

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

С. М. ПЕРЕСАДА

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи
автоматизації, електропривод та електромобільність»

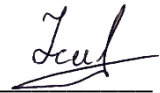
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

на тему: Електромеханічна система електровелосипеда

Виконав : студент 4 курсу, групи ЕП-71

ІСИП Михайло Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Керівник асистент, РОДЬКІН Дмитро Ілліч

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

(підпис)

Консультант д.т.н., доцент КОВБАСА Сергій Миколайович

(назва розділу) (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент: _____




(підпис)

Київ – 2021 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

| № з/п | Формат | Позначення | Найменування | Кількість листів | Примітка |
|-------|--------|-----------------|---|------------------|----------|
| 1 | A4 | | Завдання на дипломний проект | 2 | |
| 2 | A4 | 141.0004.019.БР | Пояснювальна записка | 80 | |
| 3 | A1 | 141.0004.019.БР | Електрична принципова схема силової частини електропривода | 1 | |
| 4 | A1 | 141.0004.019.БР | Електрична принципова схема схеми керування електровелосипеда | 1 | |
| 5 | A1 | 141.0004.019.БР | Результати дослідження системи керування | 1 | |

| | | | | | | | | | |
|-----------|-----|---------------|---|------|--|---|------|---------|--|
| | | | | | 141.0004.019.БР | | | | |
| Змн. | Лит | ПІБ | Підпис | Дата | Електромеханічна система автоматизації електровелосипеда | Літ. | Арк. | Аркушів | |
| Розробн. | | ІСИП М. О. |  | | | | | | |
| Керівн. | | РОДЬКІН Д. І. | | | | | 2 | 80 | |
| Консульт. | | | | | | КПІ ім. Ігоря Сікорського Кафедра АЕМС-ЕП Гр. ЕП-71 | | | |
| Н/Контр. | | | | | | | | | |
| Зав. каф. | | ПЕРЕСАДА С.М. | | | | | | | |

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту**

на тему: ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОВЕЛОСИПЕДА

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
 (код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ С.М. ПЕРЕСАДА
 (підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

ІСИП Михайло Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: Електромеханічна система електровелосипеда, _____

керівник проекту асистент РОДЬКІН Дмитро Ілліч, _____,

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

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту: 11.06.2021р.

3. Вихідні дані до проекту: Вимоги до електровелосипеда: дальність ходу на одному заряді акумулятора $l = 25$ км, середня швидкість руху $v = 25$ км/год, маса електровелосипеда $m_{\text{ев}} = 20$ кг, маса водія $m_{\text{в}} = 80$ кг, маса вантажу $m_{\text{вт}} = 10$ кг, діаметр велосипедного колеса $D = 26$ дюймів.

4. Зміст пояснювальної записки: 1) Аналітичний огляд ринку й літератури.
2) Розрахунок потужності двигуна і ємності акумуляторної батареї

електропривода. 3) Керування моментом безколекторного двигуна постійного струму. 4) Практична реалізації автоматичної системи електровелосипеда.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): 1) Схема електрична принципова силової частини електропривода. 2) Схема керування електровелосипедом.

6. Консультанти розділів проекту*

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| 4 | КОВБАСА С. М. | 07.05.2021 | 20.05.2021 |
| | | | |
| | | | |

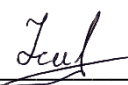
* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

7. Дата видачі завдання 01.04.2021

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проекту | Термін виконання | Примітка |
|-------|--|------------------|----------|
| 1 | Аналітичний огляд ринку й літератури | До 15.04.2021 | |
| 2 | Розрахунок потужності двигуна і ємності АКБ електропривода | До 22.04.2021 | |
| 3 | Керування моментом безколекторного двигуна постійного струму | До 06.05.2021 | |
| 4 | Практична реалізації автоматичної системи електровелосипеда | До 20.05.2021 | |
| 5 | Графічна частина | До 03.06.2021 | |
| 6 | Оформлення пояснювальної записки | До 10.06.2021 | |
| 7 | Підготовка доповіді на захист дипломного проекту | До 12.06.2021 | |

Студент


(підпис)

ІСИП М. О.
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

РОДЬКІН Д. І.
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ


Дипломний проект містить 80 сторінок, з них 68 – основного тексту, 53 рисунка, 12 таблиць, 3 аркуші графічної частини.

Мета проекту – розробка автоматичної системи керування електровелосипедом.

У даній роботі створено автоматичну систему керування електровелосипедом. Для цього виконано розрахунок електропривода, розробку алгоритмів керування електродвигуном, проектування схем управління.

Система керування електроприводом виконана на основі розробленого мікропроцесорного пристрою. Результати математичного моделювання в прикладному пакеті MATLAB довели успішність спроектованої електромеханічної системи автоматизації електровелосипеда.

МОТОР-КОЛЕСО, ЕЛЕКТРОВЕЛОСИПЕД, КОНТРОЛЕР, ДРОСЕЛЬ, РЕГУЛЯТОР, ТЯГОВИЙ, МОДЕЛЬ, МІКРОСХЕМА, АКУМУЛЯТОР, ГІСТЕРЕЗИС, МЕРТВИЙ ЧАС.

| | | | | | | | | |
|-----------|-------|---------------|---|------|--|---|------|---------|
| | | | | | 141.0004.019.БР | | | |
| Змн. | Лист. | № докум. | Підпис | Дата | | | | |
| Розробн. | | ІСИП М. О. |  | | Електромеханічна система автоматизації електровелосипеда | Літ. | Арк. | Аркушів |
| Керівн. | | РОДЬКІН Д. І. | | | | | 6 | 80 |
| Консульт. | | | | | | КПІ ім. Ігоря Сікорського Кафедра АЕМС-ЕП Гр. ЕП-71 | | |
| Н/Контр. | | | | | | | | |
| Зав. каф. | | ПЕРЕСАДА С.М. | | | | | | |

ABSTRACT


The diploma project contains 80 pages, from them 68 – the main text, 52 figures, 12 tables, 3 sheets of a graphic part.

The purpose of the project is to develop an automatic control system for an electric bicycle.

In this work, an automatic control system for an electric bicycle is designed. The calculation of the electric drive, the development of control algorithms for the motor and the design of control circuits have done for it.

The control system of the electric drive is made on the basis of the developed microprocessor device. The results of mathematical modeling in the MATLAB application package proved the success of the designed electromechanical electric bicycle automation system.

HUB DRIVE, ELECTRIC BICYCLE, CONTROLLER, THROTTLE, REGULATOR, TRACTION, MODEL, CHIP, BATTERY, HYSTERESIS, DEAD TIME.

| | | | | | | | | |
|-----------|-------|---------------|---|------|--|---|------|---------|
| | | | | | 141.0004.019.БР | | | |
| | | | | | | | | |
| Змн. | Лист. | № докум. | Підпис | Дата | Електромеханічна система автоматизації електровелосипеда | Літ. | Арк. | Аркушів |
| Розробн. | | ІСИП М. О. |  | | | | | |
| Керівн. | | РОДЬКІН Д. І. | | | | | 7 | 80 |
| Консульт. | | | | | | КПІ ім. Ігоря Сікорського Кафедра АЕМС-ЕП Гр. ЕП-71 | | |
| Н/Контр. | | | | | | | | |
| Затвердив | | ПЕРЕСАДА С.М. | | | | | | |

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 9 |
| 1. Аналітичний огляд ринку й літератури | 11 |
| 1.1. Електромеханічна систем електровелосипеда..... | 11 |
| 1.2. Основні типи акумуляторних батарей електровелосипедів..... | 14 |
| 1.3. Огляд електромеханічних і передавальних пристроїв електровелосипедів..... | 17 |
| 1.4. Схеми керування сучасними електровелосипедами | 25 |
| 2. Розрахунок потужності електродвигуна і ємності АКБ | 30 |
| 2.1. Розрахунок потужності тягового електродвигуна | 30 |
| 2.2. Розрахунок ємності тягової акумуляторної батареї..... | 35 |
| 3. Керування моментом безколекторного двигуна постійного струму | 38 |
| 3.1. Математичний опис БДПС | 38 |
| 3.2. Задача керування моментом БДПС | 41 |
| 3.3. Розв’язка задачі керування | 42 |
| 3.3.1. Синтез регулятор моменту | 42 |
| 3.3.2. Синтез регулятор струму | 45 |
| 3.4. Дослідження статичних і динамічних характеристик спроектованої системи керування..... | 48 |
| 4. Практична реалізація автоматичної системи електровелосипеда | 55 |
| 4.1. Розробка силової схеми електропривода | 55 |
| 4.2. Розробка схеми керування електровелосипедом | 60 |
| 4.2.1. Вибір елементів контролю й керування..... | 60 |
| 4.2.2. Вибір процесора і реалізація його контролера..... | 66 |
| 4.2.3. З’єднання зовнішніх сигналів з мікроконтролером..... | 69 |
| ВИСНОВОК..... | 74 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ | 76 |

ВСТУП

Складно заперечити, що люди завжди намагалися знайти для себе можливість переміщуватися з більшою швидкістю, щоб долати велику відстань за менший проміжок часу, в той же час з економією власних ресурсів. Так раніше використовували коней, волів для того, щоб їздити на них і перевозити вантажі. З плином часу потреби людства розширюються, а тому з'являються нові вимоги до способу пересування. Протягом 18-20 сторічь транспортні засоби ставали кращими – підвищувався комфорт, збільшувалася дальність і швидкість поїздки, з'являлися нові елементи керування й обладнання для забезпечення безпеки руху. Розширення потреб і особливостей перевезення людей і вантажів стимулювали створення різноманітних видів і типів транспорту, таких як вантажні й легкові автомобілі, автобуси, поїзди й мотоцикли. Для кожного з них розроблялися ефективні установки для приведення в рух і керування ними. Це призвело до появи парових двигунів, двигунів внутрішнього згорання й електричних двигунів. В певний час, а саме в кінці 19 і на початку 20 століть, ці приводні механізми, які можна сміливо вважати «серцем» автомобільного транспорту, конкурували між собою за звання найкращого. Парові двигуни майже відразу відійшли в історію через свою складність запуску, габаритність, яка обумовлена наявністю шатунно-кривошипного механізму, і малу потужність. Тому далі, впродовж сторіччя, продовжували конкурувати між собою електродвигуни й двигуни внутрішнього згорання. Останні ж набули найбільшого поширення через дешевий на той час вид палива і, найголовніше, дальність поїздки і швидкість заправки машини. Хоча електромобілі ще в 1912 році в журналі «Вог» позиціонувалися як жіночий автомобіль через простоту в експлуатації, відсутність запахів і менший рівень шуму, що є їхніми беззаперечними перевагами перед автомобілями з паливними двигунами.

Однак, енергетична криза в 70-х роках 20 століття розкрила досить очевидну істину про паливо для двигунів внутрішнього згорання, а саме нафту –

вона є обмеженою в надрах нашої планети. Такі високорозвинені капіталістичні країни як Німеччина, Англія, Японія і США зіштовхнулися з цією проблемою. Бажання мати енергетичну незалежність змусила по-новому глянути на електротранспорт.

В той же час, не довго чекаючи, насунулася нова криза, тепер вже екологічного характеру. Велика кількість викидів вуглекислого газу в атмосферу спричиняє парниковий ефект, через який поверхня земної кулі швидко нагрівається. Це призводить до змін клімату, що загрожує катастрофічними явищами, такими як глобальна посуха, затоплення прибережних зон Світовим океаном і їх похідними. Окрім цього, продукти згорання паливних двигунів є шкідливими для людей. Вони спричиняють ряд страшних захворювань, які вражають легені, серцево-судинну систему, очі й інші органи. Вже не говоримо про шумове забруднення, яке також має негативний вплив на здоров'я, і просте відчуття смороду від смогу. Кількість людей на планеті постійно збільшується, всім потрібен транспорт, і, бажано, власний. Але саме автомобілі є винуватцями близько 35 % всіх викидів парникових газів у повітря. У великих містах, таких як Київ, концентрація шкідливих речовин в атмосфері вже постійно знаходиться на дуже високому рівні.

Описані вище проблеми вимагають негайного вирішення, інакше наслідки можуть бути не відворотні й катастрофічні. Це призвело до появи в широкому користуванні різного роду електротранспорту, який в значній мірі поліпшує ситуацію з критичними енергетичними й екологічними питаннями. Багато досліджень вказують на те, що саме транспортні засоби на електричній тязі є нашим найближчим майбутнім. Один із чудових прикладів – електровелосипеди. Вони є найпоширенішими серед всіх інших видів електротранспорту. На даний момент існує велика кількість різновидів, які призначенні для найрізноманітніших потреб. Враховуючи все це, **метою дипломної роботи** є розробка простої та ефективної системи керування електромеханічною автоматизованою системою електровелосипеда заради досягнень у розвитку новітнього транспорту і сталої енергетики.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РИНКУ Й ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Електромеханічна система електровелосипеда

Для початку варто зрозуміти, що ж собою представляє електровелосипед. Згідно одного з найпопулярніших журналів у світі на велотематику «Bicycling» [1], це такий механічний транспортний засіб, який приводиться в рух за допомогою електродвигуна в поєднанні з силою м'язів людини. Тут варто чітко розрізняти електровелосипед (electric bicycle), електроскутер (electric scooter) і звичайний велосипед (regular bicycle).

Звичайний велосипед не містить у своїй конструкції жодного тягового двигуна. Він приводиться в рух лише завдяки зусиллю велосипедиста – найчастіше ногами (рис. 1.1, а), але є й моделі, в яких використовується сила рук (рис. 1.1, б).



Рисунок 1.1 – Види звичайних велосипедів в залежності від способу приведення в рух: а) ногами; б) руками

Велосипеди, які приводяться в рух силою рук, зазвичай використовується людьми з інвалідністю ніг або спини.

Звичайні велосипеди діляться на багато типів, які характеризують їх призначення. Це можуть бути дорожні, спортивні, дорожньо-спортивні велосипеди й багато інших [2]. Вони визнані найкращим видом транспорту через

те, що загартовують здоров'я – зміцнюють м'язи, стимулюють кровообіг; мають низьку вартість, високу надійність і екологічну безпеку, а також безшумність [3].

Електроскутер являє собою різновид мопедів, в яких приводний рух здійснюється тільки за допомогою електродвигуна (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Електроскутер Schwalbe фірми Govecs

Такі транспортні засоби характеризуються високим комфортом, достатньо великою дальністю поїздки на одному заряді (60 – 100 км) і швидкістю руху (60 – 80 км/год), а також значною вагою (приблизно 80 кг). В даний час електроскутери є чи не найкращим вибором для міста, адже поїздки на ньому є дуже дешевими і комфортними.

Електровелосипед – це гібрид електроскутера і звичайного велосипеда. Обов'язковою умовою цього транспорту є те, що приводний рух має здійснюватися як за допомогою людської сили, так і за допомогою електричної тяги. В той же час, існує певна ступінь гібридності. Наприклад є деякі електровелосипеди, в яких переважно використовується електрична тяга, а людська сила для приведення в рух не потрібна. І навпаки, існують моделі, в яких електродвигуни застосовуються лише для того, щоб в якусь міру полегшити навантаження, які долає велосипедист за допомогою власної сили. Простіше кажучи, будь-який електровелосипед повинен містити у своїй конструкції приводний електродвигун і педалі з системою передачі (найчастіше шестерня по

типу зірка – ланцюг – зірка). У разі, якщо акумуляторна батарея розрядиться, водій має змогу рухатися за допомогою власних зусиль.

Наведемо загальну функціональну схему електромеханічної системи (ЕМС) автоматичного керування електровелосипедом (ЕВ) (рис. 1.3).

Як бачимо на рис. 1.3, електромеханічна система автоматичного керування складається з джерела енергії (ДЕ), перетворювального пристрою (ПП), електродвигунного пристрою (ЕДП), передавального пристрою (ПДП), робочої машини (РМ) і керуючого пристрою (КП).

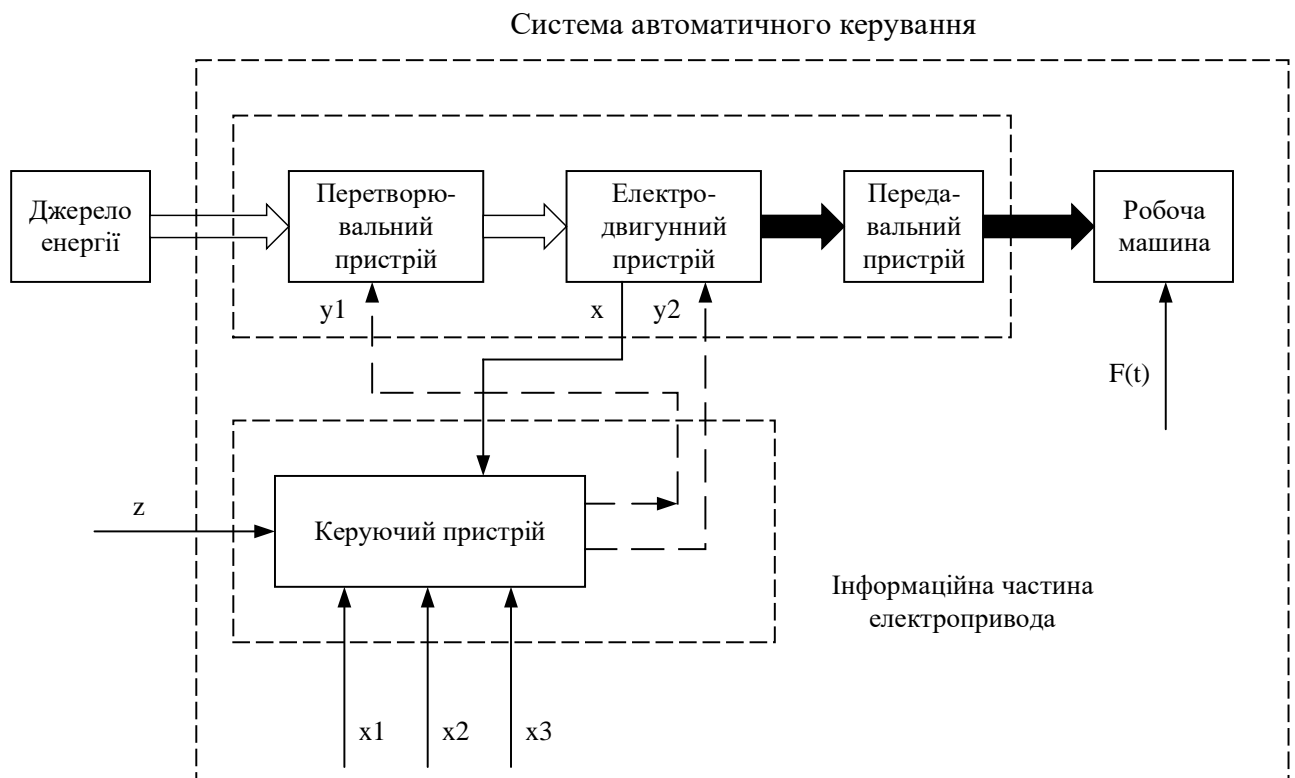


Рисунок 1.3 – Електромеханічна система автоматичного керування електровелосипедом

Розглянемо детальніше кожну з частин ЕМС, що використовується в системах електровелосипедів.

1.2. Основні типи акумуляторних батарей електровелосипедів

Оскільки електровелосипеди потребують автономного джерела живлення, то в його якості використовують акумуляторні батареї (АКБ), що обов'язково повинні перезаряджатися.

В електровелосипедах можуть використовуватися кілька типів акумуляторних батарей, які різняться матеріалами для виготовлення електродів і електролітів. Коротко розглянемо кожен із них для того, щоб визначити найоптимальніший для застосування.

1) Свинцева акумуляторна батарея (кислотна).

У свинцево-кислотній АКБ в якості електродів служать пластини зі свинцю й окису свинцю, а електроліт являється розчином сірчаної кислоти.

