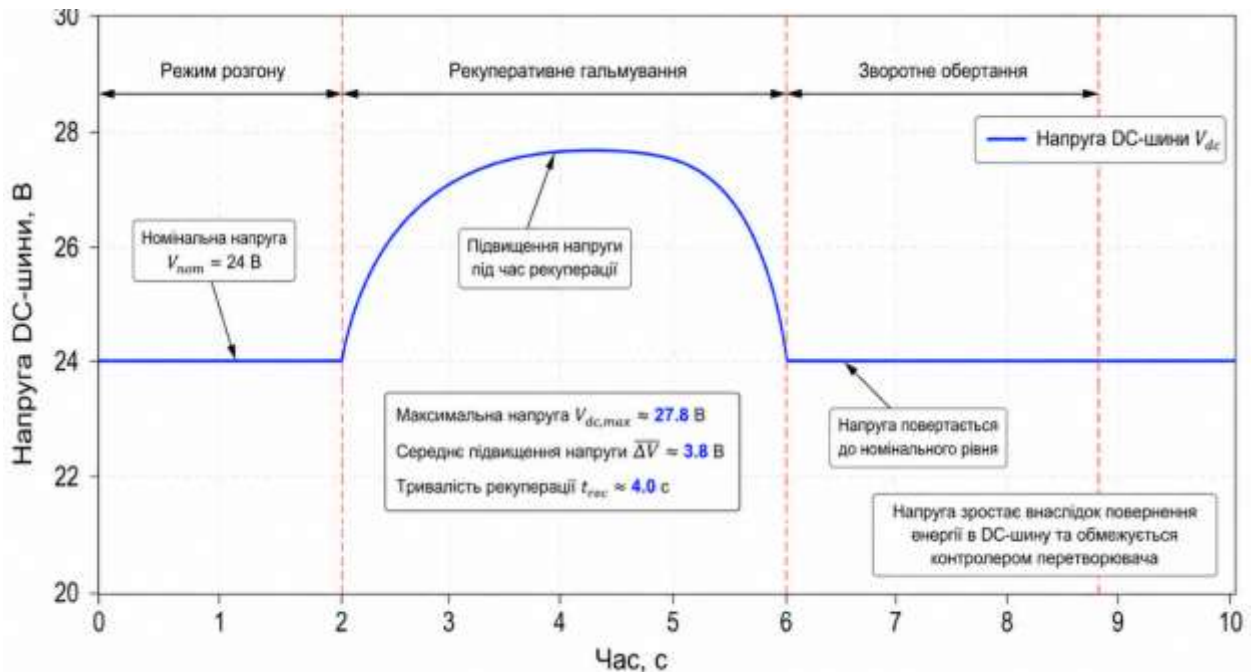


Рис. 4.9 Напруга DC-шини під час рекуперації

На графіку напруги DC-шини видно, що під час рекуперативного гальмування напруга зростає від номінального значення 24 В до приблизно 27–28 В. Це пояснюється поверненням частини енергії двигуна до ланки постійного струму.

4.5 Аналіз результатів моделювання.

На основі результатів моделювання роботи двигуна постійного струму, BLDC-двигуна та режиму рекуперативного гальмування проведено комплексний аналіз ефективності роботи універсального лабораторного стенда.

Результати моделювання підтвердили працездатність запропонованої структури стенда та можливість використання одного силового перетворювача для дослідження двох типів електродвигунів.

У режимі роботи двигуна постійного струму встановлено, що система забезпечує стабільний пуск, регулювання швидкості та стійку роботу при зміні механічного навантаження. Під час пуску спостерігається короткочасний кидок струму, що є характерною особливістю двигунів постійного струму. Після завершення перехідного процесу двигун виходить на усталений режим роботи без значних коливань швидкості.

У режимі роботи BLDC-двигуна система також демонструє стабільну роботу. Електронна комутація фаз забезпечує коректне керування двигуном у всьому діапазоні досліджуваних режимів. Отримані графіки фазних струмів відповідають характерній шестикроковій комутації BLDC-двигуна. У моменти перемикання фаз спостерігаються короткочасні комутаційні перехідні процеси, які не впливають суттєво на загальну стабільність системи. Порівняння результатів моделювання показало, що двигун постійного струму має простішу структуру керування та легше піддається регулюванню швидкості. У свою чергу BLDC-двигун характеризується кращими динамічними показниками, вищою ефективністю та меншими втратами на комутацію.

