

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ Сергій КОВБАСА
(підпис)

“ ____ ” _____ 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 електросамокату на основі синхронного двигуна з
постійними магнітами**

Виконав (-ла): студент (-ка) 4 курсу, групи ЕП-91
(шифр групи)

Барбул Денис Андрійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник д.т.н., доцент Ковбаса Сергій Миколайович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____
(підпис)

Київ – 2023 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

[illegible]

				141.ЕП9101.001.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Барбул Д.А.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Ковбаса С.М.				2	63
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП- 91	
Н/контр.	Теряєв В. І.					
Зав.каф.	Ковбаса С. М.					

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Електромеханічна система електросамокату на основі синхронного двигуна з постійними магнітами _____

**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
_____ Сергій КОВБАСА
(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Барбула Дениса Андрійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Електромеханічна система електросамокату на основі синхронного двигуна з постійними магнітами _____

керівник проекту д.т.н., доцент Ковбаса Сергій Миколайович _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Термін подання студентом проекту 12.06.2023 _____

3. Вихідні дані до проекту траєкторія руху електросамокату в міських умовах, запас ходу 30 кілометрів, максимальна швидкість 36 км/год _____

4. Зміст пояснювальної записки 1 Аналітичний огляд електромеханічної системи. 2 Розрахунок та вибір основних елементів емс 3 Розрахунок параметрів сдпм та розробка системи керування двигуном 4 Математичне моделювання системи

векторного керування моментом. 5 Практична реалізація системи векторного керування моментом синхронного двигуна з постійними магнітами. _____

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Креслення загального виду електромеханічної системи моноколесу (формат A1); схема електрична принципова силової частини електроприводу, схема електрична принципова керуючого пристрою (формат A1); функціональна та структурна схеми системи, результати дослідження статичних та динамічних режимів (формат A1) _____

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

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

7. Дата видачі завдання 10 лютого 2023 _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд електромеханічної системи.	03.04.23	
2	Розрахунок та вибір основних елементів ЕМС	24.04.20	
3	Розрахунок параметрів сдпм та розробка системи керування двигуном	15.05.20	
4	Математичне моделювання системи векторного керування моментом.	22.05.20	
5	Практична реалізація системи векторного керування моментом синхронного двигуна з постійними магнітами.	03.06.20	
	Оформлення пояснювальної записки	12.06.20	

Студент

(підпис)

Барбул Д.А.

Керівник проекту

(підпис)

Ковбаса Сергій

Бакалаврська робота складається із вступу, п'яти розділів, висновка, списку використаної літератури і додатка (63 сторінок пояснювальної записки, 15 рисунків, 6 таблиць, 28 використаних джерел).

Мета роботи – розробка електромеханічної системи електросамокату на основі синхронного двигуна з постійними магнітами.

Об'єкт дослідження – синхронний двигун з постійними магнітами.

Предмет дослідження – алгоритм векторного керування моментом синхронного двигуна з постійними магнітами.

В першому розділі проведено аналітичний огляд електромеханічної системи електросамокату, розглянуто будову пристрою, окремі компоненти електричної частини.

В другому розділі розроблено цикл руху електросамокату, визначено кількість затраченої енергії, на основі цих даних розраховано акумуляторну батарею.

В третьому розділі розроблено математичну модель керування моментом синхронного двигуна з постійними магнітами.

В четвертому розділі промодельовано електромеханічну систему в середовищі MatLab Simulink.

В п'ятому розділі здійснено вибір обладнання, та пораховано вартість усіх компонентів.

ЕЛЕКТРОСАМОКАТ, СИНХРОННИЙ ДВИГУН З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ, СУПЕРКОНДЕНСАТОР, СДПМ

					141.0001.001.БР			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Барбул Д. А.			Електромеханічна система електросамокату на основі синхронного двигуна з постійними магнітами	Літ.	Лист	Листів
Перевір.							7	63
Реценз.						КПІ ім Ігоря		
Н. Контр.								
Затв.								

The bachelor thesis consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of used literature and an appendix (63 pages of explanatory note, 15 figures, 6 tables, 28 used sources).

The purpose of the work is to develop an electromechanical system of an electric scooter based on a synchronous motor with permanent magnets.

The object of research is a synchronous motor with permanent magnets.

The subject of the study is the torque vector control algorithm of a synchronous motor with permanent magnets.

In the first chapter, an analytical review of the electromechanical system of the electric scooter was carried out, the structure of the device, individual components of the electric part were considered.

In the second section, the electric scooter motion cycle is developed, the amount of energy consumed is determined, and the battery is calculated based on these data.

In the third chapter, a mathematical model of torque control of a synchronous motor with permanent magnets is developed.

In the fourth chapter, the electromechanical system is modeled in the MatLab Simulink environment.

In the fifth section, the selection of equipment is made, and the cost of all components is calculated.

ELECTRIC CAR, PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR, MATHEMATICAL MODELING, TORQUE VECTOR CONTROL, ACCUMULATORY BATTERY, SUPER CAPACITOR, PMSM

					141.0001.001.БР						
Ch.	Sheet	No document	Sign.	Date							
Develop.		Барбул Д. А.			Electromechanical system of an electric scooter based on a synchronous motor with permanent magnets			Let.		Mass	Scale
Check.									8	63	
Review.				Igor Sikorsky KPI, FEA, AEMS-ED, EP-91							
N. contr.											
Approv.											

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	13
1.1 Будова електросамоката	15
1.2 Електропривід.....	16
1.3 Плата керування	17
1.4 Супер конденсатори.....	18
1.4.1 Історія створення перших іоністорів.....	19
1.5 Літій-йонний акумулятор	21
1.5.1 Історія виникнення літій йонних акумуляторів.	22
2 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕМС	23
2.1 Розрахунок потужності двигуна	23
2.2 Вибір приводного двигуна електросамокату	27
2.3 Розрахунок та вибір батареї акумуляторів	27
2.4 Порівняння використання батареї конденсаторів в якості акумуляторної батареї автомобіля.....	29
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СДПМ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ.....	31
3.1 Розрахунок параметрів СДПМ.....	31
3.2 Постановка задачі веторного керування швидкістю СДПМ	33
3.3 Математична модель СДПМ.....	34
3.4 Алгоритм векторного керування моментом СДПМ.....	34
3.5 Алгоритм векторного керування швидкістю СДПМ	37
4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ	40
4.1 Моделювання системи векторного керування моментом.....	41
4.2 Дослідження динамічних характеристик.....	41
5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ	45
5.1 функціональна схема синхронного електроприводу з живленням від акумуляторної батареї.....	45
5.2 Розрахунок силової частини.	46
5.3 Розрахунок інвертора напруги.....	47

	10
5.4 Розрахунок резистора та ключа клампера	48
5.5 Вибір датчиків напруги та струму	49
5.6 Датчик швидкості	49
5.7 Розрахунок вартості компонентів	50
ВИСНОВКИ	53
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	55
ДОДАТОК А	59

ВСТУП

Для людей у сучасному світі однією з найважливіших завдань є раціональне використання часу. Тому було розроблено багато електронних пристроїв з метою досягнення цієї цілі. Один з нових, але вже дуже популярних, електричних засобів транспорту є електросамокат. Це стильний, компактний та легкий у керуванні засіб пересування, який також досягає значної швидкості (до 80 км/год). Це саме те, що потрібно для життя у великому місті з постійними транспортними заторами. Електросамокат не лише зручний у використанні в повсякденному житті, а й економічний та екологічний.

Перший електросамокат, який працював за допомогою десяти вольтової батареї, був запатентований 19 вересня 1895 року Огденом Болтоном в США, проте, через недосконалість джерел живлення в ті часи, не набув популярності і був витіснений моторизованим самокатом з бензиновим двигуном.

Зовні електросамокат має простий та дуже компактний вигляд. Це звичайний самокат, дещо більшого розміру, в середині якого знаходиться батарея акумуляторів, плата керування та електродвигун, які приводять його в рух. Такий транспортний засіб можна використовувати для прогулянок, поїздок на невеликі відстані а також щоб дістатись до місця роботи. Електросамокат звісно не може повністю замінити автомобіль, проте його можна сміливо використовувати замість велосипеда, скутера або мопеда.

В електросамокаті велику роль відіграє ємність акумулятора: чим вона більша – тим більшу відстань подолає транспортний засіб.

Поява безколекторних двигунів постійного струму зі збудженням від постійних магнітів (brushless DC motor) привела до популярності електричних транспортних засобів, оскільки такі двигуни мають високу енергоефективність, пускові моменти та велику перевантажувальну здатність.

Причиною широкого розповсюдження компактного електротранспорту став розвиток електроніки, зокрема винахід IGBT. Крім того поява потужних, рідкоземельних магнітів в NdFeB та SmCo відіграли чималу роль.

Концепція безколекторного двигуна з'явилася на ранньому етапі розвитку електротехніки та електромеханіки. Однак, через обмеженість технологій, її впровадження затримувалося до 1962 року, коли було запущено перший комерційний безколекторний двигун постійного струму. З того часу пройшло понад півстоліття, і було розроблено різні серійні реалізації цього типу електроприводу. Останні 10 років характеризується значним прогресом у розробці та розширенні ринку безколекторних двигунів, що відбувається швидше, ніж у випадку машин з постійними магнітами інших типів.

Такі типи двигунів мають багато переваг:

- Більш надійні через відсутність колектора;
- Необмежені в частоті обертання;
- Мають високий коефіцієнт корисної дії та потужності;
- Має компактні розміри.

Отже метою цієї бакалаврської роботи є розробка електромеханічної системи електросамокату на основі безколекторного двигуна постійного струму.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Електросамокат – сучасний засіб пересування на невеликі відстані. Такий вид самокату є вигідною альтернативою до популярних міських транспортів, таких як скутер, мопед та велосипед. Тому розглянемо основні переваги електросамокату над цими видами транспорту:

- Екологічність. Електросамокат дозволяє зменшити викиди вуглекислого газу в місті, тим самим не завдає шкоди населенню. Кожен самокат який пересувається вулицями, замість бензинового транспорту, робить повітря чистішим.

- Невеликий розмір дає змогу зберігати самокат навіть у квартирі, крім того є можливість вільно пересуватись містом навіть вузькими вулицями та у великому потоці людей.

- Економічність. Електросамокат не потребує регулярних витрат на заправку та обслуговування, також власник власник звільнений від різного виду податків. Економічність ще можна помітити в ціні на транспортний засіб.

- Надійність, яка проявляється в довгих роках роботи цього виду транспорту, а також у довговічності електромеханічної системи.

Існують різноманітні види самокатів, які поділяють за різними характеристиками.

По-перше розглянемо електросамокат в залежності від типу приводу.

1. Повний привід. Двигуни розташовані в передньому та задньому колесах, що дає змогу з легкістю проходити будь-які перешкоди, а також поєднує в собі переваги електросамокатів з переднім та заднім приводами.

2. Передній привід. Спереду розташовується двигун-колесо. Ця конструкція допомагає легко керувати самокатом при повороті, а також забезпечує доволі швидкий розгін. Проте швидкість руху залежить від покриття дороги.

3. Задній привід. У свою чергу поділяється на два підтипи:

- Двигун розташований у задньому колесі, такий самокат дозволяє легко підніматися вгору та їздити по будь-яким типам доріг.

- Двигун розташований на корпусі самокату та приводить у рух колесо за допомогою ципка. Така конструкція дає змогу встановити на самокат більш потужний двигун.

По-друге, електросамокати поділяють на дві групи в залежності від типу акумуляторної батареї:

- З свинцевим акумулятором: витримує низькі температури та дозволяє користуватись електросамокатом навіть під час холодів.

- Проте самокат з таким типом акумулятора потребує тривалої зарядки, а також має невелику ємність.

- З літій-йонним акумулятором, мають великий ресурс, розрахований приблизно на 1000 циклів перезарядки.

Проте такі акумулятори дорожчі за свинцеві, та мають меншу стійкість до низьких температур.

По-третє, електросамокати поділяються в залежності від кількості коліс розташованих на корпусі.

- Двоколісні: їхня перевага полягає у компактній конструкції та невеликій вазі. Однак такі електросамокати потребують деяких навичок керування, а також вміння тримати рівновагу.