Цей тип акумуляторної батареї вимагає обслуговування, що проявляється в необхідності доливати дистильовану воду для забезпечення необхідного рівня електроліту. Крім цього, його щільність енергії є дуже малою, а тому для забезпечення потрібної енергетичної ємності необхідно встановлювати акумулятор зі значними масо-габаритними розмірами. Зазвичай він втрачає більшу частину своєї електричної ємності вже через 6 років, а також існує великий ризик витоку електролітичної кислоти в разі пошкодження. Через описаний ряд недоліків свинцева АКБ значно поступається сучаснішим типам, а тому майже не використовується в якості високовольтних тягових джерел живлення.

2) Нікель-кадмієві і нікель-металогідридні акумуляторні батареї (лужні).

В нікель-кадмієвих акумуляторних батареях в якості матеріалу електродів використовується кадмій і з'єднання нікелю, а електролітом служить гідроксид калію. Цей тип тягових АКБ володіє більшою щільністю енергії, ніж свинцево-кислотний, а також більш стійкий до пошкоджень і витікання електроліту. Однак такі акумулятори мають два значних недоліка, а саме: кадмій і його сполуки отруйні; наявність ефекту пам'яті. Це робить їх практично непридатними для повноцінного використання в електровелосипедах.

Ефект пам'яті змушує батарею приймати і тримати менше заряду, тобто поступово втрачається енергетична ємність, якщо вони багаторазово перезаряджаються після неповної зарядки.

У нікель-металогідридних АКБ в якості матеріалу для електродів використовується з'єднання нікелю й іншого металу. Електролітом являється гідроксид калію. У свою чергу вони мають більшу щільність енергії, ніж нікель-кадмієві та відносно стійкі до пошкоджень. Ефект пам'яті також проявляється в меншій мірі.

Властивим недоліком цього типу АКБ також є зниження коефіцієнту корисної дії (ККД) протягом терміну служби, хоча такі втрати до певної міри усуваються. Перевагою нікель-металогідридних акумуляторів є те, що вони не містять отруйні важкі метали, такі як свинець або кадмій. Окрім цього, електроліт має твердий вигляд, а тому в разі руйнування корпусу можливі лише окремі бризки.

3) Літій-іонні акумуляторні батареї.

Даний тип акумуляторних батарей є найбільш сучасним і поширеним в електровелосипедах.

В якості електродів використовуються різні оксиди металевого літію і графіту, а електролітом є різні розчинники для солей літію. В літій-іонних батареях міститься тільки незначна кількість води, відсутній ефект пам'яті. У порівнянні з нікель-кадмієвими батареями вони мають майже удвічі більшу щільність енергії. З описаними перевагами такий тип АКБ сильно перевершує попередні, а тому найбільша частка електровелосипедів на ринку саме з літій-іонними джерелами живлення. Однак, існує й значний недолік. Він полягає в тому, що при нагріванні в батареї може початися процес розпаду, що ймовірно призведе до займання та виділення шкідливих для здоров'я газів. Це змушує використовувати додаткові елементи контролю циклів зарядки й розрядки акумулятора, його температури тощо. Для цього використовується система керування батареєю – так звана BMS (Battery Management System). Принцип роботи такої системи полягає в постійному моніторингу стану батареї та її

компонентів. При знаходженні якого-небудь небезпечного фактору плата керування відключає батарею. Таким чином, забезпечується безпечна робота батареї в усіх режимах, виконується балансування акумуляторів у збірці (рівномірний розподіл енергії), контролюється температура живильних елементів, їх напруга й опір.

Літій-іонний акумулятор – це не якийсь конкретний вид батарей з єдиним затвердженим складом, а ціле сімейство батарей з різними складами електрохімічних елементів. Кожен тип підходить для конкретної сфери застосування, а в якості тягових АКБ використовуються наступні:

- літій-марганцевий;
- літій-нікель-марганець-кобальт-оксидний;
- літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидний;
- літій-титанатний;
- літій-залізо-фосфатний.

Основні параметри, якими характеризується тягова АКБ:

- 1) щільність енергії ($\text{Вт} \cdot \text{год} / \text{кг}$) – кількість енергії, яка може зберігатися в даній масі речовини;
- 2) довговічність батареї – описується параметром стійкості до багаторазових циклів розрядки-зарядки, від умов використання, включаючи температуру навколишнього середовища;
- 3) коефіцієнт корисної дії – показує кількість енергії, витраченої на зарядку, яку можна буде знову використати при розряді акумуляторної батареї. Пояснюється тим, що незначна частина енергії зарядки розсіюється у вигляді теплової енергії;
- 4) ємність батареї – параметр, що характеризує дальність поїздки на одному заряді. Хоча це також залежить від конструкції, ваги електровелосипеда, типу електродвигуна тощо.

1.3. Основні електродвигунні і передавальні пристрої електровелосипедів

Розглянемо основні електродвигунні пристрої, які використовуються в електровелосипедах.

Існує два найпоширеніших типи виконання електродвигунів для електровелосипедів – мотор-колесо і середній привід. Опишемо кожен з них детальніше.

1) Мотор-колесо.

Мотор-колесо – це такий тип електричного двигуна, конструкція якого пояснюється самою назвою. Найперше, чим він вирізняється, так це те, що обертається саме статор, а не ротор. Ротор фіксується на осі обертання колеса, а статор може бути двох типів – становити повністю готовий обід колеса або бути матчиною, яка кріпиться спицями до обода. В електровелосипедах найчастіше використовується другий варіант через великий діаметр стандартного велосипедного колеса й електродвигуна такої потужності, що відповідає його малим масо-габаритним розмірам (рис. 1.4).

Найчастіше в якості мотор-колеса застосовується безколекторний (безконтактний) двигун постійного струму (БДПС).



Рисунок 1.4 – Велосипедне мотор-колесо

Статор БДПС являється якорем. Він містить в собі осердя з електротехнічної сталі й трифазну мідну обмотку, вкладену в пази по периметру осердя.

Ротор БДПС є його індуктором. Виготовляється з використанням постійних магнітів і має звичайно від двох до восьми пар полюсів з чергуванням північного й південного полюсів.

Ще одним необхідним конструктивним елементом БДПС є датчик положення ротора. Він реалізовує зворотний зв'язок за положенням ротора. Його робота може бути заснована на різних принципах – фотоелектричний, індуктивний, на ефекті Холла і т.д. Найбільшу популярність отримали давачі Холла, оскільки вони безінерційні і дозволяються позбутися запізнення в каналі зворотного зв'язку за положенням ротора. Вони представляються собою тонку напівпровідникову пластинку з нанесеними на ній контактними площадками, до яких припаяні виводи, що підключені до джерела живлення, і виводи, з яких знімається вихідний сигнал.

Безконтактний тип двигуна було розроблено з метою поліпшення властивостей двигунів постійного струму. Основна відмінність полягає в тому, що в них щітково-колекторний вузол замінено напівпровідниковим комутатором (інвертором), керованим сигналами, що надходять із безконтактного датчика положення ротора. Структурна схема БДПС зображена на рис. 1.5, а конструкція мотор-колеса на його базі показана на рис. 1.6.

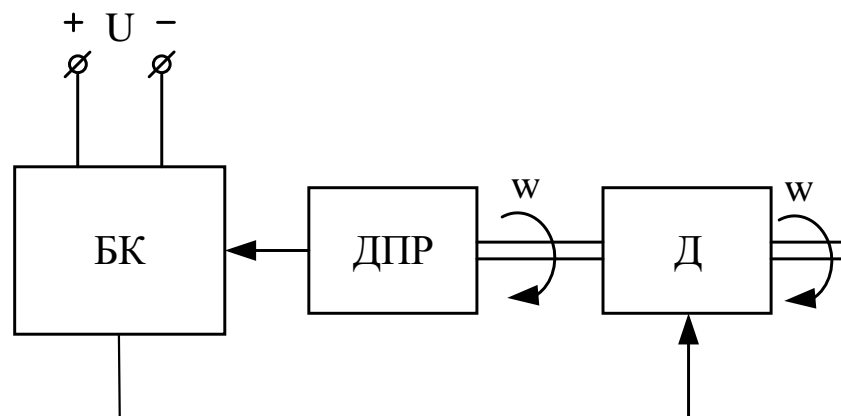


Рисунок 1.5 – Структурна схема безконтактного двигуна постійного струму



Рисунок 1.6 – Конструкція мотор-колеса на базі БДПС

На структурній схемі БДПС (рис.1.5) зроблено такі позначення: БК – блок керування, Д – двигун, ДПР – датчик положення ротора.

Принцип дії [4] БДПС полягає у використанні давача положення ротора, перетворювача координат і силового напівпровідникового перетворювача. Вони спільно формують на обмотках статора машини фазні напруги таким чином, щоб результуючий вектор напруги завжди був зсунутий на кут 90 градусів і нерухомий щодо осі магнітного поля ротора.

Комутація проводиться так, що потік збудження ротора підтримується постійним щодо потоку якоря. В результаті взаємодії потоку якоря і збудження створюється обертовий момент, який прагне розвернути ротор так, щоб потоки якоря і збудження збігалися, але при повороті ротора під дією ДПР відбувається перемикання обмоток і потік якоря повертається на черговий крок.

В цьому випадку і результуючий вектор струму буде зсунений і нерухомий щодо потоку ротора, який і створює момент на валу двигуна.

Принцип роботи безколекторного двигуна постійного струму дуже схожий на той, який в синхронного двигуна. Основною відмінністю є його самосинхронізація за допомогою ДПР, внаслідок чого у БДПС, навпаки, частота обертання поля пропорційна частоті обертання ротора, а частота обертання ротора залежить від напруги.

Мотор-колесо може мати передавальний пристрій, що являє собою редуктор. Найчастіше застосовується планетарний механізм (рис. 1.7). Він може

бути зроблений з металу, але звичайно, для здешевлення пристрою, використовують пластмасу, а саме – різновид текстоліту. Як показує практика, металеві механізми можуть мати навіть меншу експлуатаційну витривалість через більшу міцність, що спричиняє сильніші удари й, відповідно, швидше зношування. Пластиковий редуктор не схильний до цього, бо має певну пружність і меншу масу, тому з використанням спеціального мастила може служити багато років поспіль. Окрім цього, його виготовляють таким чином, щоб зовнішня шестерня, яка кріпиться до корпусу, була міцніша за внутрішні, і не стиралася. Це дозволяє замінювати лише останні, що набагато спрощує ремонт двигуна.



Рисунок 1.7 – Редукторне мотор-колесо з планетарним механізмом

Планетарний редуктор використовується з кількох причин. По-перше, він підходить за формою до мотор-колеса і на займає багато об'єму. По-друге, найголовніше, дозволяє їхати на електровелосипеді в режимі холостого ходу. Справа в тому, що коли на двигун не подається живлення для роботи, через інерцію транспортного засобу рух продовжується. В цей момент відбувається режим рекуперативного гальмування, який повертає механічну енергію руху назад в електричну енергію. Оскільки дуже часто електровелосипед має малу вагу, його інерція також становить зовсім невелике значення. Через це, ефективність рекуперативного гальмування ставиться під питання. Це підкріплюється ще тим, що в разі розряду акумулятора, велосипедист повинен додатково долати силу, яка використовується для генерування енергії двигуном.

Такі навантаження дуже великі і можуть становити реальні обмеження на пересування без зарядженого джерела живлення.

Ще одна перевага редукторного мотор-колеса полягає в зменшених масо-габаритних розмірах при тій же потужності.

Мотор-колесо може не мати передавального пристрою. Тоді воно називається прямохідним.

Перевагами прямохідного мотор-колеса є висока надійність і практична безшумність, що обумовлені відсутністю рухомих механічних з'єднань між ЕДП і РО.

Існують задні й передні мотор-колеса, яка обумовлюються встановленням їх відповідно в якості заднього і переднього колеса. Відмінності полягають в керованості й конструкції. На задньому колесі встановлюється касета з зірками-шестернями для приводу двигуна за допомогою ланцюгової передачі. Також відрізняється діаметр осей коліс, що кріпляться до конструкції велосипеда (до рами й вилки). Електровелосипеди з переднім мотор-колесом більше схильні до прокручування, яке може становити небезпеку під час проходження повороту.

Перевагами мотор-коліс є:

- універсальність – швидке встановлення в конструкцію майже будь-якого велосипеда;
- доступність – наявність на ринку великої кількості моделей різних розмірів і параметрів;
- широкий вибір робочої потужності (від 250 Вт до 10 000 Вт);
- у випадку прямохідного мотор-колеса – висока надійність, безшумність, плавність ходу;
- у випадку редукторного колеса – високий момент при малих масо-габаритних розмірах, наявність режиму холостого ходу, простота в обслуговуванні.

Недоліками є:

- підвищенні навантаження через розташування двигуна в колесі – отримання збільшених коливань, частих ударів і т.д. Це призводить до

швидшого зношування механічних частин електродвигуна. Найбільше від цього страждають постійні магніти на роторі. Відламування шматків не просто виводить двигун з ладу, а ще й може спричинити блокування обертання колеса. Така аварійна ситуація становить значну небезпеку для водія. Ймовірність збільшується пропорційно масі мотор-колеса. Через це намагаються все-таки перейти на реактивні синхронні двигуни, в яких збудження відбувається не за допомогою постійних магнітів, а завдяки чергуванню більш магнітопроникних областей на індукторі з меншими.

- зміщення центру мас від середини електровелосипеда до його краю, що негативно впливає на керування транспортним засобом.

2) Середній привод.

Як і у випадку з мотор-колесом, назва даного типу двигуна також пояснює його головну особливість – він розміщений посередині електровелосипеда (рис. 1.8). Метою є досягнення найкращої керованості транспортним засобом шляхом зосередження такого важкого елементу як приводний механізм з двигуном і платою керування максимально низько й по-центру конструкції. Це утворює найоптимальніший центр мас, який найменшим чином впливає на керованість велосипедом.

В загальному випадку середній привод складається з електродвигуна, редукторного механізму передачі, а також плати керування та датчиків зусилля й частоти обертання педалей. Всі ці елементи знаходяться в одному корпусі, який кріпиться в зоні педального вузла.



Рисунок 1.8 – Середній привод компанії Bafang

В якості електродвигуна найчастіше використовується все той же безколекторний двигун постійного струму, про який було написано раніше. Знову ж таки через надійність, простоту керування й високий обертальний момент.

Існує кілька найпопулярніших моделей такого типу привода. Вони поділяються на повністю інтегровані й напівінтегровані. До перших відносяться електродвигуни таких відомих виробників як Bosch (рис. 1.9, а), Shimano (рис. 1.9, б), Yamaha і т.д.



Рисунок 1.9 – Інтегровані середні приводи від фірми: а – Bosch; б – Shimano

Для обладнання велосипеда інтегрованим середнім приводом, потрібно мати раму, конструкція якої передбачає таке встановлення. Редукторний механізм в даному випадку найчастіше складається зі шківів та ременя (рис. 1.10, а), однак може бути шестерно-ланцюговим (рис. 1.10 б) або просто шестерним (рис. 1.11).

Найкращими представниками напівінтегрованого типу середнього привода є електродвигуни компаній Bafang і Mxus, що зображені відповідно на рис. 1.12, а і рис. 1.12, б.

Напівінтегровані середні приводи можна встановлювати на звичайні велосипедні рами. Вони найчастіше мають планетарні редукторні механізми передачі (рис. 1.13).

Робочим органом будь-якого велосипеда являється його колесо. У випадку застосування середнього привода, електродвигун не здатний самостійно обертати колесо, так як призначений лише для допомоги водієві долати зусилля

обертання педалей. Якщо велосипедист не обертає педалі, тоді й відсутня передача енергії від електродвигуна до колеса.

Якщо використовується мотор-колесо, то воно обов'язково жорстко з'єднано з велосипедним колесом, через що фактично і являється одночасно робочим органом.



а)



б)

Рисунок 1.10 – Механічні передачі інтегрованих середніх приводів: а – шківо-ремінна; б – шестерно-ланцюгова



Рисунок 1.11 – Середній привод з шестеренним механізмом



а)



б)

Рисунок 1.12 – Напівінтегровані середні приводи від фірми: а – Bafang, б – Mxus



Рисунок 1.13 – Напівінтегрований середній привод з планетарним редуктором

Перевагами середніх приводів є:

- оптимальний центр мас, що гарантує стійкість електровелосипеду і гарну керованість ним;
- висока технологічність, яка забезпечує енергетичну ефективність;
- компактність;
- надійність.

До недоліків слід віднести наступне:

- висока вартість;
- наявність механізму передачі;
- необхідність обслуговування;
- невеликий вибір моделей на ринку;
- вузький вибір робочої потужності (зазвичай 250 Вт, і лише в окремих випадках до 1000 Вт).

1.4. Схеми керування сучасними електровелосипедами

Перетворюючий і керуючий пристрої зазвичай поєднують в одну систему, яка називається контролером. Він представляє собою силовий перетворювач струму і відповідну плату керування на основі мікроконтролера. Таким чином, даний прилад виконує дві основні функції – перетворення струму від джерела

живлення до електродвигуна і навпаки, а також керування електроприводом та іншими елементами, якими обладнаний електровелосипед (освітлення, сигнал, моніторинг інформації про швидкість, дальність поїздки, ємність акумулятора тощо, а також інші функції, які полягають в перемиканні швидкісних режимів, увімкнення круїз-контролю, безінерційному відключенню електродвигуна, захисті і т.д.).

На рис. 1.14 показано стандартний тип контролера, що найчастіше представляється на ринку компонентів для електровелосипеда у світі.

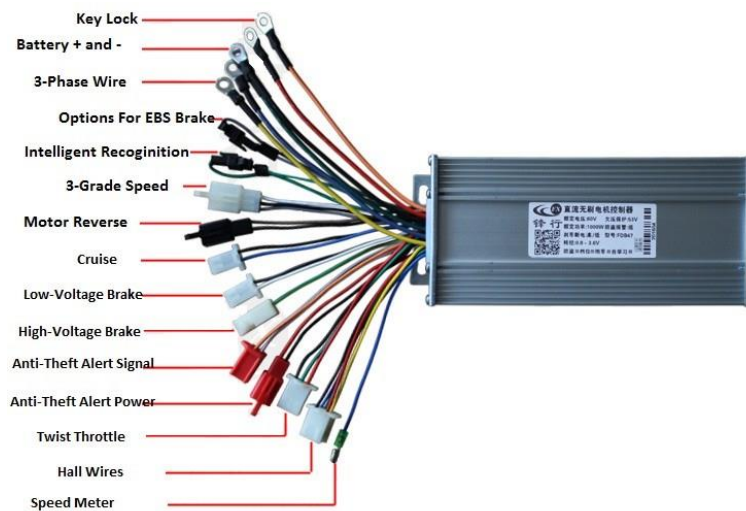


Рисунок 1.14 – Контролер керування електровелосипедом

Система керування містить силові ключі, часто тиристори або силові транзистори з ізольованим затвором. Такі елементи називаються вентилями, що дає ще одну назву для безколекторного двигуна – вентильний (ВД). З них збирається інвертування напруги або струму. Велика кількість обчислювальних операцій керування двигуном вимагає наявності мікропроцесора.

Різноманітність прийомів і способів керування частотою обертання вентильним двигуном можна звести до двох структурних схем [5], що зображені на рис. 1.15, а і рис. 1.15, б.