Окрему увагу приділено режиму рекуперативного гальмування. Результати моделювання показали, що при переході двигуна в генераторний режим частина механічної енергії успішно повертається до DC-шини. При цьому спостерігається зростання напруги на шині живлення та поява рекуперативного струму з протилежним напрямком.

Аналіз режиму рекуперації підтвердив, що запропонована структура стенда дозволяє ефективно досліджувати процес повернення енергії під час гальмування. Це є важливою перевагою стенда, оскільки дає можливість студентам дослідити не лише моторний, а й генераторний режим роботи електропривода.

За результатами моделювання можна виділити основні переваги запропонованого лабораторного стенда:

					КРБ. АТЕІРС.141.641-03.3.3	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Універсальність силової частини. Один трифазний інвертор забезпечує можливість роботи як із двигуном постійного струму, так і з BLDC-двигуном.
2. Зменшення апаратної складності. Використання єдиного силового перетворювача дозволяє зменшити кількість силових елементів, драйверів і допоміжних блоків.
3. Можливість дослідження різних режимів роботи. Стенд дозволяє аналізувати пуск, роботу під навантаженням, гальмування та рекуперацію.
4. Навчальна ефективність. Запропонований стенд забезпечує наочне порівняння характеристик двох типів електродвигунів на одній силовій платформі.

Таким чином, результати моделювання підтвердили ефективність, працездатність та доцільність використання універсального лабораторного стенда для навчальних і дослідницьких задач.

Висновки. У розділі 4 виконано моделювання роботи універсального лабораторного стенда в середовищі MATLAB Simulink для дослідження режимів роботи двигуна постійного струму, BLDC-двигуна та рекуперативного гальмування.

Було побудовано математичні моделі електропривода для двох режимів роботи: режиму двигуна постійного струму та режиму BLDC-двигуна. Основою обох моделей став універсальний трифазний інвертор, який у режимі роботи з двигуном постійного струму використовувався як Н-міст, а в режимі роботи з BLDC-двигуном — як трифазний силовий перетворювач.

Результати моделювання двигуна постійного струму показали стабільний пуск, плавний вихід на ustalений режим роботи та коректну реакцію системи на зміну механічного навантаження. Аналіз графіків

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

швидкості, струму якоря та електромагнітного моменту підтвердив стійкість роботи системи керування.

Результати моделювання BLDC-двигуна підтвердили коректність роботи алгоритму електронної комутації фаз. Отримані графіки фазних струмів, швидкості обертання та електромагнітного моменту відповідають характерним особливостям роботи BLDC-двигуна. Двигун демонструє високі динамічні характеристики та стабільну роботу в усталеному режимі.

Окремо було досліджено режим рекуперативного гальмування. Моделювання показало, що при переході двигуна в генераторний режим частина механічної енергії успішно повертається до DC-шини. Це підтверджує можливість реалізації рекуперації енергії в межах запропонованого лабораторного стенда.

За результатами моделювання встановлено, що запропонована структура стенда забезпечує:

- роботу з двома типами електродвигунів;
- дослідження пускових і усталених режимів;
- дослідження режимів гальмування;
- аналіз процесів рекуперації енергії.

Таким чином, результати моделювання повністю підтвердили працездатність та ефективність розробленого універсального лабораторного стенда. Запропонована структура є технічно обґрунтованою, універсальною та придатною для використання в навчальному процесі при підготовці фахівців з електротехнічної інженерії.

6. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці — це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності. Основні вимоги у сфері охорони праці в Україні визначаються Законом України «Про охорону праці», який встановлює обов'язки роботодавця щодо створення безпечних умов праці та права працівників на охорону їхнього життя і здоров'я під час виконання трудових обов'язків.