- Триколесні, у яких два колеса знаходиться позаду. Такі самокати іноді доповнюють сидінням, що допомагає долати більші відстані. До переваг цього виду самокату можна віднести комфортабельність та стійкість. Проте такі електросамокати більш габаритні та мають доволі велику вагу.

- Триколесні, у яких два колеса знаходиться попереду. Ці самокати вирізняються здатністю гарно маневрувати, вони легкі в керуванні, досить швидко розганяються та можуть проїхати будь-якими типами доріг.

1.1 Будова електросамоката

На рисунку 1.1 зображено електросамокат та його будову.



Рисунок 1.1 – схематичне зображення електросамоката

З рисунка:

1. – ручка гальма, призначена для керування гальмами;
2. – ручка газу, призначена для керування швидкістю пересування;
3. – кермо, призначене для керування напрямком;
4. – стоп сигнал, сигналізує про натиснення ручки гальма;
5. – гальмівна система, призначена для зменшення швидкості;
6. – мотор-колесо, призначене для набору швидкості та зупинки;
7. – платформа для райдера – місце де стоїть кермувальник;
8. – заднє колесо;
9. – підніжка, призначена для фіксації самокату під час стоянки.

На рисунку 1.2 зображена внутрішня будова електросамокату.

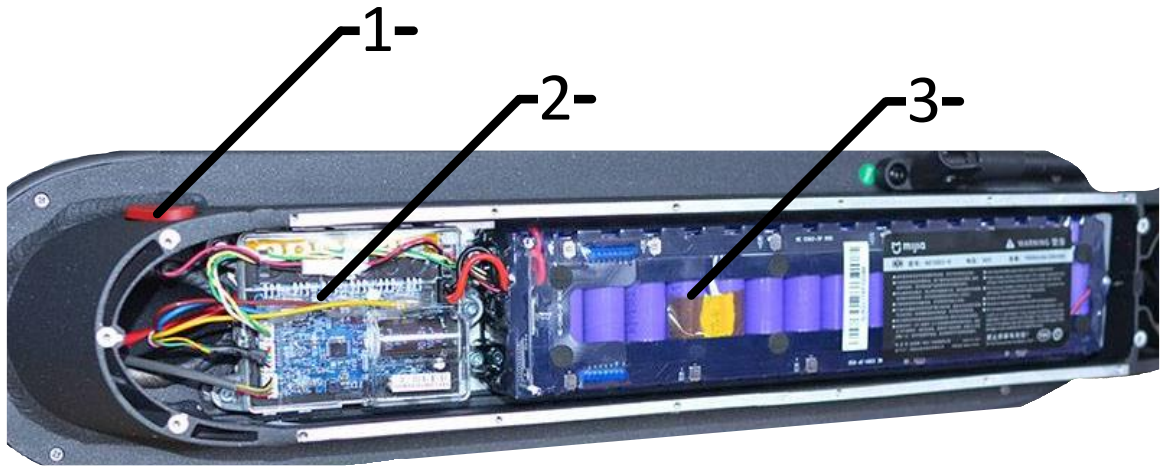


Рисунок 1.2 – внутрішня будова електросамокату

З рисунку 1.2 :

1. Роз'єм для зарядки, призначений для заряджання акумуляторів.
2. Плата керування, призначена для керування живленням електродвигуна, контролю заряджання акумуляторів та різного роду індикацій. Такий пристрій зазвичай будують на основі програмованого логічного контролера.
3. Акумуляторна батарея, призначена для живлення самокату, зазвичай складається з літій-йонних акумуляторів типу 18650.

1.2 Електропривід

В електросамокаті використовується електропривід на основі синхронного двигуна з постійними магнітами

У 80-ті роки минулого століття були створені високоефективні магніти на основі рідкоземельних матеріалів це дало змогу розробити синхронні двигуни із збудженням від постійних магнітів, які за характеристиками не гірші за високомоментні двигуни постійного струму.

Зараз існує декілька конфігурацій синхронних двигунів зі збудженням від постійних магнітів. Їх можна розділити на два класи : електричні машини з несинусоїдальним (трапецієвидним) та з синусоїдальним розподіленням магніторушійної сили (МРС) вздовж кола машини. Двигуни першого типу мають

просту конструкцію, для роботи потребують використання інвертора для формування фазного струму у формі прямокутника та давача положення ротора для визначення моменту подачі струму. Часто система на основі такого двигуна має великі пульсації моменту.

Двигуни з синусоїдальним розподіленням МРС традиційно є дорожчими та мають більш складну будову. Має таку конструкцію ротора, що МРС, створювана постійними магнітами, змінюється за синусоїдальним законом. Конструкція цього двигуна дозволяє виконувати плавне регулювання моменту, отримати більшу перевантажувальну здатність та коефіцієнт корисної дії.

1.3 Плата керування

Типова схема керування електросамокатом побудована на основі перетворювача частоти з ланкою постійного струму. Базою є перетворювач частоти, який виконує функції перетворювального і керуючого пристрою.

Зазвичай перетворювач розділяють на дві складові:

- Силова частина, до неї входить датчик напруги та ємність, клампер, інвертор, датчики фазних струмів, гальванічна розв'язка, сигнали керування силовими ключами інвертора і клампера.
- Контролер керування, до нього входить цифровий контролер, який часто базується на цифровому сигнальному процесорі, схема узгодження сигналів, сигнал з датчика швидкості, опторозв'язки та сигнал з ручки-акселератора.

Призначення основних модулів та елементів розглянемо більш детально:

Клампер призначений для стабілізації напруги при роботі двигуна в генераторному режимі, при якому енергія від двигуна рекуперується в ланку постійного струму.

Інвертор перетворює напругу ланки постійного струму у потрібну фазну напругу на виході перетворювача, результуючий вектор якої має потрібний кут, частоту та модуль.

Датчик напруги призначений для інформування керуючого контролера про напругу в ланці постійного струму, використовується для захисту, контролю заряду акумуляторів та для генерації імпульсів керування ключами інвертора за законами ШІМ.

Датчики фазних струмів призначені для інформування керуючого контролера про фазні струми на клеммах двигуна, використовуються для захисних функцій, а також для організації зворотніх зв'язків.

Датчик швидкості, призначений для інформування керуючого контролера про кутову швидкість, використовується для зворотніх зв'язків.

Опторозв'язка виконує функції захисту керуючого контролера, та захисту від завад.

Схеми узгодження сигналів призначені для приведення аналогових сигналів до допустимого рівня аналогово-цифрового перетворювача керуючого контролера.

1.4 Супер конденсатори

Іоністор, також відомий як супер-конденсатор або ультра-конденсатор, є конденсатором, в якому використовується подвійний електролітичний шар як "обкламки". Товщина подвійного електричного шару надзвичайно мала, що дозволяє накопичувати високу енергію в порівнянні з конденсаторами звичайного типу такого ж розміру. Крім того, використання подвійного електричного шару замість діелектрика дозволяє значно збільшити площу поверхні електрода, наприклад, за допомогою пористих матеріалів, таких як активоване вугілля або спінені метали. Іоністор має питому ємність до декількох фарад на кубічний сантиметр і номінальну напругу від 2 до 4 вольт.

1.4.1 Історія створення перших іоністорів

У 1957 році компанією General Electric був запатентований перший конденсатор з подвійним шаром на пористих вугільних електродах. Хоча точний механізм його роботи тоді ще не був зрозумілим, припускали, що енергія запасається в порах електродів, що забезпечує "надзвичайно високу ємність". У 1966 році компанія Standard Oil of Ohio, Cleveland (SOHIO), USA запатентувала елемент, який зберігав енергію в подвійному шарі. У наступному році ліцензія на цей продукт була передана компанії NEC, яка просунула його на ринку під назвою "Supercapacitor" (Суперконденсатор). В 1978 році Panasonic випустила на ринок "Gold capacitor" ("Gold Cap"), який також працював на принципі зберігання енергії в подвійному шарі. Однак ці конденсатори мали високий внутрішній опір, що обмежував їхню віддачу енергії, тому застосовувалися вони тільки як накопичувальні батареї для SRAM. Фірма PRI розробила перші іоністори з малим внутрішнім опором для потужних схем у 1982 році, які з'явилися на ринку як "PRI Ultracapacitor".

Поява іоністорів забезпечила можливість використовувати конденсатори в електричних колах не лише як перетворюючий елемент, але і як джерело струму, що має кілька переваг над звичайними гальванічними елементами та акумуляторами:

- Високі швидкості заряду та розряду.
- Простота зарядного пристрою.
- Мала деградація навіть після сотень тисяч циклів заряду / розряду.
- Низька вага порівняно з електролітичними конденсаторами подібної ємності.
- Матеріали, що використовуються, не токсичні.
- Висока ефективність (коефіцієнт корисної дії більше 95%).
- Іоністори є неполярними, хоча вони мають позначення «+» та «-» для позначення полярності залишкової напруги після заряду на заводі-виробнику.

Суперконденсатори сьогодні поділяються на:

- Подвійношарові конденсатори (ДБК).
- Псевдоконденсатори.
- Гібридні конденсатори.

Подвійношаровий суперконденсатор рисунок 1.3 складається з двох пористих електродів, які виготовлені з електропровідних матеріалів, і розділених заповненим електролітом сепаратором. Процес накопичення енергії відбувається шляхом розподілу заряду між електродами з великою різницею потенціалів між ними. Електричний заряд подвійношарових конденсаторів безпосередньо залежить від ємності подвійного електричного шару, тобто окремого конденсатора, який знаходиться на поверхні кожного електрода. Електроди з'єднуються між собою за допомогою електроліту, який є провідником з іонною провідністю.

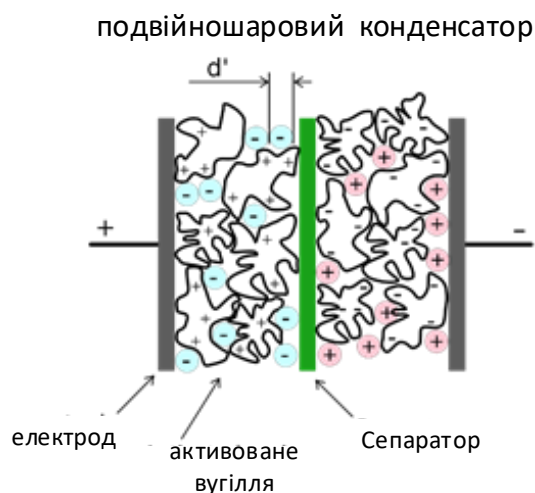


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення подвійношарового суперконденсатора

Псевдоконденсатори рисунок 1.4 мають властивості, близькі до акумуляторів, які можна перезаряджати. Вони складаються з двох твердих електродів і поєднують два механізми збереження енергії: фарадєвські процеси, які схожі з тими, що відбуваються в батареях та акумуляторах, та електростатична взаємодія, яка притаманна конденсаторам з подвійним електричним шаром. Використання приставки "псевдо" пояснюється тим, що

ємність псевдоконденсаторів залежить не лише від електростатичних процесів, але й від швидких фарадієвських реакцій з переносом заряду.

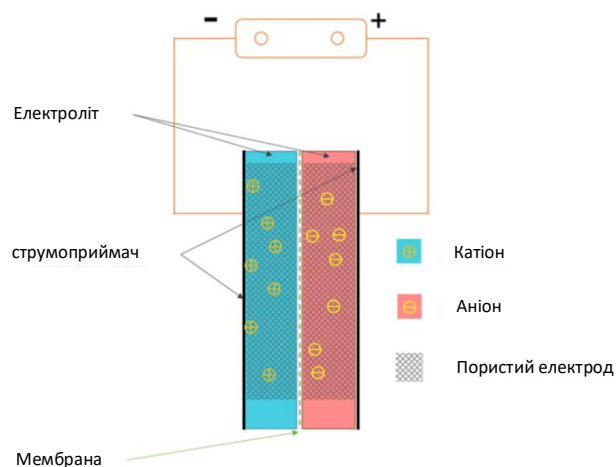


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення псевдоконденсатора

Гібридні конденсатори знаходяться на межі між конденсаторами та акумуляторами. Термін "гібридні" пояснюється тим, що електроди в таких конденсаторах виконані з різних матеріалів і заряд накопичується за допомогою різних механізмів. Зазвичай, катодом у гібридних конденсаторах є матеріал з псевдоємністю. Накопичення заряду на катоді відбувається за рахунок окислювально-відновних реакцій, що збільшує питому ємність конденсатора і розширює діапазон робочих напруг. В гібридних конденсаторах часто використовують комбінацію електродів з доповнених провідних полімерів та змішаних оксидів. До дуже перспективних варіантів належать композиційні матеріали, які складаються з оксидів металів, що покриті провідними полімерами або вуглецевими носіями.