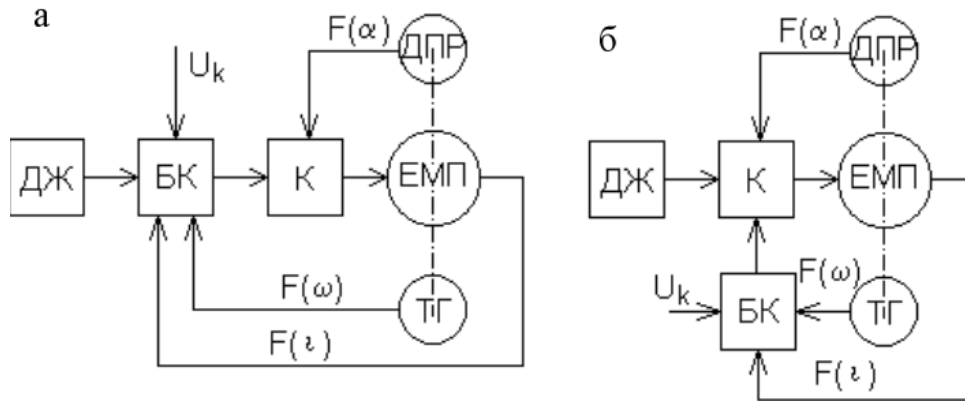


Рисунок 1.15 – Структурні схеми керування швидкістю вентильного двигуна

На рис. 1.15 вказано такі позначення: ДЖ – джерело живлення, БК – блок керування, К – комутатор, ЕМП – електромеханічний перетворювач, ДПР – датчик положення ротора, ТГ – тахогенератор.

На схемі а) весь потік потужності від джерела живлення проходить через блок керування БК, який є підсилювачем лінійного, релейного або імпульсного типу, і який керується сигналом U_k . Далі потік потужності, перетворений відповідно з обраним законом керування, що визначається типом підсилювача БК і характером зворотних зв'язків за швидкістю і струмом, надходить на комутатор К і розподіляється по секціях ВД згідно з сигналами ДПР за законом. Зворотний зв'язок за струмом двигуна обмежується, як правило, випадками струмообмеження під час пуску.

ВД може мати тахометричний вузол ТГ, який продукує сигнал зворотного зв'язку за швидкістю.

Помітною особливістю структурної схеми на рис. 1.14, а є наявність блока керування БК, який має бути розрахованим на повну потужність, що споживається двигуном під час керування.

На схемі рис. 1.14, б потік потужності від джерела живлення ДЖ надходить безпосередньо на комутатор двигуна К. Блок керування БК, який керується напругою U_k , впливає на комутатор за допомогою сигналів малої потужності. Отже, в цьому випадку функцію керованого підсилювача виконує власне комутатор двигуна К, а блок керування БК тільки формує керувальну функцію.

Встановлена потужність БК в схемі б) є меншою, ніж у схемі а), що забезпечує переваги за габаритами, вартістю й простотою всієї схеми.

Наявність повністю керованих силових електронних елементів у колах статорних обмоток ВД дозволяє використати їх і для регулювання частоти обертання будь-якими з відомих способів керування. Вибір способу регулювання залежить від конкретних умов роботи приводу й типу електромеханічного перетворювача. Амплітудно-імпульсна модуляцію сприятлива для електромеханічного перетворювача, але спричиняє підвищення втрат на силових ключах комутатора. Широтно-імпульсна модуляція зумовлює додаткові втрати від вищих гармонік в електромеханічному перетворювачі і збільшенню динамічних втрат на перемикання силових ключів комутатора. Для формування жорстких механічних характеристик при загаданих способах керування необхідно застосовувати системи авторегулювання.

Елементи для задання сигналу на зміну швидкості в електровелосипедах за принципом дії розрізняються на дроселі й PAS, що розшифровується як Pedal Assist System.

Дроселі використовуються в якості ручки газу, за допомогою якої можна вручну змінювати швидкість від нуля до максимальної. Вони влаштовуються на керму. Найбільшого застосування одержали в електровелосипедах першого типу гібридності.

Система PAS – сучасна розвинена система керування електровелосипедом. Спеціально розроблена для того, щоб керувати швидкістю за допомогою обертання педалей. Цей спосіб максимально зближує відчуття з поїздкою звичайним велосипедом.

Також в електровелосипедах використовуються різноманітні прилади контролю ємності акумуляторної батареї, кнопки перемикання швидкісних режимів, пристрої відмикання електродвигунів під час натискання на гальма, елементи освітлення, GPS-навігатори, спідометри і навіть проєктуються системи на основі штучного інтелекту, які попереджають водія про можливу небезпеку на дорозі, показують сліпі зони тощо.

Висновок до розділу 1.

В цьому розділі дипломного проєкту виконано аналітичний огляд сучасних типів систем електровелосипедів на ринку у світі й описано основні елементи електроприводу задля розуміння основних можливостей даного транспортного засобу на цей час і формування технологічних вимог.

- 1) Серед типів автономних джерел живлення, які можуть використовуватися в електровелосипедах, найкращим варіантом є літій-іонні акумуляторні батареї. Основна перевага полягає у великій енергетичній щільності в порівнянні з іншими типами.
- 2) В електровелосипедах в якості електромеханічного пристрою найчастіше використовують безколекторні двигуни постійного струму. Це пояснюється їхньою надійністю, великою потужністю при відносно невеликих габаритах і простотою керування. Двигуни можуть виконуватися у конструкції мотор-колеса або середнього привода. Найчастіше ці пристрої містять планетарні механізми в якості редуктора, що дозволяють зменшити габарити двигуна при майже тій самій потужності.
- 3) Перетворювальний і керуючий пристрої об'єднуються в одному корпусі. Такий прилад називається контролером. Він виконує функцію силового перетворення енергії для живлення й керування двигуна, а також здійснює функції управління всіма необхідними елементами системи електровелосипеда – світло-звуковим обладнанням, пультом керування, інформаційною панеллю тощо.

Електровелосипед повинен бути безпечним, енергетично ефективним і комфортним транспортним засобом.

2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА І ЄМНОСТІ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ

Одним з найголовніших завдань у розробці системи електроприводу електровелосипеду є забезпечення потрібної дальності подорожі на ньому із заданою середньою швидкістю руху [6] і безпеки під час поїздки.

Виконаємо електрифікацію звичайного гірського велосипеда з вимогою долати до 25 км відстані на одному заряді акумуляторної батареї із середньою швидкістю руху 25 км/год.

Для розрахунку системи електроприводу приймемо наступні технічні дані:

- маса електровелосипеда після повної електрифікації $m_{ев} = 20$ кг;
- середня маса водія $m_{в} = 80$ кг;
- середня маса вантажу $m_{вт} = 10$ кг;
- діаметр колеса велосипеда $D_{к} = 26$ дюймів.

2.1. Розрахунок потужності тягового електродвигуна

Для розрахунку потужності електродвигуна потрібно врахувати дві складові навантаження. Перша складова – це статичний момент, що створюється всіма гальмуючими силами. Їх можна знайти за наступним виразом:

$$F = F_{тр} + F_{оп}, \quad (2.1)$$

де $F_{тр}$ – сила тертя коліс об асфальт, $F_{оп}$ – сила опору повітря.

Сила опору тертя знаходиться за допомогою формули:

$$F_{тр} = \mu \cdot m \cdot g = 0,0035 \cdot 110 \cdot 9,81 = 4 \text{ (Н)}, \quad (2.2)$$

де $\mu = 0,0035$ – коефіцієнт тертя при взаємодії резини з асфальтом;
 $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; m – повна маса електровелосипеда з водієм і вантажем:

$$m = m_{\text{ев}} + m_{\text{в}} + m_{\text{вт}} = 20 + 80 + 10 = 110 \text{ (кг)}. \quad (2.3)$$

Сила опору повітря виражається формулою:

$$F_{\text{оп}} = C_x \cdot S \cdot \rho \cdot \left(\frac{v^2}{2} \right) = 1,1 \cdot 0,63 \cdot 1,29 \cdot \left(\frac{7^2}{2} \right) = 22 \text{ (Н)}, \quad (2.4)$$

де $C_x = 1,1$ – коефіцієнт лобового опору або коефіцієнт обтічності;

S – лобова площа, яка визначається наступним чином:

$$S = 0,5 \cdot h \cdot w = 0,5 \cdot 1,8 \cdot 0,7 = 0,63 \text{ (м}^2\text{)}, \quad (2.5)$$

де $h = 1,8 \text{ м}$ та $w = 0,7 \text{ м}$ – середня висота і ширина посадки водія на транспортному засобі відповідно (рис. 2.2); $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря; $v = 4 \text{ м/с}$ – середня швидкість руху електровелосипеда.

Коефіцієнт обтічності визначається експериментально шляхом обдування моделі в аеродинамічній трубі. Оскільки розрахунок проводиться на етапі розробки, то це число вибрано приблизно, враховуючи значення цього коефіцієнту вже для існуючих велосипедів. Тому, беручи до уваги високу посадку водія, а також візуальні особливості електровелосипеда, було вирішено прийняти це число рівним $C_x = 1,1$.

Найбільший аеродинамічний опір діє в напрямку, який протилежний руху електровелосипеда, тому площу лобової поверхні знаходимо так, як показано на рис. 2.2.

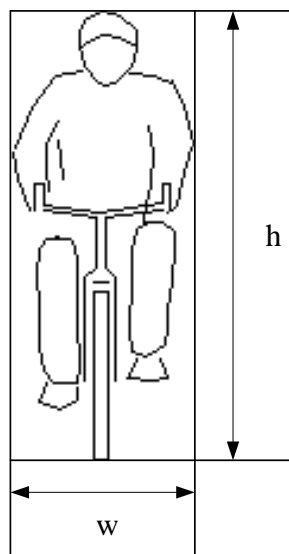


Рисунок 2.1 – Визначення лобової площі електровелосипеда

Таким чином, згідно з (2.1), сила, яка потрібна для подолання сил опору буде дорівнювати

$$F_T = 4 + 22 = 26 \text{ Н.} \quad (2.6)$$

Для визначення статичного моменту необхідно порахувати коефіцієнт приведення:

$$r = \frac{R_k}{i_p}, \quad (2.7)$$

де i_p – передатне число, R_k - радіус колеса в метрах.

Найчастіше в редукторних мотор-колесах використовується передатне число $i_p = 3$. Радіус колеса в метрах R_k знаходиться наступним чином:

$$R_k = \frac{D_k}{2 \cdot d} = \frac{26}{2 \cdot 39,4} = 0,33 \text{ (м)}, \quad (2.8)$$

де d – коефіцієнт приведення дюймів до метру.

Відповідно до (2.7), радіус приведення буде

$$r = \frac{0,33}{3} = 0,11. \quad (2.9)$$

Тепер можемо знайти статичний момент навантаження:

$$M_{ст} = \frac{F_T \cdot r}{\eta_m} = \frac{26 \cdot 0,11}{0,8} = 3,6 \text{ (Нм)}, \quad (2.10)$$

де $\eta_m = 0,8$ – середнє значення коефіцієнту корисної дії всього механізму.

Слід врахувати, що отриманого значення потужності електродвигуна вистачить тільки для того, щоб долати сили опору руху при звичайних погодних умовах на рівній поверхні. Врахуємо також зусилля для руху вгору по похилій площині і складні погодні умови, такі як сильний вітер, та збільшимо розрахункове значення статичного моменту у два рази.

$$M'_{ст} = 2 \cdot M_{ст} = 2 \cdot 3,6 = 7,2 \text{ (Нм)}. \quad (2.11)$$

Друга складова, яку потрібно врахувати, це динамічний момент навантаження, оскільки електровелосипед є досить інерційним механізмом.

Для безпечного руху водія, розрахуємо лінійне прискорення таким чином:

$$a = \frac{2S}{t^2} = \frac{2 \cdot 100}{15^2} = 0,9 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right). \quad (2.12)$$

У формулі (2.12) вважаємо, що електровелосипед з початку руху проїжджає 100 метрів за 15 секунд. Це комфортний розгін транспортного засобу на дорозі.

Тоді, кутове прискорення дорівнюватиме:

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{0,9}{0,11} = 8,2 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right). \quad (2.13)$$

Динамічний момент знаходимо за наступною формулою:

$$M_{\text{дн}} = J'_B \varepsilon = 1,3 \cdot 8,2 = 10,7 \text{ (Нм)}, \quad (2.14)$$

де J'_B – приведений до валу двигуна момент інерції електровелосипеда, що знаходиться за формулою:

$$J'_B = m \cdot r^2 = 110 \cdot 0,11^2 = 1,3 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}. \quad (2.15)$$

Повний момент двигуна при розгоні дорівнює:

$$M = M_{\text{ст}} + M_{\text{дн}} = 7,2 + 10,7 = 18 \text{ (Нм)}. \quad (2.16)$$

Кутову швидкість електродвигуна знайдемо за такою залежністю:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{7}{0,11} = 63 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right). \quad (2.17)$$

Отже, виберемо мотор-колесо на базі БДПС з вбудованими давачами Холла від компанії Aegean Dynamics [7], що зображений на рис. 2.3. Його основні технічні характеристики занесено до табл. 2.1.

Планетарний редуктор та обгінну муфту для двигуна замовимо на сайті Lancereal [8].



Рисунок 2.2 – Електродвигун Aegean Dynamics

Таблиця 2.1 – Паспортні дані вибраного електродвигуна

| Характеристика | Значення |
|--|----------|
| 1 | 2 |
| Номінальна потужність, кВт | 0,5 |
| Номінальна напруга, В | 48 |
| Номінальна кутова швидкість, рад/с | 70 |
| Кутова швидкість холостого ходу, рад/с | 85 |
| Номінальний струм, А | 11 |
| Номінальний момент, Нм | 7,8 |
| Струм короткого замикання, А | 243 |
| Момент короткого замикання, Нм | 136 |
| Коефіцієнт корисної дії, % | 85 |
| Кількість фаз | 3 |
| Кількість пар полюсів | 15 |
| Активний опір, мОм | 196 |
| Індуктивність, мГн | 0,56 |
| Стала моменту | 0,57 |
| Стала проти-ЕРС | 0,57 |
| Маса, кг | 5,8 |

Перевіримо двигун за максимальним моментом. Для цього знайдемо відношення максимального моменту до повного розрахованого.

$$\frac{M_{\max}}{M} = \frac{136}{18} = 7,6. \quad (2.18)$$

Як бачимо, максимальний момент двигуна більший ніж в 7 разів за номінальний.

2.2. Розрахунок ємності тягової акумуляторної батареї

Порахуємо значення енергетичної ємності акумуляторної батареї, яке потрібне для поїздки на задану відстань $l = 25$ км при швидкості $v' = 25$ км/год. Для цього використаємо наступну залежність:

$$Q = P_n \cdot t = P_n \cdot \frac{l}{v'} = 500 \cdot \frac{25}{25} = 500 \text{ (Вт} \cdot \text{год)}. \quad (2.19)$$

В якості автономного джерела енергії буде використовуватися саме літій-іонна акумуляторна батарея через ряд значних переваг. Відомо, що для довгочасної роботи такого елемента живлення, треба обмежити заряджання до 80-90%, а розряджання до 10-20%. Тобто, використовувана ємність дорівнюватиме приблизно 70% від повної. Згідно цього, виконаємо перерахунок необхідної ємності АКБ:

$$Q_n = Q / 0,7 = 500 / 0,7 = 715 \text{ (Вт} \cdot \text{год)}. \quad (2.20)$$

Врахувавши напругу електропривода $U = 48$ В, енергетична ємність дорівнюватиме:

$$Q' = \frac{Q_n}{U} = \frac{715}{48} = 15 \text{ (А} \cdot \text{год)}. \quad (2.21)$$

Таким чином, виберемо акумуляторну батарею Boston Swing Li-Ion від компанії Evel [9], що показана на рис. 2.4.



Рисунок 2.3 – Акумуляторна батарея Boston Swing

Основні технічні характеристики АКБ занесено до табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Паспортні дані АКБ Boston Swing

| Характеристика | Значення |
|---|----------|
| Робоча ємність, А·год | 15,9 |
| Номінальна робоча напруга, В | 48 |
| Значення напруги для відмикання заряду, В | 54,6 |
| Відсічка розряду, В | 40 |
| Робочий струм розряду, А | 25 |
| Максимальний струму розряду в імпульсі, А | 40 |
| Максимальний постійний струм розряду, А | 30 |
| Стандартний струм заряду, А | 5 |
| Максимальний неперервний струм заряду, А | 10 |
| Середній час повного заряду, год | 3 |
| Маса, кг | 3,9 |
| Тип заряду | CC/CV |

Для даного акумулятору виберемо зарядний пристрій [10] CC/CV з параметрами $U = 54,6$ В, $I = 4$ А виробника Evel з розрахунком того, що електровелосипед буде заряджатися в нічний час.

Висновок до розділу 2

В цьому пункті дипломної роботи виконано основні розрахунки тягового електропривода для електровелосипеду, що проєктується. Для цього було задано початкові дані, такі як повна маса транспортного засобу з водієм, дальність поїздки на одному заряді при середній швидкості руху і тип велосипеда, який потрібно електрифікувати.

- 1) Пораховано потужність електродвигуна, враховуючи задані кінематичні параметри, такі як швидкість руху й дальність подорожі, а також прискорення – для безпечної і комфортної їзди. Таким чином, вибрано двигун компанії Aegean Dynamics потужністю 0,5 кВт з номінальною кутовою швидкістю 70 рад/с, а також редуктор та обгінну муфту до нього.
- 2) Визначено ємність тягової акумуляторної батареї для забезпечення потрібної дистанції руху. Окрім цього, враховано фізичні властивості хімічного елемента живлення, після чого здійснено перерахунок енергетичної ємності й остаточно вибрано АКБ системи на 48 В і 16 А·год.

Отримані характеристики тягових елементів електропривода мають забезпечити необхідні вимоги щодо динаміки й статички руху електровелосипеда.

3 КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ БЕЗКОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

В електротранспорті важливим завданням є керування саме електромагнітним моментом двигуна. Це пояснюється тим явищем, що електродвигуни можуть розвивати великий обертовий момент дуже швидко, на відміну від двигунів з внутрішнім згоранням. Правильне керування моментом безколекторного двигуна постійного струму забезпечить плавність розгону транспортного засобу і, при цьому, безпеку для водія, а також високу енергетичну ефективність і продуктивність.

3.1. Математичний опис БДПС

Складемо математичний опис БДПС [11] за еквівалентною схемою, що зображена на рис. 3.1.

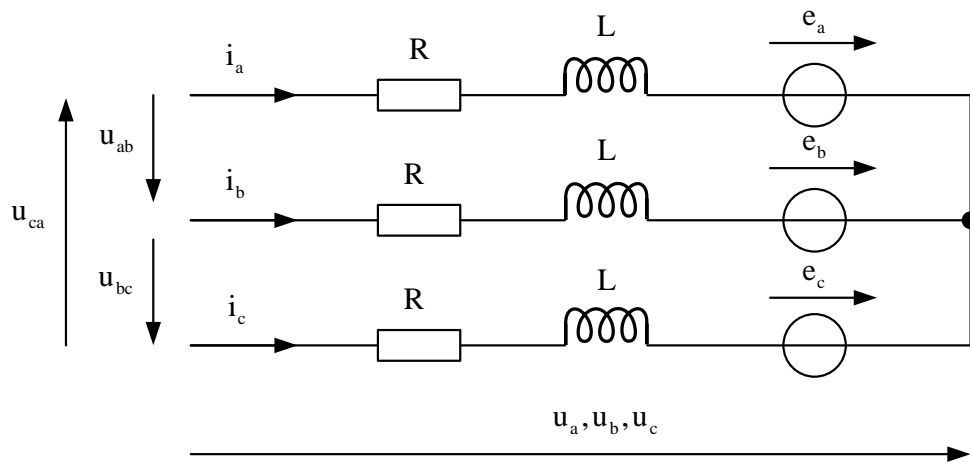


Рисунок 3.1 – Еквівалентна схема безколекторного двигуна постійного струму із з'єднанням обмоток в зірку

Припустимо, що $R_a = R_b = R_c = R$ і $L_a = L_b = L_c = L$ завдяки симетрії трифазного двигуна.

У відповідності з представленою еквівалентною схемою напишемо рівняння лінійних напруг двигуна за другим законом Кірхгофа у вигляді:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b, \\ U_{bc} &= R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c, \\ U_{ca} &= R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де e_a, e_b, e_c – проти-ЕРС, i_a, i_b, i_c – струми якоря, що протікають через обмотки, u_a, u_b, u_c – фазні напруги, u_{ab}, u_{bc}, u_{ca} – лінійні напруги.