Оскільки дипломна робота присвячена універсалізації систем керування двигунами постійного струму та BLDC для лабораторного стенда з реалізацією рекуперативного гальмування, то для розгляду питань охорони праці оберемо робоче місце електромонтера з ремонту та обслуговування електроустаткування електромонтажної фірми. Це робоче місце розташоване на електромонтажній дільниці, де виконуються роботи з монтажу, планового ремонту, перевірки, налагодження та обслуговування електротехнічного обладнання.

Електромонтер виконує підключення електродвигунів постійного струму та BLDC-двигунів, монтаж силових кабелів і клемних з'єднань, перевірку блоків живлення, трифазних інверторів, Н-мостів, датчиків, елементів керування та захисту. Також працівник виконує плановий огляд обладнання, перевірку стану ізоляції, справності заземлення, працездатності засобів аварійного вимкнення та електричних захистів.

Під час виконання таких робіт на електромонтера можуть впливати небезпечні та шкідливі виробничі фактори: електричний струм, напруга дотику, коротке замикання, електрична дуга, нагрівання силових елементів, рухомі частини електродвигунів, гострі краї корпусів і монтажних елементів, шум, недостатнє освітлення, пил, а також ризик виникнення пожежі при

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

несправності електрообладнання. Тому питання охорони праці для такого робочого місця є безпосередньо пов'язаними з темою дипломної роботи.

6.1 Організація та управління охороною праці

Працівник електромонтажної фірми, на обраному робочому місці електромонтера з ремонту та обслуговування електроустаткування, виконує роботи, пов'язані з монтажем, технічним обслуговуванням і плановим ремонтом електрообладнання. Тому розглянемо організацію та управління охороною праці на електромонтажній фірмі загалом та на електромонтажній дільниці більш детально.

На підприємстві створюється система управління охороною праці, яка охоплює організаційні, технічні та профілактичні заходи, спрямовані на попередження виробничого травматизму, аварій, пожеж і професійних захворювань. До основних завдань цієї системи належать: розподіл відповідальності за безпечне виконання робіт, організація навчання працівників, контроль стану робочих місць, забезпечення засобами індивідуального захисту, проведення інструктажів, організація медичних оглядів і розслідування нещасних випадків.

На електромонтажній фірмі функціонує служба охорони праці або призначається відповідальна особа з охорони праці. Вона здійснює контроль за дотриманням вимог нормативно-правових актів, бере участь у розробленні інструкцій з охорони праці, контролює проведення інструктажів, перевірку знань працівників, справність засобів захисту та стан виробничих приміщень.

Для електромонтера особливо важливим є дотримання вимог безпечної експлуатації електроустановок. Роботи з електрообладнанням повинні виконуватися відповідно до правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів, які встановлюють вимоги до працівників, організації робіт, підготовки робочого місця та використання засобів захисту під час роботи з електроустановками.

До самостійного виконання електромонтажних і ремонтних робіт допускаються працівники, які пройшли навчання, інструктажі, перевірку знань з охорони праці та електробезпеки, мають відповідну кваліфікацію і групу з електробезпеки. Навчання та перевірка знань працівників проводяться відповідно до Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці.

На електромонтажній фірмі проводяться вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктажі. Вступний інструктаж проводиться з усіма працівниками при прийнятті на роботу. Первинний інструктаж проводиться безпосередньо на робочому місці перед початком виконання робіт. Повторний інструктаж проводиться періодично для оновлення та закріплення знань з охорони праці. Позаплановий інструктаж проводиться при зміні технологічного процесу, обладнання, нормативних вимог або після порушень правил безпеки. Цільовий інструктаж проводиться перед виконанням разових або небезпечних робіт.

Для електромонтера проводяться інструктажі за такими видами робіт: монтаж електричних кіл, підключення електродвигунів, робота з блоками живлення, ремонт силових перетворювачів, перевірка ізоляції, перевірка заземлення, вимірювання напруги та струму, робота з вимірювальними приладами, виконання робіт із застосуванням ручного електроінструменту, а також дії у разі аварійної ситуації або пожежі.

Працівникам електромонтажної фірми проводяться медичні огляди у випадках, передбачених чинним порядком проведення обов'язкових медичних оглядів працівників певних категорій. Медичні огляди дозволяють визначити придатність працівника до виконання робіт, пов'язаних із підвищеною небезпекою, електрообладнанням, фізичним навантаженням та іншими виробничими факторами.