1.5 Літій-йонний акумулятор

Літій-йонні акумулятори є одним з двох основних типів літієвих електричних акумуляторів, які використовуються як вторинні електричні батареї. Їх особливістю є перенос літієвих іонів від анода до катода на основі різних сполук, що забезпечує появу електричного струму в зовнішньому колі.

Хімічний склад, експлуатаційні характеристики, вартість та безпечність акумуляторів залежать від їх типу. Найбільш поширеним типом є акумулятори з катодом на оксиді кобальту, які мають високу енергетичну густину, але є менш безпечними. Інші типи, такі як літій-ферум-фосфатні, літій-манган-оксидні та літій-нікель-манган-кобальт-оксидні акумулятори, мають меншу енергетичну густину, але довший життєвий цикл та більш безпечні з хімічної точки зору. Ці типи акумуляторів застосовуються в різних сферах, включаючи електроінструменти, медичне обладнання та автомобільну промисловість. Існують також нові типи акумуляторів, такі як літій-сульфурні акумулятори, які обіцяють кращі експлуатаційні характеристики до ваги.

1.5.1 Історія виникнення літій йонних акумуляторів.

Корпорація Sony випустила на ринок перший літій-іонний акумулятор у 1991 році. Розробка перезаряджуваних літєвих батарей почалася ще в 70-х роках ХХ століття, але була неуспішною через високий ризик безпеки під час експлуатації. Це пов'язано з властивостями літію - дуже активного елемента, який реагує з водою і може взорватися. Було встановлено, що при циклах заряду-розряду батареї з металевим літєвим електродом може статися коротке замикання всередині батареї, що може призвести до підвищення температури внутрішньої частини акумулятора до температури плавлення літію, що зумовлює вибух.

2 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕМС

2.1 Розрахунок потужності двигуна

Згідно з законом Ньютона, прискорення транспортного засобу залежить від сили, що на нього діє, тому динамічна поведінка транспортного засобу може бути описана через сили, що на нього діють, і його прискорення:

$$\dot{V} = a = \frac{\sum F_T - \sum F_o}{m}, \quad (2.1)$$

де a , V – лінійне прискорення та лінійна швидкість транспортного засобу, $\sum F_T$ – тягова сила, яка виникає в точці дотику шин з дорогою, залежить від моменту, який створюється приводним двигуном, $\sum F_o$ – Сумарна сила опору руху, що діє на транспортний засіб.

Припустимо, що маємо транспортний засіб масою m , який рухається, як показано на малюнку 2.1. Під час руху транспортного засобу на нього впливають такі основні сили опору руху: сила тертя кочення F_r та сила аеродинамічного опору F_a .

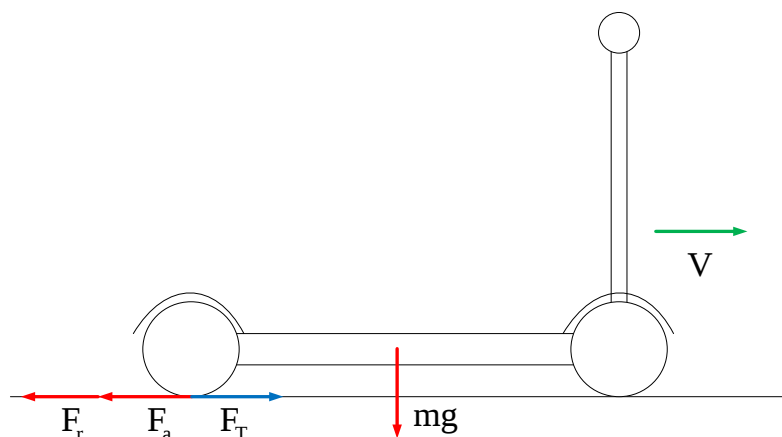


Рисунок 2.1 – Схема дії сил на транспортний засіб.

Сила тертя кочення визначається як:

$$F_r = mgf_r, \quad (2.2)$$

де f_r – коефіцієнт тертя кочення, $g = 9,8 \text{ м / с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Сила аеродинамічного опору визначається за формулою:

$$F_a = \frac{\rho S C_a V^2}{2} \quad (2.3)$$

де ρ - густина повітря, S - площа фронтального перерізу транспортного засобу, C_a - коефіцієнт аеродинамічного опору

Отже, тягова сила, що виникає в точці дотику колеса з дорогою, має перебороти всі сили опору, щоб забезпечити необхідне прискорення транспортного засобу визначається за формулою.

$$F_T = F_r + F_a + ma \quad (2.4)$$

Тягова потужність без врахування втрат визначається як:

$$P_{\text{тяг}} = F_{\text{тяг}} V, \text{ Вт.} \quad (2.5)$$

Еквівалентний момент дорівнює:

$$M_e = \sqrt{\frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} M^2(t) dt}, \text{ Нм,} \quad (2.6)$$

Затрачена енергія на проходження шляху визначається як:

$$W = \int_0^{t_c} P(t) dt, \text{ Дж.} \quad (2.7)$$

У світовій практиці широко використовуються стандартні діаграми руху, що мають назву "Driving Cycle", які застосовуються для проектування транспортних засобів та аналізу їх експлуатаційних показників.

Зберемо математичну модель для розрахунку на основі приведених вище виразів та розробленого врасноруч "Driving Cycle", яка наведена на рисунку 2.2.

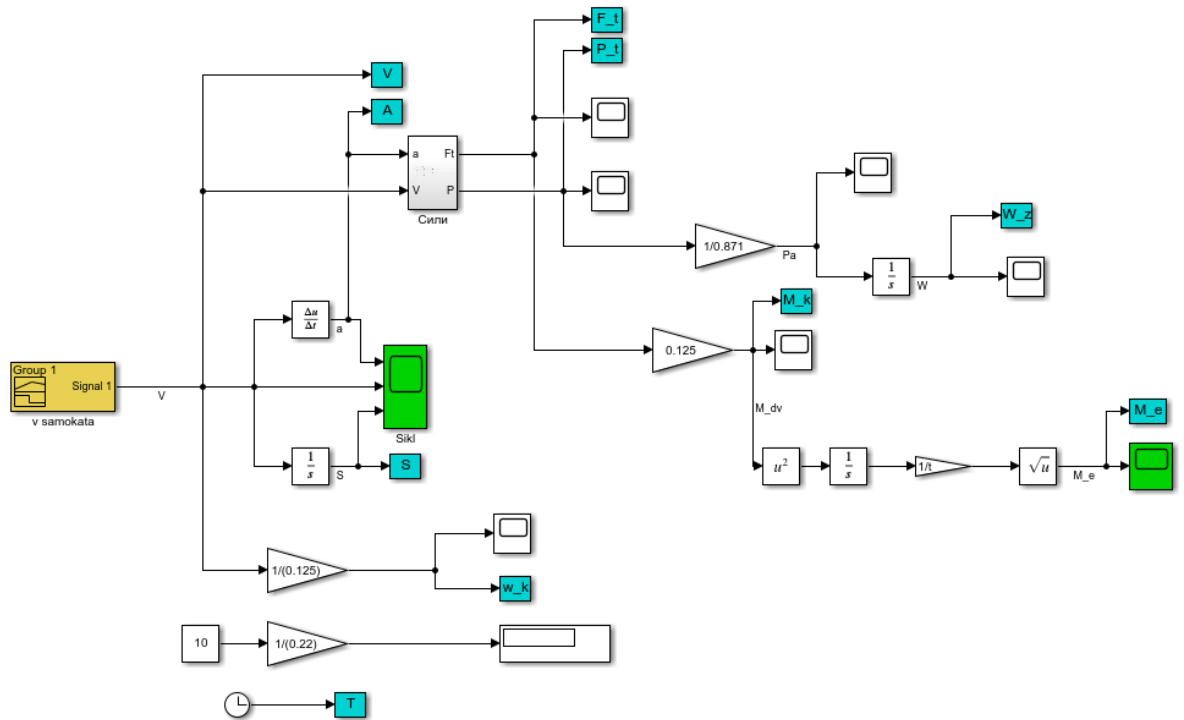


Рисунок 2.2 – Математична модель для розрахунку системи.

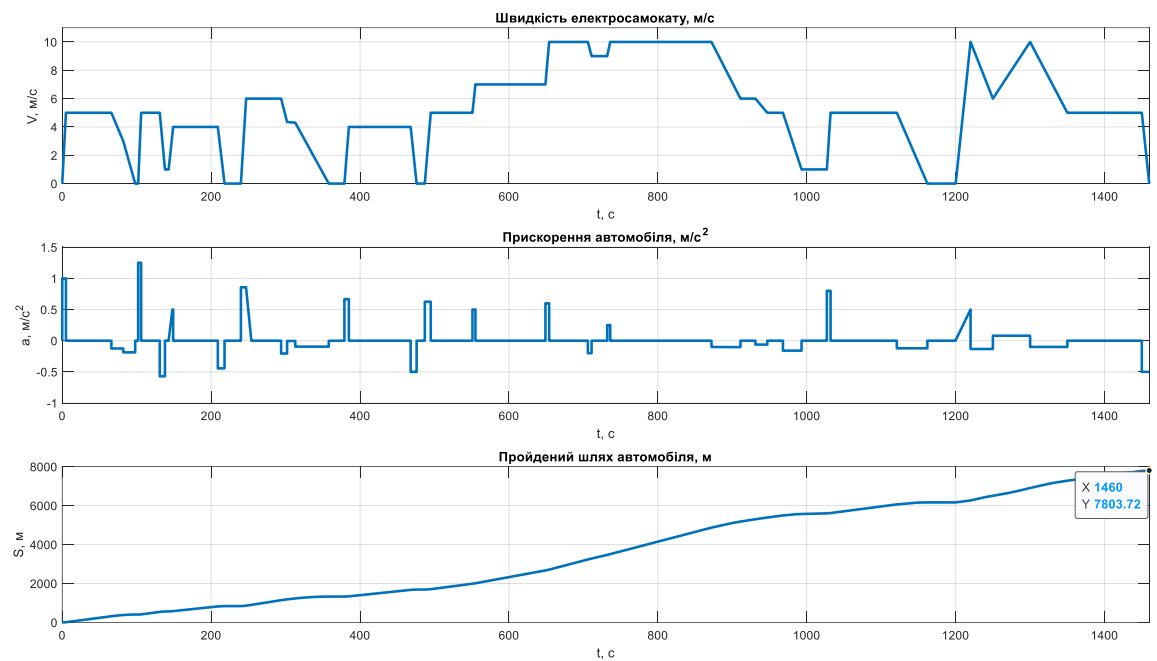


Рисунок 2.3 – Розраховані данні пройденого циклу руху.