Відношення між фазними струмами двигуна для з'єднання в зірку описується виразом:

$$i_a + i_b + i_c = 0. \quad (3.2)$$

Оскільки кожна з напруг є лінійною комбінацією двох інших, то для опису об'єкта керування достатньо двох рівнянь. Використовуючи рівняння (3.1) і (3.2), перепишемо систему рівнянь лінійних напруг у вигляді:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b, \\ U_{bc} &= R(i_a + 2i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a + 2i_b) + e_b - e_c. \end{aligned} \quad (3.3)$$

У відповідності з другим законом руху Ньютона відношення між електромагнітним моментом T_e і кутовою швидкістю двигуна ω має вигляд:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt}, \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}, \quad (3.4)$$

де T_L – навантаження в Нм, J – момент інерції в кг/м².

Проти-ЕРС і електромагнітний момент можна виразити через наведену далі систему рівнянь.

$$e_a = \frac{k_e}{2} \omega F(\theta_e), \quad e_b = \frac{k_e}{2} \omega F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right), \quad e_c = \frac{k_e}{2} \omega F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right). \quad (3.5)$$

Результуючий електромагнітний момент БДПС набуде вигляду:

$$T_e = \frac{k_t}{2} \left[i_a F(\theta_e) + i_b F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \right]. \quad (3.6)$$

В рівнянні (3.5) і (3.6) наведено такі позначення: k_e і k_t – константи проти-ЕРС і електромагнітного моменту. Електричний кут θ_e дорівнює механічному куту θ_m двигуна, помноженого на кількість пар полюсів $\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m$. Функція $F(\theta)$ – це функція положення ротора, що відповідає трапецієподібній формі сигналу проти-ЕРС. Один період її зміни аналітично описується так:

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3}, \\ 1 - \frac{6}{\pi} \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right), & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \pi, \\ -1, & \pi \leq \theta_e < \frac{5\pi}{3}, \\ 1 + \frac{6}{\pi} \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right), & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi. \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\text{Якщо позначити } F(\theta_e) = f_a(\theta_e), F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) = f_b(\theta_e) \text{ і } F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) = f_c(\theta_e),$$

то рівняння (3.5) і (3.6) перепишуться в такому вигляді:

$$e_a = \frac{k_e}{2} \omega f_a(\theta_e), e_b = \frac{k_e}{2} \omega f_b(\theta_e), e_c = \frac{k_e}{2} \omega f_c(\theta_e); \quad (3.8)$$

$$T_e = \frac{k_t}{2} [i_a f_a(\theta_e) + i_b f_b(\theta_e) + i_c f_c(\theta_e)]. \quad (3.9)$$

На рис. 3.2 приведено форми траєкторій фазних проти-ЕРС e_a, e_b, e_c і функцій положення ротора f_a, f_b, f_c . На рис. 3.2 через E_p позначено амплітуду ЕРС.

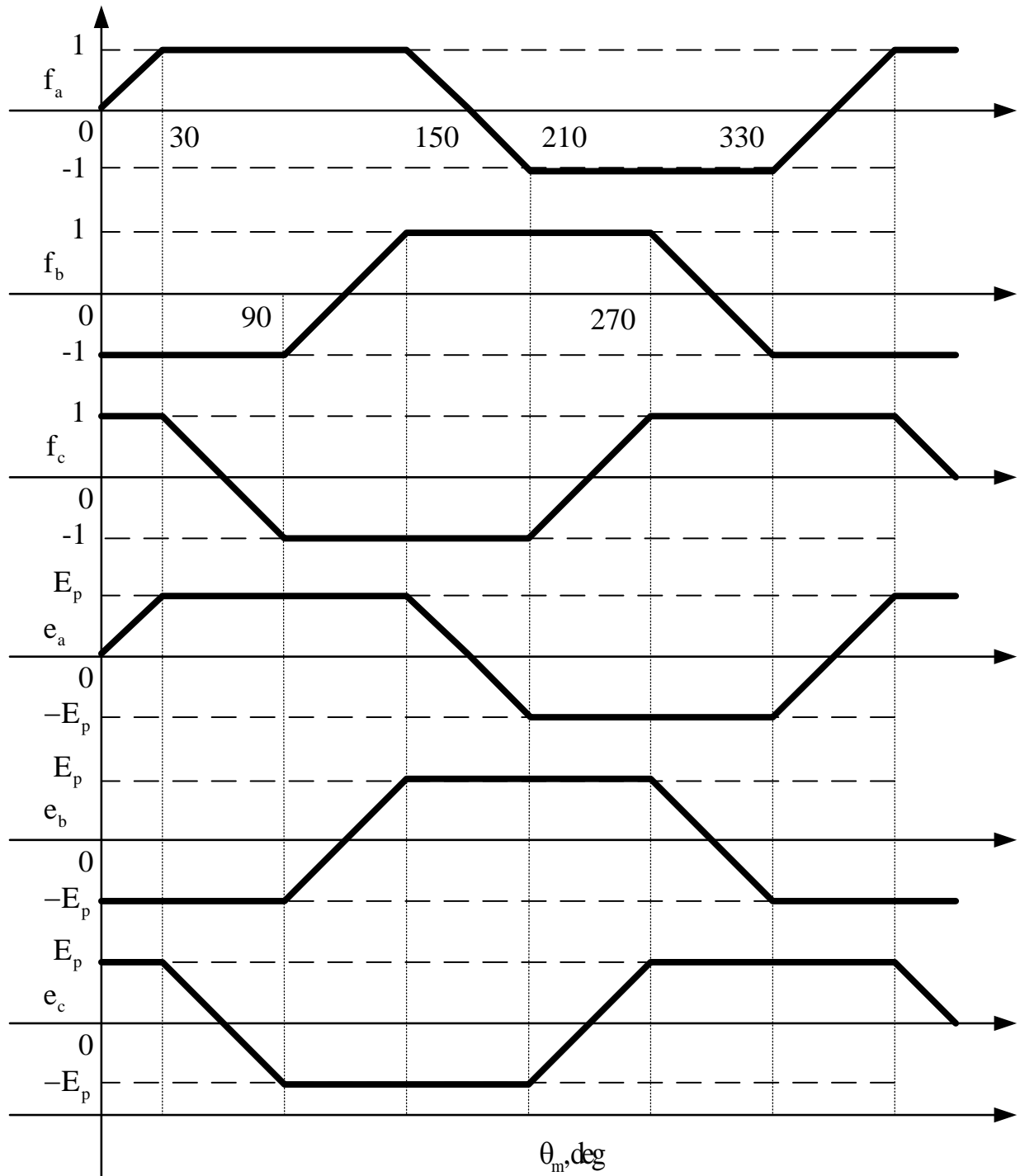


Рисунок 3.2 – Форми траєкторій фазних проти-ЕРС і функцій положення ротора

3.2. Задача керування моментом БДПС

Динамічна модель БДПС на основі фазних струмів за умови повної симетрії фаз статора може бути визначена з (3.1) і має наступний вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(T_e - T_L), \\ T_e &= \frac{k_t}{2} [i_a f_a(\theta_e) + i_b f_b(\theta_e) + i_c f_c(\theta_e)], \\ \dot{\mathbf{i}}_s &= \frac{1}{L}(-R\mathbf{i}_s - \mathbf{e}_s + \mathbf{u}_s),\end{aligned}\tag{3.10}$$

де $\mathbf{i}_s = (i_a, i_b, i_c)^T$ – вектор фазних струмів статора, $\mathbf{u}_s = (u_a, u_b, u_c)^T$ – вектор фазних напруг статора, ω – кутова швидкість ротора, T_e – електромагнітний момент двигуна, R – активний опір статора, L – індуктивність статора, J – момент інерції ротора, T_L – момент навантаження.

Вважаємо, що виконуються наступні умови:

А.1. Струми статора вимірюються.

А.2. Інформація про сектор, в якому знаходиться ротор отримується на основі трьох давачів Холла.

А.3. Задана траєкторія крутного моменту T_e^* є обмеженою, з обмеженою першою похідною.

За умовами виконання цих припущень, необхідно синтезувати регулятори моменту й струму, що гарантують асимптотичне відпрацювання електромагнітного моменту, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{T}_e = 0,\tag{3.11}$$

де похибка відпрацювання моменту визначена як

$$\tilde{T}_e = T_e - T_e^*.\tag{3.12}$$

3.3. Розв'язок задачі керування

3.3.1. Синтез регулятора моменту

Для того, щоб отримати постійний момент на виході БДПС, пропонується задати форми струмів так, як показано на рис. 3.3.

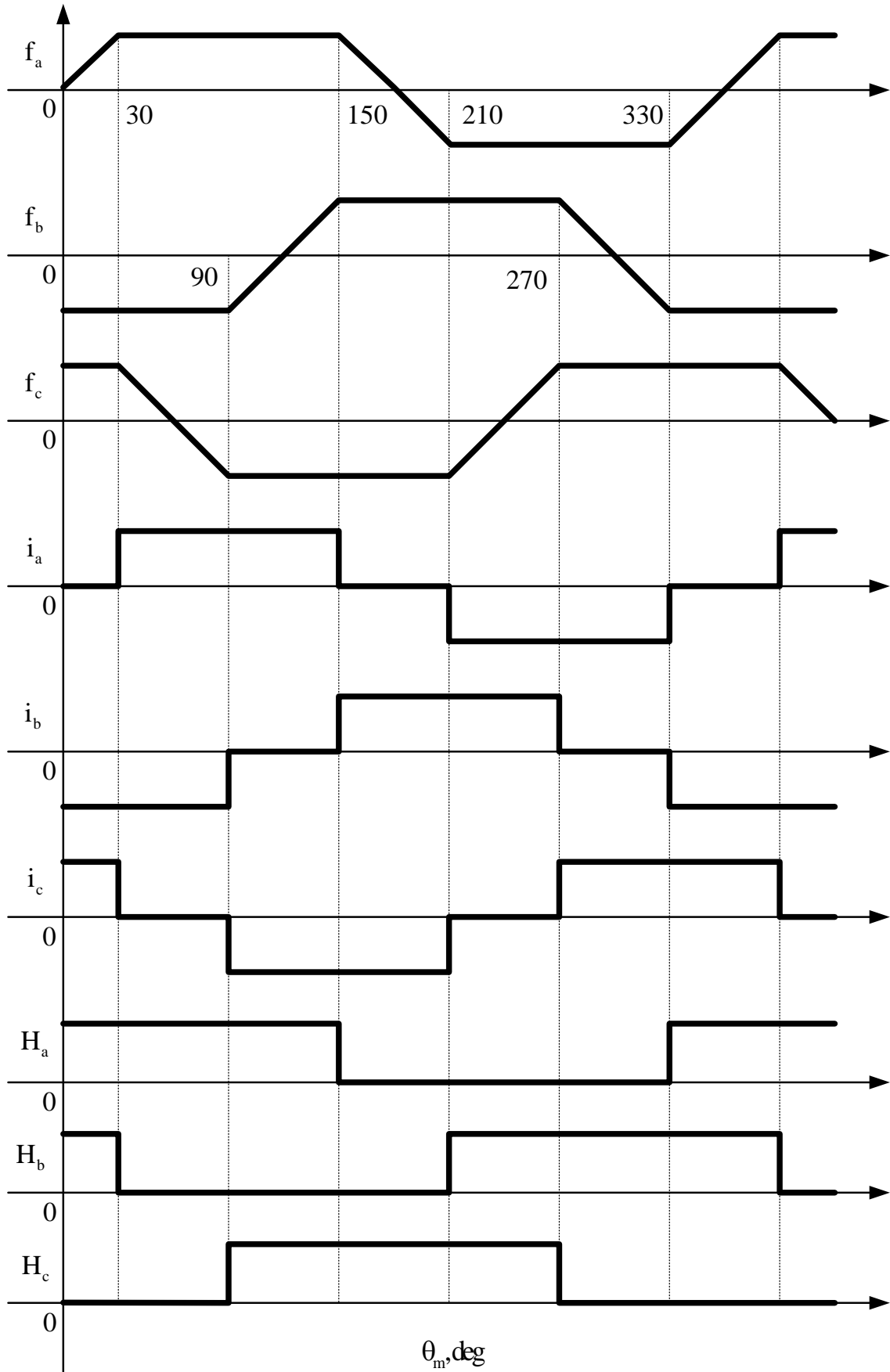


Рисунок 3.3 – Форми траєкторій функцій положення ротора, фазних струмів і сигналів давачів Холла

В кожен момент часу струм однієї з фаз має нульове значення. Струми інших фаз приймають значення I_p різної полярності. Слід зазначити, що струм по фазі є нульовим в той момент часу, коли відповідна йому функція $f(\theta_e)$ змінює своє значення. Як наслідок момент, що створює двигун в кожен момент часу, якщо прикладаються струми відповідно до рис. 3.3, з (3.10) спрощується до вигляду

$$T_e = k_t I_p. \quad (3.13)$$

На основі (3.13) формується задане значення струму I_p .

$$I_p^* = \frac{T_e^*}{k_t}. \quad (3.14)$$

Сигнали з давачів Холла H_a , H_b , H_c також наведені на рис. 3.3. Сигнал від кожного з давачів змінює своє значення один раз на π рад. Таким чином, три давачі зсунуті на $\frac{2\pi}{3}$ рад дозволять визначити сектор в якому знаходиться ротор двигуна. Величина сектору - $\frac{\pi}{6}$ рад. Якщо давачі Холла зорієнтовано по фазам двигуна, то інформації про сектор достатньо для організації струмового керування моментом БДПС. Завдання струмів по кожній з фаз i_s^* та вихідні значення з давачів Холла H_a , H_b , H_c наведені для кожного сектору в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Послідовність сигналів струму й давачів Холла

| № сектора | H_a | H_b | H_c | i_a^* | i_b^* | i_c^* |
|-----------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | +1 | -1 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | +1 | 0 | -1 |
| 3 | 1 | 0 | 1 | +1 | -1 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 | +1 |
| 5 | 0 | 1 | 1 | -1 | 0 | +1 |
| 6 | 0 | 1 | 0 | -1 | +1 | 0 |

3.3.2. Синтез регулятора струму

Для реалізації регулятора струму використаємо релейний спосіб на основі явища гістерезису [12]. Він застосовується для генерування імпульсів керування силовими ключами інвертора. Для цього використовується гістерезисний широтно-імпульсний регулятор, який працює завдяки постійному миттєвому зворотному зв'язку. Дійсне значення струму постійно повторює траєкторію задання струму в межах гістерезисної зони так, як показано на рис. 3.4.

Вихідним сигналом цього регулятора є напруга, що прикладається до фаз статора двигуна. Якщо система має сигнал на зростання струму, то прикладається додатна напруга, а якщо на спадання струму, то від'ємна. Таким чином, коли реальне значення струму досягає верхньої межі (ВМ) зони гістерезису, то напруга перемикається з додатної на від'ємну, а коли досягається нижня межа (НМ), то навпаки – напруга перемикається з від'ємної на додатну.

На рис. 3.5 зображено схему керування двигуном за допомогою інвертора. Використовуючи гістерезисний спосіб регулювання струму можна задати послідовність перемикання силових ключів (табл. 3.2). Вона формує основу для проєктування відповідного алгоритму керування БДПС.

Перевагами даного методу керування струмом є відсутність необхідності знати параметри електромеханічного об'єкта, бо завжди прикладається максимальне значення напруги, і відповідно максимальна швидкість прикладання струму.

Основним недоліком є нефіксована частота коливань релейного регулятора. Якщо ширина гістерезисної зони вузька, то частота перемикань є високою і неконтрольованою. Навпаки, якщо гістерезисна зона широка, то в системі присутні великі пульсації моменту. Така незвична частота перемикань ускладнює фільтрацію акустичних і електромагнітних шумів [13].

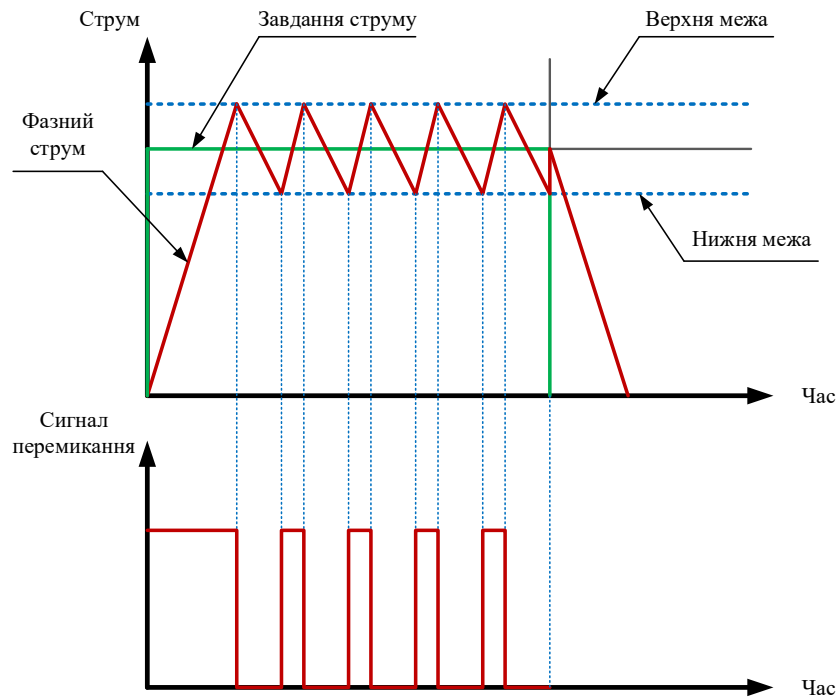


Рисунок 3.4 – Робота релейного регулятора струму

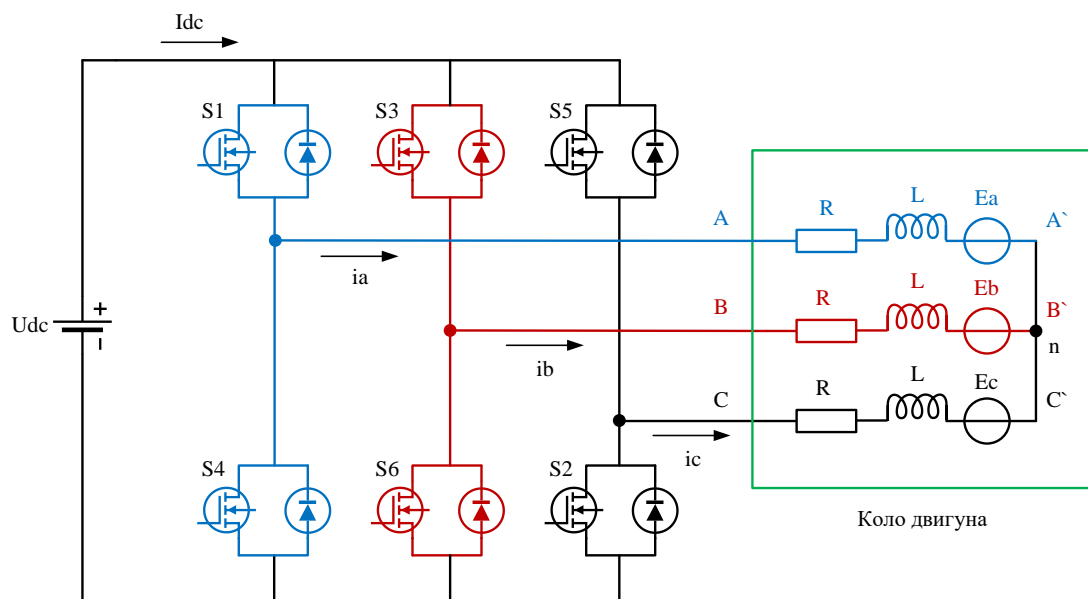


Рисунок 3.5 – Схема керування БДПС за допомогою інвертора

Таблиця 3.2 – Послідовність перемикань ключів інвертора

| Стан | Активація ключів |
|------------|----------------------------|
| $I_a > BM$ | S1 закритий і S4 відкритий |
| $I_a < NM$ | S1 відкритий і S4 закритий |
| $I_b > BM$ | S3 закритий і S6 відкритий |
| $I_b < NM$ | S3 відкритий і S6 закритий |
| $I_c > BM$ | S5 закритий і S2 відкритий |
| $I_c < NM$ | S5 відкритий і S2 закритий |

Математично релейний регулятор струму можна описати у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{i}}_s &= \mathbf{i}_s^* - \mathbf{i}_s, \\ \tilde{\mathbf{i}}_s &> \frac{h}{2}, \mathbf{u}_s = -U_{dc}, \\ \tilde{\mathbf{i}}_s &< -\frac{h}{2}, \mathbf{u}_s = U_{dc},\end{aligned}\quad (3.17)$$

де $\tilde{\mathbf{i}}_s$ – похибка відпрацювання струмів.