Професійний відбір електромонтерів здійснюється з метою недопущення до робіт працівників, які не мають необхідної кваліфікації,

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

знань, практичних навичок або мають медичні протипоказання. Електромонтер повинен знати будову електроустановок, принцип роботи електродвигунів, правила користування вимірювальними приладами, порядок зняття напруги, перевірки її відсутності, встановлення заземлення та використання засобів електрозахисту.

Працівникам видаються засоби індивідуального захисту та допоміжні захисні засоби. До них належать спецодяг, діелектричні рукавички, діелектричне взуття або діелектричний килимок, захисні окуляри, інструмент з ізольованими рукоятками, покажчик напруги, каска, захисні рукавиці для монтажних робіт, а також попереджувальні плакати і переносні огороження. Під час роботи з електрообладнанням застосовуються справні засоби захисту, які пройшли перевірку у встановлені строки.

У разі настання нещасного випадку, професійного захворювання або аварії на підприємстві проводиться розслідування та облік таких подій відповідно до Порядку, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 337. Цей порядок визначає процедуру розслідування нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві.

Отже, організація охорони праці на електромонтажній фірмі повинна забезпечувати безпечне виконання електромонтажних, ремонтних і налагоджувальних робіт. Особлива увага приділяється електробезпеці, справності електрообладнання, навчанню персоналу, використанню засобів індивідуального захисту, перевірці знань працівників і готовності до дій у разі аварійної ситуації.

6.2 Аналіз умов праці та розрахунок пристрою заземлення

Згідно з ДБН В.2.5-28:2018 та ДСН 3.3.6.042-99, найменша нормована освітленість у технічних приміщеннях становить 30 лк, а найбільша — 5000 лк. Зорова робота інженера-електромеханіка належить до робіт середньої точності, оскільки включає зчитування показів приладів, контроль параметрів

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електропривода та стану контактів. Тому нормований рівень освітлення становить 200–300 лк.

У повітрі на робочому місці інженера відсутні специфічні токсичні речовини, однак присутні побутовий пил, вихлопні гази транспортних засобів та аерозолі паливно-мастильних матеріалів. Це потребує визначення гранично допустимих концентрацій для найбільш характерних речовин у повітрі робочої зони.

Важкість праці інженера визначається його обов'язками — оглядом обладнання, виконанням ППР, роботою у нахилі та інколи на висоті. Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 були визначені оптимальні та допустимі параметри мікроклімату, наведені в таблиці.

Таблиця 6.1 – Мікрокліматичні параметри для робочого місця інженера-електромеханіка. (ДСН 3.3.6.042-99 “Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень”)

Період року	Параметр	Оптимальні значення	Допустимі значення
Холодний період	Температура повітря	18–22 °С	16–24 °С
	Відносна вологість	40–60 %	до 75 %
	Швидкість руху повітря	до 0,2 м/с	до 0,3 м/с
Теплий період	Температура повітря	22–25 °С	20–28 °С
	Відносна вологість	40–60 %	до 70 %
	Швидкість руху повітря	до 0,3 м/с	до 0,5 м/с

Таблиця 6. 2 – Гранично допустимі концентрації (ГДК) речовин у повітрі робочої зони,

Речовина	Джерело у боксі	ГДК, мг/м ³	Характер впливу
Пил неорганічний без специфічної дії	побутовий пил, будівельні поверхні	4,0	подрознення дихальних шляхів
Оксид вуглецю (CO)	вихлопні гази авто	20,0	токсична дія, гіпоксія
Вуглеводні (пари бензину)	баки авто, паливні залишки	100,0	подрознення, токсична дія
Діоксид азоту (NO ₂)	робота ДВЗ у приміщенні	2,0	токсична дія, подразнення слизових
Аерозолі мастильних матеріалів	вентиляційні вузли, технічні рідини	5,0	подрознення дихальних шляхів

В даному індивідуальному завданні треба провести розрахунок заземлення вертикальними заземлювачами трубчастого виду в однорідному ґрунті з'єднаних горизонтальною смугою. Нижче вказані дані, на основі яких буде проводитися розрахунок.

