

**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 тролейбуса на основі асинхронного двигуна

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи ЕП-31мп

(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 – 2024 р.

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Електромеханічна система тролейбуса на основі асинхронного двигуна

Київ – 2024 р.
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 тролейбуса на основі асинхронного двигуна

,
 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 10.012.2024

3. Вихідні дані до проекту траєкторія руху тролейбуса в міських умовах, запас ходу 30 кілометрів, максимальна швидкість 50 км/год

4. Зміст пояснювальної записки 1 Аналітичний огляд електромеханічної системи. 2 Розрахунок та вибір основних елементів емс 3 Розрахунок параметрів АД та розробка системи керування двигуном 4 Математичне моделювання системи векторного керування моментом. 5 Практична реалізація системи векторного керування моментом синхронного двигуна з постійними магнітами. 6 Економічна доцільність.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Креслення загального виду електромеханічної системи тролейбуса (формат А1); схема електрична принципова силової частини електроприводу, схема електрична принципова керуючого пристрою (формат А1); функціональна та структурна схеми системи, результати дослідження статичних та динамічних режимів (формат А1)

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 1 вересня 2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд електромеханічної системи.	23.9.24	
2	Розрахунок та вибір основних елементів ЕМС	24.10.24	
3	Розрахунок параметрів АД та розробка системи керування двигуном	15.11.24	
4	Математичне моделювання системи векторного керування моментом.	22.11.24	
5	Практична реалізація системи векторного керування моментом асинхронного двигуна.	03.12.24	
6	Розрахунок економічної доцільності	08.12.24	
	Оформлення пояснювальної записки	10.12.24	

Студент

(підпис)

Барбул Д.А.

Керівник проекту

(підпис)

Ковбаса Сергій

Магістерська робота складається із вступу, шести розділів, висновка, списку використаної літератури і додатка (103 сторіноки пояснювальної записки, 26 рисунків, 38 таблиць, 47 використаних джерел).

Мета роботи – розробка електромеханічної системи тролейбуса на основі асинхронного двигуна.

Об’єкт дослідження – асинхронний двигун, та керування ним.

Предмет дослідження – алгоритм векторного керування моментом асинхронного двигуна.

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

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

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

В четвертому розділі промодельовано електромеханічну систему в середовищі MatLab Simulink.

В п’ятому розділі здійснено вибір обладнання, розроблено схему електричну принципову системи.

В шостому розділі виконано порівняння з основними виробниками тролейбусів
ТРОЛЕЙБУС, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ, СУПЕРКОНДЕНСАТОР, АД, ТРАНЗИСТОР, КЛАМПЕР, КОНТАКТОР

					141.ЕПЗ1МП01.001.МР			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Барбул Д. А.			Електромеханічна система електросамокату на основі синхронного двигуна з постійними магнітами	Літ.	Лист	Листів
Перевір.							7	106
Реценз.						КПІ ім Ігоря Сікорського		
Н. Контр.								
Затв.								

The master's thesis consists of an introduction, six sections, a conclusion, a list of references and an appendix (103 pages of explanatory note, 26 figures, 38 tables, 47 references).

The purpose of the work is to develop an electromechanical trolleybus system based on an induction motor.

The object of research is an induction motor and its control.

The subject of the research is the algorithm of vector torque control of an induction motor.

In the first section, an analytical review of the electromechanical system of the trolleybus is carried out, the structure of transport, individual components of the electrical part are considered.

In the second section, the trolleybus cycle was developed, the amount of energy consumed was determined, and the battery was calculated on the basis of these data.

In the third section, a mathematical model for controlling the torque of an induction motor with permanent magnets is developed.

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

In the fifth section, the selection of equipment is carried out, the electrical circuit of the schematic system is developed.

In the sixth section, a comparison with the main products of trolleybuses is made

TROLLEYBUS, INDUCTION MOTOR, MATHEMATICAL MODELING, VECTOR TORQUE CONTROL, ACCUMULATOR BATTERY, SUPERCAPACITOR, AD, TRANSISTOR, CLAMPER, CONTACTOR

					141.EII31MII01.001.MP			
Ch.	Sheet	<i>No document</i>	<i>Sign.</i>	Date				
<i>Develop.</i>		Барбул Д. А.			Electromechanical system of an electric scooter based on a synchronous motor with permanent magnets	Let.	Mass	Scale
Check.							8	106
Review.						Igor Sikorsky KPI, FEA, AEMS-ED, EP-31MP		
N. contr.								
Approv.								

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	13
1.1 Огляд ринку тролейбусів.....	13
1.2 Огляд технічних характеристик акумуляторних батарей в тролейбусах.	14
1.3 Літій-йонні акумулятори.....	14
1.4 Літійзалізофосфатний акумулятор.....	15
1.5 Свинцево-кислотні акумулятори, основні характеристики та принцип дії	15
1.6 Літій-титанатні акумулятори (LTO): характеристики та застосування .	17
1.7 Супер конденсатори.....	18
1.8 Огляд типів електродвигунів, які використовуються в електротранспорті.....	19
1.9 Електродвигуни постійного струму (ДПС): основні характеристики та застосування.....	20
1.10 Асинхронний двигун основні аспекти конструкції, роботи та переваги	22
1.11 Синхронний двигун із постійними магнітами (СДПМ): основні характеристики, конструкція та принцип роботи.....	23
1.12 Огляд характеристик тролейбуса PTS 12.....	25
2 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕМС	27
2.1 Розрахунок потужності двигуна.....	27
2.2 Вибір приводного двигуна тролейбуса.....	34
2.3 Розрахунок та вибір батареї акумуляторів.....	35
2.4 Порівняння використання батареї конденсаторів в якості акумуляторної батареї автомобіля.....	37
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ АД ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ	40
3.1 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна.....	40
3.2 Розрахунок номінальних даних двигуна.....	40
3.3 Модель асинхронного двигуна в системі a-b, перетворення в систему d- q.....	43

	10
3.4 Алгоритм векторного керування швидкістю асинхронного двигуна.....	46
3.5 Алгоритм векторного керування моментом асинхронного двигуна	50
4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ.....	55
4.1 Моделювання системи векторного керування моментом	56
4.2 Дослідження динамічних характеристик	56
5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ асинхронного двигуна	61
5.1 Функціональна схема синхронного електроприводу з живленням від акумуляторної батареї.	62
5.2 Вибір компонентів силової частини.....	65
5.3 Вибір ємнісного фільтру та зарядного кола	67
5.4 Розрахунок резистора і ключа клампера	72
5.5 Датчики струму та напруги.....	73
5.6 Розв’язка цифрових, керуючих та аналогових сигналів	77
5.7 CAN мережа.....	80
5.8 Вибір енкодера	81
5.9 Вибір низьковольтного живлення	82
5.10 Вибір компаратора	83
5.11 Вибір мікроконтролера.....	84
5.12 Вибір запобіжників	85
5.13 Вибір вхідних контакторів	87
6 Економічна доцільність	90
6.1 Огляд ціни проекту	90
6.2 Порівняння з найпопулярнішими виробниками тролейбусів	91
ВИСНОВКИ	93
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	96
ДОДАТОК А.....	103

ВСТУП

Актуальність роботи

У сучасному світі раціональне використання часу та ресурсів є одним із найважливіших завдань людства. Важливу роль у вирішенні цього завдання відіграє громадський транспорт. Одним із найсучасніших та екологічно відповідальних видів транспорту є тролейбус.

Тролейбус, оснащений електричною силовою установкою, поєднує переваги автобуса та трамвая, будучи мобільним, швидким та незалежним від рейок. Завдяки підключенню до контактної мережі він ефективно працює в умовах міста, розвиває швидкість до 80 км/год та забезпечує безшумність руху. Це робить його ідеальним рішенням для мегаполісів із щільним трафіком та постійними заторами.

Окрім того, тролейбус – це економічний та екологічний вид транспорту, адже він працює на електроенергії, зменшуючи залежність від викопного палива.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Розробка виконана в рамках навчання на кафедрі «Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Проект відповідає сучасним тенденціям сталого розвитку міст та інновацій у громадському транспорті.

Мета роботи та задачі дослідження

Метою роботи є розробка електромеханічної системи тролейбуса на основі асинхронного двигуна та шасі тролейбуса PTS 12 для підвищення ефективності та зниження витрат енергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Провести аналітичний огляд сучасних технологій тролейбусів, зокрема ключових компонентів, таких як двигуни, джерела живлення та системи керування.

2. Розрахувати параметри та виконати вибір основних елементів електромеханічної системи: асинхронного двигуна та батареї автономного ходу.

3. Розробити математичні моделі для опису роботи електромеханічної системи та визначити оптимальні алгоритми керування.

4. Провести дослідження системи за допомогою моделювання для оцінки її енергоефективності та експлуатаційних характеристик.

5. Розробити електричні принципові схеми силової частини та системи керування, обрати основні елементи тягової системи.

6. Провести економічний розрахунок доцільності такої системи.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процеси електромеханічного перетворення енергії в тяговому асинхронному електроприводі

Предметом дослідження

Предметом дослідження є тяговий асинхронний векторно-керований електропривід

Методи дослідження

У роботі використовуються методи математичного моделювання, симуляції та оптимізації систем.

Наукова новизна

Наукова новизна роботи полягає у розробці сучасної електромеханічної системи для тролейбусів з використанням асинхронного двигуна та інноваційних рішень для ефективного керування і електроприводом.

Практичне значення

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості підвищення ефективності, надійності та екологічності тролейбусів. Це сприяє розвитку інноваційного громадського транспорту, який відповідає вимогам сталого розвитку міської інфраструктури.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Огляд ринку тролейбусів

Ринок тролейбусів у світі в останні роки зазнав помітних змін через тенденції щодо електрифікації транспорту, урбанізації та екологічної політики, спрямованої на зменшення викидів вуглекислого газу.

У сучасному світі існує великий попит на тролейбуси з автономним ходом, адже це дає змогу відійти від дороговартісної інфраструктури, а також зменшити викиди вуглецю в атмосферу за рахунок впровадження маршрутів без контактної мережі. Зокрема, зважаючи на складну енергетичну ситуацію в Україні, такий вид транспорту дозволяє зменшити навантаження на електромережу, а також підтримувати безперебійну роботу громадського електротранспорту.

В світі існує декілька брендів які випускають такі тролейбуси :

Škoda Electric (Чехія) — компанія пропонує тролейбуси з можливістю автономного ходу до 15-20 км. Вони активно впроваджуються у різних європейських містах.

Solaris (Польща) — пропонує моделі тролейбусів із великими акумуляторами, що можуть рухатись автономно до 30-40 км.

Bogdan Motors (Україна) — працює над тролейбусами з акумуляторами, що дозволяють автономний рух на відстані до 20 км.

CRRC (Китай) — активно розвиває ринок тролейбусів із автономним ходом, оскільки Китай робить значні інвестиції у розвиток електричного транспорту.

ПОЛІТЕХНОСЕРВІС (Україна) – виробляє тролейбуси зі збільшеним автономним ходом до 25 км при повному навантаженні.

1.2 Огляд технічних характеристик акумуляторних батарей в тролейбусах.

Сучасні виробники тролейбусів з автономним ходом використовують 2 типи акумуляторів для своїх батарей, а саме літій-іонні (Li-ion) та літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄).

Škoda Electric батарея потужністю , Bogdan Motors та ПОЛІТЕХНОСЕРБІС використовують літій-йонні акумулятори в своїх батареях, проте Solaris та CRRC використовують літій-залізо-фосфатні акумулятори LiFePO₄, які відрізняються підвищеною безпекою, збільшеним запасом циклів зарядки-розрядки та працюють краще за високих температур. Ці характеристики підходять для використання в електротранспорті.

1.3 Літій-йонні акумулятори

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]

1.4 Літійзалізофосфатний акумулятор

Літій-залізо-фосфатний акумулятор (LiFePO_4 або LFP) є різновидом літій-іонних акумуляторів, де в якості катодного матеріалу використовується залізофосфат літію, а анод виготовлений з графітового вуглецю на металевій підкладці. Завдяки своїй нижчій вартості, високій безпеці, низькій токсичності та тривалому терміну експлуатації, LFP акумулятори широко застосовуються у транспортних засобах, стаціонарних енергетичних системах та резервних джерелах живлення. Важливо зазначити, що ці акумулятори не містять кобальту, що робить їх більш екологічними.

Станом на перший квартал 2021 року частка ринку акумуляторів LFP становила 24,1%, причому основну частину цього ринку контролюють китайські виробники. Очікується, що до 2028 року їхня частка продовжить зростати і перевищить популярність акумуляторів типу NMC (нікель-марганець-кобальт).

Густина енергії акумуляторів LFP є нижчою порівняно з іншими літій-іонними акумуляторами, такими як NMC чи NCA (нікель-кобальт-алюміній), а також вони мають нижчу робочу напругу. Наприклад, акумулятори LFP виробництва CATL мають енергетичну щільність близько 125 Вт-год/кг, з можливим збільшенням до 160 Вт-год/кг завдяки вдосконаленим технологіям пакування. Водночас акумулятори BYD мають щільність 150 Вт-год/кг, що значно поступається акумуляторам NMC, які можуть досягати понад 300 Вт-год/кг. [2]

1.5 Свинцево-кислотні акумулятори, основні характеристики та принцип дії

Свинцево-кислотні акумулятори (АКБ) широко використовуються завдяки універсальним характеристикам і низькій вартості. Вони застосовуються в системах автономного електропостачання, резервного

живлення, сонячних електростанціях, автомобілях, а також у промисловій і побутовій техніці.

Робота свинцево-кислотних АКБ базується на оборотній хімічній реакції між металевими пластинами та розчином сірчаної кислоти, що слугує електролітом:

-Аноди (позитивні пластини): виконані з діоксиду свинцю.

-Катоди (негативні пластини): виготовляються зі свинцю (губчастого).

-Сепаратори: розділяють пластини, запобігаючи їх замиканню під час заряджання та розряджання.

Для підвищення міцності електроди покриваються сплавами свинцю з домішками кальцію або сурми.

Хімічні процеси:

1. Розрядка АКБ:

- У замкнутому ланцюзі виникає струм, спричинений хімічною реакцією в електроліті.

- На пластинах утворюється сульфат свинцю та корозійний наліт, а напруга батареї зменшується.

2. Зарядка АКБ:

- Під час подачі струму від зарядного пристрою реакція проходить у зворотному напрямку.

- Сульфат свинцю видаляється з пластин, відновлюється різниця зарядів, і батарея заряджається. Однак повне очищення пластин не відбувається, тому з часом ємність АКБ зменшується до 70-80% від початкової.

Свинцево-кислотні акумулятори залишаються популярним вибором для багатьох застосувань завдяки простоті конструкції, доступності та надійності.

[3]

1.6 Літій-титанатні акумулятори (LTO): характеристики та застосування

Літій-титанатні акумулятори (LTO) мають анод із нанокристалічного титанату літію, що забезпечує велику площу позитивно зарядженого електрода та стабільну роботу.

Їхніми перевагами є:

-Швидке зарядження: повний заряд за 5-10 хвилин.

-Мінімальний внутрішній опір, що сприяє ефективному переносу заряду.

-Низький саморозряд: 2-5% на місяць.

-Широкий температурний діапазон експлуатації: від -10 до +55 °С, збереження працездатності при низьких температурах.

-Безпека: відсутність вуглецю - запобігає перегріву, а низька напруга (2,4 В) підвищує безпечність використання.

- Відсутність ефекту пам'яті.

Недоліком є низька енергетична щільність (30-110 Вт·год/кг), що пов'язано з малою напругою комірки.

Літій-титанатні батареї використовуються як джерела живлення у електротранспорті, у бензинових автомобілях як заміна стартерних АКБ для автозвуку та освітлення, у побутовій техніці, медичному та телекомунікаційному обладнанні, для організації внутрішнього та зовнішнього освітлення, особливо в системах із сонячними панелями.

LTO-батареї вирізняються довговічністю та універсальністю, що робить їх популярним вибором для різних сфер, особливо в комунальному транспорті.

[4]

1.7 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.

Суперконденсатори сьогодні поділяються на:

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

Подвійношаровий суперконденсатор 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 йонною провідністю.

Псевдоконденсатори мають властивості, близькі до акумуляторів, які можна перезаряджати. Вони складаються з двох твердих електродів і поєднують два механізми збереження енергії: фарадівські 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.

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. [5]

1.8 Огляд типів електродвигунів, які використовуються в електротранспорті

Перші моделі тролейбусів використовували двигуни постійного струму. Однак з часом двигуни змінного струму набули більшої популярності завдяки їх перевагам: вищій питомій потужності, кращій ефективності, меншій масі та відсутності щітково-колекторного вузла. Це стало можливим завдяки появі надійних тиристорних і транзисторних перетворювачів. У сучасних тролейбусах найчастіше використовуються саме електродвигуни змінного струму.

Серійні тролейбуси зазвичай оснащуються одним із трьох типів електродвигунів:

- Асинхронні двигуни – це двигуни змінного струму, в яких швидкість обертання ротора не збігається з частотою електромагнітного поля.
- Синхронні двигуни – також працюють на змінному струмі, однак рух ротора синхронізований з полем. Вони використовуються при високих

потужностях, наприклад, крокові та вентиляльні двигуни. Крокові двигуни забезпечують точне положення ротора шляхом подачі живлення на конкретну обмотку.

- Двигуни-колеса. У цьому типі двигуна момент і потужність спрямовані на конкретне колесо. Такі двигуни часто застосовують у гібридних автобусах.

Система керування електродвигуном передбачає використання інвертора для перетворення постійного струму з мережі акумуляторів у трифазний змінний. Трансмісія зазвичай представлена одноступінчастим зубчастим редуктором і відповідає за передачу моменту двигуна на колеса та зменшення передатного числа для збільшення крутного моменту на колесах. Інші параметри роботи двигуна регулюються індивідуальною електронною системою управління. [6]

1.9 Електродвигуни постійного струму (ДПС): основні характеристики та застосування

Електродвигун постійного струму (ДПС) — це електромеханічна машина, яка перетворює електричну енергію постійного струму на механічну. Його конструкція подібна до генератора постійного струму. Принцип роботи базується на електромагнітній індукції, яка створює обертальний момент при взаємодії струму в обмотках ротора (якоря) з магнітним полем статора.

Двигуни постійного струму поділяються на:

1. За магнітною системою статора:

- З постійними магнітами.
- З електромагнітами:
- Незалежне збудження (обмотка живиться окремо).
- Залежне збудження:
- Послідовне (обмотка підключена послідовно з ротором).
- Паралельне (обмотка підключена паралельно).
- Змішане (переважає одна з обмоток).

2. За типом обмотки: вид з'єднання обмоток суттєво впливає на механічні та електромеханічні характеристики.

Переваги ДПС

- Простота конструкції і керування.
- Лінійні механічні характеристики.
- Широкий діапазон регулювання швидкості обертання.
- Високий пусковий момент (особливо у двигунах з послідовним збудженням).
- Можливість роботи в генераторному режимі (рекуперація енергії).

Недоліки ДПС

- Дорожняча виготовлення.
- Необхідність використання випрямлячів для живлення від змінного струму.
- Зношення та необхідність обслуговування колекторно-щіткових вузлів.
- Обмежений термін служби через зношення елементів.
(Сучасні технології значно зменшили ці недоліки.)

Застосування

1. Промисловість та транспорт:
 - Приводи кранів, прокатних станів.
 - Тягові електроприводи тепловозів, електровозів, теплоходів.
2. Автомобілі та механізми:
 - Стартери автомобілів та тракторів (із чотирма полюсами та щітками для зменшення опору).
 - Кар'єрні самоскиди та інші машини.
 - Радянські тролейбуси та трамваї
3. Інші галузі:
 - Автоматизовані системи.
 - Спеціалізовані приводи із високими вимогами до пускового моменту.

Двигуни постійного струму залишаються важливими завдяки простоті регулювання швидкості, високим пусковим характеристикам і здатності до рекуперативного гальмування, що робить їх актуальними автоматизованих промислових установок. Проте, в сфері комунального електротранспорту такий тип електродвигуна є застарілим, через перераховані вище недоліки. [7]

1.10 Асинхронний двигун основні аспекти конструкції, роботи та переваги

Асинхронний двигун має просту будову, що складається з таких основних частин:

1. Статор – нерухома частина у формі циліндра, виготовлена зі сталевих листів. У його пазах, зміщених на 120° , розташована обмотка.