В системі (3.17) символом h позначено ширину гістерезисної зони. Структурна схема системи керування зображена на рис. 3.6.

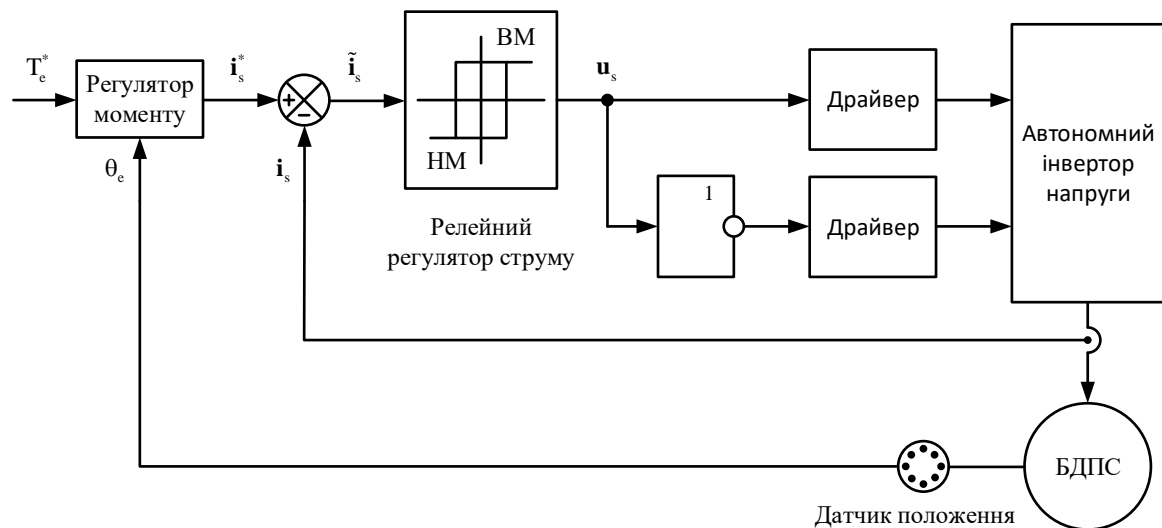


Рисунок 3.6 – Структурна схема алгоритму керування моментом БДПС

На практиці в реальних інверторах завжди присутні резистивні втрати і час на вимикання ключів [13].

Напівпровідникові ключі мають опір, навіть коли вони повністю увімкнені. Це призводить до падіння напруги й нагрівання. Ще більше енергії розсіюється під час коротких проміжків, коли ключ переходить з непровідного стану в провідний і навпаки. В системі з релейним регулюванням частота перемикань досить висока, а тому втрати також великі. Однак, якщо момент навантаження постійний, то частота може бути налаштована шляхом підбору відповідної ширини допуску гістерезису.

Відомо, що в напівпровідникових ключах час на вимикання довший, ніж на вмикання. Це може призвести до короткого замикання, коли перший ключ ще не вимкнувся, а наступний уже увімкнувся. Для того, щоб уникнути цього небажаного ефекту і забезпечити плавність комутації, в систему потрібно вводити затримку на вмикання (мертвий час). Значення цієї величини підбирається відповідно до значення часу на вимикання транзисторного ключа таким чином, щоб його було достатньо і, в той же час, він був максимально короткий, бо інакше можуть з'явитися інші негативні наслідки. Наприклад комутаційні виризи стають глибшими, коли застосовується затримка часу на вмикання. В результаті пульсації моменту стають ще більшими. Звичайно, пульсації з'являються також в ланці постійного струму, а це збільшує амплітудну компоненту коливання струму.

3.4. Дослідження статичних і динамічних характеристик спроектованої системи керування

Проведемо дослідження статичних і динамічних характеристик синтезованого алгоритму керування моментом БДПС для того, щоб дізнатися чи досягаються поставлені в задачі цілі. Для цього промодельюємо систему в прикладному пакеті Simulink MATLAB.

Побудуємо програму для тестування з використанням бібліотеки SimPowerSystems (SPS-блоки). Це допоможе значно спростити складання досліджуваного об'єкта, а також пришвидшить процес моделювання.

На рис. 3.7 показано програму для дослідження системи керування безколекторним двигуном постійного струму. Вона містить джерело постійного струму, електропривод БДПС, блок для задання моменту навантаження й осцилограф. Блок під назвою powergui використовується для роботи програми із SPS-блоками.

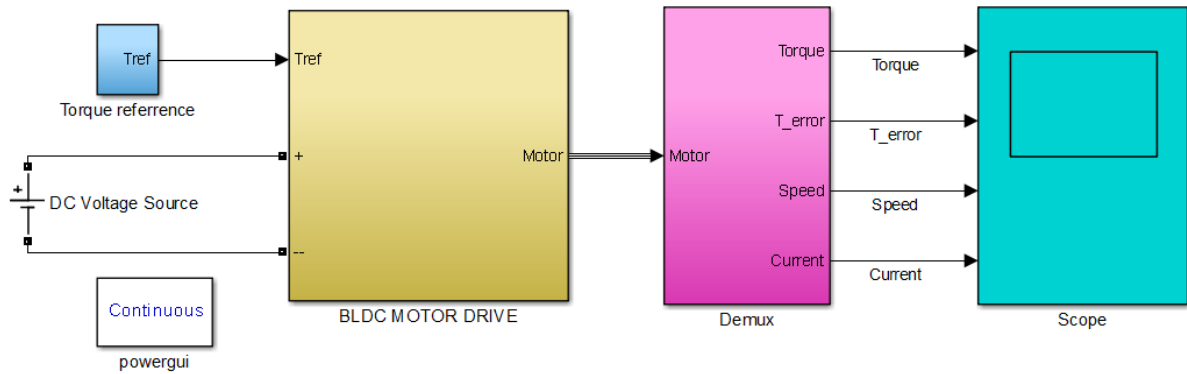


Рисунок 3.7 – Програма для дослідження системи керування моментом БДПС

Блок завдання моменту складається з двох простих елементів бібліотеки Simulink (S-блоки), а саме Clock і Look-Up Table (рис. 3.8).

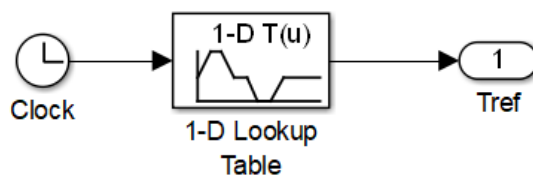


Рисунок 3.8 – Вміст блоку для завдання моменту

Розглянемо детальніше вміст блоку електропривода БДПС, що показаний на рис. 3.9. Електрична енергія з джерела напруги надходить до трифазного інвертора із силовими ключами типу MOSFET/Diodes. Сюди ж приходять імпульсні сигнали керування транзисторами від блоку струмового контролера. Перетворена інвертором електрична енергія надходить до синхронного двигуна на постійних магнітах із трапецієвидною формою струму через блок вимірювання. З блоку Load до двигуна надходить сигнал навантаження, який в даному випадку дорівнює нулю. На виході двигуна отримуємо вектор його змінних, з якого електромагнітний момент [Нм], кутову швидкість [рад/с] і силу струму фази A [A] вибираємо для виводу на осцилограф, а сигнали датчиків Холла – для контролера струму. Останній отримує також сигнал завдання моменту і значення реальних струмів з вимірювального блоку.

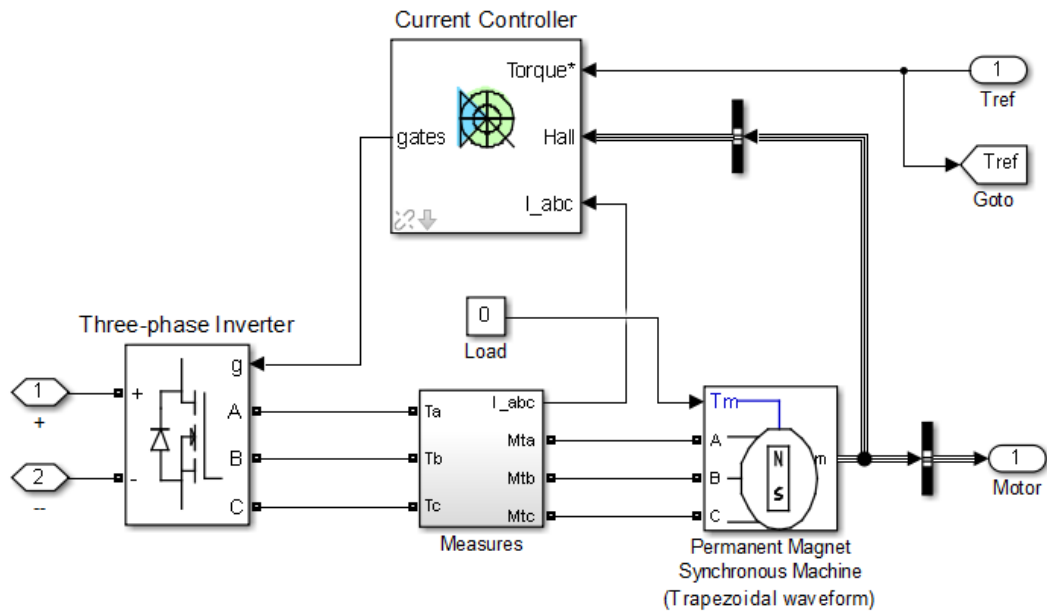


Рисунок 3.9 – Вміст блоку електропривода БДПС

Блоки трифазного інвертора, безколекторного двигуна постійного струму і струмового контролера взято з бібліотеки SimPowerSystems. Контролер струму містить блоки регуляторів моменту й струму (рис. 3.10 і рис. 3.11), описані в попередньому підрозділі математичними виразами (3.16) і (3.17).

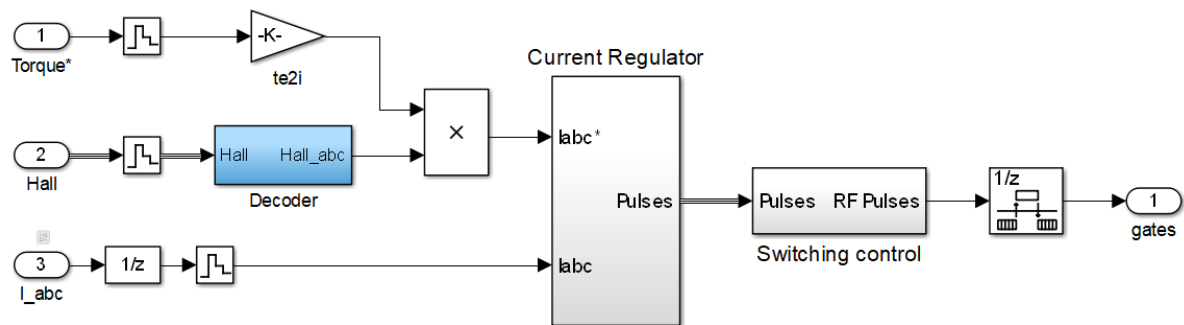


Рисунок 3.10 – Вміст блоку струмового контролера

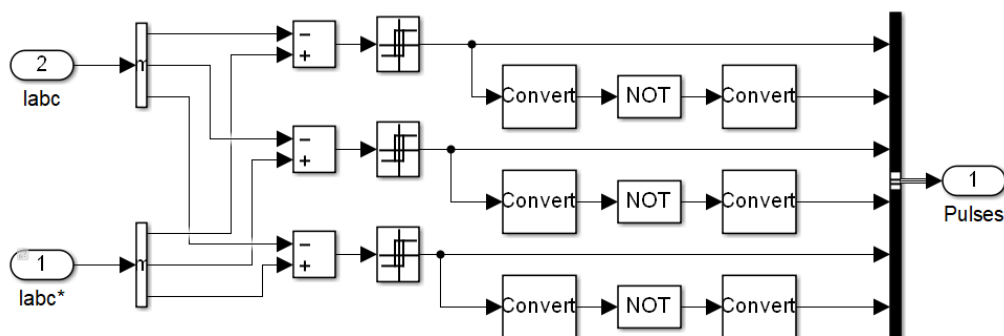


Рисунок 3.11 – Вміст блоку регулятора струму

Умова для виконання тесту

На проміжку від 0 до 0,5 с електромагнітний момент лінійно зростає до номінального значення $T_n = 7$ Нм і залишається на цьому рівні до моменту часу 8,5 с, коли він починає спадати лінійно до нуля так само довго, як і під час розгону. Після цього, завдання залишається на нульовому значенні, поки не досягне 14 с часу. Тоді цикл повторюється, але з від'ємним значенням електромагнітного моменту $T = -T_n$.

Графіки перехідних процесів досліджуваної системи керування моментом БДПС представлено на рис. 3.12.

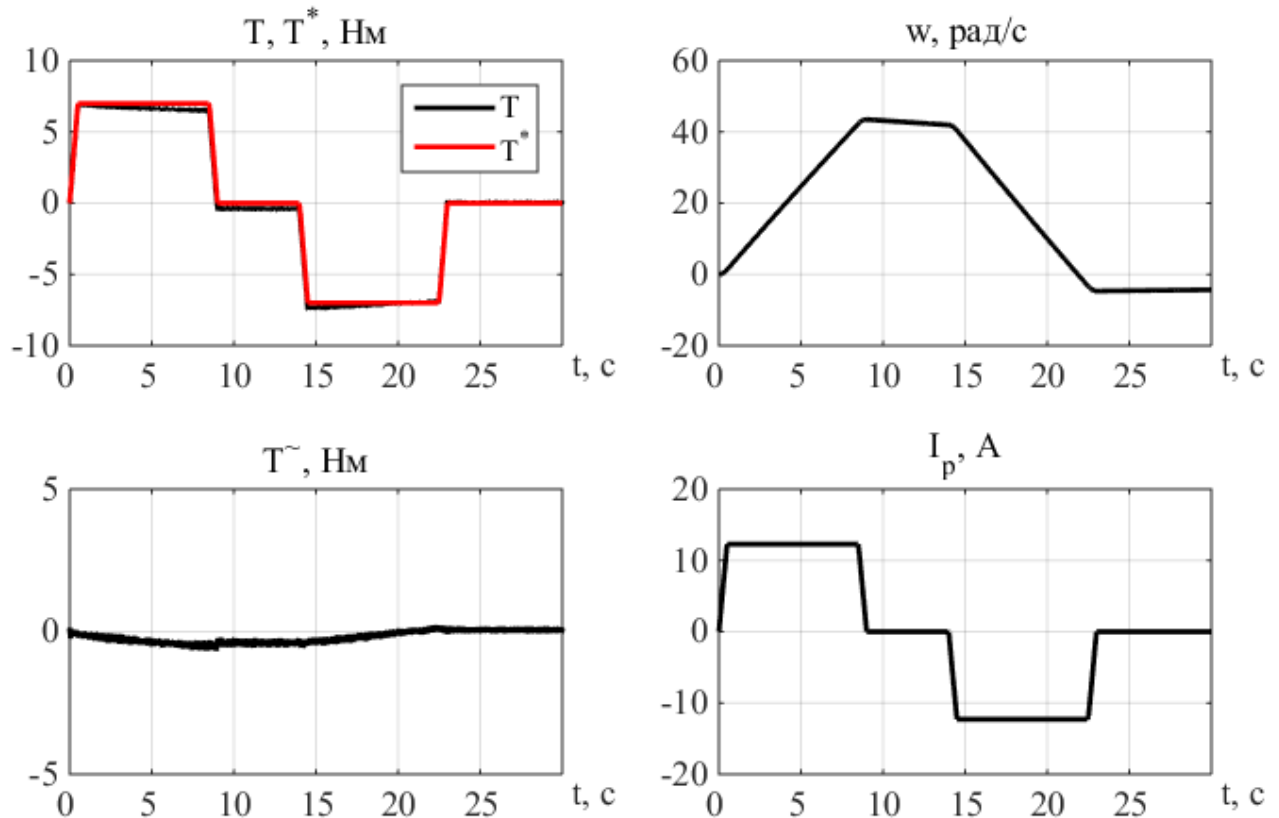


Рисунок 3.12 – Перехідні процеси в системі керування моментом БДПС

Аналіз графіків

Значення дійсного електромагнітного моменту постійно повторює траєкторію завдання. Наявність похибки відпрацювання в системі пояснюється тим, що контур керування моментом не є замкненим. Система керування не враховує нелінійні процеси інвертора, які враховуються в моделюючій програмі.

Похибка набуває свого максимального значення $\tilde{T} \approx -1$ Нм в момент часу 8,5 с. Даних показників якості достатньо для використання розробленої системи керування в електромеханічних системах електровелосипедів.

Кутова швидкість плавно зростає на проміжку від 0 до 9 с до значення, близького до номінального $\omega = 40$ рад/с, протягом 5 с тримається на цьому ж рівні, допоки не почне так само плавно спадати приблизно до нуля. Несиметричність у формі швидкості пояснюється наявністю сил тертя, що впливають на роботу системи.

В системі присутні електричні шуми. Це пояснюється принципом регулювання струму, в якому сигнал постійно коливається в межах середнього значення завдання.

На рис. 3.13 зображено перехідні процеси фазних струмів під час лінійного зростання моменту на проміжку $t_1 = [0 \ 0,5]$ с і виходу його на номінальне значення на проміжку $t_2 = [0,5 \ 1]$ с.

Стрибкоподібний характер траєкторії струму вказує на те, як система реагує на входні сигнали датчиків положення ротора, переключаючись з одного стану в інший згідно закону керування. Зі збільшенням моменту, частота коливань струму збільшується, тому що ротор обертається швидше і до системи надходять частіше сигнали від давачів Холла.