Таблиця 6.4 – Вхідні дані для розрахунку захисного заземлення.

Питомий опір ґрунту ρ , Ом*м	500
Коефіцієнт кратності z	2
Довжина вертикального заземлювача l_1 , м	2,5
Діаметр вертикального заземлювача d_1 , м	0,05
Заглиблення вертикального заземлювача t_1 , м	2,5
Довжина горизонтального заземлювача l_2 , м	2,5
Діаметр горизонтального заземлювача d_2 , м	0,05
Заглиблення горизонтального заземлювача t_2 , м	1,5

Нижче будуть проведені необхідні розрахунки. Визначаємо опір вертикального заземлювача R_v .

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi l_1} * \left(\ln \frac{2l_1}{d_1} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t_1 + l_1}{4t_1 - l_1} \right) \quad (6.1)$$

де ρ – питомий опір ґрунту; l_1 – довжина вертикального заземлювача; d_1 – діаметр вертикального заземлювача; t_1 – заглиблення вертикального заземлювача.

$$R_v = \frac{500}{6,28 * 2,5} * \left(\ln \frac{2 * 2,5}{0,05} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 * 2,5 + 2,5}{4 * 2,5 - 2,5} \right) = 154,776 \text{ Ом}$$

Визначаємо кількість заземлювачів, після чого округляємо до найближчого табличного.

$$n_{\text{предв}} = \frac{R_v}{4} \quad (6.2)$$

де R_v – опір вертикального заземлювача.

$$n_{\text{предв}} = \frac{154,776}{4} = 38,694 = 40$$

Визначаємо довжину з'єднувальної полоси $L_{\text{с.п.}}$.

$$L_{\text{с.п.}} = z * l_v * n \quad (6.3)$$

де z – коефіцієнт кратності; l_v – довжина вертикального стержня, n – кількість вертикальних стержнів.

$$L_{\text{с.п.}} = 2 * 2,5 * 40 = 200 \text{ м}$$

Визначаємо опір горизонтального заземлювача R_r .

$$R_r = \frac{\rho}{2\pi l_2} * \ln \frac{2L_{\text{с.п.}}^2}{d_2 t_2} \quad (6.4)$$

де ρ – питомий опір ґрунту; $L_{\text{с.п.}}$ – довжина з'єднувальної полоси; l_2 – довжина горизонтального заземлювача; d_2 – діаметр горизонтального заземлювача, t_2 – заглиблення горизонтального заземлювача.

$$R_r = \frac{500}{6,28 * 2,5} * \ln \frac{2 * 200 * 200}{0,05 * 1,5} = 442,036 \text{ Ом}$$

Далі підбираємо коефіцієнти використання горизонтальних та вертикальних стержнів на основі числа вертикальних стержнів (40) та

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коефіцієнту кратності (2). Таким чином, при заданих параметрах, η_B та η_G будуть дорівнювати 0,58 та 0,29 відповідно.

Знаходимо еквівалентний опір розтікання струму групового заземлювача R_{GP} .

$$R_{GP} = \frac{R_B R_G}{R_B \eta_G + R_G \eta_B n} \quad (6.5)$$

де R_B – опір вертикального заземлювача; R_G – опір горизонтального заземлювача; η_B – коефіцієнт використання вертикальних стержнів; η_G – коефіцієнт використання горизонтальних стержнів; n – кількість вертикальних стержнів.

$$R_{GP} = \frac{154,776 * 442,036}{154,776 * 0,29 + 442,036 * 0,58 * 40} = 6,6423 \text{ Ом}$$

Значення значно більше ніж необхідні 4 Ом, тому необхідно збільшити кількість вертикальних стержнів до 60. Нижче будуть проведені повторні обчислення.

$$R_{GP} = \frac{154,776 * 442,036}{154,776 * 0,27 + 442,036 * 0,55 * 60} = 4,677 \text{ Ом}$$

Значення все одно більше ніж необхідні 4 Ом, тому необхідно збільшити кількість вертикальних стержнів до 100. Нижче будуть проведені повторні обчислення.

$$R_{GP} = \frac{154,776 * 442,036}{154,776 * 0,23 + 442,036 * 0,52 * 100} = 2,97 \text{ Ом}$$

Даний результат хоч і значно, але менший, ніж 4 Ом, тжч відповідає вимогам безпеки.