2. Ротор – рухома частина, яка може бути:

- Короткозамкненим: складається з осердя, в якому алюмінієві стрижні з'єднані торцевими ущільнювачами.

- Фазним: має трифазну обмотку, застосовується тільки в трифазних двигунах.

Пристрої з короткозамкненим ротором можуть бути одно-, дво- чи трифазними.

3. Додаткові елементи – відповідають за охолодження, захист і забезпечення обертання.

Асинхронний двигун працює за принципом взаємодії магнітних потоків статора і ротора. Основні етапи:

1. Магнітний потік статора перетинає ротор, викликаючи електрорушійну силу.

2. У короткозамкненому роторі виникає змінний струм.

3. Взаємодія магнітних потоків створює момент, що крутить, який обертає вал двигуна.

4. Через відставання ротора від поля статора двигун працює несинхронно, забезпечуючи стабільну роботу.

Особливість асинхронного двигуна – безконтактне формування струму в роторі, що підвищує його ефективність і надійність. Напрямок обертання змінюється через перестановку фаз на обмотках.

Переваги

Асинхронні двигуни широко застосовуються завдяки таким перевагам:

- Простота конструкції – мінімальна кількість деталей.
- Надійність і довговічність – контактні елементи майже не зношуються.
- Доступна вартість – завдяки простим матеріалам і технології виготовлення.

виготовлення.

- Універсальність – використовуються в обладнанні різних типів.

Ці характеристики забезпечують популярність асинхронних двигунів у промисловості та повсякденному житті, а особливо в тролейбусах[8]

.

1.11 Синхронний двигун із постійними магнітами (СДПМ): основні характеристики, конструкція та принцип роботи

Синхронний двигун із постійними магнітами (СДПМ) — це синхронна електрична машина, у якій індуктор ротора складається з постійних магнітів. Основною відмінністю СДПМ від асинхронного двигуна є конструкція ротора. Дослідження показують, що СДПМ має коефіцієнт корисної дії (ККД) на 2% вищий, ніж високоефективний асинхронний двигун за однакових умов роботи, зокрема при використанні ідентичного статора та частотного перетворювача. Перевагами синхронного двигуна з постійними магнітами є вища потужність на одиницю об'єму та більший момент на одиницю інерції у порівнянні з іншими двигунами.

Конструкція та типи СДПМ

1. Складові частини:

- Статор (необертальна частина): складається з корпусу, сердечника та обмоток (зазвичай дво- або трифазних).

- Ротор (обертальна частина): містить постійні магніти, які виготовляються з матеріалів із високою коерцитивною силою.

2. Типи роторів:

- З явно вираженими полюсами: індуктивність уздовж повздовжньої L_d та поперечної L_q осей є різною $L_d \neq L_q$.

- З неявно вираженими полюсами: індуктивність по обох осях однакова $L_d = L_q$.

3. Типи за розташуванням магнітів:

- З поверхневою установкою магнітів (SPMSM).

- Із вбудованими магнітами (IPMSM).

4. Типи обмоток статора:

- Розподілена обмотка: число пазів на полюс і фазу $Q = 2, 3, \dots, k$.

- Сконцентрована обмотка: $Q = 1$, пази розташовані рівномірно по колу статора.

Принцип роботи СДПМ

Робота СДПМ базується на взаємодії:

- Обертального магнітного поля статора (створюється трифазними струмами).

- Постійного магнітного поля ротора (генерується магнітами).

Цей принцип аналогічний до роботи трифазного асинхронного двигуна, але в СДПМ ротор рухається синхронно з полем статора.

Керування СДПМ

Для роботи СДПМ обов'язковою є система управління, наприклад, частотний перетворювач або сервопривод. Існує багато методів керування, вибір яких залежить від вимог електропривода. Ефективність роботи СДПМ значною мірою визначається вибором системи керування.

Переваги СДПМ

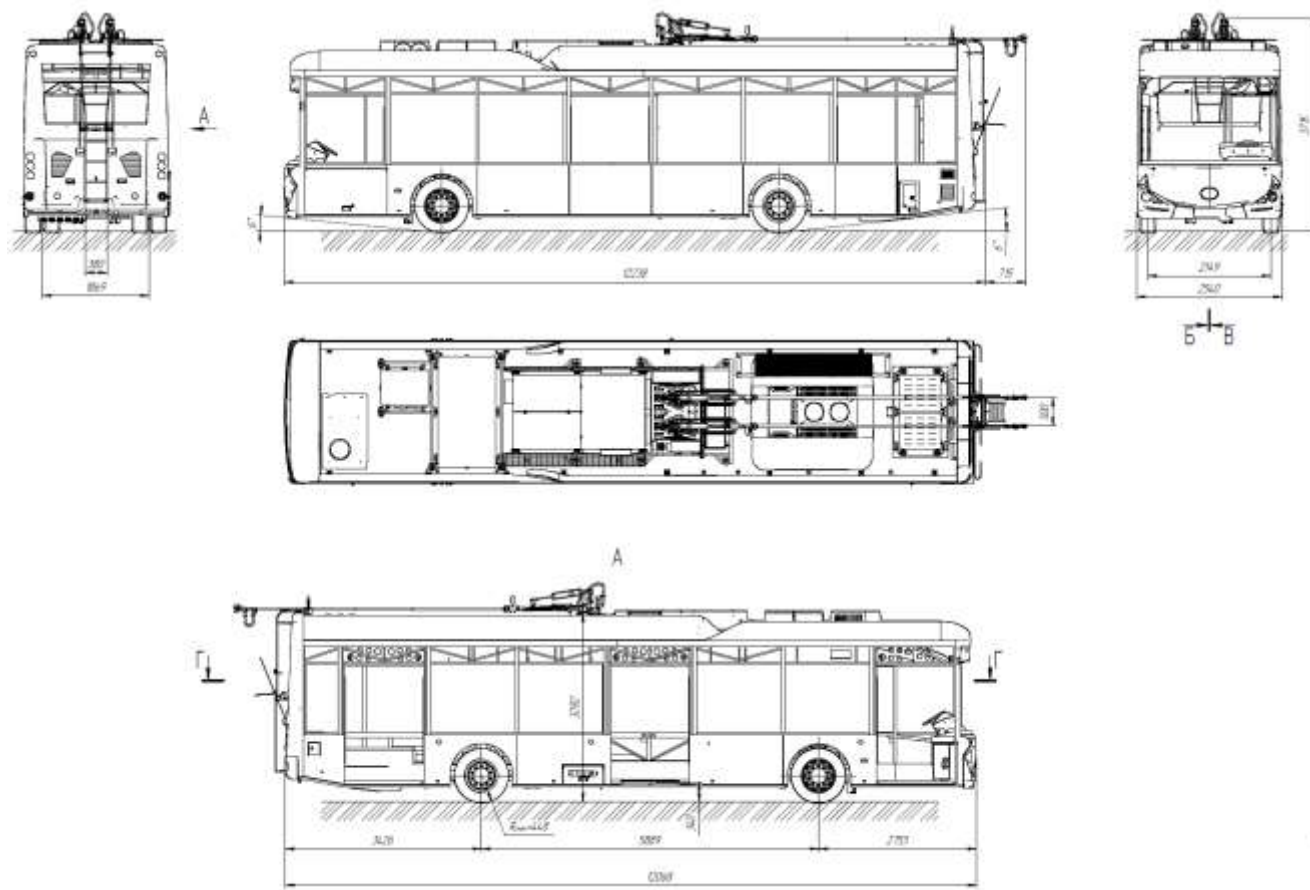
- Високий ККД.

- Компактність (вища потужність на одиницю об'єму).
- Високий коефіцієнт моменту до інерції.
- Енергоефективність у поєднанні з частотним перетворювачем.

Синхронні двигуни з постійними магнітами широко застосовуються у промисловості, транспорті, автоматизації та інших сферах завдяки своїй високій ефективності та компактності. В сфері міського транспорту ці двигуни використовують, поки що, тільки передові компанії. [9]

1.12 Огляд характеристик тролейбуса PTS 12

Зовнішній вигляд та габарити тролейбуса PTS 12 наведені на рисунку 1.1



Характеристики тролейбуса PTS 12 наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Характеристики тролейбуса PTS 12

№ п/п	Параметр	Опис
1	2	3
Загальна інформація		
2	Кількість сидячих місць	37
3	Загальна кількість місць	97
4	Кількість дверей	4
Характеристики продуктивності		
6	Розгін 0 - 100 км/год	2.5 сек
7	Максимальна швидкість	65 км/год
8	Співвідношення ваги до потужності	67.7 кг/кВт
9	Співвідношення ваги до обертального моменту	2.3 кг/Нм, 429.2 Нм/т
Характеристики джерела живлення		
10	Тип акумуляторів	Lithium-ion
11	Кількість комірок	864
12	Кількість модулів	24
13	Охолодження	Водяне
14	Загальна ємність акумулятора	67 кВт/год
15	Напруга акумулятора	572 В
17	Запас ходу	До 50 км
18	Середнє споживання енергії	1.9 кВт/ км
Характеристики тягової установки		
19	Потужність системи	180 кВт
20	Крутний момент системи	900 Нм
21	Електродвигун 1	
22	Тип двигуна	Асинхронний
23	Напруга	320 В
24	Потужність електродвигуна	180 кВт
25	Крутний момент електродвигуна	900 Нм
27	Передаточне число редуктора	1/8

Отже, в якості тягового двигуна оберемо асинхронний двигун оскільки він має просту будову, високу надійність та відносно невелику ціну. В якості батареї для автономного ходу оберемо літій іонний акумулятор.

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, – тягова сила, яка виникає в точці дотику шин з дорогою, залежить від моменту, який створюється приводним двигуном, – 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 та сила аеродинамічного опору.

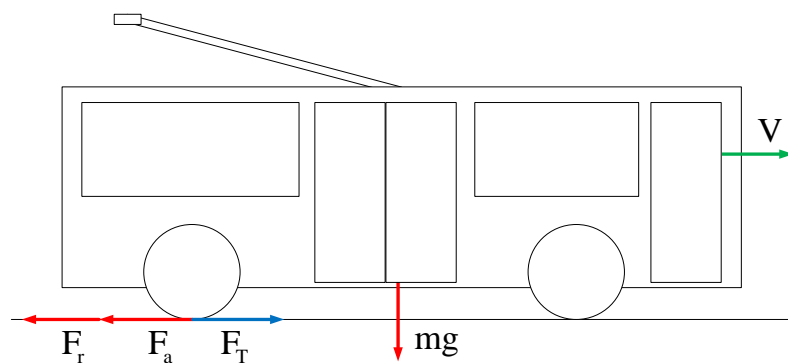


Рисунок 2.1 – Схема дії сил на транспортний засіб.

Сила тертя кочення визначається як:

$$F_r = mgf_r = 18600 \cdot 9.8 \cdot 0.008 = 1458 \text{ Н}, \quad (2.2)$$

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

Сила аеродинамічного опору визначається за формулою:

$$F_a = \frac{\rho S C_a V^2}{2} = \frac{1.22 \cdot 6.25 \cdot 0.7 \cdot 15^2}{2} = 40 \quad (2.3)$$

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.

$$F_T = F_r + F_a + ma = 1458 + 40 + 0 = 1498 \quad (2.4)$$

Тягова потужність без врахування втрат визначається як:

$$P_{\text{тяг}} = F_{\text{тяг}} V = 1498 \cdot 15 = 22470, \text{ Вт}. \quad (2.5)$$

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.

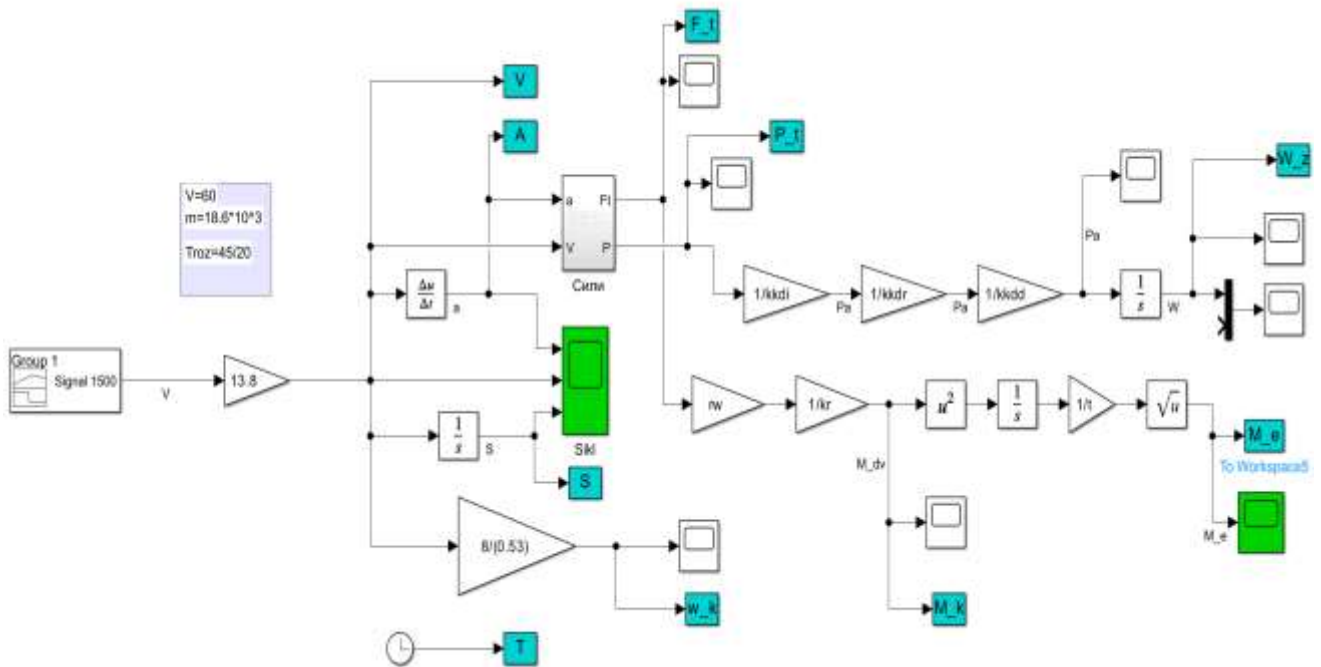


Рисунок 2.2 – Математична модель для розрахунку системи.

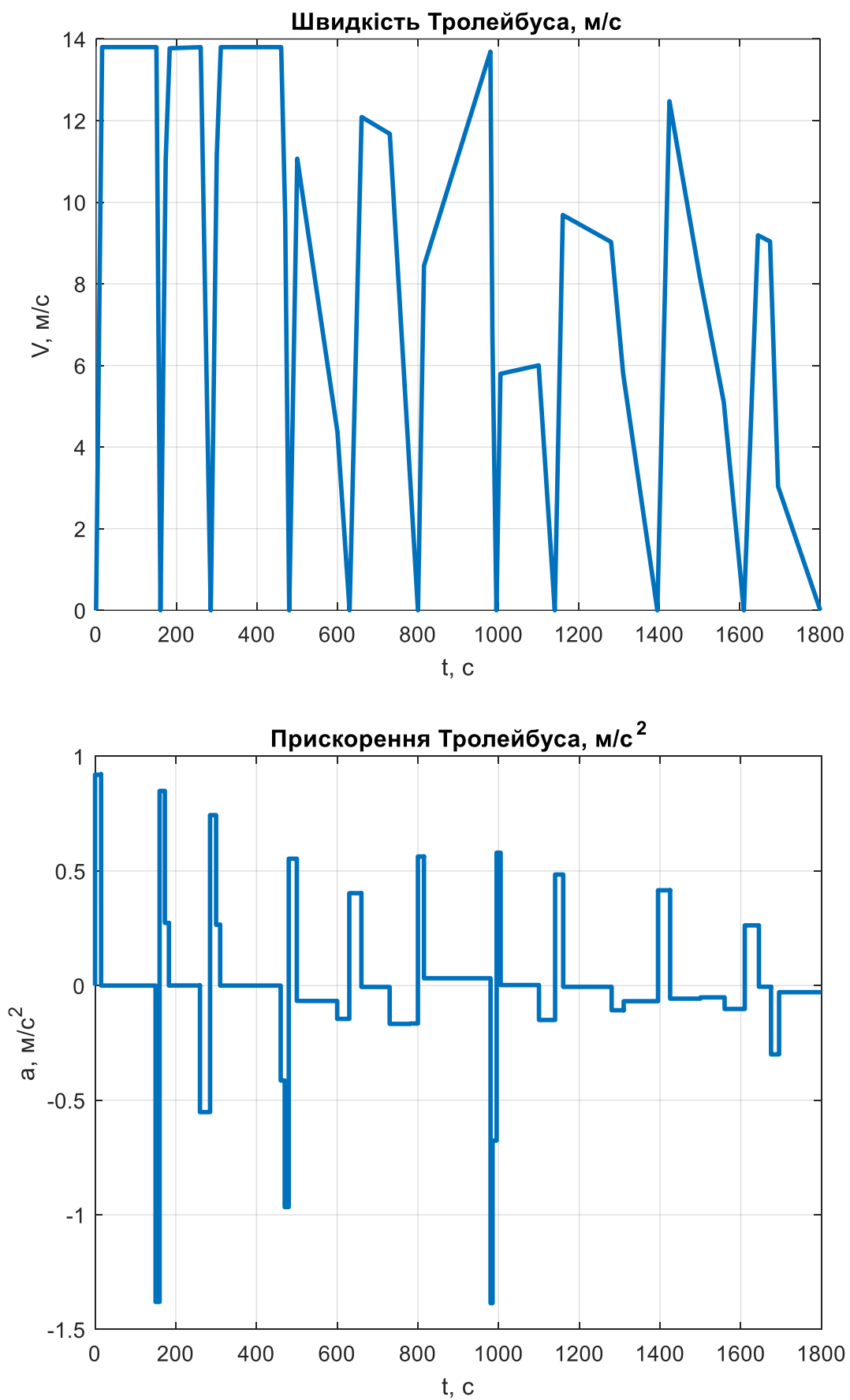


Рисунок 2.3 – Розраховані данні пройденого циклу руху.