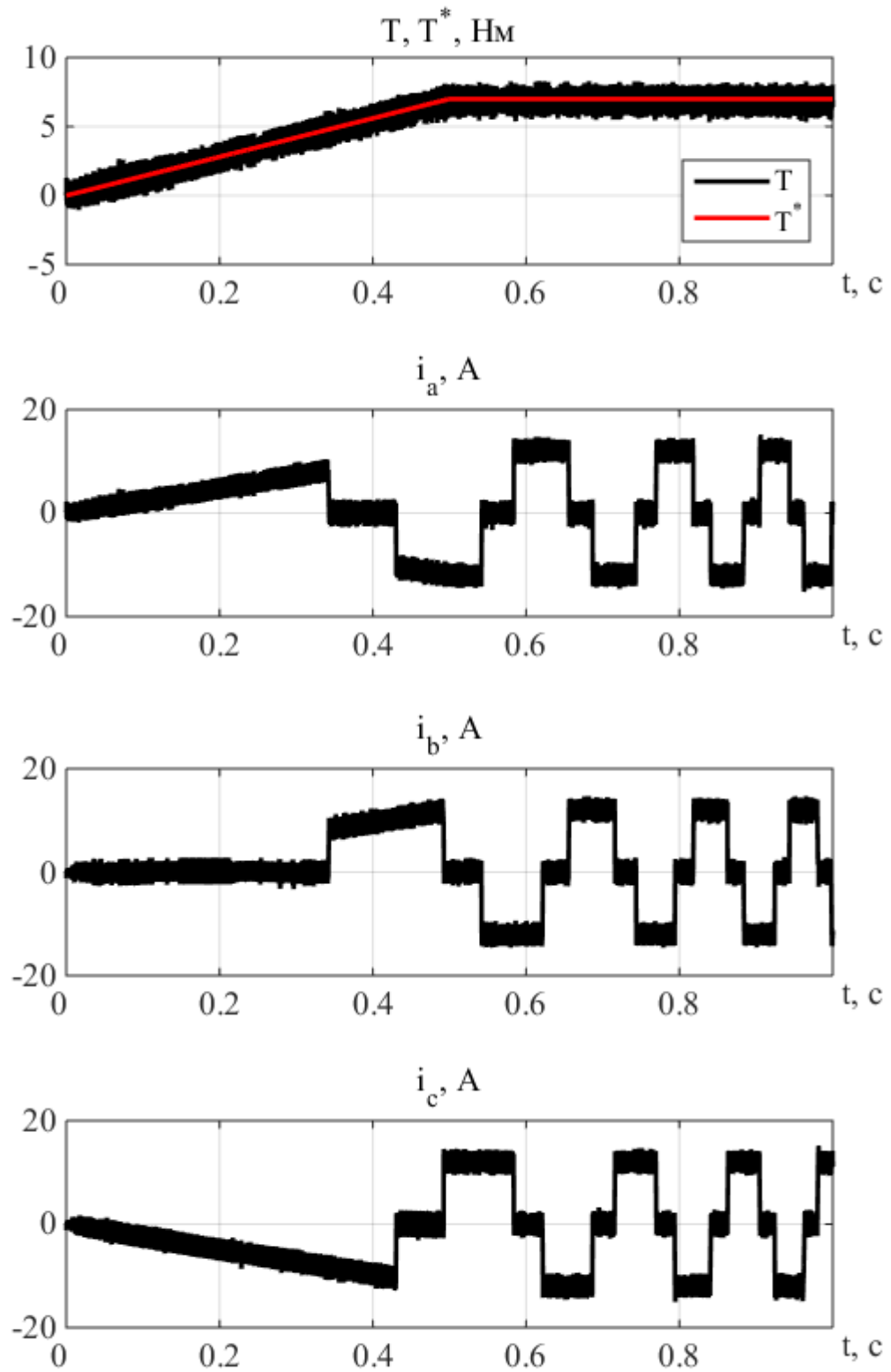


Рисунок 3.13 – Перехідні процеси електромагнітного моменту й фазних струмів

Висновок до розділу 3.

В цьому пункті дипломної роботи виконано розробку системи керування безколекторним двигуном постійного струму в якості тягового двигуна електровелосипеда.

- 1) Математично описано даний електромеханічний об'єкт й отримано рівняння, що виражають проти-ЕРС і електромагнітний момент двигуна.
- 2) Керування моментом БДПС здійснюється на основі сигналів давачів Холла у функції положення ротора. Таким чином, у двигуні наводяться потрібні проти-ЕРС і, шляхом регулювання струму, можна отримати необхідне значення моменту.
- 3) Задача забезпечення асимптотичного регулювання моменту БДПС реалізована шляхом синтезування відповідних законів керування моментом і струмом. Регулятор струму виконано на основі широтно-імпульсного релейного компаратора, який забезпечує відпрацювання струму в межах гістерезисної зони. Таким чином, забезпечується висока швидкодія системи і надзвичайна простота.
- 4) Побудовано програмну модель в програмному середовищі Simulink MATLAB з елементами бібліотеки SimPowerSystems. Це допомогло спростити процес побудови моделі і пришвидшити виконання віртуальних досліджень, а також збільшити точність результатів.
- 5) Виконано моделювання розробленої системи керування моментом БДПС. Отримано графіки перехідних процесів, аналіз яких дозволив зробити висновок про успішність синтезованого алгоритму керування.

Система керування моментом двигуна на основі релейного регулятора струму забезпечує необхідні вимоги щодо якості керування електроприводом електровелосипеда.

4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОВЕЛОСИПЕДА

Для реалізації автоматизованої системи електровелосипеда потрібно розробити схеми силової частини електропривода і керування. Для цього виберемо всі необхідні елементи, що забезпечать правильну роботу системи керування.

4.1. Розробка силової схеми електропривода

В табл. 4.1 занесено основні параметри для розрахунку силової частини електропривода, отримані в другому пункті дипломної роботи.

Таблиця 4.1 – Параметри для розрахунку силової частини

| | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Номінальне діюче значення напруги | $U_n = 48 \text{ В}$ |
| Номінальне діюче значення струму | $I_n = 25 \text{ А}$ |
| Амплітудне значення напруги | $U_{na} = 54,6 \text{ В}$ |
| Амплітудне значення струму | $I_{na} = 30 \text{ А}$ |

1) Розрахунок автономного інвертора напруги.

Інвертор напруги потрібен для перетворення електричної енергії згідно закону керування двигуном. В якості силових ключів вибираємо транзистори типу MOSFET з діодами (рис. 4.1, а). Вони, в порівнянні з IGBT, які також досить часто використовуються в електротранспорті, мають вищу швидкість комутації й енергетичну ефективність при роботі на низькій напрузі [14]. Більш того, така схема може витримувати високі напруги блокування і підтримувати високий струм.

Розрахунок MOSFET здійснюється за критерієм $I_C > I_{\max}$, $U_{CB\max} > U_{CB}$, де I_C та $U_{CB\max}$ – відповідно тривалий струм стоку і напруга стік-витік, які вказані в

паспортних даних. Вибираємо [15] шість ключів MOSFET Infineon IRFR3806 з параметрами, що вказані в табл. 4.2.

Застосування силового інвертора показано на рис. 4.1, б).

Таблиця 4.2 – Параметри MOSFET Infineon IRFR3806

| | |
|----------------------|-------------------------|
| Напруга стік-витік | $U_{CB} = 60 \text{ В}$ |
| Струм стоку | $I_C = 43 \text{ А}$ |
| Напруга затвор-витік | $U_{3C} = 3 \text{ В}$ |

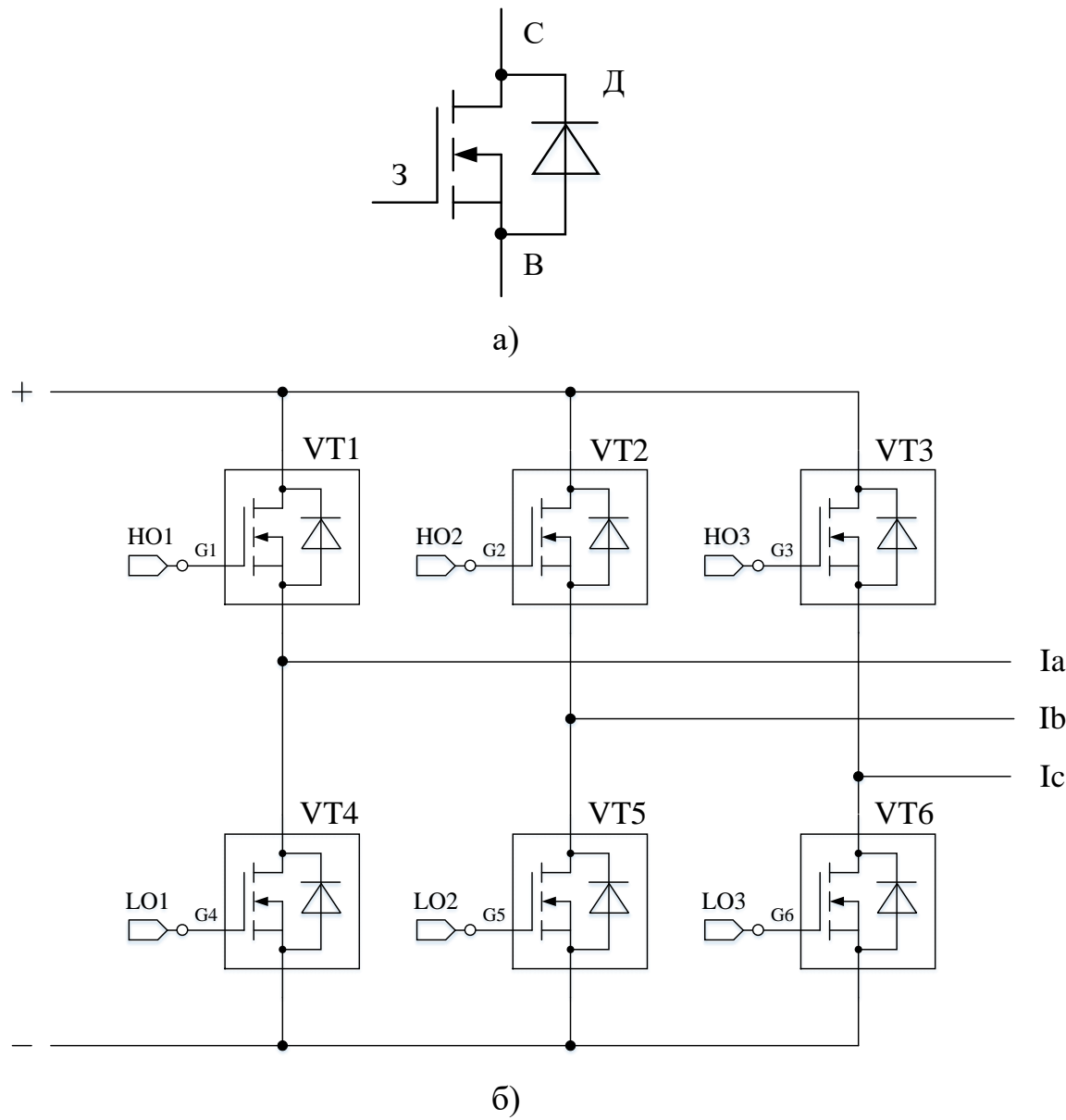


Рисунок 4.1 – Автономний інвертор напруги електропривода: а) силовий ключ; б) трифазна мостова схема

На рис. 4.1 позначено: I_a, I_b, I_c – фазні струми двигуна, $HO1, LO1, HO2, LO2, HO3, LO3$ – сигнали драйверів управління транзисторами.

2) Датчик напруги в ланці постійного струму.

Датчик напруги (ДН) в ланці постійного струму (ЛПС) потрібен для індикації рівня заряду акумуляторної батареї. Розрахуємо його за максимальним значенням напруги джерела живлення $U_{ДН} > U_{ДЖ\max}$. Обираємо пристрій LEM LV 100-100 [16] з параметрами, що вказано в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні параметри датчика напруги LV 100-100

| | |
|------------------------------|------------------------------------|
| Діапазон вимірювання напруги | $\Delta U = 0 - \pm 150 \text{ В}$ |
| Номінальний первинний струм | $I_{\text{пн}} = 100 \text{ мА}$ |
| Номінальний вторинний струм | $I_{\text{вн}} = 50 \text{ мА}$ |
| Напруга живлення | $U_{\text{ж}} = \pm 15 \text{ В}$ |

Застосування ДН показано на рис. 4.2.

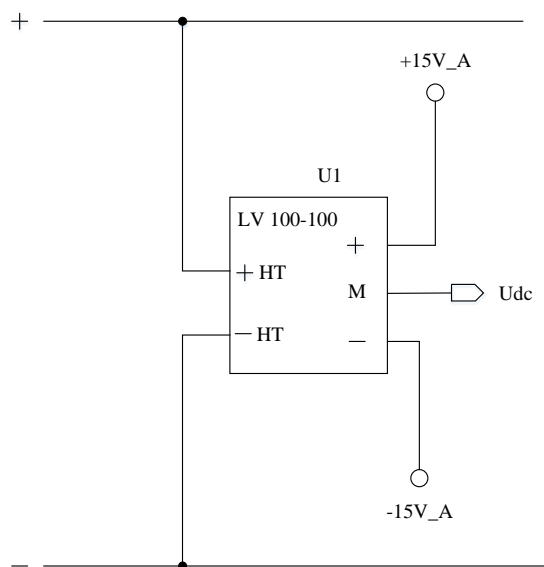


Рисунок 4.2 – Датчик напруги в ланці постійного струму

3) Датчик фазного струму електродвигуна.

Алгоритм керування потребує постійного зворотного зв'язку за струмом. Оскільки трифазний двигун симетричний, достатньо забезпечити систему двома датчиками струму (ДС) в силу залежності (3.2). Розрахунок виконується за

максимальним струмом джерела живлення $I_{ДС} > I_{ДЖ\max}$. Таким чином, обираємо пристрій LEM LA 100-TP [17] з параметрами, що занесені до табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Основні параметри датчика струму LA 100-TP

| | |
|-----------------------------|--|
| Діапазон вимірювання струму | $\Delta I = 0 - \pm 150 \text{ A}$ |
| Номінальний первинний струм | $I_{\text{пн}} = 100 \text{ A}$ |
| Номінальний вторинний струм | $I_{\text{вн}} = 50 \text{ mA}$ |
| Напруга живлення | $U_{\text{ж}} = \pm 12 \dots 15 \text{ V}$ |

Застосування ДС показане на рис. 4.3.

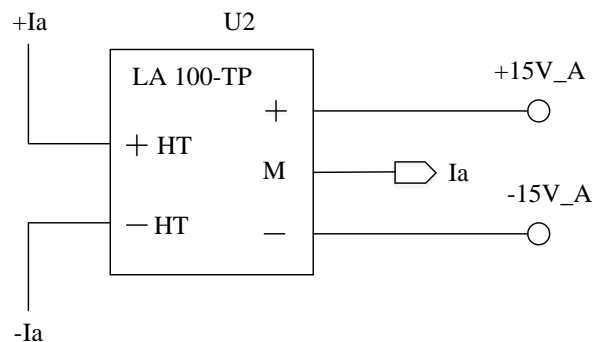


Рисунок 4.3 – Датчик фазного струму двигуна

4) Перетворювач напруги постійного струму.

Оскільки силова частина ЕП містить прилади, які живляться напругою відмінною від тієї, з якою працює електродвигун, то необхідно реалізувати схему перетворення напруги 48 В – 15 В. Для цього виберемо понижуючий DC-DC перетворювач Texas Instruments (TI) LM76003 [18] з технічними параметрами, вказаними в табл. 4.5. Він зображений на рис. 4.4.

Таблиця 4.5 – Основні параметри перетворювача напруги LM76003

| | |
|----------------|------------|
| Робоча частота | 500 кГц |
| Вхідна напруга | 3,5 – 60 В |
| Вихідний струм | 3,5 А |

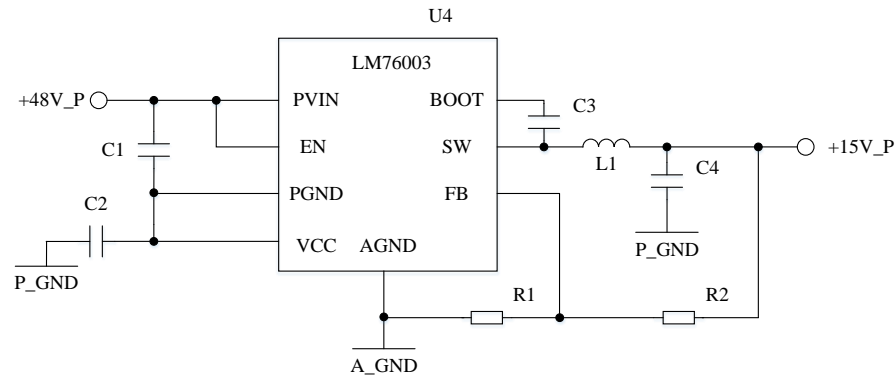


Рисунок 4.4 – Понижуючий перетворювач напруги

5) Драйвер керування транзисторним ключем.

Для керування транзисторними ключами інвертора напруги використаємо мікросхему HCPL-3120 [22]. Схема її використання зображена на рис. 4.5.

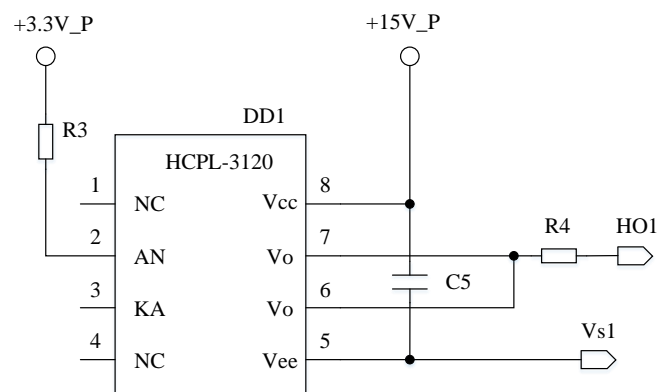


Рисунок 4.5 – Драйвер керування транзистором інвертора

Згідно рекомендацій виробника конденсатор, що встановлений між виходами мікросхеми 5 і 8 має бути ємністю 0,1 мкФ. Виберемо конденсатор з технічною документацією [20]. Резистор R3 знаходимо за формулою:

$$R3 = \frac{U_{IN}}{I_{IN}} = \frac{3,3}{14 \cdot 10^{-3}} = 236 \text{ (Ом)}. \quad (4.1)$$

Обираємо відповідний резистор з технічною документацією [19].

Резистор R4 вибирається відповідно до залежності:

$$R4 \geq \frac{(V_{CC} - V_{EE} - V_{OL})}{I_{OLPEAK}} = \frac{(15 + 5 - 2)}{2,5} = 7,2 \approx 8 \text{ (Ом)}. \quad (4.2)$$

У випадку, коли V_{EE} з'єднано з землею (рис. 4.6), вихідний опір дорівнюватиме:

$$R6 \geq \frac{(V_{CC} - V_{EE} - V_{OL})}{I_{OLPEAK}} = \frac{(15 + 0 - 2)}{2,5} = 5,2 \cong 6 \text{ (Ом)}. \quad (4.3)$$

Отже, вибираємо резистори $R4$ і $R6$ відповідно до порохваних в (4.2) і (4.3) значень з технічною документацією [19].

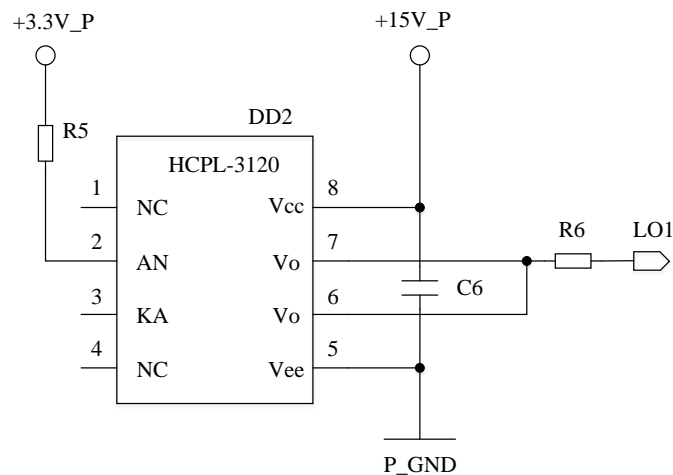


Рисунок 4.6 – Драйвер керування зі з'єднанням V_{EE} на землю

Отже, виконано повний розрахунок і вибір елементів силової частини електропривода. Електрично-принципова схема зображена в додатку А.

4.2. Розробка схеми керування електровелосипедом

4.2.1. Вибір елементів керування й контролю

Для проєктування схеми керування (див. дод. Б) електровелосипедом потрібно вибрати обладнання, за допомогою якого здійснюватиметься керування й контроль.

Виділимо основні елементи електрообладнання для велосипеда, що проєктується, і реалізуємо схемо-технічні рішення для їх роботи.

1) Ручка газу для завдання руху.

Виберемо стандартну ручку газу (рис. 4.7) для електровелосипеда важільного типу Z3-48v [23] з наступними характеристиками:

- тип: датчик Холла SS-49 з постійним магнітом;
- напруга живлення: +5В;
- напруга керування: 1 – 4,2 В.