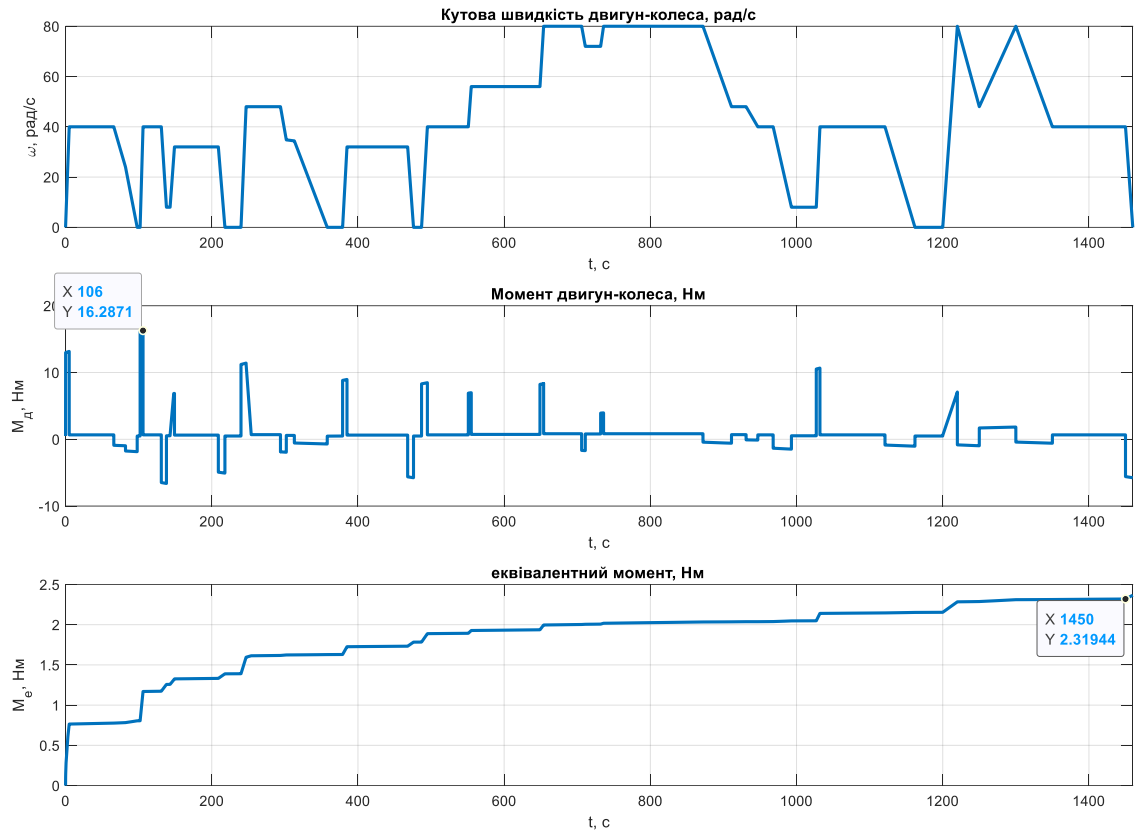


Рисунок 2.4 – Розраховані данні пройденного циклу руху.

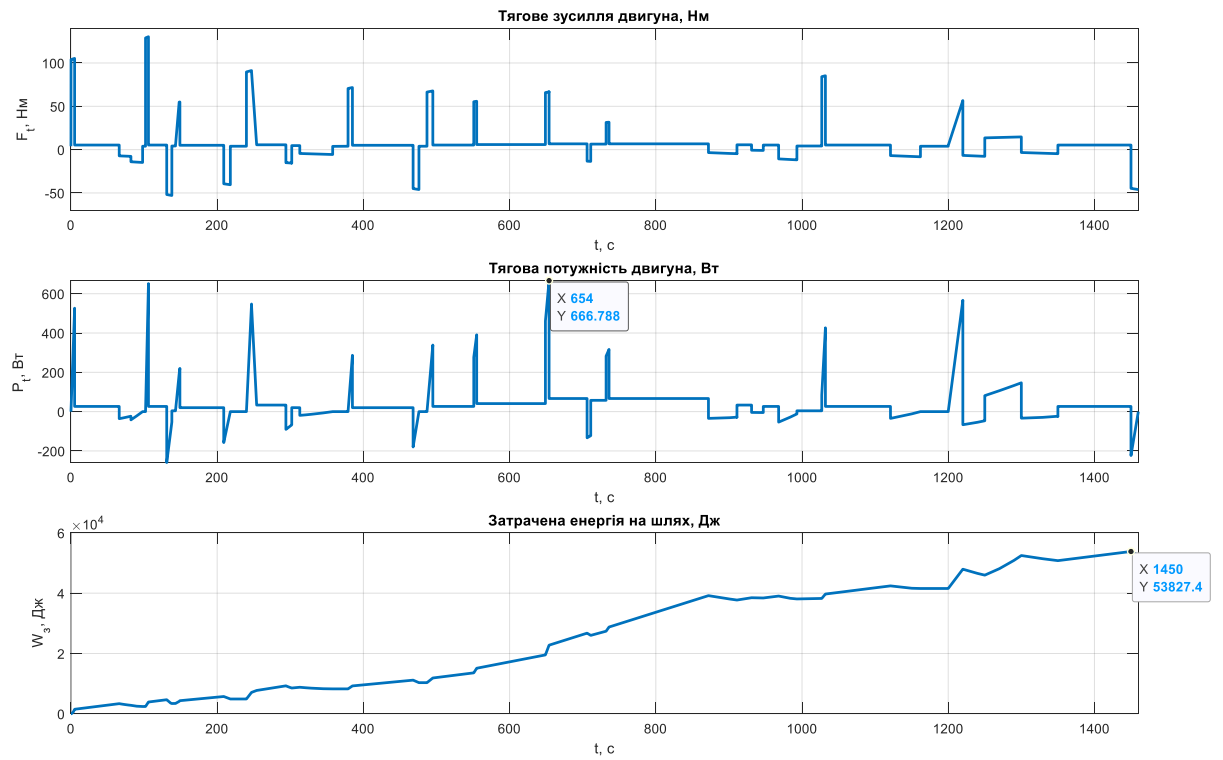


Рисунок 2.5 – Розраховані данні пройденного циклу руху

2.2 Вибір приводного двигуна електросамокату

Оскільки розрахована кутова максимальна швидкість двигуна становить 80 об/хв, розрахований максимальний момент двигуна – 16.3 Н·м, розрахований еквівалентний момент – 2.36 Н·м, виберемо за цими параметрами 3-фазний синхронний двигун із постійними магнітами KY110AS0410-15[7], технічні дані двигуна наведені в Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1– Технічні дані двигуна KY110AS0410-15

Параметр	Опис
Постійна потужність	1000 Вт
Піковий момент	22 Н·м
Постійний момент	6.3 Н·м
Момент інерції	0.00074 Н·м ²
Максимальна швидкість	1500 об/хв
Номінальна напруга	48 В
Індукція між двома фазами	0.05 мГн
Число пар полюсів	1
Маса	7.8 кг
Коефіцієнт корисної дії	0.85

2.3 Розрахунок та вибір батареї акумуляторів

Виберемо акумулятори Panasonic NCR18650A з технічними даними, що містяться в Таблиці 2.2, для створення акумуляторної батареї.

Таблиця 2.2 – Технічні дані акумуляторів Panasonic NCR18650A

Параметр	Опис
Діаметр	18.5 мм
Довжина	65.3 мм
Ємність	3070 мА·год
Напруга	3.6 В

Продовження до таблиці 2.2

Заряд	CC-CV, стандартний 1475 мА, 4.2 В, 4 год
Вага	47.5 г
Щільність енергії	225 Вт·год/кг

Розрахункова потужність, яку повинна мати акумуляторна батарея:

$$W_{\Sigma \text{АКБ}} = W_1 \frac{S_{\Sigma}}{S_1} = 5.3827 \cdot 10^4 \cdot \frac{30 \cdot 1000}{7810} = 206.76, \text{ кДж}, \quad (2.8)$$

де W_1 – затрачена енергія на шлях за один цикл, Дж; S_{Σ} – запас ходу, м; S_1 – пройдений шлях за один цикл, м.

Розрахункова потужність батареї :

$$P_{\text{АКБ}} = \frac{W_{\Sigma \text{АКБ}}}{3600} = \frac{206.76 \cdot 10^3}{3600} = 57.43, \text{ Вт}. \quad (2.9)$$

Розрахункова ємність батареї:

$$I_{\text{АКБ}} = \frac{P_{\text{АКБ}}}{U_{\text{АКБ}}} = \frac{57.43}{48} = 1.1965, \text{ А} \cdot \text{год}, \quad (2.10)$$

де $U_{\text{АКБ}}$ – напруга акумуляторної батареї, яка вибрана з врахуванням напруги двигуна, В.

Кількість з'єднаних послідовно акумуляторів в ланці:

$$N_U = \frac{U_{\text{АКБ}}}{U_{\text{cell}}} = \frac{48}{3.6} = 14, \text{ шт}, \quad (2.11)$$

де U_{cell} – напруга одного акумулятора, В.

Кількість з'єднаних паралельно ланок:

$$N_I = \frac{I_{\text{АКБ}}}{I_{\text{cell}}} = \frac{1.1965}{3.07} = 1, \text{ шт}, \quad (2.12)$$

де I_{cell} – ємність одного акумулятора, А·год.

Загальна кількість акумуляторів:

$$N = N_I N_U = 1 \cdot 14 = 14, \text{ шт.} \quad (2.13)$$

Загальна вага акумуляторної батареї:

$$m_{\text{АКБ}} = N m_{\text{cell}} = 14 \cdot 0.0475 = 0.665, \text{ кг,} \quad (2.14)$$

де m_{cell} – вага одного акумулятора, кг.

2.4 Порівняння використання батареї конденсаторів в якості акумуляторної батареї автомобіля

Виконаємо розрахунок при використанні суперконденсаторів як джерела живлення. Виберемо суперконденсатор KYOCERA AVX SCCZ1EB308SWB[8], технічні дані якого наведені в таблиці

Технічні дані суперконденсатора KYOCERA AVX SCCZ1EB308SWB

Параметр	Опис
Діаметр	60 мм
Довжина	138 мм
Піковий струм	2165.78 А
Ємність	3000 Ф
Номінальна напруга	2.7 В DC
Точність	- 10 %, + 30 %
ESR	200 мкОм
Струм витoku	5200 мкА
Вага	644,67 г
Щільність потужності	6033 Вт/кг
Щільність енергії	6.08 Вт·год/кг

Кількість з'єднаних послідовно суперконденсаторів в ланці:

$$N_{\text{BATU}} = \frac{U_{\text{BATmax}}}{U_{\text{BATcell}}} = \frac{65}{2.7} = 24, \text{ шт,} \quad (2.15)$$

де $U_{BATcell}$ – напруга одного суперконденсатора, В; U_{BATmax} – максимальна прийнята напруга для суперконденсаторної батареї, В.

Ємність однієї ланки суперконденсаторів:

$$C_{BATU} = \frac{C_{BAT}}{N_{BATU}} = \frac{3000}{24} = 125, \text{ Ф}, \quad (2.16)$$

де C_{BAT} – ємність одного суперконденсатора, Ф.

Кількість енергії однієї ланки суперконденсаторів:

$$W_{BATU} = \frac{C_{BATU}}{2} (U_{BATmax}^2 - U_{BATmin}^2) = \frac{125}{2} (65^2 - 32,5^2) = 198.046, \text{ кДж}, \quad (2.17)$$

де U_{BATmin} – мінімальна прийнята напруга для суперконденсаторної батареї, яка ще може жити електродвигун, В.

Кількість з'єднаних паралельно ланок суперконденсаторів:

$$N_{BATI} = \frac{W_{\Sigma АКБ}}{W_{BATU}} = \frac{206.76 \cdot 10^3}{198.046 \cdot 10^3} = 1, \text{ шт.} \quad (2.18)$$

Загальна кількість суперконденсаторів:

$$N_{BAT} = N_{BATI} N_{BATU} = 1 \cdot 24 = 24, \text{ шт.} \quad (2.19)$$

Загальна вага батареї суперконденсаторів:

$$m_{BAT} = N_{BAT} m_{BATcell} = 24 \cdot 0.645 = 15,48, \text{ кг}, \quad (2.20)$$

де $m_{BATcell}$ – вага одного суперконденсатора, кг.

Отже, через велику вартість, вагу та розміри батареї на супер конденсаторах доцільніше буде використовувати акумуляторну батарею.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СДПМ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ

3.1 Розрахунок параметрів СДПМ

Данні двигуна з каталогу наведено в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Паспортні дані KY110AS0410-15

Номінальна потужність	$P_{2n} = 1000 \text{ Вт}$
Номінальний момент	$M_n = 6.3 \text{ Н} \cdot \text{м}$
Номінальна швидкість	$\omega_n = 157 \text{ рад / с}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{ln} = 48 \text{ В}$
Номінальне діюче значення фазного струму статора	$I_n = 28 \text{ А}$
Число пар полюсів	$p_n = 1$
Момент інерції	$J_d = 0.00074 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
ККД	$\eta = 0.85$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 3.5$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
Максимальна швидкість з постійною потужністю	$\omega_{\max} = 188 \text{ рад / с}$
Амплітудне фазне значення проти-ЕРС двигуна при ω_n	$U_{be}(\omega_n) = 41 \text{ В}$
Параметри схеми заміщення	
Активний опір статора	$R = 0.11 \text{ Ом}$
Індуктивність по осі d	$L_d = 0.05 \text{ мГн}$
Індуктивність по осі q	$L_q = 0.05 \text{ мГн}$

Обчислимо значення, які залишилися для повного опису електричної частини синхронного двигуна з постійними магнітами.