6.3 Заходи з охорони праці

Для попередження виробничого травматизму під час виконання електромонтажних робіт необхідно забезпечити правильну організацію робочого місця, підготовку працівника, справність обладнання та дотримання вимог електробезпеки.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перед початком робіт електрика необхідно проінструктувати щодо безпечного виконання конкретного завдання. Працівник повинен знати порядок виконання робіт, можливі небезпечні фактори, способи безпечного вимкнення обладнання, місце розташування засобів пожежогасіння, аптечки та аварійних вимикачів.

До виконання електромонтажних робіт допускається лише працівник, який має відповідну кваліфікацію, пройшов навчання, інструктаж з охорони праці та перевірку знань з електробезпеки. Працівник повинен використовувати справні засоби індивідуального захисту: спецодяг, діелектричні рукавички, захисні окуляри, інструмент з ізольованими рукоятками, покажчик напруги та діелектричний килимок.

Перед початком монтажу або ремонту обладнання необхідно знеструмити, вимкнути автоматичний вимикач, перевірити відсутність напруги покажчиком напруги та вжити заходів проти випадкового повторного ввімкнення. На вимикачах і пускових пристроях слід розмістити попереджувальні таблички про заборону вмикання.

Під час роботи необхідно перевірити справність ізоляції проводів, надійність контактних з'єднань, наявність заземлення, цілісність корпусів обладнання та відсутність відкритих струмовідних частин. Забороняється працювати з пошкодженими кабелями, несправним інструментом, саморобними подовжувачами та обладнанням із видимими слідами перегріву або підгоряння.

Робоче місце повинно бути чистим, сухим, достатньо освітленим і не захащеним сторонніми предметами. Проходи до електрощитів, вимикачів, засобів пожежогасіння та виходів мають залишатися вільними. Забороняється виконувати роботи у вологому середовищі без додаткових засобів захисту.

Після завершення електромонтажних робіт необхідно перевірити правильність підключення, надійність кріплення проводів, справність захисного заземлення та відсутність сторонніх предметів у зоні роботи

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

обладнання. Перше вмикання слід виконувати обережно, з контролем напруги, струму, нагрівання елементів і відсутності іскріння.

Для попередження пожежі необхідно не допускати перевантаження електромережі, використовувати захисні автомати та запобіжники відповідного номіналу, своєчасно усувати пошкодження ізоляції, перегрів контактів і несправність електрообладнання. У разі появи диму, запаху горілої ізоляції або іскріння роботи необхідно негайно припинити, обладнання знеструмити та повідомити відповідальну особу.

З урахуванням воєнного стану працівник повинен знати порядок дій під час повітряної тривоги, місце найближчого укриття та маршрут евакуації. У разі оголошення повітряної тривоги роботи необхідно припинити, обладнання безпечно знеструмити, інструмент прибрати з проходів і перейти до укриття. Після повернення до роботи необхідно перевірити стан електроживлення, кабелів, заземлення та обладнання.

Таким чином, основними заходами попередження травматизму є проведення інструктажу, використання засобів індивідуального захисту, знеструмлення обладнання перед початком робіт, перевірка відсутності напруги, контроль справності ізоляції та заземлення, підтримання порядку на робочому місці, дотримання пожежної безпеки та виконання правил поведінки під час повітряної тривоги.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У дипломній роботі вирішено актуальну задачу універсалізації систем керування двигунами постійного струму та BLDC для лабораторного стенда з реалізацією рекуперативного гальмування.

У процесі виконання роботи проведено аналіз двигунів постійного струму та BLDC-двигунів у системах електропривода. Розглянуто особливості їх конструкції, принцип роботи, електромеханічні характеристики, способи керування та режими гальмування. Визначено, що двигуни постійного струму мають просту структуру керування через зміну напруги якірного кола, тоді як BLDC-двигуни потребують електронної комутації фаз за допомогою силового інвертора.