Рисунок 4.7 – Ручка газу важільного типу

При повороті рухомої ручки, магніт зміщується відносно датчика Холла. При цьому, на виході датчика змінюється напруга в заданому діапазоні керування. Відповідно до рівня напруги, що надходить до контролера, швидкість обертання мотор-колеса змінюється.

2) Система допомоги педалями (PAS – pedal assist system).

Система допомоги педалями використовується для того, щоб керувати двигуном шляхом обертання педалей. Існують багато різних видів таких органів керування і, по-суті, являються датчиками швидкості, моменту та їх поєднання.

Виберемо найпростіший датчик швидкості обертання педалей [24], що зображений на рис. 4.8.



Рисунок 4.8 – Датчик швидкості обертання педалей

Датчик швидкості обертання педалей складається з двох основних частин. Перша – це пластикове кільце з п'ятьма магнітами, що встановлюється на рухомий вал педалей. Друга частина є металевим кільцем з датчиком Холла, до якого підводиться живлення. Воно кріпиться на нерухомому тілі велосипеда близько до кільця з магнітами. Якщо велосипедист починає крутити педалі, магніти проходять повз датчик Холла з певною частотою. Залежно від рівня частоти сигналів змінюється швидкість обертання двигуна.

Основні характеристики PAS:

- напруга живлення: +5В;
- напруга керування: +3,3 В.

3) Датчик гальмування.

Коли водій електровелосипеда відпускає ручку газу або перестає крутити педалі, двигун продовжує працювати ще деякий час за інерцією. Це може створити аварійну ситуацію, адже гальмування не може здійснитися правильно. Для того, щоб уникнути цього явища, використовуються спеціальні датчики (рис. 4.9). Ці пристрої можуть принципово різнитися залежно від конструкції транспортного засобу і способу застосування, але фактично є магнітними датчиками на основі ефекту Холла або герконовими вимикачами.



Рисунок 4.9 – Датчик гальмування

Виберемо два простих датчики гальмування BL-5 [25], що встановлюються в механічній гальмівній системі таким чином, що трос проходить крізь датчик. Під час натискання гальмівної ручки, трос здійснює рух всередині датчика. Останній реагує на цю подію і подає сигнал контролеру на відключення двигуна.

Пристрій працює від напруги +5 В живлення.

4) Кнопка круїз-контролю.

В транспорті корисною функцією є круїз-контроль, що полягає в заданні рівня швидкості за допомогою кнопки. Спочатку електровелосипед розганяється до бажаної швидкості, а після натискання кнопки круїз-контролю залишається на ній до відключення шляхом гальмування.

Для реалізації цієї функції використаємо кнопку на 5 В живлення [26], що зображена на рис. 4.10.



Рисунок 4.10 – Кнопка круїз-контролю

5) Світло-звукове обладнання.

Електротранспортний засіб обладнаємо світло-звуковим обладнанням для безпечного і комфортного пересування.

- а) Передня фара і звуковий сигнал HGM LED 40 Вт напругою 12-85 В [27], що зображена на рис. 4.11, а.
- б) Задня фара із вказівниками поворотів WD400 [28] з напругою 48 В і потужністю 3,8 Вт, що зображена на рис. 4.11, б.



а)



б)

Рисунок 4.11 – Світло-звукове обладнання: а) передня фара зі звуковим сигналом; б) задня фара із вказівниками поворотів

6) Пульт керування світло-звуковим обладнанням.

Вибираємо пульт керування світло-звуковим обладнанням [29] з номінальною напругою 12...60 В і силою струму 0,5 А (рис. 4.12).



Рисунок 4.12 – Пульт керування світло-звуковим обладнанням

7) . Інформаційна панель.

Інформаційна панель в системі електровелосипеда потрібна задля того, щоб контролювати різноманітні параметри, такі як рівень заряду акумуляторної батареї, швидкість руху, дальність поїздки, вибраний швидкісний режим тощо. Реалізуємо цей пристрій на основі LCD-дисплея 1602 з контролером ST70 [30]. Його основні характеристики занесено до табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Основні параметри LCD1602

| | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| Напруга живлення для логіки | $V_{dd} = 4,7 - 5,5 \text{ В}$ |
| Напруга живлення для LCD | $V_{dd} - V_o = 5 \text{ В}$ |
| Струм живлення | $I_{dd} = 1,1 \text{ мА}$ |

Перелік виводів дисплея занесено до табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Перелік виводів дисплея LCD1602

| Назва | Номер піна | Призначення |
|-------|------------|-----------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| VSS | 1 | Живлення контролера (-) |
| VDD | 2 | Живлення контролера (+) |
| VO | 3 | Вивід управління контрастом |
| RS | 4 | Вибір регістра |

| | | |
|----------|----------|-----------------------------------|
| RW | 5 | Послідовне введення даних |
| 1 | 2 | 3 |
| E | 6 | Скидання |
| DB0-DB3 | 7-8 | Молодші біти 8-бітного інтерфейсу |
| DB4-DB7 | 10-14 | Старші біти інтерфейсу |
| A | 15 | Анод (+) живлення підсвічування |
| K | 16 | Катод (-) живлення підсвічування |

Оскільки інформаційна панель є зовнішнім пристроєм, необхідно обмежити кількість проводів лише до п'яти, три з яких сигнальні (для вводу даних, для їх виводу і для увімкнення), а два – живлення. Для цього необхідно використати інтерфейс передачі даних.

Окрім вибраних елементів керування й контролю система також опрацьовує наступні сигнали.

8) Сигнали датчиків положення ротора електродвигуна.

Вибраний електродвигун має три датчики положення ротора на основі ефекту Холла. Таким чином, від мікроконтролера до давачі прямує п'ять проводів, два з яких для живлення давачів напругою 5 В, а інші три – для передачі сигналів 3,3 В від кожного з них відповідно.

9) Вимірювальні сигнали датчиків струму й напруги силової частини електроприводу.

Кожен з вибраних датчиків напруги й струму силової частини схеми подає на вхід мікроконтролера аналоговий сигнал номінальним значенням 50 мА.

10) Сигнали керування транзисторними ключами силової частини електроприводу.

Мікропроцесор повинен генерувати сигнали на основі ШІМ задля чіткого керування транзисторними ключами інвертора напруги в силовому блоці контролера.

На основі інформації про вибрані елементи можемо сформувати таблицю сигналів мікроконтролера відповідно до їх типів, значень, кількості та приналежності до елементів системи електровелосипеда (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Таблиця сигналів мікроконтролера

| Пристрій | Тип | Значення | Кількість |
|---|-----------------------------------|-----------|-----------|
| Датчик Холла електродвигуна | Дискретний вхід | 3,3 В | 3 |
| Ручка газу | Аналоговий вхід | 1 – 4,2 В | 1 |
| PAS | Дискретний вхід | 3,3 В | 1 |
| Датчик гальмування | Дискретний вхід | 5 В | 2 |
| Кнопка круїз-контроля | Дискретний вхід | 5 В | 1 |
| Передня фара | Дискретний вихід | 48 В | 1 |
| Звуковий сигнал | Дискретний вихід | 48 В | 1 |
| Задня фара | Дискретний вихід | 48 В | 1 |
| Вказівник повороту | Дискретний вихід | 48 В | 2 |
| Кнопка увімкнення фар | Дискретний вхід | 48 В | 1 |
| Кнопка увімкнення поворотного вказівника | Дискретний вхід | 48 В | 2 |
| Кнопка звукового сигналу | Дискретний вхід | 48 В | 1 |
| LCD-дисплей | Дискретний вхід/вихід | 3,3 В | 3 |
| Датчик напруги ЛПС | Аналоговий вхід | 50 мА | 1 |
| Датчик фазного струму | Аналоговий вхід | 50 мА | 2 |
| Драйвер керування транзисторним ключем | Дискретний вихід на основі ШІМ | 3,3 В | 6 |

4.2.2. Вибір мікропроцесора і реалізація його роботи

На основі інформації, що міститься в табл. 4.8, виберемо необхідний мікропроцесор STM32F030C8 [31] на базі 32-бітного ядра з частотою 48 МГц. Його основні параметри вказано в табл. 4.9. Схематичне зображення мікропроцесора STM32F030C8 показано на рис. 4.13.

Таблиця 4.9 – Основні технічні параметри мікропроцесора STM32F030C8

| | |
|---|-------------------------|
| Напруга живлення | 3,3 В |
| Напруга цифрових і входних/вихідних сигналів | 2,5 – 3,3 В |
| Flash-пам'ять | 64 Кб |
| SRAM | 8 Кб |
| Лічильник прогресивного контролю | 1 (16-біт) |
| Лічильник загальноцільовий | 5 (16-біт) |
| Лічильник базовий | 1 (16-біт) |
| SPI інтерфейс | 2 |
| I2C інтерфейс | 2 |
| USART інтерфейс | 2 |
| 12-бітний АЦП (кількість каналів) | 1 (10 зовн. і 2 внутр.) |
| Максимальна частота процесора | 48 МГц |
| Кількість загальноцільових входів/виходів (GPIOs) | 39 |
| Корпус | LQFP48 |

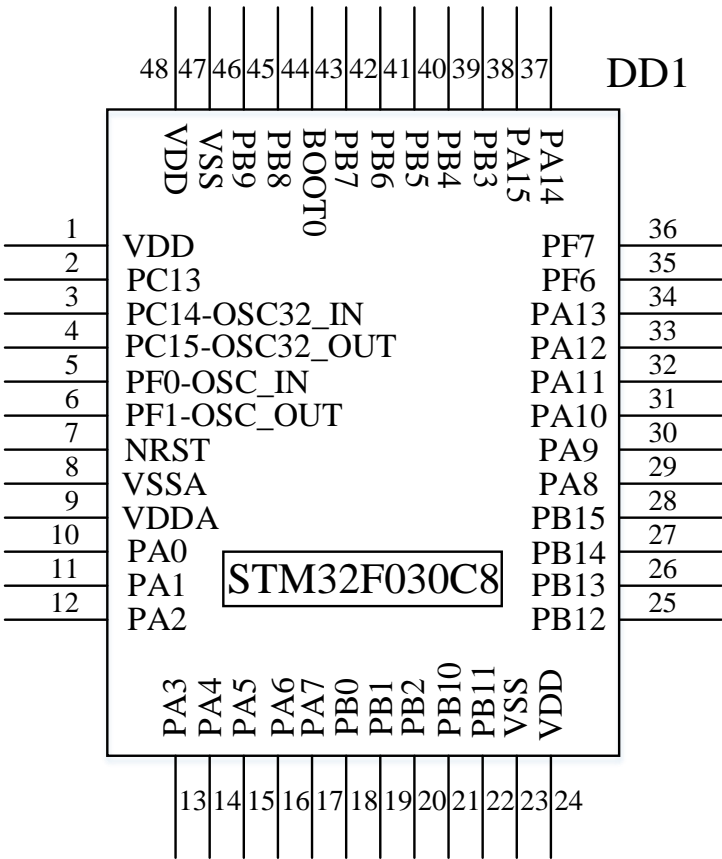


Рисунок 4.13 – Мікропроцесор STM32F030C8

Реалізуємо схемотехнічні рішення для роботи вибраного процесора.

1. Організація живлення мікроконтролера.

Всі елементи мікроконтролера будуть мати живлення $+3,3$ В – на одному рівні з мікропроцесором. Реалізуємо пониження напруги із $+48$ В від акумулятора живлення до $+3,3$ В мікроконтролера. Для цього використаємо DC-DC перетворювач рівнів напруги від силової схеми до схеми керування. З каталогу [32] вибираємо елемент P6CU-483R3ELF з параметрами перетворення напруги 48 В – $3,3$ В. Схема його застосування зображена на рис. 4.14.

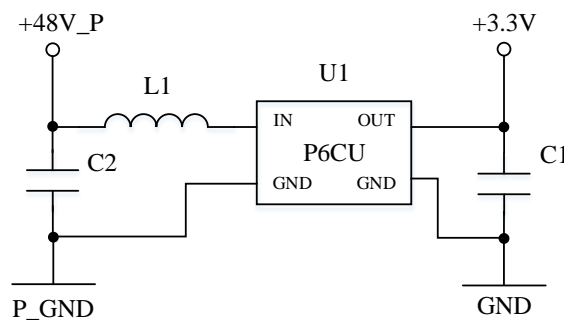


Рисунок 4.14 – Схема застосування перетворювача P6CU-483R3ELF

Для роботи DC-DC перетворювача необхідно використати наступні елементи, які вибрані згідно рекомендацій виробника:

- 1) Вихідний конденсатор C1 ємністю 10 мкФ і напругою $+75$ В [20];
- 2) Вхідний конденсатор C2 ємністю 10 мкФ і напругою $+20$ В [20];
- 3) Вхідна котушка індуктивності L1 з індуктивністю 18 мкГ [21].

2. Організація шлейфу для програмування процесора.

Для програмування процесора STM32F030C8 використовується програматор ST-LINK/V2 [33], за допомогою SWD з'єднання. На схемі шлейф позначено як XT1.

3. Фільтр живлення мікропроцесора.

В живильних ланцюгах зазвичай присутні різноманітні перешкоди. Для якості вимірювання АЦП процесора це може мати сильно негативні наслідки. Щоб уникнути цього, розділимо загальну землю на цифрову й аналогову так, як показано на рис. 4.15.

В якості конденсаторів C6 і C3 вибираємо з каталогу [20] керамічні конденсатори на 0,2 мкФ напругою 16 В і 0,01 мкФ напругою 6,3 В відповідно.

В якості конденсаторів C5 і C4 з каталогу [34] виберемо електролітичні конденсатори напругою 4 В з ємністю 4,7 мкФ і 1 мкФ відповідно.

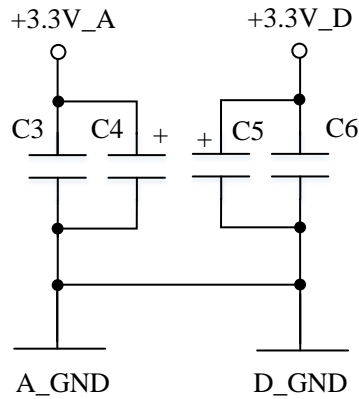


Рисунок 4.15 – Схема розподілу землі на цифрову й аналогову

4. Кварцовий резонатор.

Для завдання частоти процесору виберемо кварцовий резонатор X1 з частотою 32 кГц [35] і конденсатори C7 і C8 ємністю по 12 пФ [20] кожен. На рис. 4. 16 показано схему під'єднання осцилятора до процесора.

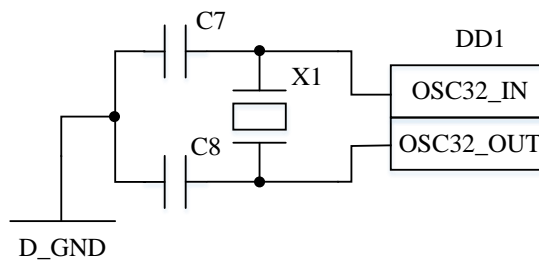


Рисунок 4.16 – Кварцовий резонатор

Основні елементи для роботи мікропроцесора STM32F030C8 реалізовано, а тому почнемо виконувати з'єднання зовнішніх елементів з мікроконтролером.

4.2.3. З'єднання зовнішніх сигналів з мікроконтролером

1. Виходи керування драйверами силових ключів.

Керування драйверами силових ключів здійснюється за допомогою ШІМ-виходів процесора, оскільки для системи керування важливим є синхронізація сигналів у часі. Використаємо мікросхему-буфер SN74HCT541PW [36], яка живиться напругою +3,3 В, для узгодження сигналів (рис. 4.17).

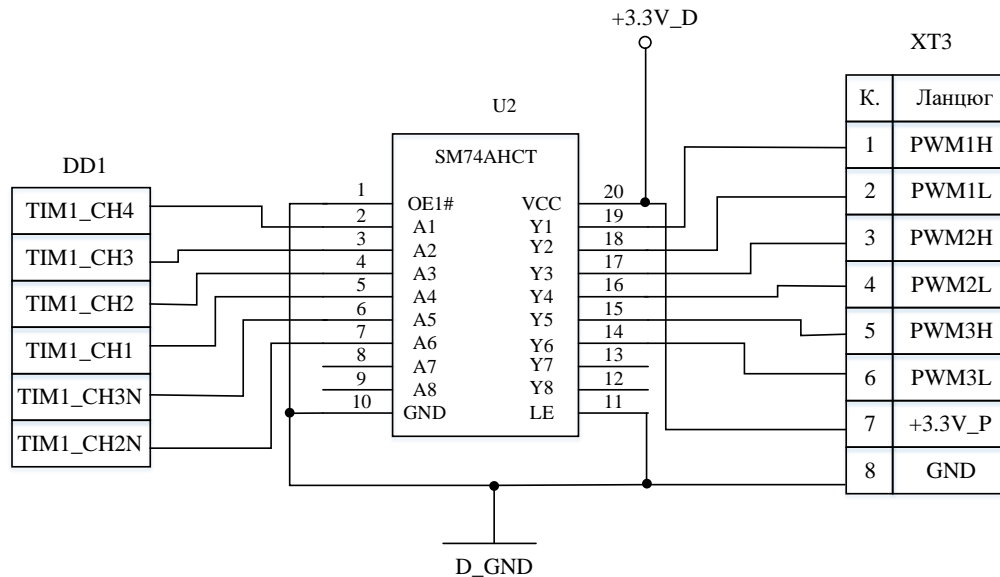


Рисунок 4.17 – Схема для узгодження вихідних сигналів процесора з драйверами силових ключів інвертора

2. Опитування датчиків напруги й струму силової частини електропривода.

Сигнали від датчиків напруги й струму потрапляють на вхід аналого-цифрового перетворювача за допомогою схем аналогових входів (рис. 4.18).

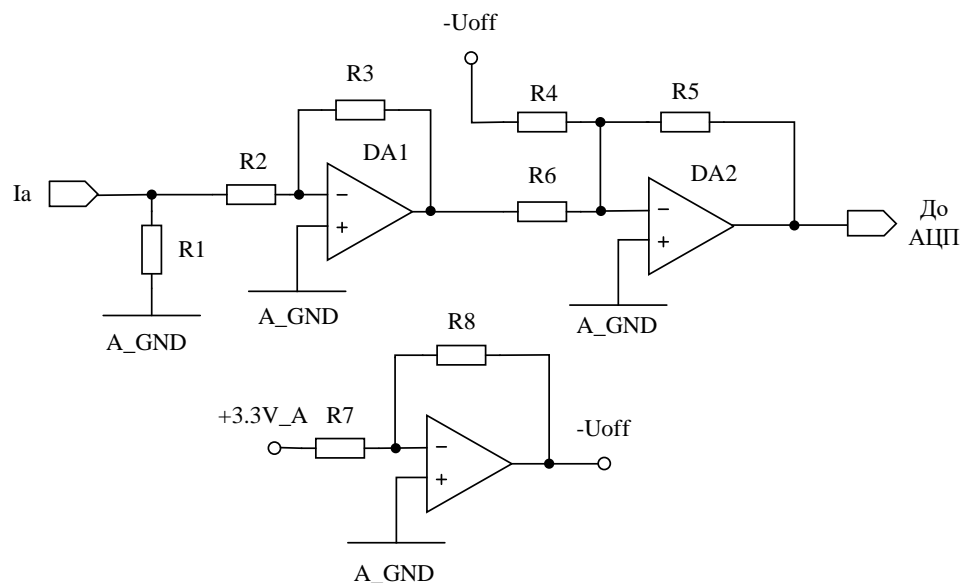


Рисунок 4.18 – Аналоговий вхід для датчиків напруги й струму силової частини

В якості операційного підсилювача виберемо мікросхему TLC2274 [37].

Порахуємо всі елементи аналогових входів. Оскільки датчики напруги й струму мають однаковий вихідний сигнал, то достатньо порахувати лише один аналоговий вхід, а інші будуть такі самі.