Розрахуємо критичний момент з перевантажувальної здатності:

$$M_k = \lambda M_n = 3.5 \cdot 6.3 = 22 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.1)$$

За умови $f = 50$ Гц діюче значення фазної напруги статора дорівнює:

$$U_n = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{f}{f} U_{1n} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{50}{50} \cdot 48 = 27.71 \text{ В} \quad (3.2)$$

Амплітудні значення фазного струму і напруги статора I_{na}, U_{na} :

$$I_{na} = \sqrt{2} I_n = 1.41 \cdot 28 = 39.48 \text{ А} \quad (3.3)$$

$$U_{na} = \sqrt{2} U_n = 1.41 \cdot 27.71 = 39.07 \text{ В} \quad (3.4)$$

Можемо розрахувати потік постійних магнітів Ψ_m , оскільки маємо значення проти ЕРС:

$$\Psi_m = \frac{U_{be}}{\sqrt{3} \omega p_n} = \frac{U_{be}(\omega_n)}{\sqrt{3} \omega_n p_n} = \frac{23.4}{1.73 \cdot 157 \cdot 1} = 0.086 \text{ Вб} \quad (3.5)$$

Для стабілізації компоненти u_{1q} в умовах роботи на максимальній швидкості $\omega_{\max}$, усталене значення струму i_{dw} для режиму ослаблення поля може бути визначено:

$$i_{dw} = \frac{\Psi_m}{L_d} \left(\left| \frac{\omega_n}{\omega} \right| - 1 \right) = \frac{\Psi_m}{L_d} \left(\left| \frac{\omega_n}{\omega_{\max}} \right| - 1 \right) = \frac{0.086}{0.05 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\left| \frac{157}{188} \right| - 1 \right) = -28.46 \text{ А} \quad (3.6)$$

Для забезпечення номінального моменту на заданій швидкості $\omega_{\max}$, максимальне значення моментного струму i_{qw} може бути визначено:

$$i_{qw} = \sqrt{I_{na}^2 - i_{dw}^2} = \sqrt{39.07^2 - (-28.46)^2} = 26.67 \text{ А} \quad (3.7)$$

Занесемо пораховані величини, яких бракувало, до табл. 3.2[11].

Таблиця 3.2 – Параметри СДПМ, яких бракувало

M_k	22Н·м	Ψ_m	0.086Вб
U_n	27.71В	$\cos \varphi$	0.18
U_{na}	39.07В	i_{dw}	-28.46А
I_{na}	39.48А	i_{qw}	26.67А

3.2 Постановка задачі векторного керування швидкістю СДПМ

Для стандартної моделі двигуна ми припускаємо наступне:

А.1. Ми вимірюємо струми статора, кутову швидкість ротора та кутове положення ротора, які потрібні для перетворення Парка-Горьєва.

А.2. Ми знаємо та маємо постійні значення всіх параметрів двигуна, але не знаємо момент навантаження, який може бути постійним або повільно змінюватися і обмежений.

А.3. Задана траєкторія зміни кутової швидкості є функцією часу з обмеженими відомими похідними першого та другого порядків, а також задана обмежена траєкторія зміни струму з обмеженою похідною.

За цих умов ми повинні синтезувати керувальний алгоритм, який має досягати таких керувальних цілей:

СО.1. Глобально асимптотично стабілізувати керовані змінні - кутову швидкість ротора та пряму компоненту струму статора з обмеженням всіх внутрішніх сигналів.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\omega}, \tilde{i}_d) = 0 \quad (3.9)$$

де $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ — похибка відпрацювання кутової швидкості ротора, $\tilde{i}_d = i_d - i_d^*$ — похибка відпрацювання компоненти струму статора по осі d.

СО.2. Забезпечення асимптотичного вирішення процесів регулювання кутової швидкості та прямої компоненти струму статора.

СО.3. Асимптотична лінеаризація підсистеми керування кутовою швидкістю при номінальних умовах.

3.3 Математична модель СДПМ

Модифіковане перетворення координат визначаються рівняннями

$$\begin{aligned} x_{dq} &= e^{-j\theta} x_{ab}, \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = e^{j\theta} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix}, e^{-j\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, e^{j\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.10)$$

де θ — кутове положення ротора.

Математична модель явнополюсних СДПМ в синхронній системі координат ротора (d-q) має вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - v\omega - M_c), M = \mu_2(i_d)i_q, \\ \dot{i}_d &= \frac{1}{L_{dd}(i_d)} (-R_1 i_d + L_q(i_q) \omega p_n i_q + u_d), \\ \dot{i}_q &= \frac{1}{L_{qq}(i_q)} (-R_1 i_q - L_d(i_d) \omega p_n i_d - \Psi_m \omega p_n + u_q), \end{aligned} \quad (3.11)$$

де $L_d(i_d)$, $L_q(i_q)$ та $L_{dd}(i_d)$, $L_{qq}(i_q)$ — статичні та динамічні індуктивності статора в системі координат ротора (d-q); $\Psi_m = L_m i_f = \text{const}$ — потік постійних магнітів;

$\mu_2(i_d) = \frac{3}{2} p_n (L_m i_f + (L_d - L_q) i_d)$ — коефіцієнт моменту.[11]

3.4 Алгоритм векторного керування моментом СДПМ

Повний алгоритм відпрацювання моменту вміщує:

- регулятор моменту:

$$i_{1q}^* = \frac{M^*}{k_M} \quad (3.12)$$

де $k_M = \frac{3}{2} L_m i_f p_n$ – електромагнітна

- регулятор потокозчеплення:

$$i_{1d}^* = \frac{(\psi_1^* - L_m i_f)}{L_1} \quad (3.13)$$

де $\psi_1^* = L_m i_f$ при $|\omega| < \omega_n$

- регулятор струму по осі d:

$$\begin{aligned} u_{1d} &= R_1 i_{1d}^* + L_1 (-\omega p_n i_{1q} + \dot{i}_{1d}^* - k_{id1} \tilde{i}_{1d} - x_d) \\ \dot{x}_d &= k_{iid} \tilde{i}_{1d} \end{aligned} \quad (3.14)$$

- регулятор струму по осі q:

$$\begin{aligned} u_{1q} &= R_1 i_{1q}^* + L_m i_f \omega p_n + L_1 (\omega p_n i_{1d} + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq1} \tilde{i}_{1q} - x_q) \\ \dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_{1q} \end{aligned} \quad (3.15)$$

де $i_{1q}^* = \frac{\dot{M}^*}{k_M}$ - моментоутворюючий струм.

- Струм, що прикладається до ротора розраховується:

$$\begin{pmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{pmatrix} = e^{-j p_n \theta} \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix}, e^{-j p_n \theta} = \begin{bmatrix} \cos p_n \theta & \sin p_n \theta \\ -\sin p_n \theta & \cos p_n \theta \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

напруги, що прикладається до статора, розраховується:

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = e^{-j p_n \theta} \begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix}, e^{-j p_n \theta} = \begin{bmatrix} \cos p_n \theta & -\sin p_n \theta \\ \sin p_n \theta & \cos p_n \theta \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

Структурну схему алгоритму векторного керування моментом наведено на рис. 3.1.[10]

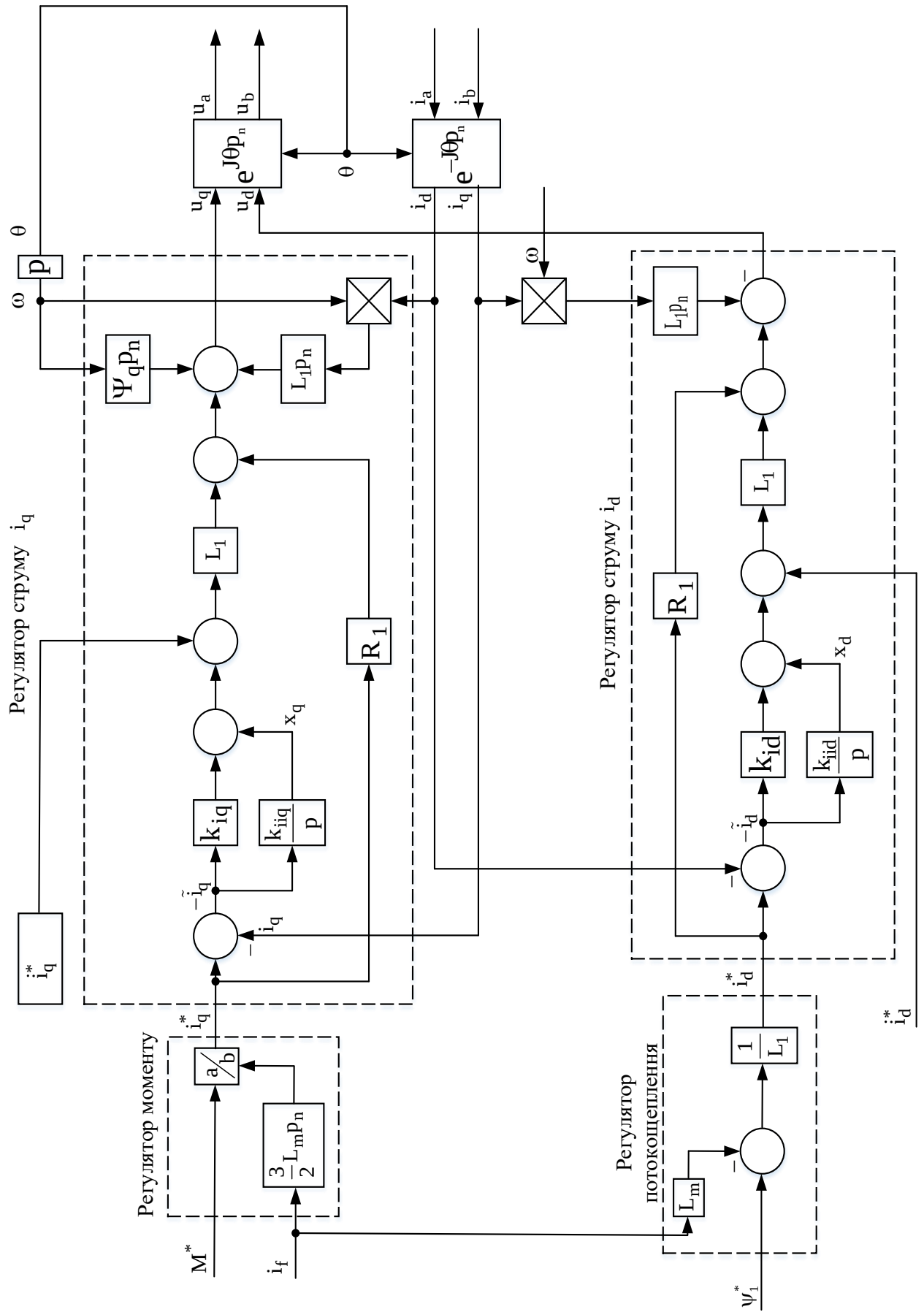


Рисунок 3.1 – структурна схема векторного керування моментом

3.5 Алгоритм векторного керування швидкістю СДПМ

Повний алгоритм векторного керування СДПМ має вигляд:

- регулятор струму по осі d:

$$\begin{aligned} u_d &= R i_d^* - \omega p_n L_q(i_q) i_q + L_{dd}(i_d)(\dot{i}_d^* - k_{ii} \tilde{i}_d - x_d), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (3.19)$$

де $(k_{ii}, k_{ii}) > 0$ — коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора струму; похідна заданого струму $\dot{i}_d^*$ розраховується та відома;

- регулятор швидкості:

$$\begin{aligned} \dot{i}_q^* &= \frac{1}{\mu'(i_d)} \left(\hat{M}_c + \frac{v}{J} \omega^* + \dot{\omega}^* - k_\omega \tilde{\omega} \right), \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