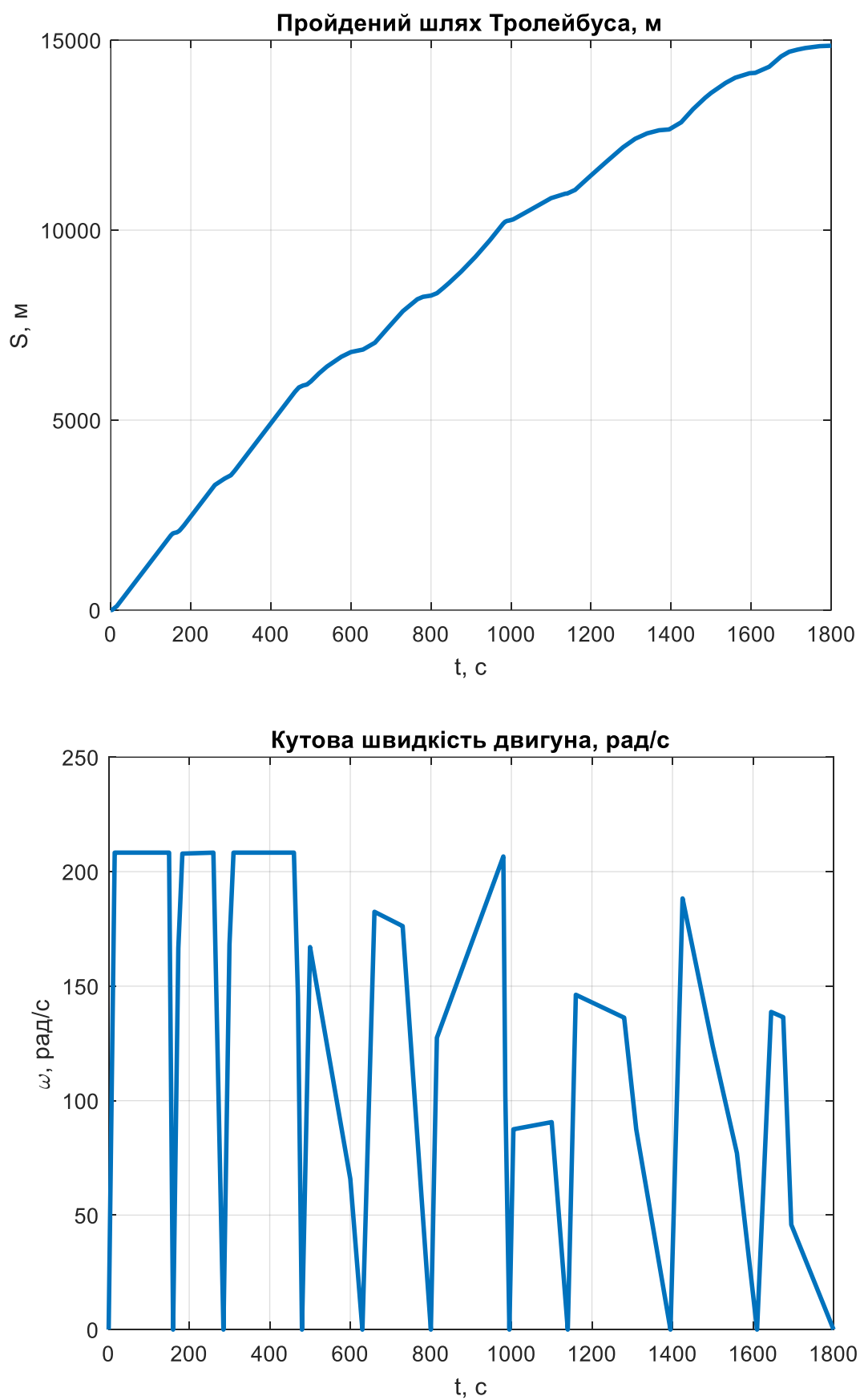


Рисунок 2.4 – Розраховані данні пройденого циклу руху.

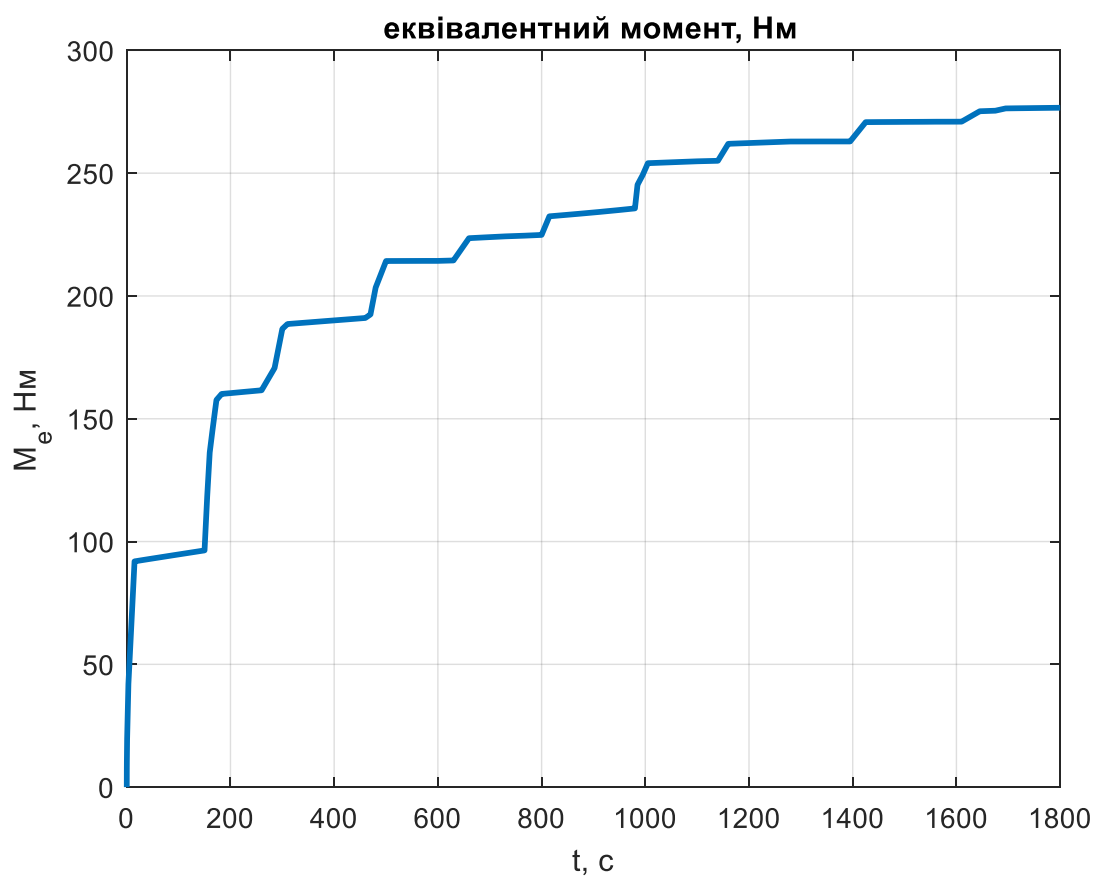
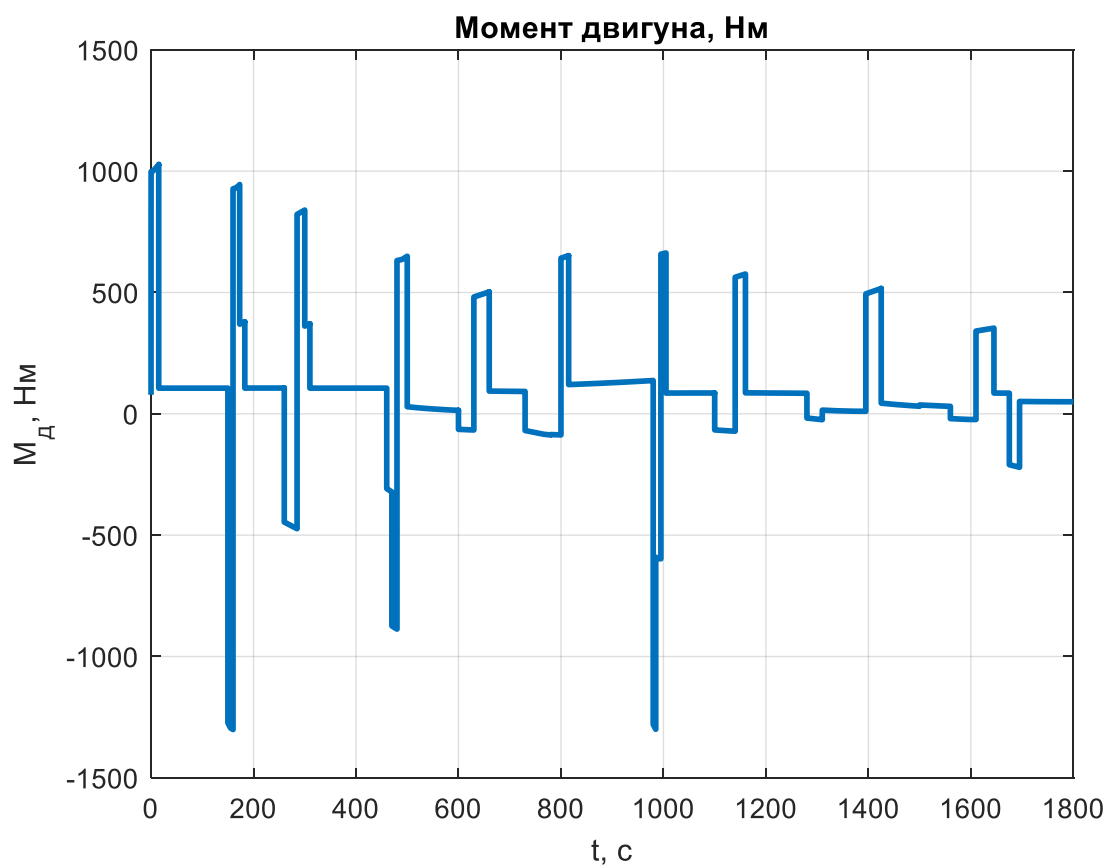


Рисунок 2.5 – Розраховані данні пройденого циклу руху.

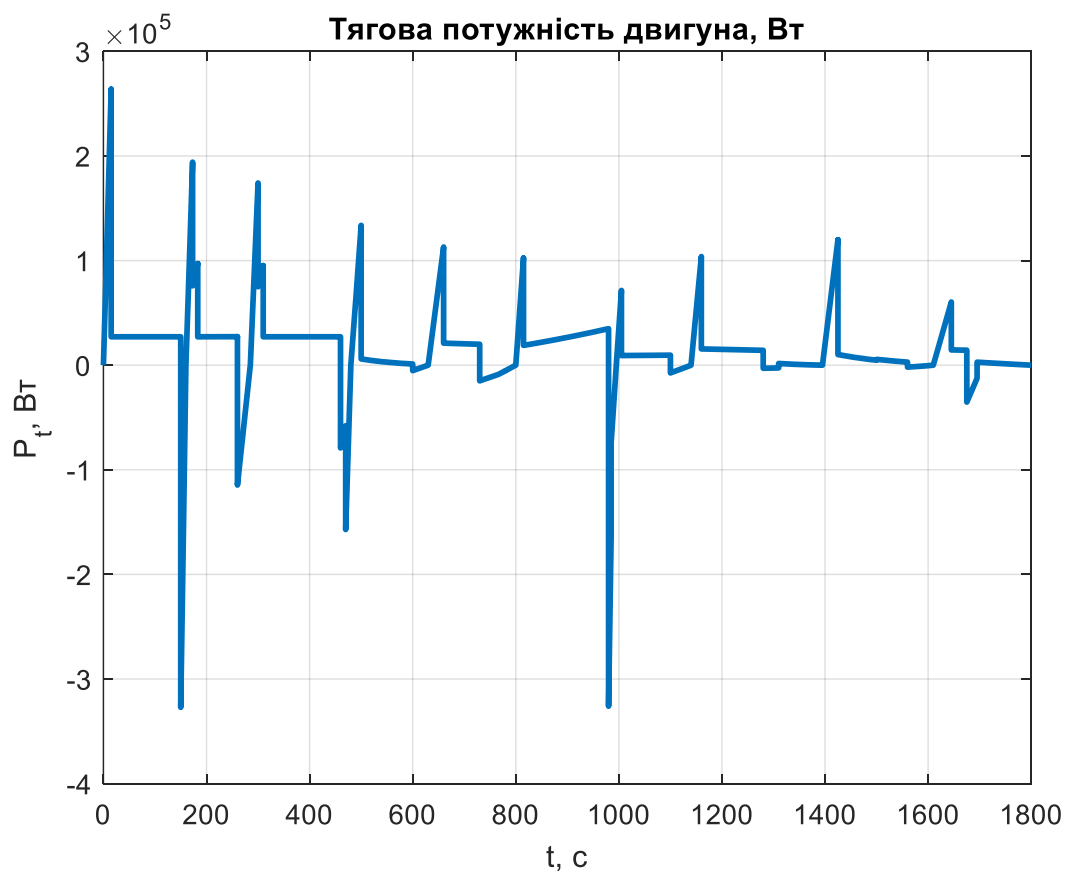
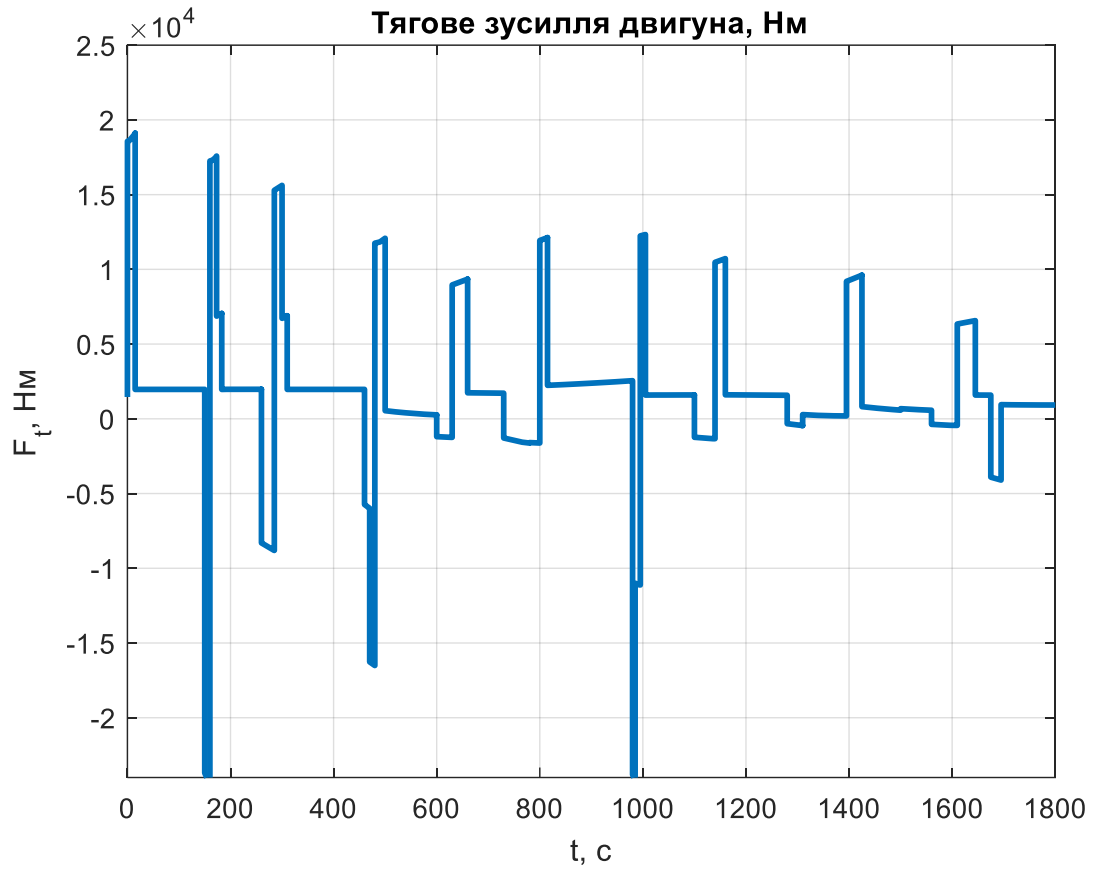


Рисунок 2.6 – Розраховані данні пройденого циклу руху.

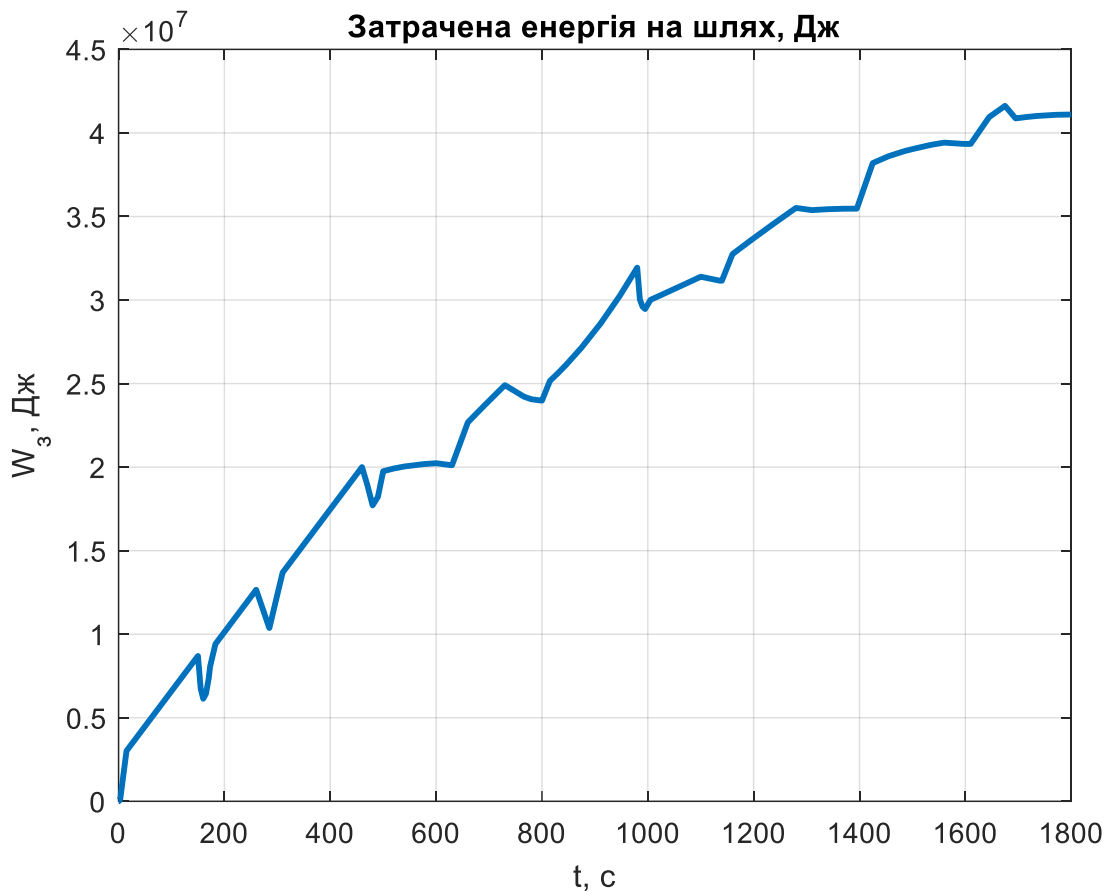


Рисунок 2.7 – Розраховані данні пройденого циклу руху

2.2 Вибір приводного двигуна тролейбуса

З рис. 2.3 – 2.5 можна визначити, що максимальний момент двигуна становить 1025 Н·м, максимальна швидкість – 208 рад/с, максимальна потужність – 264 кВт.

Обрано двигун 6ДТА.002.1 У2[10]. Технічні характеристики даного двигуна наведені у табл. 1.2.

Таблиця 2.1– Технічні дані двигуна 6ДТА.002.1 У2

Параметр	Опис
Максимальний момент, Н·м	1200
Тривалий момент, Н·м	900

Максимальна швидкість об/хв	3900
Номінальна швидкість, рад/с	157
Тривала потужність, кВт	180
ККД	0.93
Перевантажувальна здатність	3.5
Частота, Гц	50

2.3 Розрахунок та вибір батареї акумуляторів

Виберемо акумулятори Suyija Liferо4 3.2V 86Ah[11] з технічними даними, що містяться в Таблиці 2.2, для створення акумуляторної батареї.