Нехай резистор $R1 = 200 \text{ Ом}$, тоді напруга на вході дорівнює:

$$U_{R1} = I_s \cdot R1 = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 200 = 10 \text{ (В)}. \quad (4.4)$$

Нехай резистори $R3 = R4 = R5 = R6 = 10 \text{ кОм}$, тоді резистор $R2$ дорівнюватиме:

$$R2 = R3 \frac{U_{R1}}{U_{\text{adc}}} = 10 \cdot 10^3 \cdot \frac{10}{3,3} = 4 \text{ (кОм)}. \quad (4.5)$$

Нехай резистор $R8 = 10 \text{ кОм}$, тоді резистор $R7$ дорівнює:

$$R7 = R8 \frac{U_1}{U_{\text{off}}} = 10 \cdot 10^3 \cdot \frac{3,3}{\frac{3,3}{2}} = 20 \text{ (кОм)}. \quad (4.6)$$

Отже, з каталогу [19] виберемо три резистори опором 200 Ом , дванадцять резисторів опором 10 кОм , три резистора з опором 4 кОм і ще три резистора по 20 кОм кожен.

3. Сигнал завдання ручки газу.

Для реалізації аналогового входу для сигналу від ручки газу використаємо схему, що зображена на рис. 4.19.

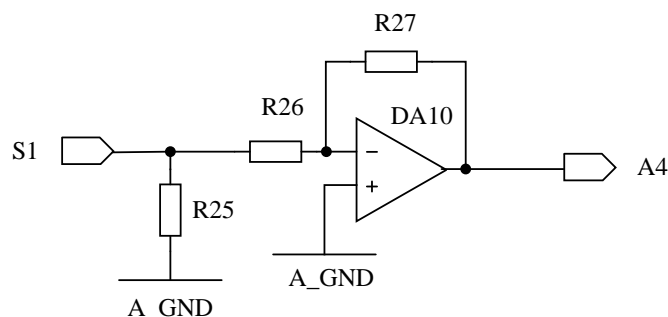


Рисунок 4.19 – Аналоговий вхід для сигналу від ручки газу

В якості операційного підсилювача використаємо той же, що й в попередньому випадку – TLC2274 [37].

Нехай значення опору резистора $R_{25} = 10 \text{ кОм}$, резистора $R_{27} = 10 \text{ кОм}$.
Тоді резистор R_{26} буде дорівнювати:

$$R_{26} = R_{27} \frac{U_{R_{25}}}{U_{\text{adc}}} = 10 \cdot 10^3 \cdot \frac{5}{3,3} = 1,5 \text{ (кОм)}. \quad (4.7)$$

З каталогу [19] виберемо потрібні резистори.

4. Сигнал завдання PAS.

Дискретний вхід від PAS реалізуємо за допомогою оптопари PC817 (рис. 4.20). Згідно технічної документації [38], його максимальний прямий струм дорівнює $I_{\text{op}} = 50 \text{ мА}$.

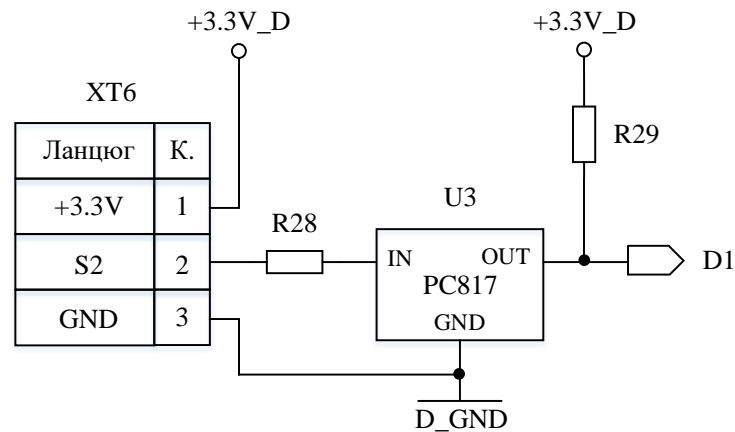


Рисунок 4.20 – Дискретний вхід

Резистор вихідного кола оптопари знайдемо за законом Ома:

$$R_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вих}}}{I_{\text{op}}} = \frac{3,3}{50 \cdot 10^{-3}} = 66 \text{ (Ом)}. \quad (4.8)$$

Таким же чином знайдемо резистор вхідного кола:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{op}}} = \frac{3,3}{50 \cdot 10^{-3}} = 66 \text{ (Ом)}. \quad (4.9)$$

З каталогу [19] вибираємо два резистори опором 75 Ом.

В табл. 4.11 представлено конструктиви системи електровелосипеда.

Таблиця 4.11 – Поділ обладнання на конструктиви

| АКБ (A1) | Двигун (A2) | Плата керування (A3) | Силова плата (A4) |
|---------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------|
| Ручка газу/PAS (A5) | Датчики гальмування (A6) | Пульти керування (A7) | Світло/звук (A8) |

На рис. 4.21 представлено схему електричних з'єднань.

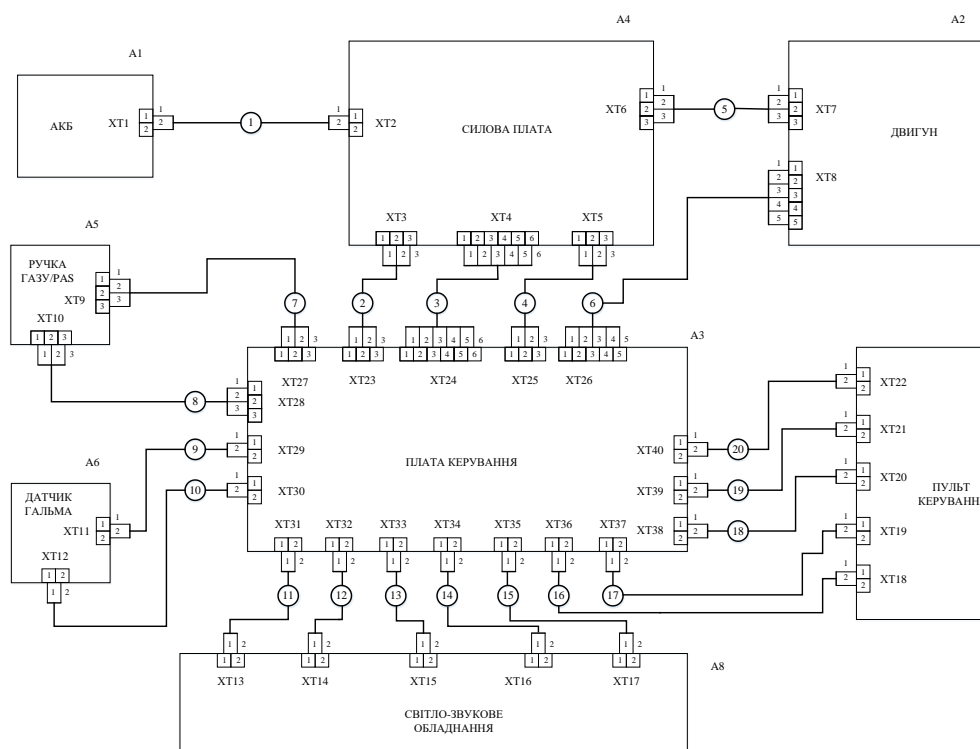


Рисунок 4.21 – Схема електричних з'єднань

Висновок до розділу 4.

В цьому розділі дипломної роботи практично реалізовано автоматичну систему керування електромеханічною системою електровелосипеда.

- 1) Розроблено електричну принципову схему силовій частини електропривода. Вона містить автономний інвертор напруги із MOSFET транзисторами, датчики напруги ланки постійного струму і фазних струмів, перетворювач рівня напруги 48 В – 15 В і шість драйверів керування силовими ключами.
- 2) Розроблено електричну принципову схему керування електровелосипедом. Вона містить 32-х бітний процесор з елементами, що забезпечують його роботу (осцилятор, програматор, фільтр), два перетворювача напруги для живлення елементів контролера й зовнішнього обладнання, LCD-дисплей з контролером інтерфейсу передачі даних I2C, дискретні й аналогові входи/виходи опрацювання різних сигналів системи електровелосипеда. Виконано схему електричних з'єднань.

ВИСНОВОК

В даному дипломному проєкті розроблено автоматизовану електромеханічну систему керування електровелосипедом. Сфера розвитку електротранспорту зараз зростає, а тому питання створення вискоефективних автоматизованих електромеханічних систем малогабаритного транспорту, такого як електровелосипед, є дуже важливим. Під час роботи отримано наступні результати.

- 1) Виконано аналітичний огляд ринку й літератури. Отримано сучасну інформацію про стан розвитку такого малогабаритного електротранспорту як електровелосипед. Виконано структурування електромеханічної системи досліджуваного об'єкта. Вона містить автономне джерело живлення, блок керування, перетворювальний, електродвигунний, передавальний пристрої і робочий орган. До кожного з цих елементів сформовано вимоги щодо їх ефективності. Згідно з цим, було визначено, що в сучасних електровелосипедах потрібно використовувати літій-іонні акумуляторні батареї, контролери керування, безколекторний двигун постійного струму з планетарним редукторним механізмом в конструкції мотор-колеса, а також інші різноманітні органи керування й контролю задля досягнення високих показників якості керування електромеханічною системою, комфорту й безпеки руху на електровелосипеді.
- 2) Виконано розрахунок основних параметрів системи електроприводу. Задля досягнення вимог щодо швидкості руху на електровелосипеді і дальності поїздки на ньому, згідно заданих параметрів, розраховано тягові елементи електромеханічної системи. Визначено потужність електродвигуна, яка потрібна для подолання основних сил опору й гарної динаміки руху, після чого вибраного безколекторний двигун постійного струму та редуктор з муфтою вільного ходу для нього. Для забезпечення необхідного середнього пробігу електровелосипеда на одному заряді акумуляторної батареї виконано розрахунок енергетичної ємності джерела

живлення з врахування фізичних і хімічних особливостей його типу. Обрано літій-іонну акумуляторну батарею і зарядний пристрій для неї.

- 3) Виконано розробку системи керування БДПС. На основі математичного опису об'єкта синтезовано алгоритми керування струмом і моментом електродвигуна, які повинні забезпечувати необхідні вимоги щодо якості й ефективності керування електромеханічною системою. Основна з них полягає в асимптотичному регулюванні електромагнітного моменту, адже в електричних двигунах він може зростати дуже швидко і становити дискомфорт та навіть небезпеку для водія. Побудова системи керування реалізується за допомогою керованого інвертора напруги і мікропроцесорного пристрою. Регулювання здійснюється на основі широтно-імпульсного гістерезисного компаратора, який регулює струм в межах встановленої зони щодо заданого значення сигналу завдання. Для перевірки якості розробленої системи керування виконано моделювання в MATLAB/Simulink з використанням блоків бібліотеки SimPowerSystems. Аналіз перехідних процесів довів успішність застосування описаного методу керування.

- 4) Практично реалізовано систему керування електромеханічної системи електровелосипеда. Виконано схему електричну принципову силової частини електропривода, яка фактично являє собою перетворювальним пристроєм системи, за допомогою якого здійснюється необхідне живлення двигуна. Також спроектовано схему керування електровелосипедом. Вона виконує функції керування й контролю усіх елементів електромеханічної системи. Схему реалізовано за допомогою різноманітної електронної техніки – мікропроцесора, приладів живлення, інтерфейсу передачі даних, мікросхем-буферів, оптопар, фільтрів, операційних підсилювачів та багатьох інших пасивних і активних елементів.

Розроблена в дипломному проєкті електромеханічна система повністю дозволяє на її основі виконати реальну систему електровелосипеда з дотриманням усіх вимог щодо якості керування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Журнал «Bicycling». URL: <https://www.bicycling.com/skills-tips/a20044021/13-things-about-e-bikes/>
2. Журнал «Century Cycles». URL: <https://www.centurycycles.com/buyers-guides/bicycle-types-how-to-pick-the-best-bike-for-you-pg9.htm>
3. Вебсайт-канал «BetterHealth». URL: <https://www.betterhealth.vic.gov.au/health/healthyliving/cycling-health-benefits>
4. Теорія і синтез вентильних двигунів постійного струму. / В. І. Ткачук, І. Є. Біляковський, О. В. Макарчук та ін.
5. Способи керування частотою обертання вентильних двигунів / В. І. Ткачук, В. Г. Гайдук / Вісн. Львів. політ. ін-та. – 2001. – с. 202 – 208.
6. Розрахунок потужності електродвигуна і ємності акумуляторної батареї електроприводу електровелосипеда / М. О. Ісип, Р.Ю. Семененко, С. Гончаров / Інновації молоді в машинобудуванні №2
7. Технічна документація електродвигуна Aegean Dynamics. URL: <https://aegeandynamics.com/product/0-5kw-blDC-hub-motor-0-5kw-i-623-rpm-i-8-42-nm-i-96-v/>
8. Сайт для замовлення редуктора й муфти. URL: <https://www.lancereal.com/products/gearboxes/planetary-gears/>
9. Технічна документація АКБ Boston Swing. URL: <https://evel.ua/catalog/akkumuljatori/akkumuljator-boston-swing-48v159ah/>
10. Технічна документація зарядного пристрою АКБ. URL: <https://evel.ua/catalog/aksessuari/zarjadvnie-ustroystva/cccv-546v4a/>
11. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives / R. Krishnan.
12. Modelling of sensed speed control of BLDC motor using MATLAB/SIMULINK / Basim Alsayid, Wael A. Salah, Yazeed Alawneh

13. BLDC Motor Modelling and Control / Stefan Baldursson
14. Mohan N. Power Electronics. A first Course / N. Mohan.
15. Технічна документація силового ключа інвертора IRFR3806. URL: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/12v-300v-n-channel-power-mosfet/irfr3806/>
16. Технічна документація датчика напруги LV100-100. URL: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_100_-_100.pdf
17. Технічна документація датчика струму LA100-TP. URL: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_100-tp_e.pdf
18. Технічна документація DC-DC перетворювача LM76003. URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm76003.pdf?ts=1623323069015&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
19. Каталог керамічних конденсаторів URL: https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/capacitor/ceramic/mlcc/catalog/mlcc_commercial_general_en.pdf
20. Каталог резисторів. URL: https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/capacitor/ceramic/mlcc/catalog/mlcc_commercial_general_en.pdf
21. Каталог котушок індуктивності. URL: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/54/SRN1060-1391513.pdf>
22. Технічна документація драйвера силової схеми HCPL3120. URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/hcpl3120-000e.pdf>
23. Технічна документація ручки газу. URL: https://e-bike.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=764
24. Технічна документація PAS. URL: https://e-bike.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=763
25. Технічна документація датчика гальмування. URL: https://e-bike.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=2599

26. Технічна документація кнопки круїз-контроля. URL: https://e-bike.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=1265
27. Технічна документація передньої фари зі звуковим сигналом. URL: <https://evel.ua/catalog/aksessuari/light/HGMLLED40USB/>
28. Технічна документація задньої фари із вказівниками повороту. URL: <https://el-vel.com.ua/ua/p1422297442-fara-zadnyaya-wd400.html>
29. Технічна документація пульта керування. URL: https://e-bike.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=763
30. Технічна документація LCD-дисплея. URL: [//www.openhacks.com/uploads/productos/eone-1602a1.pdf](http://www.openhacks.com/uploads/productos/eone-1602a1.pdf)
31. Технічна документація мікропроцесора STM32F030C8. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f030rc.pdf>
32. Технічна документація DC-DC перетворювача P6CU. URL: https://imrad.com.ua/userdata/modules/productFiles/YAaMeUjX_P6CU.pdf
33. Технічна документація програматора мікропроцесора ST-LINK/V2. URL: https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00026748-stlinkv2-incircuit-debuggerprogrammer-for-stm8-and-stm32-stmicroelectronics.pdf
34. Каталог електролітичних конденсаторів URL: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/281/c90e-1501405.pdf>
35. Технічна документація кварцового резонатора NE556DB. URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/texas-instruments/NE556DB/12130748>
36. Технічна документація SN54AHCT573. URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn54ahct573.pdf?ts=1623635536639&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
37. Технічна документація операційного підсилювача для аналогових входів TLC2274. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/28893/TI/TLC2274.html>
38. Технічна документація оптопари для дискретних входів/виходів PC817. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/optopara-pc817>

СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

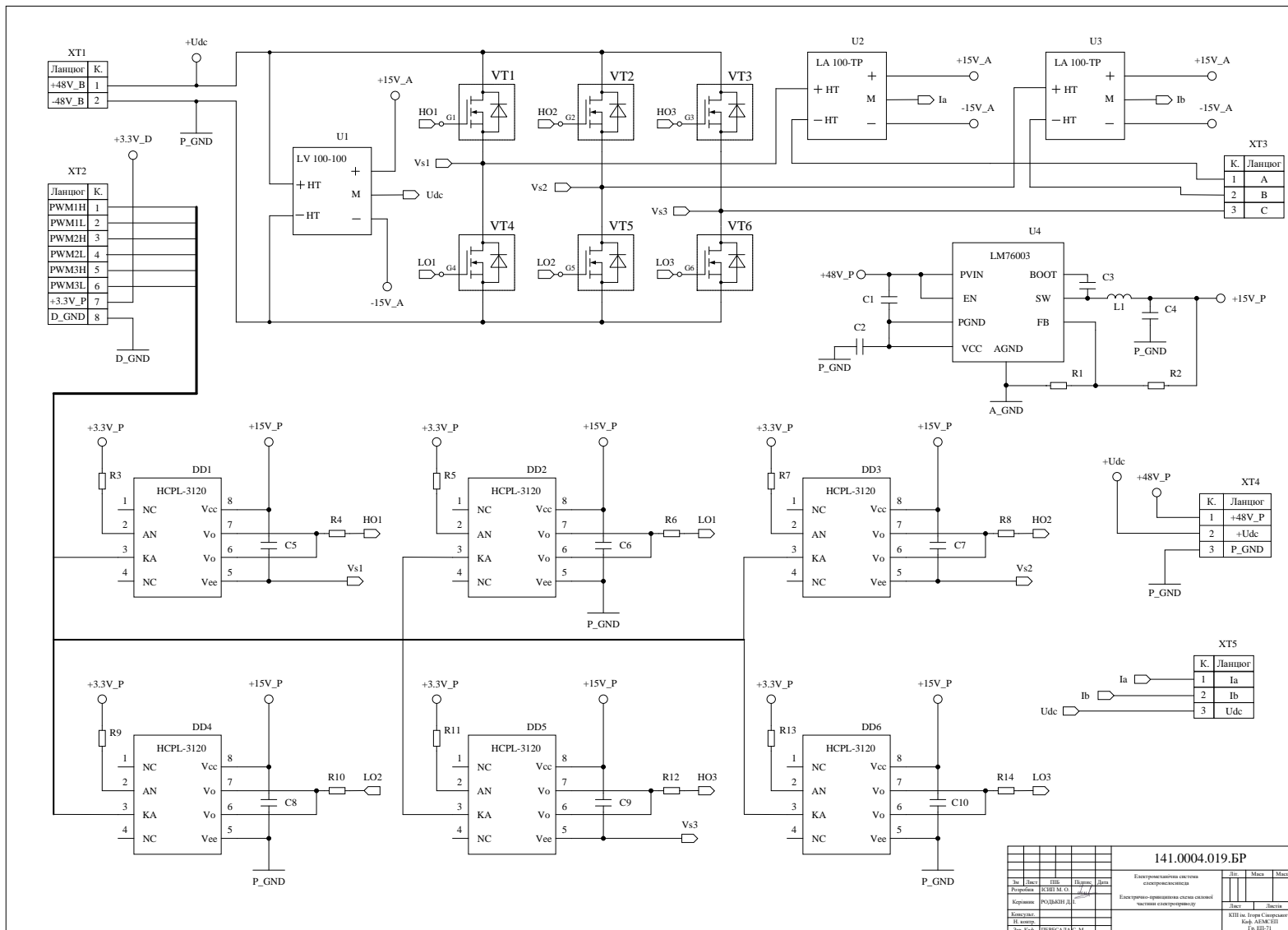


СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