де $\hat{M}_c$ — оцінене значення компоненти моменту навантаження $\frac{M_c}{J}$,

$\tilde{M}_c = \frac{M_c}{J} - \hat{M}_c$ — похибка оцінювання моменту навантаження; $k_\omega > 0, k_{\omega i} > 0$ —

коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора швидкості;

додатній параметр $\mu'(i_d) = \frac{3p_n}{2J} [\Psi_m + (L_d(i_d) - L_q(i_q) i_d)] > 0$;

- нелінійний регулятор струму по осі q:

$$\begin{aligned} u_q &= R i_q^* - \omega p_n L_d(i_d) i_d + \omega p_n \Psi_m + L_{qq}(i_q)(\dot{i}_q^* - k_{ii} \tilde{i}_q - x_q), \\ \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (3.6)$$

де відома компонента похідної струму $\dot{i}_q^*$ дорівнює:

$$\begin{aligned}
i_{q1}^* = & \frac{1}{\mu'(i_d)} \left(\dot{\hat{M}}_c + \frac{v}{J} \dot{\omega}^* + \ddot{\omega}^* \right) - \frac{3p_n}{2J\mu^2(i_d)} i_d^* \left(\hat{M}_c + \frac{v}{J} \omega^* + \dot{\omega}^* - k_\omega \tilde{\omega} \right) (L_d(i_d) - \\
& - L_q(i_q)) - \frac{k_\omega}{\mu'(i_d)} \left(- \left(k_\omega + \frac{v}{J} \right) \tilde{\omega} + \mu'(i_d) \tilde{i}_q + \frac{3p_n}{2J} (L_d(i_d) - L_q(i_q)) \tilde{i}_d i_q \right). \quad (3.7)
\end{aligned}$$

Структурну схему алгоритму векторного керування швидкістю наведено на рис. 3.1.[11]

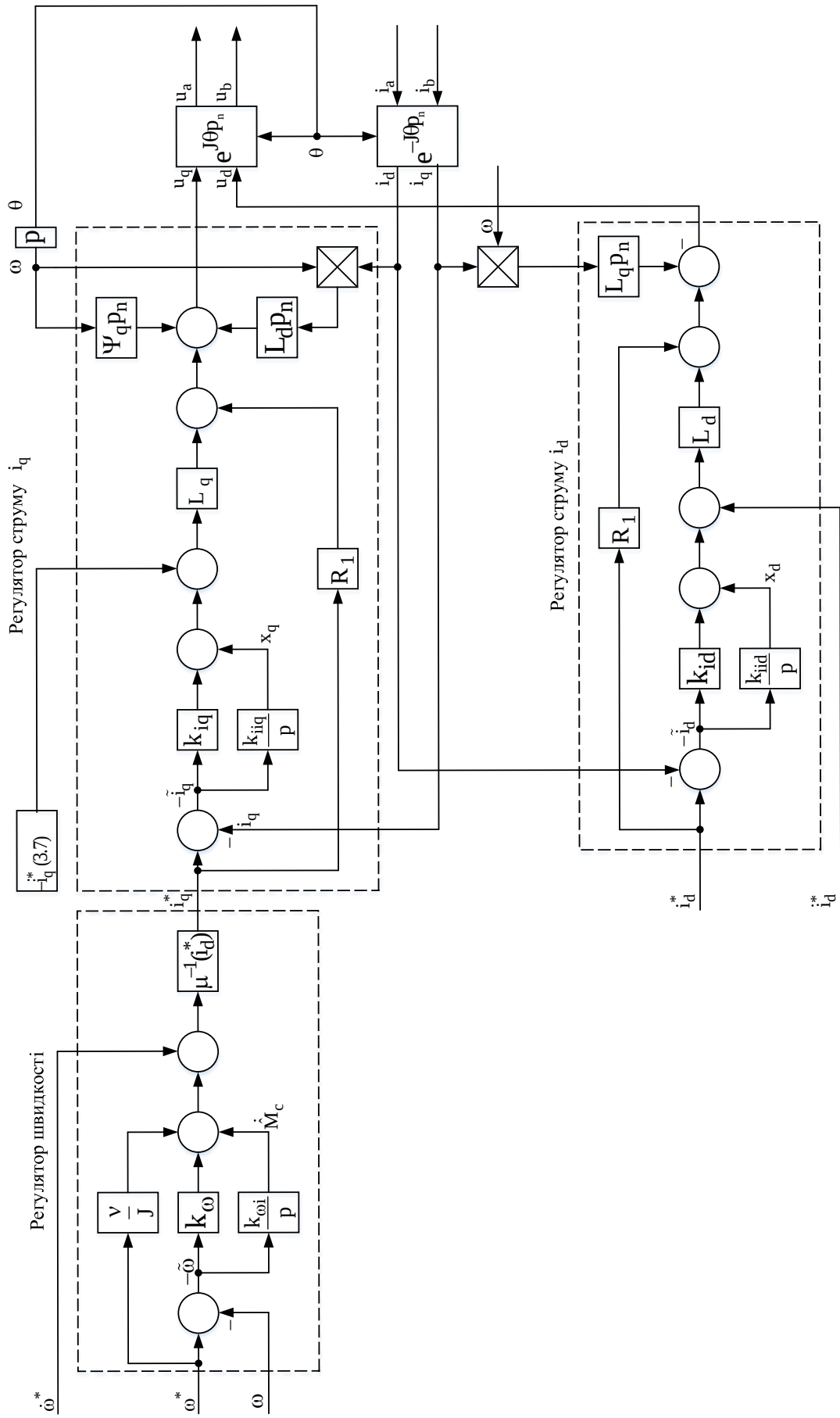


Рисунок 3.2– структурна схема векторного керування швидкістю

4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ

Для моделювання системи потрібно привести моменти інерції самоката до валу електродвигуна двигуна.

Прийmemo, що момент інерції колеса дорівнює моменту інерції двигуна $J_k = 0.00074 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Тоді, сумарний момент може бути розрахований за формулою:

$$J_{\Sigma} = J + 2J_k + J_m \quad (4.1)$$

J_m , може бути визначений за допомогою закону збереження енергії:

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{J_m \omega^2}{2} \quad (4.2)$$

V , можна записати як :

$$V = \omega r \quad (4.3)$$

Підставивши формулу 4.3 в 4.2 можемо визначити J_m :

$$J_m = \frac{2m(\omega r)^2}{2\omega^2} = mr^2 = 100 \cdot 0.125^2 = 1.56 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) \quad (4.4)$$

Підставимо формулу 4.4 в 4.1 і знайдемо приведений до валу двигуна момент інерції:

$$J_{\Sigma} = 0.00074 + 2 \cdot 0.00074 + 1.56 = 1.56222 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) \quad (4.5)$$

4.1 Моделювання системи векторного керування моментом

У цьому розділі проводиться моделювання розробленої системи векторного керування моментом з метою дослідження коректності її роботи та можливості виконання поставлених цілей системи.

Модель векторного керування моментом синхронного двигуна з постійними магнітами розроблено на основі рівнянь та характеристик двигуна, які наведені в розділі 3.

Для проведення досліджень моделі двигуна з векторним керуванням моментом використовується математична модель СДПМ, яка розроблена в середовищі Matlab simulinc. Дослідження включають проведення тесту з метою оцінки та аналізу характеристик системи:

В тесті виконується розгін до швидкості 77 рад/с, з заданим моментом двигуна $M_d^* = 13.4 \text{ Н} \cdot \text{м}$, який є в 2.12 рази більший за номінальний момент. Момент навантаження являє собою аеродинамічний опір і пов'язаний квадратичною залежністю зі швидкістю руху самокату. Моделювання триває 40с. Результати моделювання та їх аналіз наведено в 4.2.

4.2 Дослідження динамічних характеристик

На рисунку 4.1 наведено задану траєкторію та профіль моменту навантаження. На рисунку 4.2 та 4.3 зображено графіки перехідних процесів.

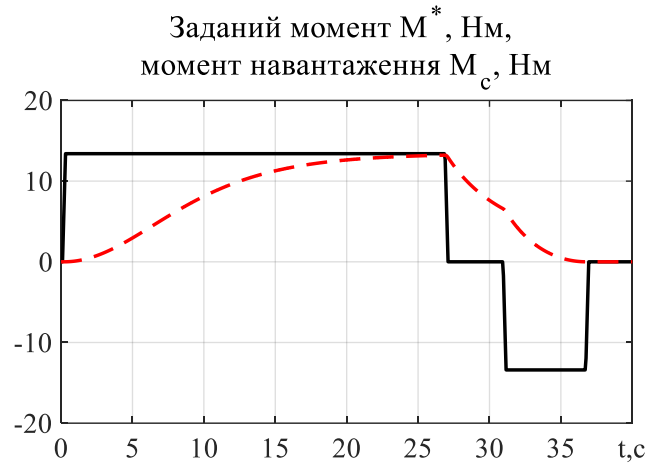


Рисунок 4.1 – Задана траєкторія моменту та профіль моменту навантаження

З рисунку 4.2 видно, що похибки регулювання моменту та потокоутворюючого струму відсутні. Це свідчить про повне відпрацювання. Також при збільшенні моменту збільшується напруга u_q , яка задає струм i_q . Також з графіків видно, що траєкторія струму i_q повністю повторює траєкторію заданого моменту, таким чином можна побачити, що i_q задає момент двигуна.

З графіків потужностей на рисунку 4.3 видно, що при роботі двигуна з моментом $2.12M_n$ втрати складають 430 Вт.