Таблиця 2.2 – Технічні дані акумуляторів Suyija Liferо4 3.2V 86Ah

Параметр	Опис
Номінальна місткість, Аг	86
Номінальна напруга, В	3.2
Маса, кг	2.1
Висота, мм	124
Ширина, мм	172
Довжина, мм	48
Максимальний струм	3с

Розрахункова потужність, яку повинна мати акумуляторна батарея:

$$W_{\Sigma \text{ АКБ}} = W_1 \frac{S_{\Sigma}}{S_1} = 41.724 \cdot 10^6 \cdot \frac{40 \cdot 1000}{14886} = 112.12, \text{ МДж}, \quad (2.8)$$

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 :

$$P_{\text{АКБ}} = \frac{W_{\Sigma \text{АКБ}}}{3600} = \frac{112.12 \cdot 10^6}{3600} = 31.143, \text{ кВт.} \quad (2.9)$$

Розрахункова ємність батареї:

$$I_{\text{АКБ}} = \frac{P_{\text{АКБ}}}{U_{\text{АКБ}}} = \frac{31143}{540} = 57.67, \text{ А} \cdot \text{год,} \quad (2.10)$$

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

Кількість з'єднаних послідовно акумуляторів в ланці:

$$N_U = \frac{U_{\text{АКБ}}}{U_{\text{cell}}} = \frac{540}{3.2} = 169, \text{ шт,} \quad (2.11)$$

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

Кількість з'єднаних паралельно ланок:

$$N_I = \frac{I_{\text{АКБ}}}{I_{\text{cell}}} = \frac{57.67}{86} = 1, \text{ шт,} \quad (2.12)$$

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

Загальна кількість акумуляторів:

$$N = N_I N_U = 1 \cdot 169 = 169, \text{ шт.} \quad (2.13)$$

Загальна вага акумуляторної батареї:

$$m_{\text{АКБ}} = Nm_{\text{cell}} = 14 \cdot 0.0475 = 354.9, \text{ кг}, \quad (2.14)$$

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 GHC C27100000SR[12], технічні дані якого наведені в таблиці

Таблиця 2.3 – Технічні дані суперконденсатора GHC C27100000SR

Параметр	Опис
Діаметр	60 мм
Довжина	138 мм
Піковий струм	300 А
Ємність	10000 Ф
Номинальна напруга	2.7 В DC
Точність	- 10 %, + 30 %
ESR	0.6 Ом
Струм витоку	15 мА
Вага	810 г

Кількість з'єднаних послідовно суперконденсаторів в ланці:

$$N_{\text{BATU}} = \frac{U_{\text{BATmax}}}{U_{\text{BATcell}}} = \frac{540}{2.7} = 200, \text{ шт}, \quad (2.15)$$

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

Ємність однієї ланки суперконденсаторів:

$$C_{\text{BATU}} = \frac{C_{\text{BAT}}}{N_{\text{BATU}}} = \frac{10000}{200} = 50, \text{ Ф}, \quad (2.16)$$

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

Кількість енергії однієї ланки суперконденсаторів:

$$W_{\text{BATU}} = \frac{C_{\text{BATU}}}{2} (U_{\text{BATmax}}^2 - U_{\text{BATmin}}^2) = \frac{50}{2} (540^2 - 270^2) = 5467.5, \text{ кДж}, \quad (2.17)$$

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

Кількість з'єднаних паралельно ланок суперконденсаторів:

$$N_{\text{BATI}} = \frac{W_{\Sigma \text{АКБ}}}{W_{\text{BATU}}} = \frac{1121.2 \cdot 10^6}{5467.5 \cdot 10^3} = 21, \text{ шт.} \quad (2.18)$$

Загальна кількість суперконденсаторів:

$$N_{\text{BAT}} = N_{\text{BATI}} N_{\text{BATU}} = 21 \cdot 200 = 4200, \text{ шт.} \quad (2.19)$$

Загальна вага батареї суперконденсаторів:

$$m_{\text{BAT}} = N_{\text{BAT}} m_{\text{BATcell}} = 4200 \cdot 0.81 = 3402, \text{ кг}, \quad (2.20)$$

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

Отже можемо зробити висновок, через низьку ємність енергії на одиницю ваги та вартість суперконденсаторів, їх не доцільно використовувати для транспорту якщо необхідно долати великі відстані без підзарядки.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ АД ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ

3.1 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна

Данні двигуна з каталогу наведено в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Паспортні дані 6ДТА.002.1 У2

Номінальна потужність	$P_n = 180 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 420 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції	$J_d = 4,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0,93$
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0,88$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 3,5$
Номінальне ковзання	$s_n = 0,985$
Критичне ковзання	$s_k = 0,505$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50(\text{Гц})$

3.2 Розрахунок номінальних даних двигуна

Номінальна кутова частота напруги статора дорівнює:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с} \quad (3.1)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна дорівнює:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{2} = 157,08 \text{ рад/с} \quad (3.2)$$

Номінальна швидкість двигуна дорівнює:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - s_n) = 157.08(1 - 0.015) = 154.72 \text{ рад/с.} \quad (3.3)$$

Номінальний момент двигуна дорівнює:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{180000}{154.72} = 1163.4 \text{ Нм.} \quad (3.4)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності λ з каталогу) дорівнює:

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 3.5 \cdot 1163.4 = 4071.8 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (3.5)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора дорівнюють:

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{420}{\sqrt{3}} = 242.49 \text{ В;} \quad (3.6)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{180000}{3 \cdot 242.49 \cdot 0.93 \cdot 0.88} = 302.34 \text{ А.} \quad (3.7)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора дорівнюють:

$$U_{na} = \sqrt{2} U_n = \sqrt{2} \cdot 242.49 = 343 \text{ В;} \quad (3.8)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 302 = 428 \text{ А.} \quad (3.9)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу при $R_1 = 0$ дорівнює:

$$\Psi_{1XX} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{343}{314} = 1.09 \text{ Вб}. \quad (3.10)$$

На основі проведених розрахунків обчислюємо значення параметрів $\alpha, \alpha_1, \beta, \gamma, \sigma, \mu_1$, які дорівнюють:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.1095}{0.01} = 11.2415 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}; \quad (3.11)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.0156}{0.01} = 1.5718 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}; \quad (3.12)$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right) = 0.01 \left(1 - \frac{(0.01)^2}{0.01 \cdot 0.01} \right) = 0.28610 \text{ мГн}; \quad (3.13)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma} = \frac{0.01}{0.01 \cdot 0.00028} = 3481.9 \frac{1}{\text{Гн}}; \quad (3.14)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta = \frac{0.156}{0.28 \cdot 10^{-3}} + 11.24 \cdot 0.01 \cdot 3481.9 = 434.38 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}; \quad (3.15)$$

$$\mu_1 = \frac{3 L_m}{2 L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.01}{0.0097} = 1.4942. \quad (3.16)$$

Таблиця 3.2 – Параметри двигуна 6ДТА.002.1 У2

$P_{2n},(\text{кВт})$	180	$R_1,(\text{Ом})$	0.0156
$\omega_{xx},(\text{рад/с})$	157	$R_2,(\text{Ом})$	0.1095
$\omega_n,(\text{рад/с})$	154.7	$L_1,(\text{Гн})$	0.01
$M_n,(\text{Н}\cdot\text{м})$	1163	$L_2,(\text{Гн})$	0.01
$M_k,(\text{Н}\cdot\text{м})$	4071	$L_m,(\text{Гн})$	0.01
λ	3.5	$a,(\text{Ом/Гн})$	11.24
$I_{na},(\text{А})$	302	$\alpha_1,(\text{Ом/Гн})$	1.57
$\psi_{1XX},(\text{Вб})$	1.091	$\sigma,(\text{Гн})$	0.286
η	0.93	$\beta,(1/\text{Гн})$	3481

3.3 Модель асинхронного двигуна в системі a-b, перетворення в систему d-q

Для моделювання систем керування АД використовується математична модель, яка записується в стаціонарній системі координат (a – b):

$$M = \mu(\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}) \quad (3.17)$$

$$\dot{i}_{1a} = -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} - \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a} \quad (3.18)$$

$$\dot{i}_{1b} = -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b} \quad (3.19)$$

$$\dot{\psi}_{2a} = -\alpha \psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a} \quad (3.20)$$

$$\dot{\psi}_{2b} = -\alpha\psi_{2b} - p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m \dot{i}_{1b}, \quad (3.21)$$

де ω – кутова швидкість ротора, $(i_{1a}, i_{1b})^T$ – компоненти струму статора і системи координат (a - b), $(\psi_{2a}, \psi_{2b})^T$ – компоненти вектора потокозчеплень ротора, $(u_{1a}, u_{1b})^T$ – компоненти вектора напруги статора, M_c – момент навантаження, ν – коефіцієнт в'язкого тертя. Додатні константи, що відносяться до електричних і механічних параметрів АД, визначені в такий спосіб

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}\right), \quad \beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma}, \quad \mu = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{J L_2}, \quad \alpha = \frac{R_2}{L_2}, \quad \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta, \quad (3.22)$$

де J – повний момент інерції ротора, R_1 і R_2 – активні опори обмоток статора і ротора відповідно, L_1 і L_2 – індуктивні опори обмоток статора і ротора відповідно, L_m – індуктивний опір взаємоіндукції обмоток статора і ротора, p_n – число пар полюсів.

Алгоритми векторного керування АД, як правило, проектуються та записуються в синхронній системі координат (d – q), яка обертається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю ω_0 , зображено на рис. 3.1.

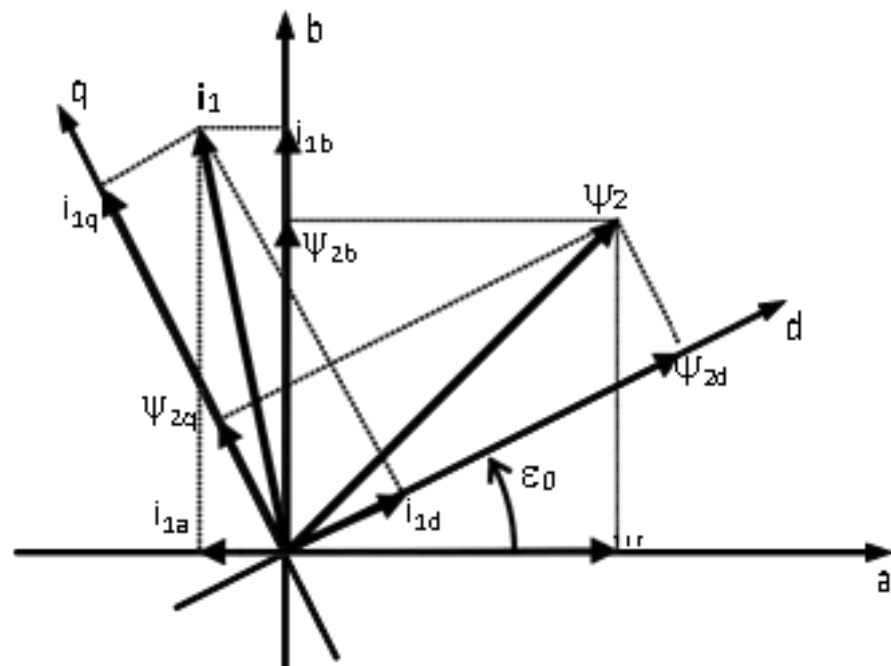


Рисунок 3.1 – Розташування векторів АД

Перетворення координат визначаються:

$$\begin{aligned} X^{(d-q)} &= e^{-j\varepsilon_0} X^{(a-b)} \\ X^{(a-b)} &= e^{j\varepsilon_0} X^{(d-q)}; \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$e^{j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_0 & -\sin\varepsilon_0 \\ \sin\varepsilon_0 & \cos\varepsilon_0 \end{bmatrix}; e^{-j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_0 & \sin\varepsilon_0 \\ -\sin\varepsilon_0 & \cos\varepsilon_0 \end{bmatrix}; J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.24)$$

де x_{yz} позначає двовимірний вектор напруги, потоку і струму статора, ε_0 – кутове положення системи координат $(d - q)$ відносно стаціонарної $(a - b)$.

Проблема відпрацювання заданих траєкторій кутової швидкості – потокозчеплення формується наступним чином. Припустимо, що для моделі АД, заданої (3.17), виконується наступне:

A.1. Струми статора та кутова швидкість ротора доступні для вимірювання.

A2. Параметри АД відомі і незмінні.

A3. Момент навантаження M_c невідомий, постійний та обмежений.

A4. Задані траєкторії кутової швидкості ω^* і потокозчеплення $\psi^* > 0$ є обмеженими функціями з обмеженими першою та другою похідними по часу.

В умовах цих припущень відбувається проектування алгоритмів прямого на непрямого векторного керування які забезпечують

O1. Глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій швидкості – потокозчеплення, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0, \quad (3.25)$$

за умови обмеженості всіх внутрішніх змінних.

O2. Асимптотичне орієнтування по вектору потокозчеплення ротора

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_q = 0. \quad (3.26)$$

О3. Асимптотичну лінеаризацію підсистеми швидкості до лінійної повністю керованої форми.

О4. Асимптотичну розв'язку процесів керування електромеханічними та електромагнітними координатами АД.

Синтез алгоритмів векторного керування по вимірюваному виходу виконано в два етапи: спершу синтезується підсистема керування потокозчепленням, а потім підсистема керування швидкістю. Обидві підсистеми синтезуються з використанням зворотної покрокової процедури проектування.

3.4 Алгоритм векторного керування швидкістю асинхронного двигуна

Структура алгоритму непрямого векторного керування містить:

- розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*) ; \quad (3.27)$$

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*) ; \quad (3.28)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*} + \phi , \quad (3.29)$$

де $\psi^*, \dot{\psi}^*, \ddot{\psi}^*$ задане значення модуля вектора потокозчеплення ротора та його перша і друга похідні відповідно, ϕ – робастифікуючий зв'язок, який буде визначено далі. В стандартному випадку $\phi = 0$.

- регулятор струму по осі d (польової складової струму статора)

$$u_{1d} = \sigma(\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d} - k_i \tilde{i}_d - x_d); \quad (3.30)$$

$$\dot{x}_d = k_{ii} \tilde{i}_d \quad (3.31)$$

де $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*$ – похибка відпрацювання струму по осі d, u_{1d} компонента вектора напруги статора по осі d, $(k_i, k_{ii}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму.

- регулятор кутової швидкості

$$i_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} (-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \nu \omega^* + \dot{\omega}^*); \quad (3.32)$$

$$\hat{M}_c = -k_{\omega i} \tilde{\omega} \quad (3.33)$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_\omega (k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q) + \hat{M}_c + \nu \dot{\omega}^* + \ddot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^*, \quad (3.34)$$

де $\omega^*, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*$ – задана кутова швидкість, перша і друга похідні відповідно, $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ – похибка відпрацювання кутової швидкості, $(k_\omega, k_{\omega i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора кутової швидкості;

-регулятор струму по осі q (моментної складової струму статора)

$$u_{1q} = \sigma(\gamma i_{1q}^* - \omega_0 i_{1d} - \omega_p \beta \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq} \tilde{i}_q - x_q) \quad (3.35)$$

$$\dot{x}_q = k_{ii} \tilde{i}_q \quad (3.36)$$

де $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*$ – похибка відпрацювання струму по осі q, u – компонента вектора напруги статора по осі q. [13]

Реальні напруги, що прикладаються до обмоток статора, дорівнюють:

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix}. \quad (3.37)$$

Структурну схему алгоритму зображено на рисунку 3.2

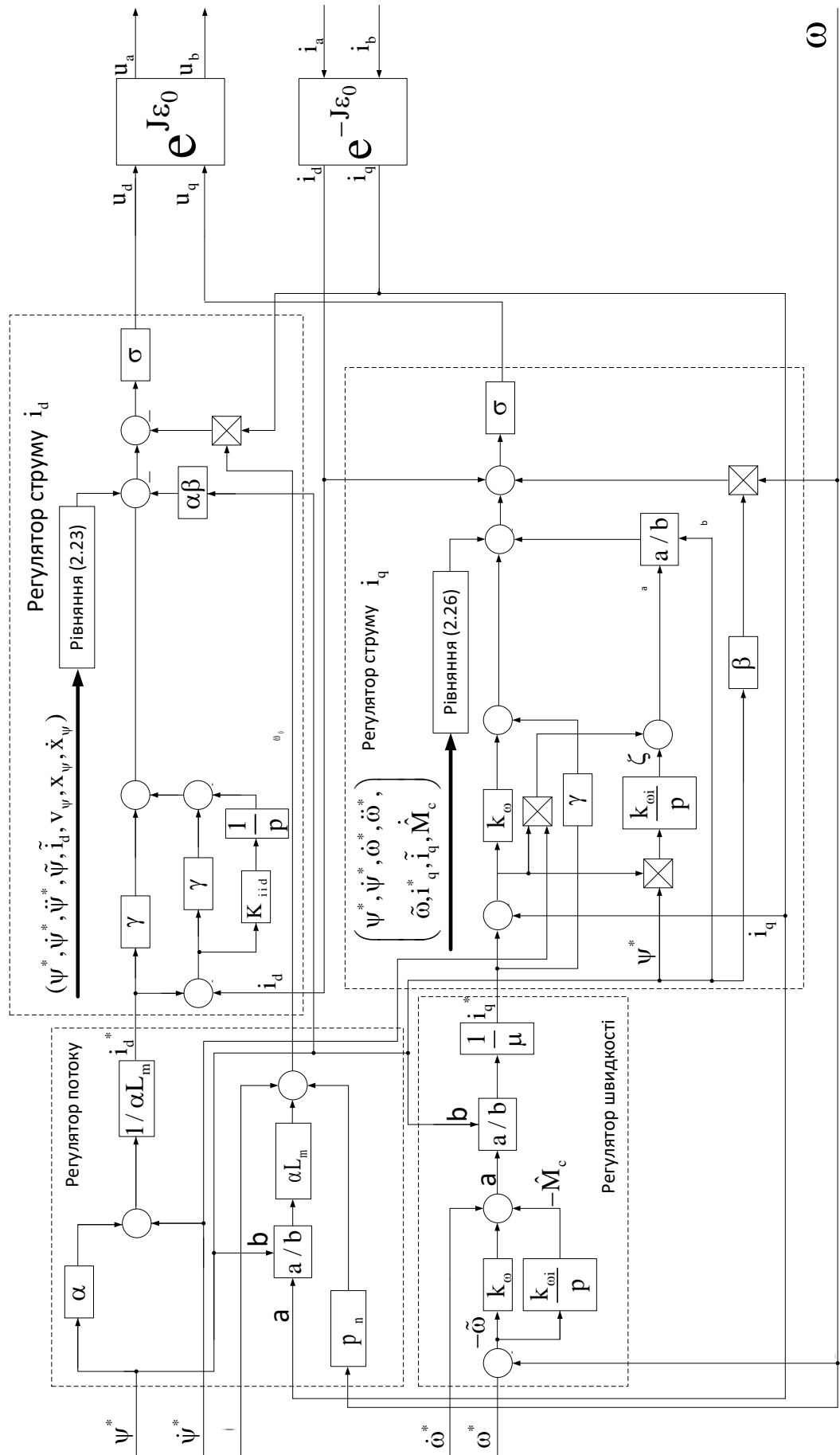


Рисунок 3.2 – Структурна схема векторного керування швидкістю АД

3.5 Алгоритм векторного керування моментом асинхронного двигуна

Синтез електромеханічної підсистеми. Алгоритм формування моменту при непрямому векторному керуванні розробляється аналогічно до алгоритму прямого керування зі спостерігачем. У цьому випадку рівняння динаміки похибок моменту та моментного струму набувають наступного вигляду.

$$\tilde{M} = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} [\tilde{\psi}_d (i_{1q}^* + \tilde{i}_{1q}) + \psi^* \tilde{i}_{1q} - \tilde{\psi}_q (i_{1d}^* + \tilde{i}_{1d})], \quad (3.38)$$

$$i_{1q}^* = \frac{1}{\mu_1 \psi^*} M^*, \quad (3.39)$$

$$\dot{\tilde{i}}_{1q} = -\gamma \tilde{i}_{1q} + \alpha \beta \tilde{\psi}_q - \beta p_n \omega (\psi^* + \tilde{\psi}_d) - \gamma i_{1q}^* - \dot{i}_{1q}^* + v_q \quad (3.40)$$

Подібно до реалізації для прямого полеорієнтування, керуюча дія в рівнянні (3.) формується у такому вигляді.

$$\dot{x}_q = k_{iiq} \tilde{i}_{1q} \quad (3.41)$$

$$v_q = -k_{iq1} \tilde{i}_{1q} - x_q + \gamma i_{1q}^* + \beta p_n \omega \psi^* + \dot{i}_{1q}^* \quad (3.42)$$

де $(k_{iq1}, k_{iiq}) > 0$ — коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії регулятора струму по осі qq .

Рівняння динаміки похибок моменту та струму в цьому випадку мають такий вигляд:

$$\tilde{M} = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \left[\tilde{\psi}_d (i_{1q}^* + \tilde{i}_{1q}) + \psi^* \tilde{i}_{1q} - \tilde{\psi}_q (i_{1d}^* + \tilde{i}_{1d}) \right] \quad (3.43)$$

$$\dot{\tilde{i}}_{1q} = -k_{iq} \tilde{i}_{1q} - x_q - \beta p_n \omega \tilde{\psi}_d + \alpha \beta \tilde{\psi}_q, \quad (3.44)$$

$$\dot{x}_q = k_{iq} \tilde{i}_{1q} \quad (3.45)$$

З рівняння (3.33) випливає, що за умови:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{i}_{1d}, x_d) = 0, \quad (3.46)$$

забезпечується асимптотичне відпрацювання

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{M}, \tilde{i}_{1q}, x_q) = 0, \quad (3.47)$$

тобто досягаються цілі керування моментом.