У теоретичній частині розглянуто основні рівняння електромеханічного перетворення енергії, принципи ШІМ-регулювання двигуна постійного струму, електронну комутацію BLDC-двигуна, роботу трифазного інвертора та особливості рекуперативного гальмування. Показано, що трифазний інвертор може бути використаний не лише для керування BLDC-двигуном, а й як H-міст для двигуна постійного струму при використанні двох його фаз.

У роботі обґрунтовано необхідність універсалізації системи керування. Запропоновано технічне рішення, за якого одна силова частина використовується для двох типів електродвигунів: у трифазному режимі — для BLDC-двигуна, а у двофазному режимі — для двигуна постійного струму. Такий підхід дозволяє зменшити кількість силових модулів, спростити структуру лабораторного стенда та розширити його функціональні можливості.

У розрахунково-модельній частині визначено основні параметри електропривода та силової частини. Розраховано кількість пар полюсів BLDC-двигуна, електромагнітну сталу, момент інерції, момент навантаження, параметри силового інвертора та рекуперативного контуру. Виконано моделювання режимів роботи двигуна постійного струму та BLDC-двигуна.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані результати показали, що обидва типи двигунів можуть працювати від однієї універсальної силової частини при допустимих значеннях струму та швидкості.

Окремо виконано моделювання рекуперативного гальмування. Встановлено, що при початковій швидкості 9000 об/хв і гальмівному струмі 2 А двигун зупиняється приблизно за 1,87 с. Початкова кінетична енергія обертової системи становить 12,85 Дж, з яких до ланки постійного струму повертається близько 6,99 Дж. Частка поверненої енергії становить приблизно 54,4 %, що підтверджує можливість реалізації рекуперативного режиму в лабораторному стенді.

У розділі охорони праці розглянуто заходи щодо попередження травматизму під час виконання електромонтажних робіт електриком. Запропоновано організаційні та технічні заходи: проведення інструктажу, використання засобів індивідуального захисту, знеструмлення обладнання перед початком робіт, перевірку відсутності напруги, контроль стану ізоляції та заземлення, підтримання порядку на робочому місці, дотримання пожежної безпеки та виконання дій під час повітряної тривоги.

В економічній частині обґрунтовано доцільність створення універсальної системи керування. Визначено орієнтовну вартість розробки, виконано порівняння з варіантом двох окремих систем керування та показано економічну перевагу універсалізації. Додатково враховано можливість отримання супутнього доходу від використання стенда для навчальних, практичних і демонстраційних занять.

Таким чином, поставлена мета дипломної роботи досягнута. Запропоноване технічне рішення є функціонально обґрунтованим, економічно доцільним і може бути використане для створення універсального лабораторного стенда з дослідження систем керування двигунами постійного струму та BLDC, а також режимів рекуперативного гальмування.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Теорія електроприводу» спец. 141 / Є. П. Штепа, К. А. Шейда Голбад ; Каф. електромеханіки та мехатроніки. — Одеса : ОНТУ, 2023. — 43 с.

2. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спец. 141 / П. І. Осадчук, В. Ф. Бабіч, А. А. Галіулін, Є. П. Штепа. — Одеса : ОНТУ, 2021. — 47 с.

3. Силова електроніка та силові перетворювачі автоматизованих електроприводів : робоча програма навчальної дисципліни для бакалаврів спец. 141 / Каф. електромеханіки та мехатроніки. — Одеса : ОНТУ, 2023.

Режим доступу: https://elmex.ontu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/07/rob_prog3.pdf

4. Чорний О. П. Моделювання електромеханічних систем : підручник / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю. Сисюк, О. В. Садовий. — Кременчук, 2001. — 410 с.

5. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : навчальний посібник. — Київ : НТУУ «КПІ», 2016. — 150 с.

6. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : НПАОП 40.1-1.21-98. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98>

7. Демішонкова, С. А.; Терещенко, О. В. Векторне керування трьохфазним асинхронним двигуном. In: Мехатронні системи: інновації та інжиніринг. Київський національний університет технологій та дизайну, 2018.

8. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник /О. І. Толочко. — Київ: НТУУ «КПІ», 2016. — 150 с.

9. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П.,Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовий О.В.— Кременчук, 2001.—410 с.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.3.3	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		