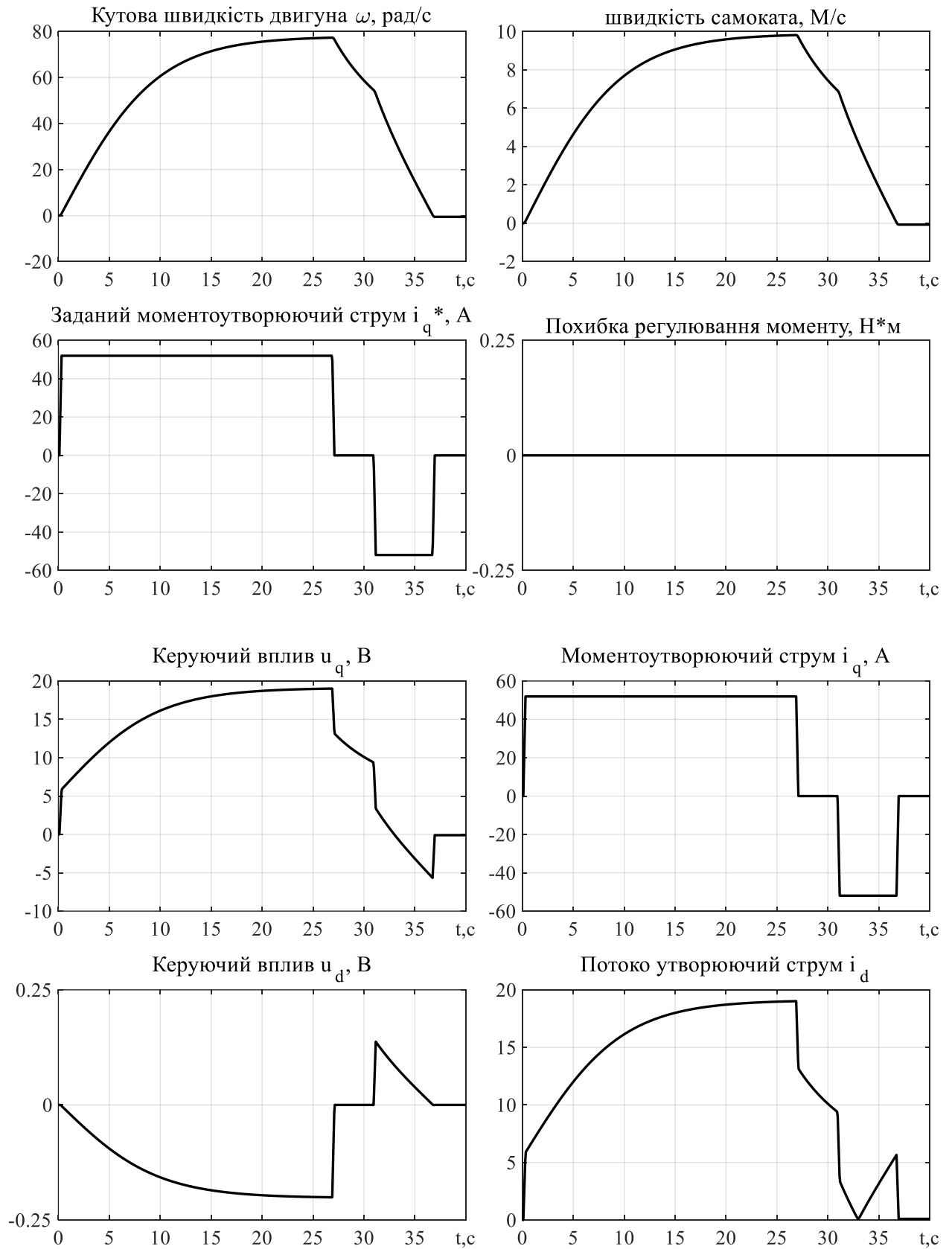


Рисунок 4.2 – графіки перехідних процесів векторного керування
МОМЕНТОМ

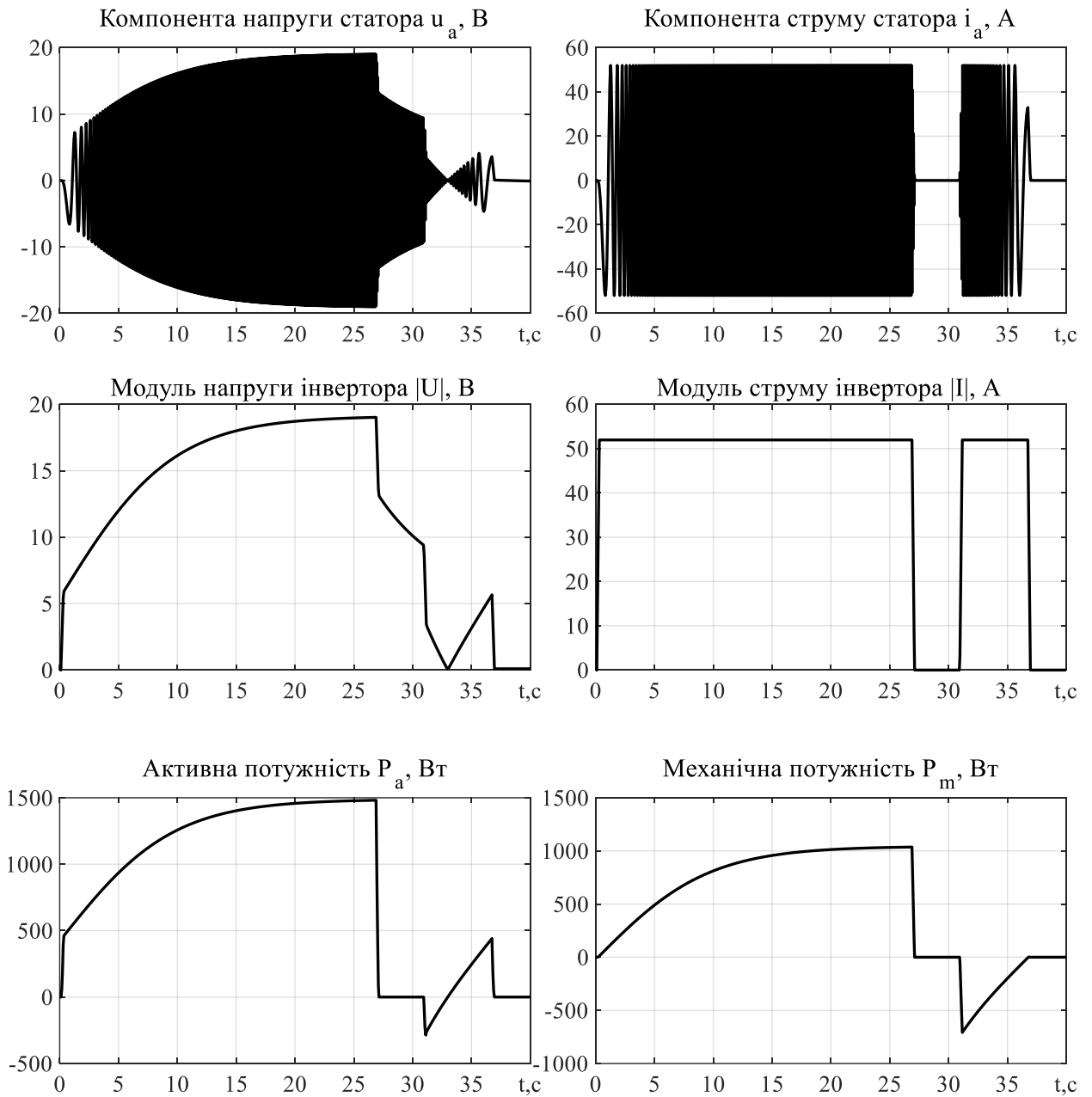


Рисунок 4.3 – графіки перехідних процесів векторного керування
МОМЕНТОМ

5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

5.1 функціональна схема синхронного електроприводу з живленням від акумуляторної батареї.

Функціональну схему сучасного електроприводу змінного струму, що ґрунтується на використанні перетворювача частоти та ланки постійного струму продемонстровано на рисунку 4.1. Вона базується на поєднанні перетворювального й керуючого пристроїв з традиційної концепції електроприводу.

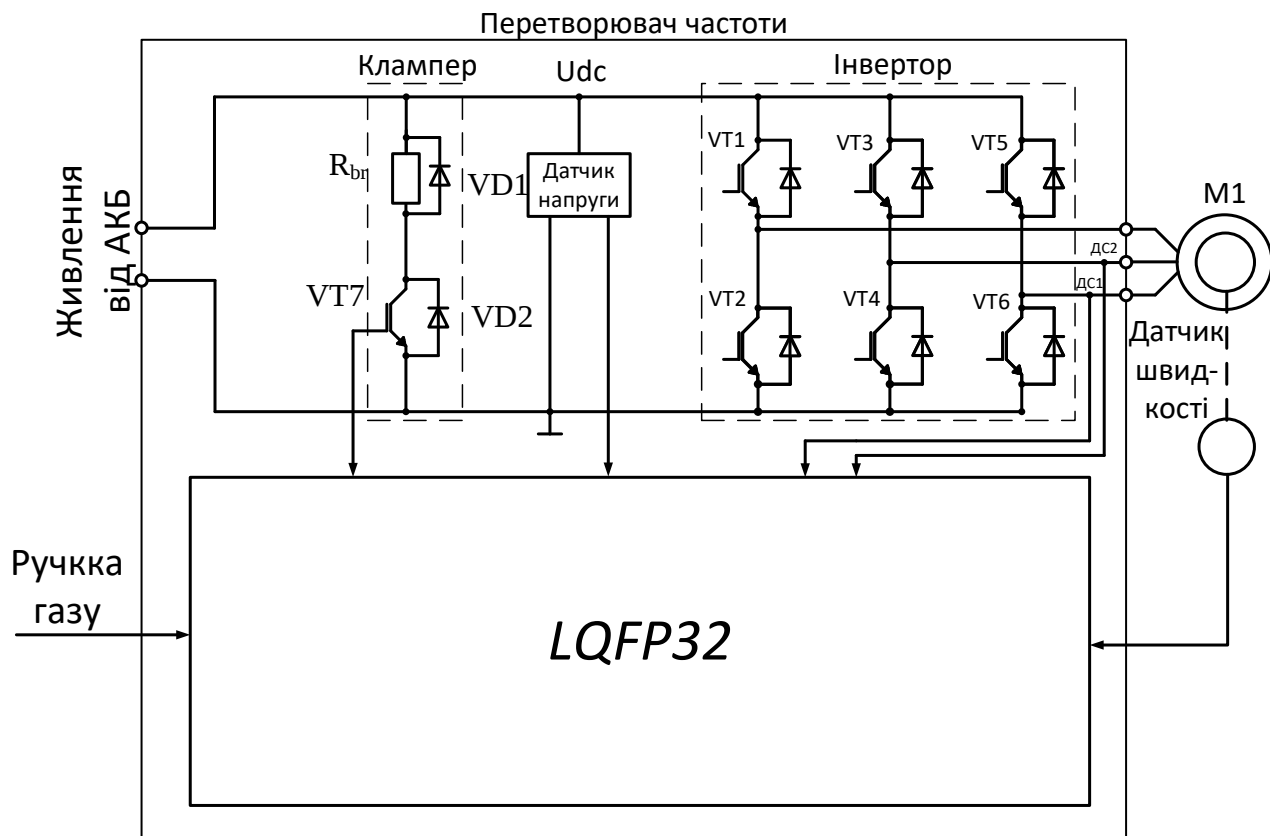


Рисунок 4.1 – Функціональна схема керування синхронним електроприводом

5.2 Розрахунок силовій частини.

Для визначення основних елементів перетворювача частоти (ПЧ) для двигуна, який використовується для приводу електросамокату, необхідні наступні значення: напруга та кількість фаз живлення, потужність, ККД і номінальний струм двигуна. Виконуємо розрахунок силовій частини ПЧ на основі параметрів, наведених у таблиці 3.1.

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора було розраховано в (3.2) та і дорівнює $U_n = 27.71 \text{ В}$ та $I_n = 28 \text{ А}$.

Амплітудне значення фазної напруги статора було розраховане в формулі (3.3) та дорівнює $U_{na} = 39.07 \text{ В}$. Амплітудне значення фазного струму статора було розраховано в формулі (3.4) і відповідно дорівнює $I_n = 39.48 \text{ А}$.

Номінальна напруга ланки постійного струму дорівнює $U_{dc} = 50.4 \text{ В}$. Максимальна напруга ланки постійного струму дорівнює $U_{dc\max} = 1.2U_{dc} = 50.4 \cdot 1.2 = 60.48 \text{ В}$

Розрахуємо конденсатор який згладжує пульсації в ланці постійного струму:

$$\Delta I_{0.5t} = \frac{0.25V_{bus}}{fL} = \frac{0.25 \cdot 50.4}{50 \cdot 0.05} = 5.04 \text{ А} \quad (5.1)$$

$$I_{rms} = \frac{\Delta I}{2\sqrt{2}} = \frac{5}{2\sqrt{2}} = 1.8 \text{ А} \quad (5.2)$$

Оберемо конденсатор BLH105K451A012[12].

5.3 Розрахунок інвертора напруги

Розрахунок максимального струму на виході перетворювача при перевантажувальній здатності $\lambda = 3.5$ розраховується за формулою :

$$I_{\max} = \lambda I_{\text{на}} = 3.5 \cdot 28 = 98 \text{ A.} \quad (5.3)$$

Максимальна допустима напруга «колектор-емітер» має бути в 1.5 рази вища за $U_{\text{dc max}}$, тобто:

$$U_{\text{ce}} = 1.5 U_{\text{dc max}} = 1.5 \cdot 60.48 = 90.72 \text{ B} \quad (5.4)$$

Виберемо IGBT за критеріями:

$$I_{\text{c}} > I_{\max} = 98 \text{ A.} \quad (5.5)$$

$$U_{\text{ce max}} > U_{\text{ce}} = 90.72 \text{ B.} \quad (5.6)$$

де $U_{\text{ce max}}$ та I_{c} - напруга та струм IGBT, які вказані в паспортних даних компонента.

За цими критеріями оберемо IGBT SEMiX151GD066HDs [13] з характеристиками $U_{\text{ce max}} = 600 \text{ B}$ та $I_{\text{c}} = 150 \text{ A}$.

Оберемо драйвер для керування IGBT HCNW3120 [14].

Оберемо живлення для драйверів SCW03C-15[15].

Оберемо конденсатор для драйвера 104J[16].

Розрахуємо обмежуючий резистор для IGBT:

$$R_{\text{об}} = \frac{U_{\text{IGBT}}}{I_{\text{IGBT}}} = \frac{15}{0.0024} = 6.25 \text{ кОм} \quad (5.7)$$

Виберемо резистор MRA0207 6K34 B 15PPM TA[17].