Повні рівняння динаміки похибок відпрацювання, виведені з (3.33) та (3.29), для електромагнітної підсистеми мають наступний вигляд:

$$\dot{\tilde{\psi}}_d = -\alpha \tilde{\psi}_d + \omega_2 \tilde{\psi}_q + \alpha L_m \tilde{i}_{1d} \quad (3.46)$$

$$\dot{\tilde{\psi}}_q = -\alpha \tilde{\psi}_q - \omega_2 \tilde{\psi}_d \quad (3.47)$$

$$\dot{x}_d = k_{id} \tilde{i}_{1d} \quad (3.48)$$

$$\dot{\tilde{i}}_{1d} = -k_{id} \tilde{i}_{1d} - x_d + \alpha \beta \tilde{\psi}_d + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_q \quad (3.49)$$

Для електромагнітної підсистеми

$$\tilde{M} = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \left[\tilde{\psi}_d (i_{1q}^* + \tilde{i}_{1q}) + \psi^* \tilde{i}_{1q} - \tilde{\psi}_q (i_{1d}^* + \tilde{i}_{1d}) \right] \quad (3.50)$$

$$\dot{\tilde{i}}_{1q} = -k_{iq} \tilde{i}_{1q} - x_q - \beta p_n \omega \tilde{\psi}_d + \alpha \beta \tilde{\psi}_q, \quad (3.51)$$

$$\dot{x}_q = k_{iiq} \tilde{i}_{1q} \quad (3.52)$$

Асимптотично лінеаризуючий регулятор за вимірюваним виходом

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} &= e^{J\varepsilon_0} \begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix}; \\ \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix} &= e^{-J\varepsilon_0} \begin{pmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (3.53)$$

$$\begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix} = \sigma \begin{pmatrix} -\omega_0 i_{1q} + v_d \\ \omega_0 i_{1q} + v_q \end{pmatrix} \quad (3.54)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = p_n \omega + \frac{\alpha L_m i_{1q}}{\psi^*}. \quad (3.55)$$

Алгоритм відпрацювання моменту

$$i_{1q}^* = \frac{1}{\mu_1 \psi^*} M^*, \quad \mu_1 = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \quad (3.56)$$

Алгоритм регулювання струму i_{1q}

$$v_q = -k_{iq1}\tilde{i}_{1q} - x_q + \gamma i_{1q}^* + \beta p_n \omega \psi^* + \dot{i}_{1q}^* \quad (3.57)$$

$$\dot{x}_q = k_{iiq}\tilde{i}_{1q}, \quad (3.58)$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu_1} \left(\frac{\dot{M}^*}{\psi^*} - \frac{M^* \dot{\psi}^*}{\psi^{*2}} \right). \quad (3.59)$$

Алгоритм відпрацювання модуля потокозчеплення

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*). \quad (3.60)$$

Алгоритм регулятора струму по осі d

$$v_d = -k_{id1}\dot{i}_{1d} - x_d + \gamma i_{1d}^* - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^*. \quad (3.61)$$

$$\dot{x}_d = k_{iid}\tilde{i}_{1d}, \quad (3.62)$$

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \dot{\psi}^*). \quad (3.63)$$

Структурну схему алгоритму зображено на рисунку 3.3[14]

Отже можна зробити висновок, що доцільно використовувати обидва алгоритми керування. Як основний режим роботи будемо використовувати векторне керування моментом. Для обмеження швидкості та для круїз контролю будемо використовувати векторне керування швидкістю.

4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ

Для моделювання системи необхідно привести момент інерції на колесах до моменту інерції валу двигуна.

Момент інерції двигуна $J_d = 4.8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Тоді момент інерції приведений до валу двигуна буде визначатись за формулою:

$$J_{\Sigma} = J_d + J_r + 4J_k + J_t \quad (4.1)$$

де J_d - момент інерції двигуна, J_r - момент інерції редуктора, J_k - момент інерції одного колеса, J_t - момент інерції тролейбуса

Момент інерції тролейбуса може бути визначений з закону збереження енергії :

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

де m - маса тролейбуса, V - лінійна швидкість руху тролейбуса, ω - кутова швидкість.

Лінійну швидкість руху тролейбуса V , визначаємо як:

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

Підставимо формулу 4.3 в 4.2 та визначимо момент інерції тролейбуса J_t :

$$J_t = \frac{2m(\omega r)^2}{2\omega^2} = mr^2 = 16600 \cdot 0.482^2 = 3856 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (4.4)$$

Тоді сумарний момент інерції складатиме :

$$J_{\Sigma} = J_d + J_r + 4J_k + J_t = 4.8 + 4.8 + 4.8 \cdot 4 + 3856 = 3 \quad (4.5)$$

4.1 Моделювання системи векторного керування моментом

У цьому розділі проводиться моделювання розробленої системи векторного керування моментом для перевірки коректності її роботи та можливості виконання поставлених цілей системи.

Модель векторного керування моментом асинхронного двигуна з розроблено на основі рівнянь і характеристик двигуна, описаних у розділі 3.

Для дослідження моделі двигуна з векторним керуванням моментом використовується математична модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, створена в середовищі Matlab Simulink. Дослідження включають тест для оцінки та аналізу характеристик системи. Під час тесту двигун розганяється до швидкості 149 рад/с при заданому моменті $M=900$ Н·м, що є номінальним моментом, а потім виконується повна зупинка. Враховане навантаження аеродинамічного опору, яке залежить від швидкості тролейбуса, коефіцієнту тертя колес. Моделювання триває 13 секунд. Результати моделювання та їх аналіз наведені в розділі 4.2.

4.2 Дослідження динамічних характеристик

На рисунку 4.1 показано траєкторію заданого моменту двигуна.

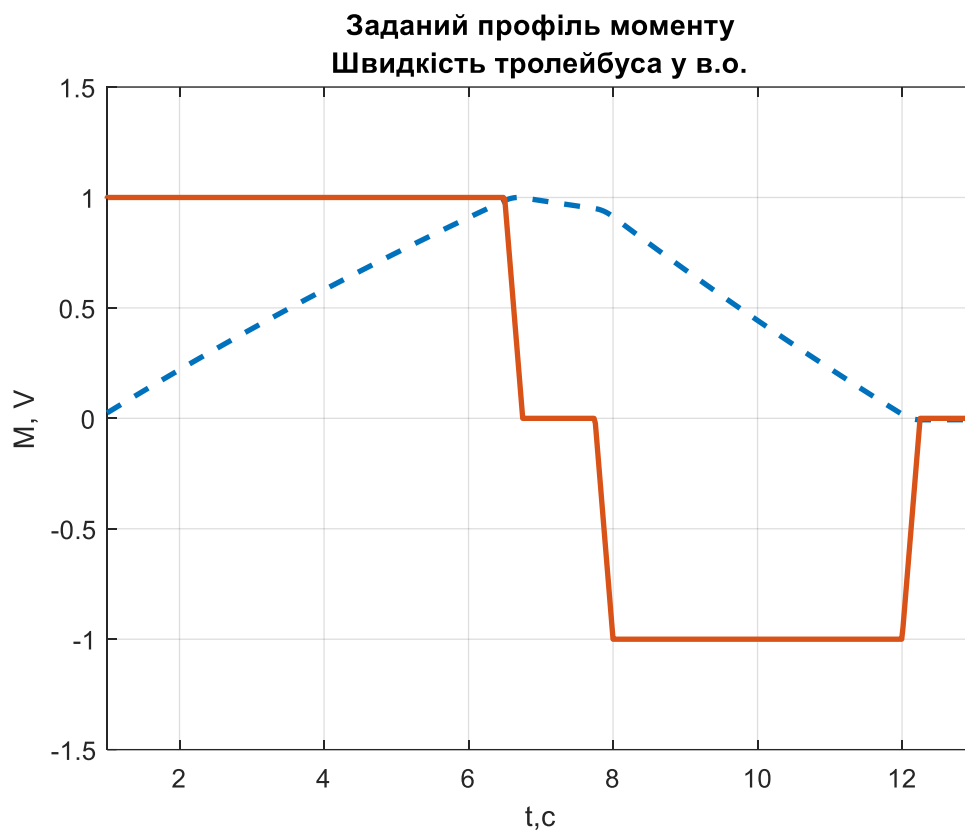


Рисунок 4.1 – Задана траєкторія моменту та швидкість тролейбуса

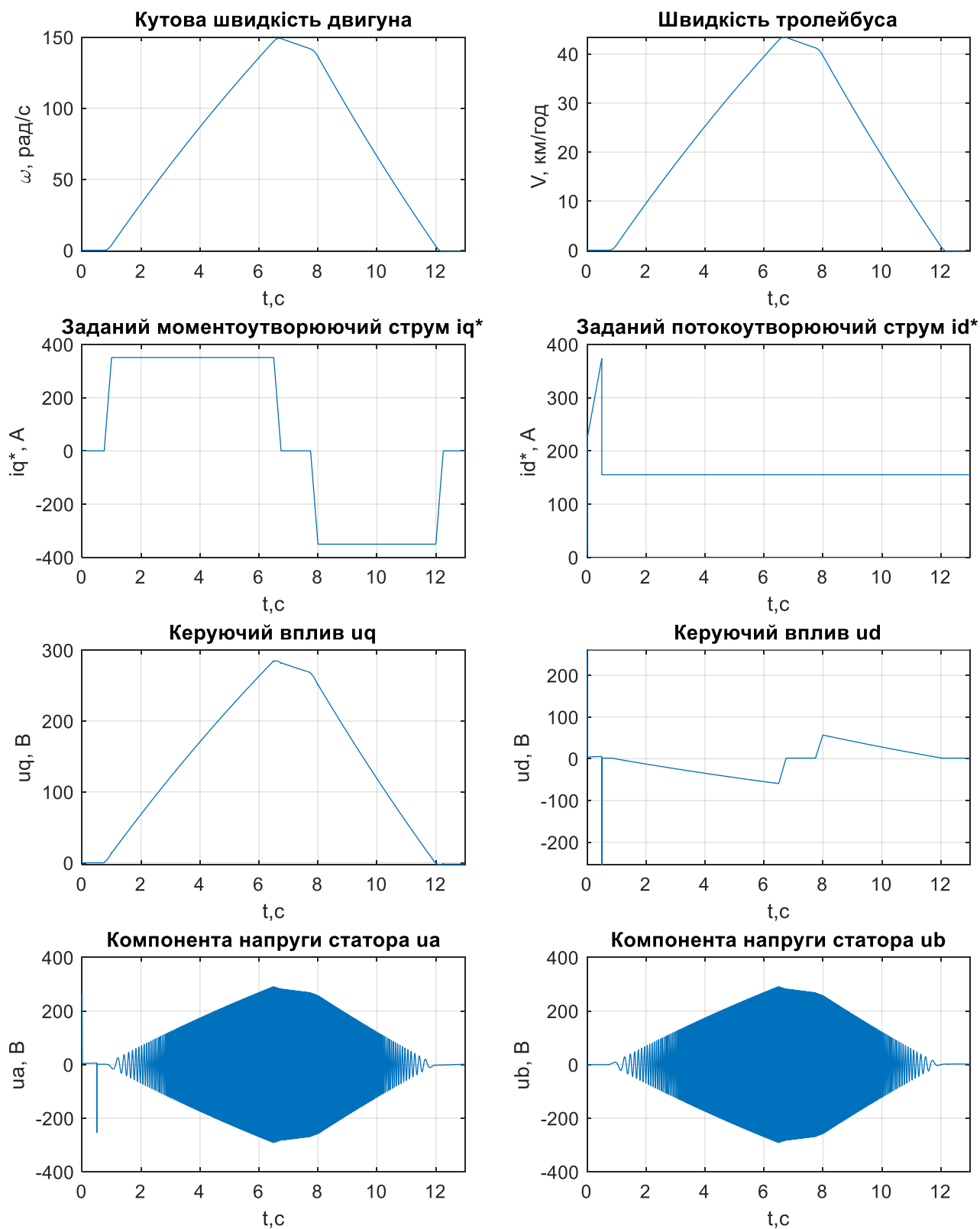


Рисунок 4.2 – графіки перехідних процесів векторного керування моментом

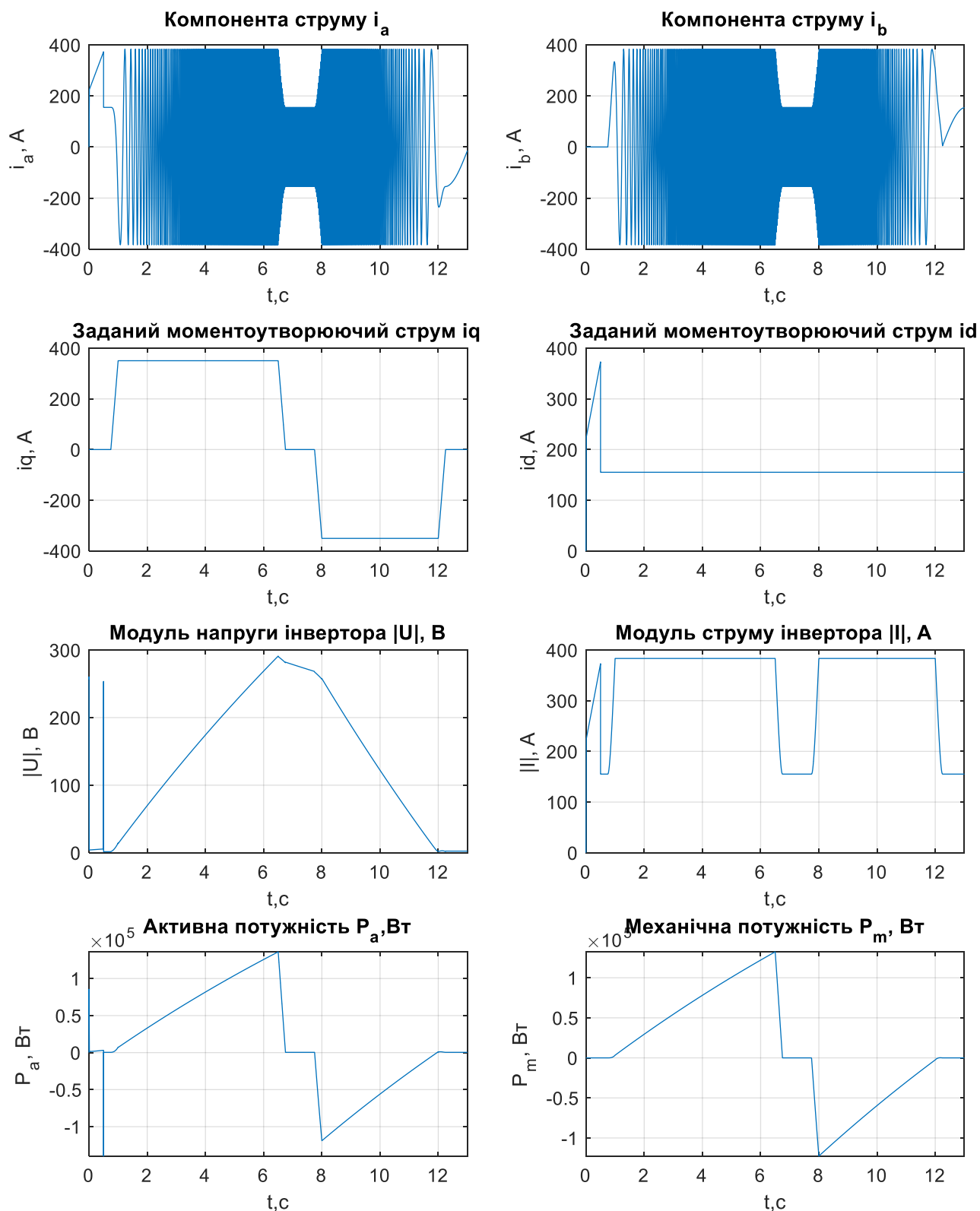


Рисунок 4.3 – графіки перехідних процесів векторного керування моментом

На рисунку 4.2 видно, що регулювання моменту та потокоутворюючого струму виконується без похибок, що свідчить про повне відпрацювання

системи. Зі збільшенням моменту зростає напруга u_q , яка визначає струм i_q . Графіки демонструють, що траєкторія струму i_q точно повторює траєкторію заданого моменту, підтверджуючи, що i_q визначає момент двигуна.

На рисунку 4.3, який відображає графіки потужностей, видно, що при роботі двигуна із моментом, рівним M_n , втрати складають 3621 Вт.

5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Блок схема основних функціональних пристроїв наведена на рисунку 5.1. опис елементів наведено нижче

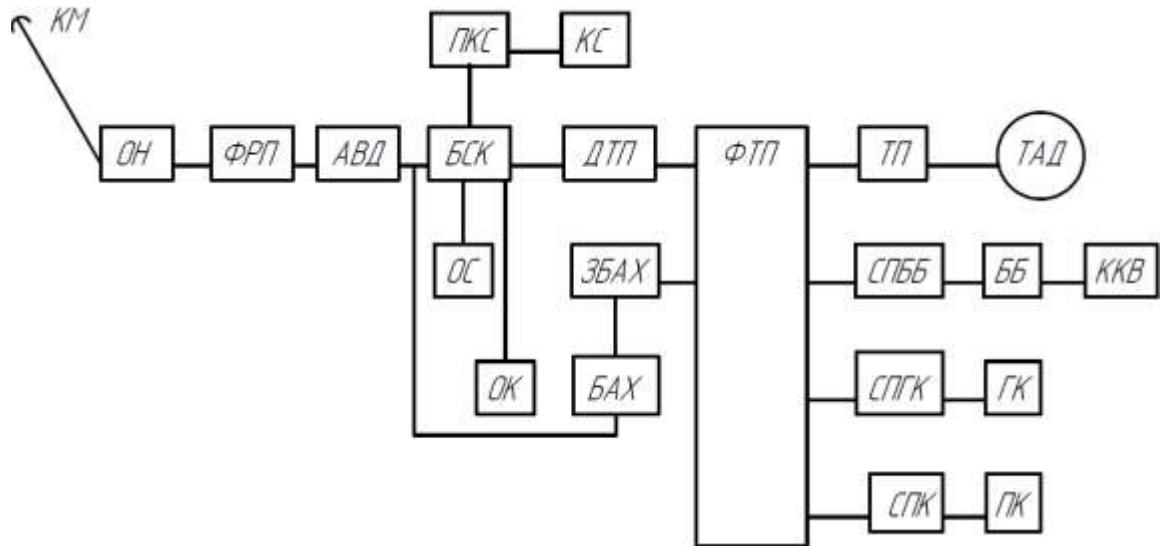


Рисунок 5.1 – Блок хсема основних вузлів тягового обладнання

Опис складу функціональних вузлів тролейбусу:

КМ – контактна мережа.

ОН – обмежувач напруги. Перешкоджає потраплянню напруги більше 1000 В в схему тролейбуса.

ФРП – фільтр радіо перешкод. Призначений для зменшення впливу високих частот на контактну мережу.

АВД – автоматичний вимикач з дистанційним керуванням. Для захисту високовольтних силових кіл тролейбуса від перенавантажень та короткого замикання.

БСК – блок силової комутації. Включає лінійні контактори, контактори опалення водія та їх запобіжники, контактори опалення салону та їх запобіжники, зарядний контактор фільтра тягового перетворювача, контактори перетворювачів кондиціонера салону та їх запобіжників.

ОС – обігрівачі салону.

ОК – обігрівачі кабіни водія.

ДТП – дросель тягового перетворювача. Призначений для фільтрації імпульсних викидів напруги.

ФТП – фільтр тягового перетворювача. Призначений для фільтрації напруги живлення тягового контейнера.

ПКС – перетворювачі кондиціонера салону.

ТП – тяговий перетворювач. Керує тяговим двигуном в режимах їзди, вибігу і гальмування.

ТАД – тяговий асинхронний двигун.

ЗБАХ – зарядний пристрій батареї автономного ходу.

БАХ – батарея автономного ходу тролейбуса.

СПББ – статичний перетворювач бортової батареї. Служить для заряду акумуляторної батареї власних потреб тролейбуса і для живлення кондиціонера кабіни водія.

ККВ – кондиціонер кабіни водія.

СПГК – Статичний перетворювач гідро підсилювача керма.

ГК – гідро підсилювач керма.

СПК – Статичний перетворювач пневматичного компресора.

ПК – пневматичний компресор.

5.1 Функціональна схема синхронного електроприводу з живленням від акумуляторної батареї.

На рисунку 5.2 представлено функціональну схему сучасного електроприводу змінного струму, що використовує частотний перетворювач і ланку постійного струму. Ця схема поєднує перетворювальний та керуючий пристрої, що є основою традиційної концепції електроприводу.

Перетворювач включає в себе збірку IGBT транзисторів та драйвери для керування ними.

В ланці постійного струму встановлений клампер. Він складається з транзистора, який замикається в генераторних режимах, гальмівного резистора, який розсіює надлишкову згенеровану енергію та діода, який захищає від протікання струму в зворотньому напрямку. Також в ланці постійного струму встановлені датчики напруги та струму для оцінки споживаної потужності, програмних захистів та для більш ефективного керування приводом. Також в ланці постійного встановлений ємнісний фільтр, для запобігання пульсації напруги в колі. Для зарядки конденсаторів розроблено зарядне коло, яке вмикається перш ніж увімкниться лінійний контактор. Також для ввімкнення живлення від мережі вибрано двухполюсний контактор.

Для якісного керування в системі будемо використовувати енкодер, він дозволить відслідковувати положення, швидкість та напрям руху.

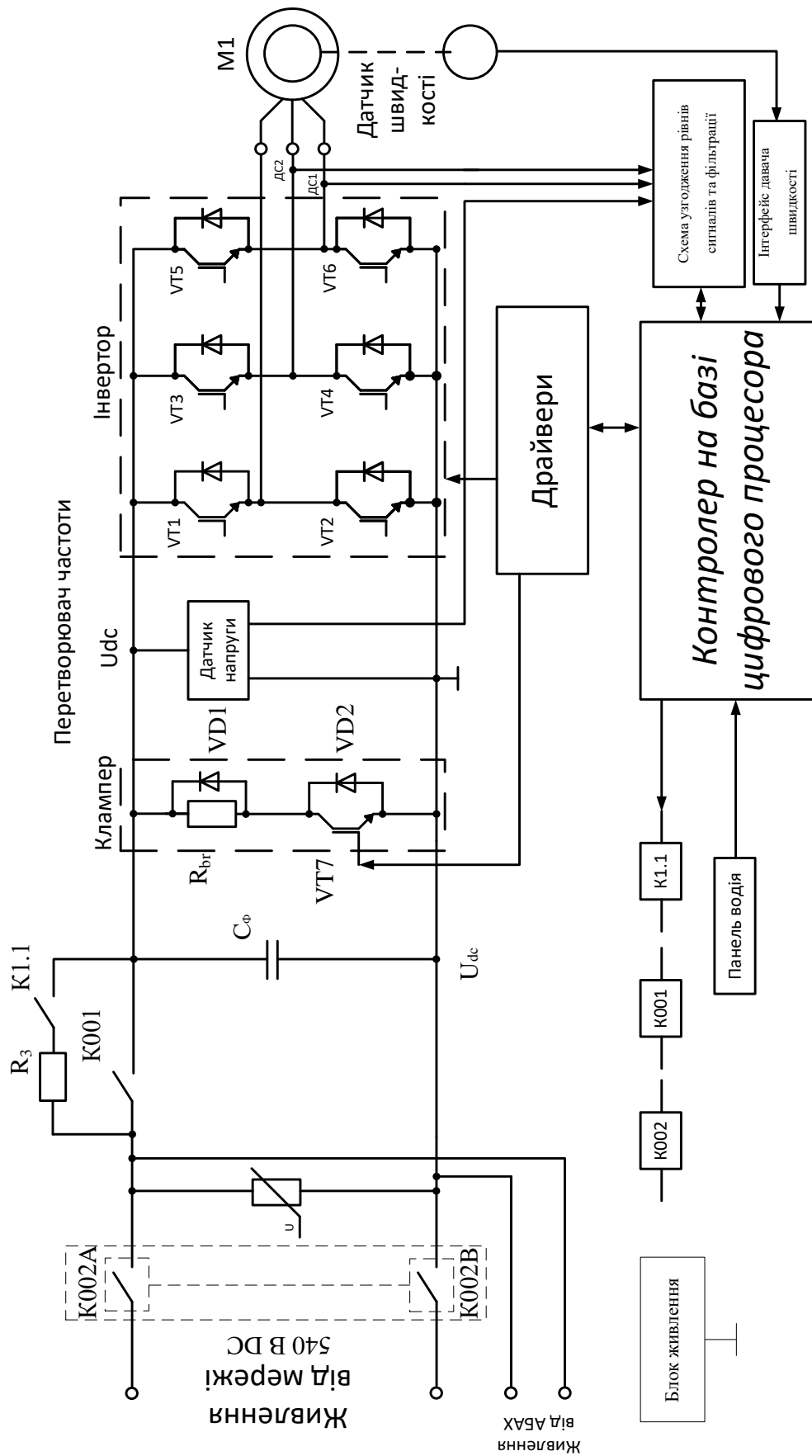


Рисунок 5.2 – Функціональна схема керування асинхронним електроприводом електромеханічної системи

5.2 Вибір компонентів силової частини

Виберемо IGBT модуль та драйвер для інвертора керуючись такими умовами:

$$I_c \geq k_3 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\max \text{RMS}} = 1.2 \cdot \sqrt{2} \cdot 302 \approx 513, \text{ A}, \quad (5.1)$$

$$U_{\text{ces}} \geq U_{\max \text{DC}} = 1.5 \cdot k_3 \cdot U_{\text{bus}} = 1.5 \cdot 1.3 \cdot 420 = 819, \text{ B}, \quad (5.2)$$

де k_3 – коефіцієнт запасу.

Обераємо IGBT модуль FF900R12IP4D[15] . Технічні данні наведені в таблиці 5.1. Даний модуль має два транзистори в одному корпусі, тобто одне плече.

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики IGBT модуля FF900R12IP4D

Параметр	Опис
V_{CES}	1200 В
I_{CRM}	1800 А
V_{GES}	-20 ... 20 В
$t_{\text{d(on)}}$	0.20 нс
E_{on}	71 мДж
$t_{\text{d(off)}}$	0.70 нс
E_{off}	125 мДж
T_{jop}	-40 ... +150°C
t_{psc}	0.12 μs
$Q_G (V_{\text{GE}} = -15 \text{ В} \dots +15 \text{ В})$	6.4 μC
R_{Gint}	1.6 Ом
$R_{\text{Gon/off}}$	1.6 Ом
Технологія	IGBT4

Драйвер для керування IGBT обираємо за наступними розрахунками :

$$P_{GD(out)} = Q_G f_{sw} (U_{G(on)} - U_{G(off)}) = 6.4 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4 \cdot (15 - (-15)) = 1.92, \text{ Вт}, \quad (5.3)$$

$$I_{G(peak)} = \frac{U_{G(on)} - U_{G(off)}}{R_G + R_{G(int)}} = \frac{15 - (-15)}{1.6 + 1.6} = 9.4, \text{ А}. \quad (5.4)$$

Вибір драйвера для IGBT модуля автономного інвертора виконується за умовами:

$$P_{DC/DC} \geq P_{GD(out)}, \quad (5.5)$$

$$I_{out(peak)} \geq I_{G(peak)}. \quad (5.6)$$

Виходячи з умов описаних вище, обираємо модуль драйвера компанії Infenion 2ED300C17-ST[16]. Технічні характеристики пристрою наведені в таблиці 5.2. В цьому драйвері вже реалізовано на платі гальванічно розв'язане живлення, встановлений DC-DC перетворювач, датчик напруги, для вимірювання напруги в ланці постійного струму.

Таблиця 5.2 – Технічні характеристики модуля драйвера Infenion 2ED300C17-ST

Параметр	Опис
Тип драйвера	Two channel driver
Напруга живлення первинна V_s	15 В
V_{iH}	$V_s + 1 \text{ В}$
V_{iL}	GND - 1 В

$I_{outPEAK}$	30 А
$I_{outAVmax}$	133 мА
f_{max}	60 кГц
V_{CE}	1700 В
T_{op}	-40 ... 85 °С
$Q_{out/pulse}$	52 μ С
Максимальний струм живлення первинної сторони, I_{S0}	1 А

5.3 Вибір ємнісного фільтру та зарядного кола

Розрахуємо квадратичний струм який виникає в ємнісному фільтрі за наступною формулою:

$$\Delta I_{rms} = \frac{0.25 U_{bus}}{2\sqrt{2}fL} = \frac{0.25 \cdot 540}{2\sqrt{2} \cdot 3000 \cdot 61 \cdot 10^{-4}} = 2.608, \text{ А}, \quad (5.7)$$

де U_{bus} – напруга ланки постійного струму, В; f – частота ШІМ на виході інвертора, Гц; L – фазна індуктивність навантаження, Гн.

Вибір конденсатора виконується за умовами:

$$I_{rms} \geq \Delta I_{rms}, \quad (5.8)$$

$$U_{cap} \geq U_{max DC}. \quad (5.9)$$

Виберемо, зважаючи на умови вище, плівковий конденсатор VLH107K801C144[17], який вмикається паралельно інвертору в коло постійного струму. Технічні характеристики конденсатора наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Технічні дані VLH406K102C084 конденсатора

Параметр	Значення
Ємність	40 мкФ
I_{RMS}	16 А
I_{PEAK}	1000 А

Для забезпечення ΔI_{RMS} використаємо один конденсатор, таким чином ємність буде складати $C_n = 40 \text{ мкФ}$.

Розрахуємо амплітудні значення пульсації напруги напруги.

$$\Delta V_{0.5t} = \frac{U_{dc}}{32 \cdot f^2 \cdot L \cdot C_{\Sigma}} = \frac{540}{32 \cdot (3000)^2 \cdot 61 \cdot 10^{-4} \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 7.23 \text{ В.} \quad (5.10)$$

Пульсації напруги в ланці постійного струму складають 7.23 В – це 1.3%, що є допустимим.

Розрахуємо опір зарядного резистора наступним чином :

$$R_3 \geq \frac{U_{bus}}{I_{\Sigma rms}} = \frac{540}{2 \cdot 16} = 16.9, \text{ Ом.} \quad (5.11)$$

Тоді час заряджання ємнісного фільтру визначаємо наступним чином:

$$t_3 = 3R_3 C_{\Sigma} = 3 \cdot 16.9 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 0.002, \text{ с.} \quad (5.12)$$

Оскільки час заряду ємнісного фільтру є незначним – то можемо обрати керамічний резистор ПЄВ-50Вт з опором 18Ом[18]. Характеристики наведені в таблиці 5.3

Таблиця 5.3 – Технічні характеристики керамічного резистора ПСВ-50Вт

Параметр	Значення
Потужність розсіювання, Вт	50
Опір, Ом	18

Розрахуємо характеристики реле для комутації зарядного кола.

$$I_{\text{contacts}} \geq \sqrt{\frac{P_{R_3}}{R_3}} = \sqrt{\frac{50}{18}} = 1.66, \text{ A}, \quad (5.13)$$

$$U_{\text{contacts}} \geq U_{\text{bus}}. \quad (5.14)$$

Обираємо, зважаючи на умови вище, контактор ЕТЕ ЕСК150В[19], технічні характеристики якого наведені в таблиці 5.4

Таблиця 5.4 – Технічні характеристики контактора ЕТЕ ЕСК150В

Параметр	Опис
Номінальна напруга котушки	9-36 V DC
Контактний струм макс.	200 А
Комутована напруга	1000 V DC/AC
Робоча температура	-40...85 °C
Контактний опір	≤ 0.4 мОм

Виконаємо розрахунок контактора для шунтування зарядного кола:

$$I_{\text{cont. carry}} \geq I_{\text{АКБ}}, \quad (5.16)$$

$$U_{\text{contacts}} \geq 540, \text{ V DC}. \quad (5.17)$$

Зважаючи на умови вище, обираємо контактор ТКПД-114ВУ2[20], технічні характеристики якого наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Технічні характеристики контактора ТКПД-114ВУ2

Параметр	Опис
Номінальна напруга котушки	24 V DC
Контактний струм номінальний	500 А
Комутована напруга	600 V DC/AC
Контактний опір	≤ 0.4 мОм

Розрахуємо транзистор для керування контактором для комутації зарядного кола.

$$I_C \geq I_{\text{coil}} = \frac{P_{\text{coil}}}{U_{\text{coil}}} = \frac{30}{24} = 1.25, \text{ А}, \quad (5.18)$$

$$U_{\text{CE}} \geq (1.5 \dots 2) U_{\text{coil}} = 2 \cdot 24 = 48, \text{ В}. \quad (5.19)$$

Зважаючи на умови наведені вище, обираємо біполярний транзистор 2SD1138[21], технічні характеристики наведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Технічні характеристики біполярного транзистора 2SD1138

Параметр	Опис
Тип транзистора	NPN
Напруга колектор-база, V_{CBO}	200 В
Напруга колектор-емітер, V_{CEO}	150 В
Напруга емітер-база, V_{EBO}	5 В
Гранична робоча частота, $f_{\text{гран}}$	100 МГц
Коефіцієнт підсилення по струму, h_{fe}	250...630

Колекторний струм, I_C	2 А
Розсіювана потужність колектора, P_C	1.8 Вт

Розглянемо умови вибору зворотного діода:

$$I_{f(av)} \geq I_{coil}, \quad (5.20)$$

$$U_{rm} \geq (1.5...2)U_{coil}. \quad (5.21)$$

Зважаючи на умови згадані вище, обираємо діод 1N5408[22]. Технічні характеристики наведені в таблиці 5.7

Таблиця 5.7 – технічні характеристики діода 1N5408

Параметр	Опис
Одноразова пікова зворотня напруга, U_{RM}	100 В
Максимальний середній струм діода, I_{FM}	3 А
Пряме падіння напруги, U_{FM}	1.2 В

Виконаємо розрахунок обв'язки для керування контактором, який виконує шунтування зарядного кола.

$$I_C \geq I_{coil} = \frac{P_{coil}}{U_{coil}} = \frac{43}{24} = 1.79, \text{ А}, \quad (5.22)$$

$$U_{CE} \geq (1.5...2)U_{coil} = 2 \cdot 24 = 48, \text{ В}. \quad (5.23)$$

Зважаючи на ці умови, для шунтування зарядного кола, обираємо тіж самі елементи.

5.4 Розрахунок резистора і ключа клампера

Клампер включає резистор, діод і напівпровідниковий ключ (рис. 5.3). Цей ключ під'єднує резистор паралельно до ланки постійного струму, щоб розсіювати надлишкову енергію, яка виникає під час роботи привода в гальмівному режимі.

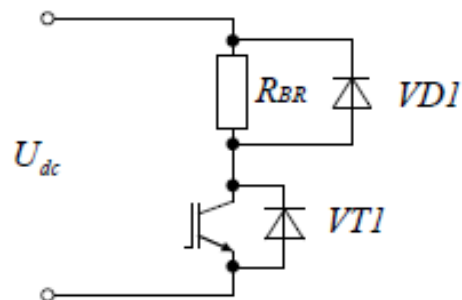


Рисунок 5.3 – Схема клампера

Клампер (Flyback) розраховують за струмом, що протікає через нього в сталому режимі. Для цього визначають тривалість гальмування відносно загального часу циклу та обчислюють потужність.

$$P_{\text{brak}} = \sqrt{\frac{TB_{\text{brak}}}{TB_{\text{cycle}}}} \cdot P_{\text{motor}} = \sqrt{\frac{402 / 1800}{100}} \cdot 180 \cdot 10^3 = 8.51 \cdot 10^3 \text{ Вт.} \quad (5.24)$$

Оскільки ми маємо надлишкову потужність, яка генерується – можемо розрахувати струм, який буде проходити через клампер:

$$I_{\text{clamp}} = \frac{P_{\text{brak}}}{U_{\text{dc}}} = \frac{8.51 \cdot 10^3}{540} = 15.8 \text{ А.} \quad (5.25)$$

Виконаємо розрахунок опору резистора:

$$R_{\text{clamp}} = \frac{U_{\text{dc}}}{I_{\text{clamp}}} = \frac{540}{15.8} = 30.85 \text{ Ом.} \quad (5.26)$$

Обираємо гальмівний резистор $R_{\text{clamp}} = 32 \text{ Ом}$.

Для кола клампера з доступного асортименту гальмівних резисторів обираємо модель FELR01.1N-04K8-N032R-A-560-NNNN потужністю 4,8 кВт і опором 32 Ом [23], технічні характеристики наведені в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Технічні характеристики резистора FELR01.1N-04K8-N032R-A-560-NNNN

Параметр	Опис
Опір, Ом	32
Потужність розсіювання тепла, Вт	4800

Як напівпровідниковий ключ доцільно використати IGBT-модуль Infineon FF2400R12IP7, аналогічний до того, що застосовується в перетворювачі. Його драйвером виступатиме модуль Infineon 2ED300C17-ST, технічні характеристики якого наведено у таблицях 5.1 та 5.2.

5.5 Датчики струму та напруги

Здійснимо розрахунок параметрів датчика струму:

$$I_c = k_3 \cdot I_{\text{peak}_{\text{RMS}}} \cdot \sqrt{2} = 1.17 \cdot 390 \cdot \sqrt{2} = 645 \text{ А,} \quad (5.27)$$

Виходячи із розрахунків зроблених в формулі (5.) обираємо датчик струму на ефекті Хола замкнутого типу JXK-7-W1-A5-O5-P2[24], параметри пристрою наведені в таблиці 5.9

Таблиця 5.9 – Технічні характеристики датчика струму JXK-7-W1-A5-O5-P2

Параметр	Опис
Діапазон вимірювання струму, А	0-800А
Поточне споживання, мА	20mA
Напруга живлення U_C, V	$\pm 24 V$
Вихідна напруга аналогового сигналу, V	0-5 V

Виберемо датчик напруги який би дав змогу вимірювати напругу 540В. Оберемо LV 100-800[25], технічні характеристики наведені в таблиці 5.10. Схема підключення зображена на рисунку 5.4.