Розрахуємо обмежуючий резистор для керування драйвером:

$$R_d = \frac{U_d}{I_d} = \frac{5}{2.5} = 2 \text{ Ом} \quad (5.8)$$

Виберемо резистор 45F2R0E[18].

5.4 Розрахунок резистора та ключа клампера

Для розсіювання надлишкової енергії, що виникає в гальмівному режимі привода, використовується клампер, що складається з резистора, діода та напівпровідникового ключа. Цей компонент підключається паралельно до ланки постійного струму, забезпечуючи шлях для розсіювання надлишкової енергії.

Якщо в процесі роботи всю активну потужність передається у ланку постійного струму, то ключ клампера вибирається на основі струму, що протікає через нього в тривалому режимі.

Розрахуємо струм, що протікає через клампер за формулою:

$$I_{BR} = \frac{P_{2n}}{U_{dcn}} = \frac{1000}{50.4} = 19.8 \text{ А.} \quad (5.9)$$

Виберемо IGBT STGFW30H65FB [19], з характеристиками $U_{ce\max} = 650\text{В}$ та $I_c = 60\text{А}$.

Необхідний діод для клампера, максимальний струм якого більший ніж 19.8А, а напруга більша за 60.48В. Оберемо діод SBR2065D1-13 [20] з максимальним струмом 20А та напругою 65В.

Середня потужність, яку необхідно розсіювати на резисторі клампера за робочий цикл електроприводу, можна визначити, враховуючи, що генераторний режим займає 5% від загального часу циклу.

$$P_{cp} = 0.05P_n = 0.05 \cdot 1000 = 50 \text{ Вт.} \quad (5.10)$$

Необхідний опір резистора клампера розраховується за формулою:

$$R_{br} = \frac{P_{cp}}{I_{br}^2} = \frac{50}{19.8^2} = 0.13 \text{ Ом.} \quad (5.11)$$

Оберемо два резистора керамічний резистор 0,1 Ом [21] потужністю 25Вт та опором 0,1 Ом. Щоб отримати необхідні характеристики, з'єднуємо резистори послідовно.

5.5 Вибір датчиків напруги та струму

Обераємо датчик напруги для ланки постійного струму DC 0-100 [22]. Цей датчик може вимірювати напругу до 100 В. Цей пристрій повністю підходить під вимоги системи. Для підключення такого датчика потрібно розрахувати резистор R_1 , який забезпечує протікання струму 20 мА чепез вольтметр.

Резистор R_1 розраховується за формулою:

$$R_1 = \frac{U_{dcmax}}{I_p} = \frac{60.48}{20 \cdot 10^{-3}} = 3024 \text{ Ом} \quad (5.12)$$

З стандартного ряду резисторів обераємо резистор MRA0207 3K16 В 15PPM TA [16], опір якого дорівнює 3.16 кОм.

Обераємо датчики струму. Вибір здійснюється за критерієм максимального струму який необхідно вимірювати, до 98 А. Оберемо 2 датчики струму ACS758LCB-100B-PFF-T [23] з максимальним вимірювальним струмом 100 А.

5.6 Датчик швидкості

Обраний в третьому пункті двигун вже має датчик швидкості з максимальним значенням обертів за хвилину 2500 об/хв.

Оберемо компаратор для датчика швидкості LM393[24]

5.7 Розрахунок вартості компонентів

Знайдемо обрані компоненти на торгівельних майданчиках та розрахуємо вартість системи в \$.

Таблиця 4.1 – вартість компонентів системи

Елемент	Кількість, шт.	Ціна за шт.
Двигун KY110AS0410-15	1	245\$
Акумулятор Panasonic NCR18650A	14	4.15\$
Модуль IGBT SEMiX151GD066HDs	1	95\$
IGBT STGFW30H65FB	1	3.25\$
Керамічний резистор 0.1Ом	2	3.55\$
Діод SBR2065D1-13	1	0.89\$
Курок газу Xiaomi M365/Pro	1	5.94\$
Датчик струму ACS758LCB-100B-PFF-T	2	4.91\$
Драйвер HCNW3120	7	1.87
DC-DC перетворювач SCW03C-15	4	10
Конденсатор 104J	9	0.04
DC-DC перетворювач LM2596HV	1	3.61\$
Датчик напруги постійного струму DC 0-100	1	3.26\$
Контролер LGT8F328P LQFP32	1	4.72\$
Резистор MRA0207 6K34 B 15PPM TA	1	0.27
Конденсатор BLH105K451A012	1	1.6
Резистор MRA0207 3K16 B 15PPM TA	1	0.27\$
компаратор LM393	1	0.27

Продовження таблиці 5.1

Загальна ціна	-	492.55\$
---------------	---	----------

Одже, електросамокати з такими ж самими характеристиками, які представлені на ринку України коштують від 1000 \$. Тому виконання цього проекту є економічно доцільним.

Поз. познач.		Найменування			Кіл.	Примітка52		
		Двигун						
M1		KY110AS0410-15			1			
		Діоди IGBT транзистори						
VT1		IGBT STGFW30H65FB			1			
VT2- VT7		Модуль IGBT SEMiX151GD066HDs			1			
VD1		Діод SBR2065D1-13			1			
		Резистори						
R1		MRA0207 3K16 B 15PPM TA			1			
Rbr		Керамічний резистор 0,1 Ом			2			
		Датчики та мікросхеми						
DD1		Контролер LGT8F328P LQFP32			1			
DD2		Перетворювач напруги LM2596HV			1			
DD3		Датчик напруги постійного струму DC 0-100			1			
DD4-DD5		Датчик струму ACS758LCB-100B-PFF-T			2			
DD6		Курок газу Xiaomi M365/Pro			1			
GB1		Батарея акумуляторів Panasonic NCR18650A			1			

ВИСНОВКИ

Під час виконання дипломного проекту була виконана розробка електромеханічної системи електросамокату на основі синхронного двигуна з постійними магнітами.

Для реалізації цієї системи було використано синхронний двигун з постійними магнітами KY110AS0410-15 з живленням від акумулятора.

Виконано аналітичний огляд механічної та електричної частини електросамокату, сформовано основні поняття про пристрій та про його основні компоненти.

Було розраховано тягове зусилля, яке необхідне для руху електросамокату, розроблено врасноруч "Driving Cycle", побудовані графіки циклу руху. Визначено, що на проходження електросамокатом циклу витрачається 5,3 кДж. На підставі цих даних були розраховані акумуляторні, та суперконденсаторні батареї. Було визначено, що більш доцільним джерелом живлення є акумуляторна батарея, оскільки вона легша, має менші габарити та дешевша.

У процесі виконання проекту було здійснено розрахунок параметрів обраного синхронного двигуна з постійними магнітами, розроблено алгоритм векторного керування моментом та створено структурну схему для наочного відображення взаємозв'язків між компонентами алгоритму.

Для того щоб промодельовати математичну модель було приведено моменти інерції всього самокату до валу двигуна, сумарний момент інерції дорівнює $J_{\Sigma} = 1.56 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}$. Проведено математичне моделювання електромеханічної системи, досліджено розгін самокату до максимальної швидкості за 27 секунд, при заданому моменті $M_r = 13.7 \text{ Нм}$, який є $2.12M_n$, система відпрацювала момент, і розігналась до заданої максимальної швидкості. Побудовано графіки перехідних процесів.

В кінці дипломного проекту було обрано компоненти для електричної частини електросамокату, побудовано функціональну схему для наочного

представлення взаємодії компонентів. Побудовано схему електричну принципову, розроблено креслення корпусу самокату.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Конструкція електросамокату URL:
https://igrushki7.ua/article_info.php?articles_id=6 (дата звернення 20.04.2023)
2. Устаткування електросамокату URL:
<https://gelius.ua/ua/elektrosamokat-kak-vybrat-i-cho-nuzhno-znat/> (дата звернення 20.04.2023)
3. Двигун постійного струму з постійними магнітами URL:
<https://riverglennapts.com/uk/dc-motor-types/273-permanent-magnet-dc-motor-or-pmdc-motor-working-principle-construction.html> (дата звернення 20.04.2023)
4. Суперконденсатор URL: <https://k-dom.com.ua/shho-take-superkondensatori-i-navishho-voni-potribni/> (дата звернення 25.04.2023)
5. Історія суперконденсаторів URL:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/Іоністор> (дата звернення 25.04.2023)
6. Літій-йонний акумулятор URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Літій-іонний_акумулятор (дата звернення 26.04.2023)
7. Електродвигун двигун KY110AS0410-15 URL:
<https://voltabikes.com.ua/motor-kolyosa-dlya-elektrosamokatov/elektronabor-zadnee-motor-koleso-volta-48v500w-v-litom-obode-10-i-perednee-koleso-10-.html>
(дата звернення 01.05.2023)
8. Літій-йонний акумулятор Panasonic NCR18650A URL:
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/597042/PANASONICBATTERY/NCR18650A.html> (дата звернення 07.05.2023)
9. Суперконденсатор KYOCERA AVX SCCZ1EB308SWB URL:
<https://eu.mouser.com/ProductDetail/KYOCERA-AVX/SCCZ1EB308SWB?qs=B6kkDfuK7%2FCwWkWWCBmIOA%3D%3D> (дата звернення 07.05.2023)

10. Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ "КПІ", 2011 р. – 96 с.

11. навчальний посібник для студентів, які навчаються за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» / Укладачі: Пересада Сергій Михайлович, докт. техн. наук, проф. Ніконенко Євген Олексійович, асп., асист.

12. Конденсатор BLH105K451A012 URL: <https://www.cde.com/resources/catalogs/BLH.pdf> (дата звернення 01.06.2023).

13. IGBT SEMiX151GD066HDs URL: <https://www.semikron-danfoss.com/products/product-classes/igbt-modules/detail/semix151gd066hds-27891210.html> (дата звернення 01.06.2023).

14. Драйвер HCNW3120 URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/oohcpl3120smd.pdf> (дата звернення 01.06.2023).

15. DC-DC перетворювач SCW03C-15 URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/scw03c-15_106626.html (дата звернення 01.06.2023).

16. Конденсатор 104J URL: <https://www.robostore.com.ua/detali-dlya-maketirovaniya/radiodetali/passivnye-komponenty/kondensator-keramicheskij-01uf-100v/> (дата звернення 01.06.2023).

17. Резистор MRA0207 6K34 B 15PPM TA URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/ohmite/MRA0207-6K34-B-15PPM-TA/16369373> (дата звернення 01.06.2023).

18. Резистор 45F2R0E URL:

<https://www.digikey.com/en/products/detail/ohmite/45F2R0E/823311> (дата звернення 01.06.2023).

19. IGBT STGFW30H65FB URL: <https://kaimte.com/product/details/stmicroelectronics/stgfw30h65fb.html> (дата звернення 01.06.2023).

20. Діод SBR2065D1-13 URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/diodes-incorporated/SBR2065D1-13/5956748> (дата звернення 01.06.2023).

21. Резистор WHDR10FET URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/ohmite/WHDR10FET/3114519> (дата звернення 01.06.2023).

22. Датчик напруги DC-0-100 URL: https://aliexpress.com/item/4000282996266.html?sku_id=10000001163895932&spm=.search_results.1.148e12a62CtQ7R (дата звернення 01.06.2023).

23. Резистор MRA0207 3K16 B 15PPM TA URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/ohmite/MRA0207-3K16-B-15PPM-TA/16369264?s=N4IgjCBcoEwAwA4CsVQGMoDMCGAbAzgKYA0IA9lANogDMAdGAGwAEA1gPIAWAtviALqkADgBcoIAKoA7AJYj2mALKFs%2BAK4AnQiAC%2BO0jCrkec7fx1A> (дата звернення 01.06.2023).

24. Датчик струму ACS758LCB-100B-PFF-T URL: <https://arduino.ua/ru/prod3480-datchik-postoyannogo-toka-na-100a-ac758lcb-100b-pff-t> (дата звернення 23.05.2023).

25. Компаратор LM393 URL: https://3v3.com.ua/product_1292.html (дата звернення 23.05.2023).

26. Ручка газу Xiaomi M365/Pro URL: <https://ez-shop.com.ua/ua/p1656097026-ruchka-gaza-rychag.html> (дата звернення 23.05.2023).

ДОДАТОК А

Графічна частина дипломного проекту