Таблиця 5.10 – Технічні характеристики LV 100-800

Параметр	Опис
Первинна номінальна RMS напруга V_{PN}	800 V
Первинна напруга, діапазон вимірювання V_{PM}	$\pm 0 \dots 1200 V$
Вимірювальний опір R_M ($\pm 15 V, \pm 800 V_{MAX}$)	0...210 Ом
Вторинний номінальний середньоквадратичний струм I_{SN}	50 mA
Напруга живлення U_C	$\pm 15 V$
Споживання струму I_C	$< 32 + I_S$ mA

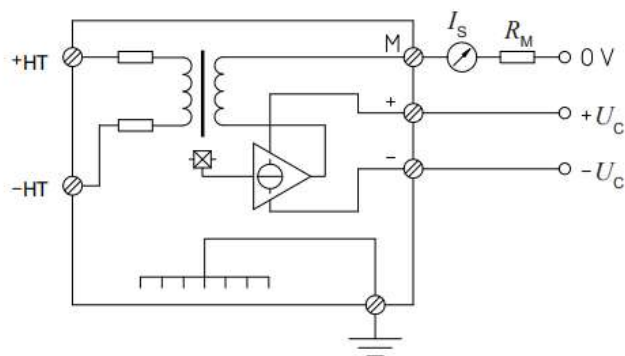


Рисунок 5.4 – Схема підключення LV 100-800

Значення вимірювального резистора розраховується, враховуючи, що вихідна напруга має бути обмежена до 1,5 В. Для досягнення цього обмеження потрібен резистор з номіналом 30 Ом.

$$U_{IM} = R_M \cdot I_{SN} = 30 \cdot 0.05 = 1.5 \text{ В.} \quad (5.28)$$

Виконаємо розрахунок неінвертуючого суматора на основі операційного підсилювача (рис. 5.5), який призначений для зниження рівня напруги з $U_{measure} = \pm 1.5 \text{ В}$ до 3,3 В та перетворення біполярного сигналу в уніполярний для подальшого подання на АЦП мікроконтролера [26].

$$V_{OUT} = \left(\frac{V_{IN1} (R_{G2}^{-1} + R_{G3}^{-1})^{-1}}{R_{G1} + (R_{G2}^{-1} + R_{G3}^{-1})^{-1}} + \frac{V_{IN2} (R_{G1}^{-1} + R_{G3}^{-1})^{-1}}{R_{G2} + (R_{G1}^{-1} + R_{G3}^{-1})^{-1}} + \frac{V_{IN3} (R_{G1}^{-1} + R_{G2}^{-1})^{-1}}{R_{G3} + (R_{G1}^{-1} + R_{G2}^{-1})^{-1}} \right) \cdot \left(\frac{R_F + R_G}{R_G} \right) - V_{REF} \frac{R_F}{R_G}. \quad (5.29)$$

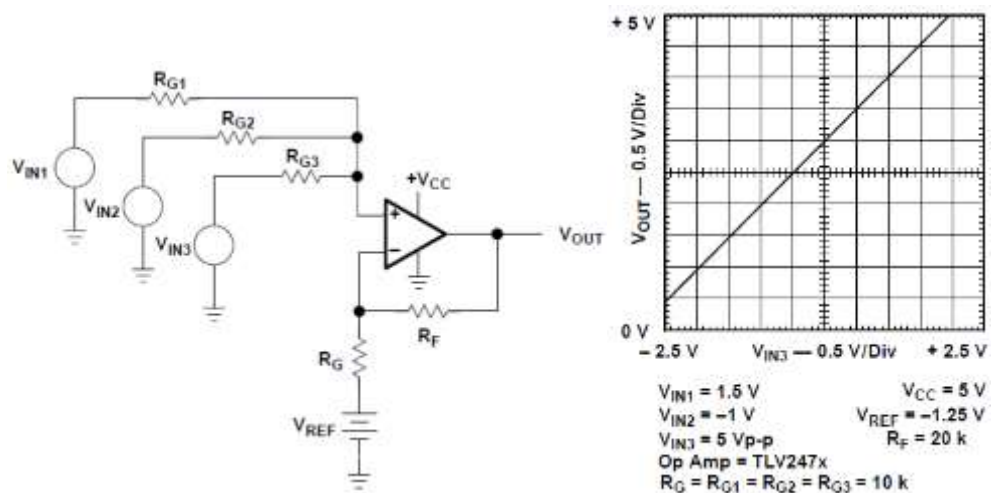


Рисунок 5.5 – Схема неінвертуючого суматора

Приймаємо $V_{REF} = 0$, $V_{IN3} = 0$, $R_{G1} = R_G = 10000 \text{ Ом}$, а значення $R_{G3} = R_{G2}$ та R_F визначаємо під час підбору.

$$V_{OUT} = \left(\frac{1.5 \cdot (22000^{-1} + 22000^{-1})^{-1}}{10000 + (22000^{-1} + 22000^{-1})^{-1}} + \frac{3.3 \cdot (10000^{-1} + 22000^{-1})^{-1}}{22000^{-1} + (10000^{-1} + 22000^{-1})^{-1}} + 0 \right) \cdot \left(\frac{10000 + 10000}{10000} \right) - 0 = 3.15, \text{ В}, \quad (5.30)$$

$$V_{OUT} = \left(\frac{-1.5 \cdot (22000^{-1} + 22000^{-1})^{-1}}{10000 + (22000^{-1} + 22000^{-1})^{-1}} + \frac{3.3 \cdot (10000^{-1} + 22000^{-1})^{-1}}{22000^{-1} + (10000^{-1} + 22000^{-1})^{-1}} + 0 \right) \cdot \left(\frac{10000 + 10000}{10000} \right) - 0 = 0, \text{ В}, \quad (5.31)$$

Зважаючи на розрахунки вище, оберемо операційний підсилювач TLV2472AIP[27]. Технічні характеристики представлені в табл. 5.11, схема обв'язки представлена на рисунку 5.6.

Таблиця 5.11 – Технічні характеристики операційного підсилювача TLV2472AIP

Параметр	Опис
Напруга живлення, V_{DD}	2.7...6 V
Діапазон синфазних вхідних напруг, V_{ICR}	0... V_{DD} V
Вхідна напруга зсуву, V_{IO}	max 2200 μ V
Вхідний струм зсуву, I_{IO}	max 50 pA
Вихідний струм, I_O	± 35 mA
Струм живлення (на канал), I_{DD}	max 1000 μ A
CMOS Rail-To-Rail	Input/Output

Підсилення-пропускна здатність	2.8 MHz
--------------------------------	---------

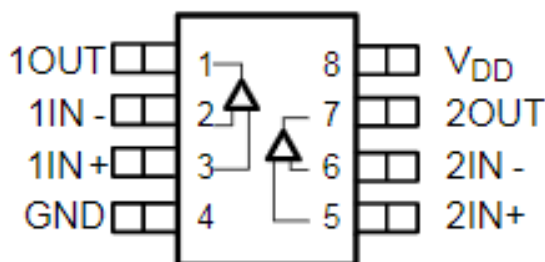


Рисунок 5.6 – Схема обв'язки операційного підсилювача TLV2472AIP

Для передачі керуючих ШІМ сигналів від мікроконтролера до драйвера застосовуємо оптрон HCPL4504-000E[28]. Технічні характеристики наведені в таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 – Технічні характеристики оптрона HCPL4504-000E

Параметр	Опис
Кількість каналів, N_{ch}	1
Максимальний прямий струм випромінювача, $I_{f(in)}$	25 мА
Максимальна зворотня напруга випромінювача, $U_{max(шт)}$	5 В
Максимальний струм приймача, $I_{max(out)}$	8 мА
Максимальна вихідна напруга приймача, U_{out}	20 В
Напруга живлення приймача, U_{cc}	30 В

5.6 Розв'язка цифрових, керуючих та аналогових сигналів

Для передачі інформаційних ШІМ сигналів від драйвера до мікроконтролера застосовуємо оптрон PC817X1NIP1B[29]. Технічні характеристики наведено в таблиці 5.13. Схема обв'язки представлена на рисунку 5.7.

Таблиця 5.13 – Технічні характеристики оптрона PC817X1NIP1B

Параметр	Опис
Кількість каналів, N_{ch}	1
Максимальний прямий струм випромінювача, $I_{f(in)}$	50 мА
Максимальна зворотня напруга випромінювача, $U_{max(шт)}$	6 В
Максимальний струм приймача, $I_{max(out)}$	30 мА
Максимальна напруга колектор-емітер, U_{ceo}	80 В
Максимальна частота перемикання, f_{max}	80 кГц

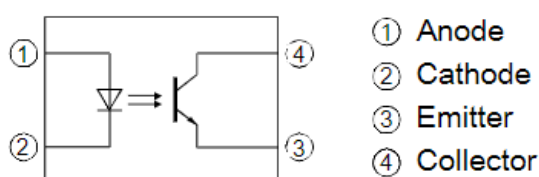


Рисунок 5.7 – Оптопара PC817X1NIP1B

Для гальванічної розв'язки аналогових сигналів обрано оптрон HCPL-7800[30]. Технічні характеристики наведено в таблиці 5.14. Схема обв'язки зображена на рисунку 5.7.

Таблиця 5.14 – Технічні характеристики оптрона HCPL-7800

Параметр	Опис
Напруга живлення, V_{dd1}, V_{dd2}	5 В
Вхідна напруга, V_{in+}, V_{in-}	-6...6 В
Вихідна напруга, V_{out+}, V_{out-}	-0.5...6 В

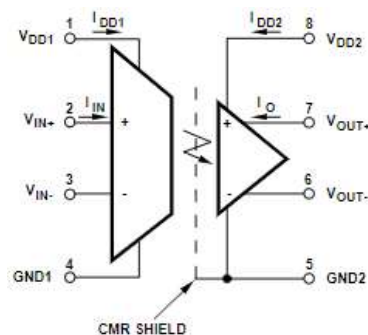


Рисунок 5.7– Схема обв’язки оптрона HCPL-7800

Для реалізації цифрових входів 0–10 В і 4–20 мА на мікроконтролер застосовуємо оптрон PC814X[31]. Технічні характеристики наведено в таблиці 5.15. Схема обв’язки представлена на рисунку 5.8.

Таблиця 5.15 – Технічні характеристики оптрона PC814X

Параметр	Опис
Максимальний прямий струм випромінювача, I_F	50 мА
Максимальна пряма напруга, U_{FM}	3 В
Максимальний струм приймача, I_C	50 мА
Максимальна напруга колектор-емітер, U_{ce0}	35 В
Максимальна частота перемикання, f_{max}	80 кГц

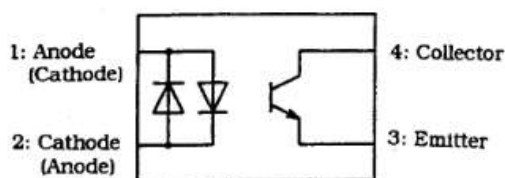


Рисунок 5.8 – Схема обв’язки оптопары PC814X

5.7 CAN мережа

Для організації CAN-інтерфейсу вибрано трансивер ISO1044BD [32]. Технічні характеристики подано в таблиці 5.16. Схему обв'язки наведено на рисунку 5.9.

Таблиця 5.16 – Технічні характеристики CAN трансивера ISO1044BD

Параметр	Опис
Напруга живлення сторони 1, V_{CC1}	-0.5...6 V
Напруга живлення сторони 2, V_{CC2}	-0.5...6 V
Діапазон логічних вхідних і вихідних напруг (TXD і RXD), V_{IO}	-0,5... $V_{CC1}+0,5$ V
Вихідний струм на контакті RXD, I_O	-15...15 mA
Напруга на контактах шини (CANH, CANL), V_{BUS}	-58...58 V
Максимальна розсіювана потужність, P_D	146 mW
Швидкість передачі даних	5 Mbps
Струм живлення сторони 1, I_{CC1}	3.5 mA
Струм живлення сторони 2, I_{CC2}	70 mA

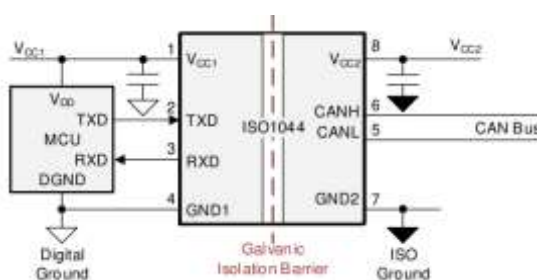


Рисунок 5.9 – Обв'язка CAN-інтерфейсу на основі трансивера ISO1044BD

Для підключення термінатора застосовується перемикач L201011MS02Q[33]. Технічні характеристики наведено в таблиці 5.17.

Таблиця 5.17 – Технічні характеристики перемикача L201011MS02Q

Параметр	Опис
Схема	DPST
Номінальний струм	4A (AC/DC)
Номінальна напруга	125 V AC; 28 V DC

Для забезпечення захисту використаємо діод NUP2105L[34]. Технічні характеристики наведено в таблиці 5.18.

Таблиця 5.17 – Технічні характеристики захисного діода NUP2105L

Параметр	Опис
Пікова розсіювана імпульсна потужність	350 W
Зворотна напруга	24 V
Максимальний зворотній струм	100 nA
Напруга пробою	26.2 V
Напруга фіксації	44 V

5.8 Вибір енкодера

Для відстеження положення, напрямку та швидкості обертання ротора обираємо енкодер E40H10-400-6-L-5[35], схема об'язки якого зображено на рисунку 5.10, технічні характеристики представлені в таблиці 5.18.

Таблиця 5.18 – Технічні характеристики енкодера E40H10-400-6-L-5

Параметр	Опис
Кількість обертів	5000
Вихідні фази	6
Вихід	Лінійний драйвер
Живлення	12-24 V DC

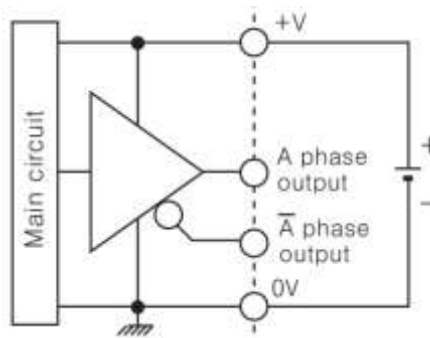


Рисунок 5.10 – Схема обв'язки енкодера E40H10-400-6-L-5

5.9 Вибір низьковольтного живлення

Для заряджання батареї на 24 В обрано понижуючий DC-DC перетворювач ННКТ3000-27F [36]. Його характеристики наведено в таблиці 5.19.

Таблиця 5.19 – Технічні характеристики dc-dc претворювача ННКТ3000-27F

Параметр	Опис
Вхідна напруга	540v
Вихідна напруга	27.5 V
Вихідна потужність	3600 W

Для живлення напругою 15 В обрано DC-DC перетворювач TSR 1-24150 [37]. Його характеристики наведено в таблиці 5.20.

Таблиця 5.20 – Технічні характеристики dc-dc претворювача TSR 1-24150

Параметр	Опис
Вхідна напруга	18-36 V
Вихідна напруга	15 V

Вихідна потужність	15 W
--------------------	------

Для живлення напругою 5 В обрано DC-DC перетворювач TEL15-2411[38]. Його характеристики наведено в таблиці 5.21.

Таблиця 5.21 – Технічні характеристики dc-dc перетворювача TEL15-2411

Параметр	Опис
Вхідна напруга	18-36 V
Вихідна напруга	5.1 V
Вихідна потужність	15 W
Максимальний струм	3 A

Для живлення напругою 3.3 В обрано DC-DC перетворювач TSR 1-2433[39]. Його характеристики наведено в таблиці 5.22.

Таблиця 5.22 – Технічні характеристики dc-dc перетворювача TSR 1-2433

Параметр	Опис
Вхідна напруга	4.75-36V
Вихідна напруга	3.3 V
Вихідна потужність	15 W
Максимальний струм	5 A

5.10 Вибір компаратора

Для перетворення сигналів із резольвера обрано здвоєний компаратор LM393 [40]. Його технічні характеристики наведено в таблиці 5.23.

Таблиця 5.23 – Технічні характеристики компаратора LM393

Параметр	Опис
Напруга живлення	36 V
Вихідна напруга	36 V
Сила струму на виході	16 A

5.11 Вибір мікроконтролера

Для керування перетворювачем та обробки сигналів всіх датчиків, цифрових та аналогових входів, виходів обрано мікроконтролер TMS320F280041[41] від компанії Texas Instruments. Технічні характеристики контролера наведено в таблиці 5.23

Таблиця 5.23 – Технічні характеристики процесора TMS320F28004x (серія цифрових сигналових процесорів від Texas Instruments):

Характеристика	Опис
1	2
Архітектура	32-бітова архітектура C28x + TMU (Trigonometric Math Unit)
Основна частота	До 100 МГц
Пам'ять	До 256 КБ Flash, 100 КБ RAM
Енергоспоживання	Низьке, підтримка живлення від 3.3 В
Модулі периферії	- PWM (Pulse Width Modulation) - ADC (Analog-to-Digital Converter), 12/16-біт -eCAP, eQEP (Enhanced Capture/Quadrature Encoder Pulse) - I2C, SPI, UART

Кількість ADC модулів	До 3 ADC, кожен із 16-канальними входами
PWM канали	До 14 каналів PWM
Годинник реального часу	RTC (Real-Time Clock)
Контроль потужності	Інтеграція з Digital Power
Робочий діапазон температур	-40°C до 125°C
Цифрові інтерфейси	CAN, LIN, Ethernet (в залежності від моделі)
1	2
Пакет	LQFP або QFN (залежить від конкретної моделі)
Підтримка інструментів розробки	Code Composer Studio (CCS), підтримка C/C++

Цей мікроконтролер ідеально підходить для застосувань, що вимагають високопродуктивних обчислень і точного контролю, таких як системи живлення, двигуни, а також промислова автоматизація.

5.12 Вибір запобіжників

Для збереження цілісності та надійності системи необхідно обрати запобіжники на випадок перенавантаження або короткого замикання.

В якості ввідного запобіжника обираємо плавку вставку ETI NH-3 Battery 250A 700V DC[42]. Технічні характеристики приведені в таблиці 5.24.

Таблиця 5.24 – Технічні характеристики плавкої вставки ETI NH-3 Battery 250A 700V DC

Параметр	Опис
Напруга	700 V

Напруга ізоляції	1000 V
Номінальний струм	250 A
Вимикаюча здатність	30 кА

В якості запобіжника батареї автономного ходу обираємо плавку вставку ETI NH-00/gG 160A 500V КОМБІ[43], характеристики якого представлені в таблиці 5.25.

Таблиця 5.25 – Технічні характеристики плавкої вставки ETI NH-00/gG 160A 500V КОМБІ

Параметр	Опис
Напруга	500 V
Напруга ізоляції	690 V
Номінальний струм	160 A
Вимикаюча здатність	120 кА

В якості запобіжника низьковольтної частини обираємо запобіжник Tesla fg200a FG maxі (mega) 200A[44]. Характеристики наведені в таблиці 5.26.

Таблиця 5.26 – Технічні характеристики плавкої вставки Tesla fg200a FG maxі (mega) 200A

Параметр	Опис
Напруга	24 V
Напруга ізоляції	58 V
Номінальний струм	200 A

Для збереження оптронів, оптопар, аналогово-цифрових перетворювачів обираємо самовідновлюючий запобіжник 30R250UU Littelfuse[45]. Технічні характеристики якого представлені в таблиці 5.27.

Таблиця 5.27 – Технічні характеристики самовідновлюючого запобіжника 30R250UU Littelfuse

Параметр	Опис
Напруга	30 V
Максимальний струм	40 A
Номінальний струм	2.5 A

5.13 Вибір вхідних контакторів

В якості вимикача мережі використаємо двохолюсний контактор марки SCHALTBAU CU1215/04, технічні характеристики якого наведені в таблиці 5.28. Зовнішній вигляд зображено на рисунку 5.11

Таблиця 5.28 – Технічні характеристики двохолюсного контактора SCHALTBAU CU1215/04

Параметр	Опис
Номінальна напруга	1500V
Номінальний струм	1000 A
Напруга котушки	24 В
Напруга пробою	15000



Рисунок 5.11 – Зовнішній вигляд двохолюсного контактора SCHALTBAU CU1215/04

В якості вимикача батареї автономного ходу використаємо контактор марки SCHALTBAU CU1215/04, технічні характеристики якого наведені вище в таблиці 5.26.

Для вмикання мережі після заряджання ємнісного фільтра виберемо лінійний контактор SCHALTBAU CT1115/04, технічні характеристики якого приведені в таблиці 5.29. Зовнішній вигляд зображено на рисунку 5.12.

Таблиця 5.29 – Технічні характеристики лінійного контактора SCHALTBAU CT1115/04

Параметр	Опис
Номінальна напруга	1500V
Номінальний струм	400 А
Напруга котушки	24 В
Напруга пробую	15000



Рисунок 5.12 – Зовнішній вигляд лінійного контактора SCHALTBAU CT1115/04

Для живлення низьковольтної частини обираємо 2 акумулятори фірми Bosch CT-140-L T4[46]. Технічні характеристики якого представлені в таблиці 5.30.

Таблиця 5.30 – Технічні характеристики акумулятора Bosch СТ-140-L T4

Параметр	Опис
Номінальна напруга	12
Номінальний струм	140 А
Максимальна напруга	14.5 В
Максимальний струм	800 А

В цьому розділі було розглянуто основний конструктив тягового обладнання, також було вибрано елементну базу для побудови схем внутрішніх з'єднань та схеми електричної принципової.

6 ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ

6.1 Огляд ціни проекту

Загальна сума тягового обладнання та керування для нього, ціни на елементну базу наведені в таблиці 6.1

Таблиця 6.1 – Таблиця елементів тягового обладнання з цінами

Пристрій	ціна в дол	кількість одн.	сума
1	2	3	4
БТДА	\$ 5 026,33	1	\$5 026,33
Battery 3.2V 86AH	\$92,03	169	\$ 15 553,34
GHC C27100000SR	\$58,81	0	\$-
FF900R12IP4D	\$ 836,91	4	\$3 347,63
Infenion 2ED300C17-ST	\$ 167,63	4	\$ 670,53
BLH107K801C144	\$18,79	1	\$18,79
ПСВ-50Вт	\$1,91	1	\$ 1,91
ETE ECK150B	\$ 106,00	1	\$ 106,00
ТКПД-114ВУ2	\$ 155,58	1	\$ 155,58
транзистор 2SD1138	\$1,54	1	\$ 1,54
діод 1N5408	\$0,20	1	\$ 0,20
FELR01.1N-04K8-N032R-A-560-NNNN	\$ 430,83	1	\$ 430,83
JXK-7-W1-A5-O5-P2	\$49,47	1	\$49,47
LV 100-800	\$ 294,74	1	\$ 294,74
TLV2472AIP	\$0,50	1	\$ 0,50
HCPL4504-000E	\$1,88	1	\$ 1,88
PC817X1NIP1B	\$0,70	1	\$ 0,70
HCPL-7800	\$12,41	1	\$12,41
PC814X	\$0,52	1	\$ 0,52
ISO1044BD	\$1,88	1	\$ 1,88
L201011MS02Q	\$4,54	1	\$ 4,54
NUP2105L	\$0,07	1	\$ 0,07
E40H10-400-6-L-5	\$ 150,31	1	\$ 150,31
ННКТ3000-27F	\$ 1 046,22	1	\$1 046,22

Продовження до таблиці 6.1

1	2	3	4
TSR 1-24150	\$6,67	1	\$ 6,67
TEL15-2411	\$59,12	1	\$59,12
TSR 1-2433	\$4,70	1	\$ 4,70
LM393	\$0,37	1	\$ 0,37
TMS320F280041	\$ 150,00	1	\$ 150,00
ETI NH-3 Battery 250A 700V	\$93,35	1	\$93,35
ETI NH-00/gG 160A 500V KOMBI	\$4,33	1	\$ 4,33
Tesla fg200a FG maxi (mega) 200A	\$4,48	1	\$ 4,48
30R250UU Littelfuse	\$1,07	1	\$ 1,07
SCHALTBAU CU1215/04	\$ 1 789,47	1	\$1 789,47
SCHALTBAU CT1115/04	\$ 1 157,89	1	\$1 157,89
акумулятор Vocsh	\$ 167,54	2	\$ 335,09
		сума	\$ 30 482,45

6.2 Порівняння з найпопулярнішими виробниками тролейбусів

Популярні міжнародні виробники тролейбусів з автономним ходом:

Škoda Transportation (Чехія):

Має тролейбуси з акумуляторами для автономного ходу до 50 км.

Ціна за одиницю: від €400,000 до €600,000 залежно від моделі та конфігурації.

Вартість батарейної системи (літій-іонні батареї, та тяговий контейнер): від €100,000 до €150,000.

Solaris (Польща):

Відомий за моделлю *Solaris Trollino*, яка підтримує автономний хід.

Ціна: від €450,000 до €700,000 за одиницю.

Вартість батарейної системи та тягового контейнера: €120,000–€180,000.

Belkommunmash (Білорусь):

Зокрема, модель E433 з автономним ходом до 30 км.

Ціна: \$250,000–\$350,000 (найдоступніший варіант серед популярних виробників).

Вартість батарей та тягового контейнера: \$80,000–\$120,000.

Український виробник – Політехносервіс:

Політехносервіс пропонує модернізацію існуючого рухомого складу або створення нових тролейбусів.

Орієнтовна вартість нових тролейбусів з автономним ходом становить від 6 млн грн (близько \$150,000–\$180,000).

Вартість акумуляторних систем, залежно від специфікацій, може становити близько 2–3 млн грн (\$50,000–\$80,000).

Ключові фактори порівняння наведені в таблиці 6.2

Таблиця 6.2 – Ключові фактори порівняння

Параметр	Škoda	Solaris	Belkommunmash	Політехносервіс
Базова вартість тролейбуса	€400–600 тис.	€450–700 тис.	\$250–350 тис.	\$150–180 тис.
Вартість батарей	€100–150 тис.	€120–180 тис.	\$80–120 тис.	\$50–80 тис.
Автономний хід	до 50 км	до 70 км	до 30 км	до 30–50 км
Локалізація виробництва	Європа	Європа	Білорусь	Україна

Перевагами системи розробленої в цій дипломній роботі є значно нижча вартість виробництва, можливість адаптації під конкретні потреби міст України, додаткові можливості для модернізації.

Отже, можемо зробити висновок, що наша система є економічно вигіднішим та дешевшим варіантом, особливо для українських міст з обмеженим бюджетом. Вартість тролейбусів може бути на 40–60% нижчою порівняно з українськими аналогами, не кажучи вже за європейських. Проте міжнародні виробники, як-от Škoda чи Solaris, пропонують триваліший автономний хід, що важливо для великих міських агломерацій.

ВИСНОВКИ

Під час виконання дипломного проекту було здійснено комплексну розробку електромеханічної системи тролейбуса, побудованої на базі асинхронного двигуна моделі БТДА, що живиться від контактної мережі, але може їздити і автономно, від акумуляторної батареї.

У межах проекту виконано детальний аналітичний огляд механічної та електричної частин тролейбуса, що включав аналіз ключових компонентів, принципів їхньої роботи та взаємодії. Сформульовано основні теоретичні положення, які визначають особливості функціонування системи тролейбуса, зокрема його електромеханічну взаємодію, способи реалізації приводу, а також методи забезпечення енергоефективності.

Для розрахунків було визначено тягове зусилля, необхідне для забезпечення руху тролейбуса за заданими умовами експлуатації. Розроблено індивідуальний цикл руху (*Driving Cycle*), що включав змінні режими роботи, що імітують реальні експлуатаційні умови. На основі цього циклу побудовано графічні залежності, які дозволили визначити енергетичні витрати системи. Результати показали, що на проходження повного циклу електросамокатом витрачається 112 МДж енергії, що стало основою для подальшого вибору джерела живлення.

У рамках аналізу джерел живлення було здійснено порівняльну оцінку акумуляторних батарей та суперконденсаторів з урахуванням їхньої ваги, габаритів, вартості та експлуатаційних характеристик. Розрахунки підтвердили доцільність використання акумуляторних батарей як основного джерела енергії. Вони забезпечують оптимальне співвідношення енергоємності, ваги та розмірів, а також мають нижчу вартість порівняно з суперконденсаторами, що робить їх економічно вигідним варіантом.

Було виконано розрахунок основних параметрів асинхронного двигуна БТДА, включаючи аналіз його номінальних характеристик, залежностей моменту від струму та швидкості, а також ефективності роботи в межах

заданих режимів. На основі отриманих результатів розроблено алгоритм векторного керування моментом двигуна.

Алгоритм передбачає реалізацію принципів управління струмом у фазах, орієнтованих у просторі координат, пов'язаних із полем ротора, що забезпечує ефективне керування моментом і швидкістю. Для наочного відображення взаємозв'язків між компонентами алгоритму побудовано структурну схему.

Для точного визначення динамічних характеристик системи виконано приведення моментів інерції всіх компонентів самоката до валу двигуна. Сумарний момент інерції склав 3884 кг·м². Проведено математичне моделювання електромеханічної системи, що включало аналіз динамічних процесів розгону тролейбуса до швидкості 40 км/год. За заданим моментом навантаження система досягла стабільної роботи: максимальна швидкість була досягнута за 6 секунд. Графіки перехідних процесів дозволили підтвердити доцільність вибраної математичної моделі та алгоритму керування.

На заключному етапі виконано вибір компонентів електричної частини тролейбуса, що включає силові модулі, контролери, джерело живлення та інші вузли. Побудовано функціональну схему, яка відображає взаємодію компонентів системи. Також розроблено схему електричну принципову для реалізації апаратної частини.

Крім того, представлено схему розміщення основних вузлів на кузові тролейбуса із врахуванням ергономічних та конструктивних вимог. Розроблено креслення корпусу, що включають деталі механічної фіксації та захисту внутрішніх компонентів.

Було виконано економічне порівняння з передовими компаніями по виробництву тролейбуса, в цілому ціна системи є нижчою на 60% ніж найдешевше представлене на ринку обладнання.

Результати виконаного проекту дозволяють зробити висновок про доцільність реалізації запропонованої електромеханічної системи тролейбуса.

Розроблена система забезпечує необхідні динамічні характеристики, високу енергоефективність та економічність, що підтверджено аналітичними й експериментальними розрахунками.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Літій-йонні акумулятори URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Літій-йонний_акумулятор (дата звернення 03.09.2024)
2. Літійзалізофосфатний акумулятор URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Літій-залізо-фосфатний_акумулятор (дата звернення 03.09.2024)
3. Свинцево-кислотний акумулятор URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Свинцево-кислотний_акумулятор (дата звернення 03.09.2024)
4. Літій-титанатні акумулятори URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Літій-титанатний_акумулятор (дата звернення 03.09.2024)
5. Супер конденсатори URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Іоністор> (дата звернення 03.09.2024)
6. Електродвигуни URL: https://tmmotor.ua/ua/news/typy-elektrovdigatelej-i-ih-ispolzovanie?srsltid=afmbooppbl9a81ppcd3km3duvemffszom0jdk2x7_nuheqbe2nnzhj68 (дата звернення 03.09.2024)
7. Електродвигуни постійного струму URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Двигун_постійного_струму (дата звернення 03.09.2024)
8. Асинхронний двигун URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/597042/PANASONICBATTERY/NCR18650A.html> (дата звернення 03.09.2024)
9. СДПМ URL: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/KYOCERA-AVX/SCCZ1EB308SWB?qs=B6kkDfuK7%2FCwWkWWCBmIOA%3D%3D> (дата звернення 03.09.2024)
10. Електродвигун тяговий асинхронний 6ДТА. 002.1 У2 для тролейбуса. Посібник з експлуатації. ОТР.460.067 РЕ

11. Suyijia Lifepo4 3.2V 86Ah URL:
<https://www.aliexpress.com/item/1005005342973242.html> (дата звернення
 26.09.2024)

12. Суперконденсатор GHC C27100000SR86Ah URL:
<https://spanish.alibaba.com/product-detail/100000F-Farad-Super-High-2-7V-1601022130997.html> (дата звернення 26.09.2024)

13. 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.

14. 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.

15. Транзистор Infenion 2ED300C17-ST URL:
https://octopart.com/2ed300c17-st-infineon-21317753?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoE-CIXVFGLkbwbI3v9HpQR7Jw6nPGlztXgxmtAal1i5vCdK04hOINRoCptEQAvD_BwE (дата звернення 26.10.2024).

16. Драйвер BLH107K801C144 URL:
https://eu.mouser.com/ProductDetail/Cornell-Dubilier-CDE/BLH107K801C144?qs=4qgZ1GHix0Uf%252BvDuNa0WZQ%3D%3D&srsltid=AfmBOoo2yLG1A1FXGeg9A18_jzZAsVEp22TLvvcv9xoSta69Tf7dxr
 (дата звернення 26.10.2024).

17. BLH107K801C144 URL:
https://eu.mouser.com/ProductDetail/Cornell-Dubilier-CDE/BLH107K801C144?qs=4qgZ1GHix0Uf%252BvDuNa0WZQ%3D%3D&srsltid=AfmBOoo2yLG1A1FXGeg9A18_jzZAsVEp22TLvvcv9xoSta69Tf7dxr
 (дата звернення 26.10.2024).

18. Резистор ПСВ-50Вт URL: <https://kraft-elektro.prom.ua/ua/p23969025-rezistor-pev.html> (дата звернення 26.10.2024).
19. ЕТЕ ЕСК150В URL: <https://www.te.com/en/product-2071576-1.html> (дата звернення 01.011.2024).
20. ТКПД-114ВУ2 URL: <https://eltechmash.com.ua/ua/p249483-tkpd-114vu2-kontaktor.html> (дата звернення 01.011.2024).
21. Транзистор 2SD1138 URL: https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=2sd1138&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoDUVD6hWsTslGz_x7iSecDpShG012wj8k537akEm7JgW_DsB6a1ghoCew8QAvD_BwE (дата звернення 01.06.2023).
22. Діод 1N5408 URL: https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=1n5408&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoLgaiMiUBm1-6PIZRXXEFz7o1B6aIusGaoobcLsg2ttJGfW8Q05NChoCGl8QAvD_BwE (дата звернення 01.011.2024).
23. FELR01.1N-04K8-N032R-A-560-NNNN URL: <https://azt.prom.ua/ua/p15118613-tormoznoj-rezistor-kvt.html> (дата звернення 15.011.2024).
24. JXK-7-W1-A5-O5-P2 URL: https://www.aliexpress.com/item/1005004274005737.html?src=google&albch=search&acnt=479-062-3723&isdl=y&aff_short_key=UneMJZVf&albcpr=21526361237&albag=168530015987&slnk=&trgt=dsa-1642801257570&plac=&crea=707770237666&albad=707770237666&netw=g&device=c&mtctp=&memo1=&albbt=Google_7_search&aff_platform=google&albag=888888&isSmbActive=false&isSmbAutoCall=false&needSmbHouyi=false&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoIZwLXE88mbFALg7P4hAqu8oC5TTKIqZS-iTPS2gJRUgn9EMUKyeGRoCFXQQAavD_BwE (дата звернення 15.011.2024).

25. Датчик напруги LV 100-800 URL:
<https://www.digikey.be/en/products/detail/lem-usa-inc/LV-100-800/22118721?srltid=AfmBOoo2vuQ2Ch7lfeuuFiwO1sll0cHR7inifKcKBnKNGj3YqNcUkW09> (дата звернення 15.011.2024)..

26. TLV2472AIP URL: https://octopart.com/tlv274ipwr-texas+instruments-408962?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoHQM6DPQa7Tqcv7Vo44xhYi1StdCuh6EGwBvKJxfg1wVSQW6YhRWRoC_x0QAvD_BwE
(дата звернення 15.011.2024).

27. HCPL4504-000E URL: https://octopart.com/hcpl-4504-broadcom-71128551?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoEzuQvtXBhnqpZdo3A8KFIhccFomI1v8QxuQfVku4X3iqOimoCSScBoCMnYQAvD_BwE
(дата звернення 15.011.2024).

28. PC817X1NIP1B URL:
https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Pc817x1nip1b&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoLbQIYvLQRZ-AYaqO166LBXysPTUrTSi9EeA_bdzNL5jR73S7z2INxoCmakQAvD_BwE (дата звернення 15.011.2024).

29. HCPL-7800 URL:
https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Hcpl7800&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoMnuY28cZtA_ykBMWg2ZWrlp2hpoe9I3mXxeXV6DI_Jxfwx4MEsjmRoC8tMQAvD_BwE (дата звернення 28.011.2024).

30. PC814X URL: https://octopart.com/pc814-sharp-20092022?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoAsTVDii-s07F5tcwX15hvcGDzAwEuxdcxAcaVUqhEGEGayHrbgTaRoCj14QAvD_BwE
(дата звернення 28.011.2024).

31. ISO1044BD URL: https://octopart.com/iso1044bd-texas+instruments-108054041?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoO_gd8Mxt

[NcplLSnYXJqq9idZwOvumflr0Vp9KVXUr25nucovNVBNxoCWq4QAvD_BwE](#)

(дата звернення 28.011.2024).

32. L201011MS02Q URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/c-k/L201011MS02Q/3753596> (дата звернення 28.011.2024).

33. NUP2105L URL: https://octopart.com/nup2105l-diotec-105952128?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoHn858elc3eDv8o-9bB4bD4f9FBuRMmCiG39opxAE4HzbP10I_1liBoCx64QAvD_BwE

(дата звернення 28.011.2024).

34. E40H10-400-6-L-5 URL: https://svaltera.in.ua/e40h10-400-6-l-5-enkoder-5b/?srsltid=AfmBOorwLIAV3lSo5EwGZ3FA1iq_VIbxolByPOsNKRTewzGawBcJVis2 (дата звернення 28.011.2024).

35. ННКТ3000-27F URL: <https://www.aliexpress.com/i/1005005538773860.html> (дата звернення 02.12.2024).

36. TSR 1-24150 URL: https://octopart.com/tsr+1-24150-tracopower-8440876?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoCJjkGA1wHiGPw9lUdvsfj_88lmDg9QOXfpzXRLqKOCqDpCAkacIuxoC0vcQAvD_BwE (дата звернення 02.12.2024).

37. TEL15-2411 URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/tel-15-2411_161561.html (дата звернення 02.12.2024).

38. TSR 1-2433 URL: https://octopart.com/tsr+1-2433-tracopower-9539342?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoJpciYLZCe43HiNqLsLvETzSlaMOjescyqUFyDbP8ZHEAOJh1WPoMcBoCq3IQAvD_BwE (дата звернення 02.12.2024).

39. LM393 URL: https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Lm393&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoM76kUZseAjwFCs4XECrU96Zv4ZXvYF9Cm_oUPZT-IMP-asfRAw3dRoCxQ8QAvD_BwE (дата звернення 02.12.2024).

40. TMS320F280041 URL: https://www.ebay.com/itm/285108395244?norover=1&mkevt=1&mkrid=711-167653-853678-5&mkcid=2&itemid=285108395244&targetid=293946777986&device=c&mktype=pla&googleloc=9194840&poi=&campaignid=20143422176&mkgroupid=148565242265&rlsatarget=pla-293946777986&abcId=&merchantid=119648210&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoC1sAqOViDSFB9GLvK9IJD3_8DOaT2QvbWpucsyJvHOq3_QLLINXpBoCmmoQAvD_BwE (дата звернення 02.12.2024).
41. ETI NH-3 Battery 250A 700V URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/c-k/L201011MS02Q/3753596> (дата звернення 02.12.2024).
42. ETI NH-00/gG 160A 500V KOMBI URL: https://vencon.ua/ua/products/eti-nh-00gg-160a-500v-kombi-004182216?utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_id=20645658177&utm_campaign=20645658177&utm_content=154110057586&utm_term=kw:|pid:335139|tarid:pla-1728554098788&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoMirvGvAuO_AkEpr40kJBnEloekRgUBJw0I4mDcsbtD-oLmGW694BhoCcKEQAvD_BwE (дата звернення 02.12.2024).
43. Tesla fg200a FG maxi (mega) 200A URL: https://dok.ua/ua/art-predohranitel-avtomobilnyy-tesla-fg200a-fg-maxi-mega-200a-24468071?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=17754460071&utm_content=&utm_term=&utm_id=&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoJiZJ_YIGG9UOmtIWdCt-8IxMOQVkvOmL8cu3XROUzwyqJlyRjFAxoChYsQAvD_BwE (дата звернення 02.12.2024).
44. 30R250UU Littelfuse URL: <https://www.tme.eu/ua/details/lvr055s/zapobizhniki-polimerni-tht/littelfuse/758968->

[000/?brutto=0¤cy=USD&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=UKRAINA%20\[PMAX\]%20UK&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9bq6BhAKEiwAH6bqoJJkhd-yM1bpLYrX6rWgsik1V_1WsmKks4RvBQmYX_F7Pd8FtoAghoCKeYQAvD_BwE](https://www.schaltbau.com/ru/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F/%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%8B/cu/) (дата звернення 02.12.2024).

45. SCHALTBAU CU1215/04 URL:
<https://www.schaltbau.com/ru/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F/%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%8B/cu/> (дата звернення 02.12.2024).

46. SCHALTBAU CT1115/04 URL:
<https://www.schaltbau.com/ru/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F/%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%8B/ct/> (дата звернення 02.12.2024).

47. ТРОЛЕЙБУС ТИПУ PTS T123 НАСТАНОВА ЩОДО ЕКСПЛУАТУВАННЯ PTS T123.0002 НЕ

ДОДАТОК А