

**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 ПЕРЕСАДА

(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
з автономним ходом

Виконав: студент 3 курсу, групи ЕП – п81

(шифр групи)

Вербовий Юрій Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник к.т.н., доц. 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 старший викладач Котлярова Вікторія Володимирівна

(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 _____

(підпис)

Київ – 2021 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141.8103.002.БР	Пояснювальна записка	72	
3	A1	141.8103.002.БР	Керуючий контролер схема електрична функціональна	1	
4	A1	141.8103.002.БР	Керуючий контролер схема електрична принципова	1	
5	A1	141.8103.002.БР	Результати досліджень системи прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна	1	

				141.8103.002.БР		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Вербовий Ю.В.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Ковбаса С.М.				2	79
Консульт.					КП ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП – п81	
Н/контр.						
Зав.каф.	Пересада С.М.					

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Електромеханічна система тролейбуса
з автономним ходом

Київ – 2021 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 ПЕРЕСАДА
(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту

_____ Вербовому Юрію Васильовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Електромеханічна система тролейбуса з автономним ходом _____

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

затверджені наказом по університету від «___» _____ 2021 р. № _____

2. Термін подання студентом проекту 07.06.2021 _____

3. Вихідні дані до проекту тролейбус типу «Богдан Т701.17», $V_{\max} = 55$ км/год, $m_{\max} = 19000$ кг, ширина – 2550 мм, висота – 3800 мм, довжина – 11960 мм. _____

4. Зміст пояснювальної записки Вступ; 1. Аналітичний огляд; 2. Розрахунок параметрів основних елементів електромеханічної системи; 3. Розробка

алгоритму прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна; 4. Дослідження динамічних показників методом математичного моделювання; 5. Вибір основних елементів силової частини перетворювача; Висновок; Перелік використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 1. Керуючий контролер, схема електрична принципова; 2. Керуючий контролер, схема електрична функціональна; 3. Результати досліджень системи прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна.

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 01.02.2021

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд	20.02.21	
2	Розрахунок параметрів основних елементів електромеханічної системи	13.03.21	
3	Розробка алгоритму прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна	02.04.21	
4	Дослідження динамічних показників методом математичного моделювання	22.04.21	
5	Вибір основних елементів силової частини перетворювача	12.05.21	
6	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини. Підготовка презентації	06.06.21	

Студент

(підпис)

Вербовий Ю.В.

Керівник проекту

(підпис)

Ковбаса С.М.

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить 79 сторінок, 12 рисунків, 5 таблиць, 3 аркуша графічної частини.


Метою даного проекту є розробка електромеханічної системи тролейбуса з автономним ходом.

Спроектована система може використовуватись в реальному транспортному засобі для вирішення проблеми автономної роботи поза контактною мережею.

Графічна частина включає в себе: схему електричну функціональну керуючого контролера, схему електричну принципову керуючого контролера, результати досліджень системи прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна.

Ключові слова:

ТРОЛЕЙБУС, АВТОНОМНИЙ ХІД, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА, ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ТАХОГРАМА РУХУ, СУПЕРКОНДЕНСАТОР, ЛІТІЙ-ІОННИЙ АКУМУЛЯТОР, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ

					141.8103.002.БР			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Вербовий Ю.В.			Електромеханічна система тролейбуса з автономним ходом	Літ.	Арк.	Аркуші
Керівник.		Ковбаса С.М.					6	79
						КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС – ЕП Гр. ЕП – п81		
Н. Контр.								
Затверд.		Пересада С.М.						

ABSTRACT

This project contains 79 pages, 12 drawings, 5 tables, 3 sheets of the graphic part.


The purpose of this project is to develop an electromechanical system of the trolleybus with autonomous operation.

Developed system can be used in real trolleybus to solve the problem of working without overhead lines, which is used to transmit electrical energy to the vehicle.

The graphic part includes: the electric functional scheme of the traction electric drive, the electric circuit diagram of the controller of the traction electric drive, the results of modeling the direct vector torque control system of an induction motor.

Key words:

TROLLEYBUS, AUTONOMOUS OPERATION, ELECTROMECHANICAL SYSTEM, TRACTION ELECTRIC DRIVE, DRIVING CYCLE, ULTRACAPACITOR, LI-ION BATTERY, CONTROL SYSTEM

					141.8103.002.БР			
	Letter	№ of doc.	Sign.	Date				
Devel.		Y. Verbovyi			Electromechanical system of the trolleybus with autonomous operation ABSTRACT	Letter	Page	Pages
Checked		S. Kovbasa					7	79
						Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Department of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives group EP – p81		
N. Contr.								
Approved.		S. Peresada						

ЗМІСТ

Зміст	8
Вступ	10
1 Аналітичний огляд	11
1.1 Виникнення і розвиток міського пасажирського транспорту	11
1.2 Тролейбус	13
1.3 Класифікація тролейбусів	14
1.4 Основні експлуатаційні характеристики	15
1.5 Типи застосовуваних тягових двигунів	19
1.6 Системи керування тяговими двигунами	19
1.7 Порівняльний аналіз типів використовуваних акумуляторних батарей	21
1.8 Суперконденсатори	27
1.9 Основні українські та світові виробники тролейбусів та тягових електроприводів	30
1.10 Висновок до першого розділу	31
2 Розрахунок параметрів основних елементів електромеханічної системи	32
2.1 Розрахунок потужності двигуна	32
2.2 Розрахунок параметрів динамічної моделі двигуна	38
2.3 Розрахунок акумуляторної батареї	39
2.4 Розрахунок батареї суперконденсаторів	45
3 Розробка алгоритму прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна	49
3.1 Струмове керування моментом при ідеальному полеорієнтуванні	49
3.2 Пряме векторне керування моментом АД на основі принципу розділення	55
3.3 Алгоритм прямого векторного керування моментом	

асинхронного двигуна.....	61
4 Дослідження динамічних показників методом математичного моделювання	62
4.1 Дослідження динамічних показників системи керування моментом при ослабленні поля	65
5 Вибір основних елементів силової частини перетворювача.....	69
5.1 Вибір IGBT транзисторів для автономного інвертора напруги	69
5.2 Розрахунок та вибір конденсаторів ємнісного фільтру	70
5.3 Вибір резистора та ключа клампера	71
5.4 Вибір датчиків напруги та струму	73
5.5 Опис схеми електричної принципової керуючого контролера	73
Висновки	74
Перелік використаних джерел	75

ВСТУП

На сьогоднішній день тролейбуси стали невід'ємною частиною міського електротранспорту та функціонують більш ніж в 53 містах України.

Сучасний тролейбус є складним комплексом електричних, пневматичних, електронних і механічних компонентів, які необхідні для забезпечення надійної роботи даного виду міського електротранспорту.

Показники якості тягових електромеханічних систем є визначальними в ефективності використання тролейбусного транспорту. Також актуальним питанням сьогодні є відновлення наявного рухомого складу з установкою сучасного економічного електрообладнання [1].

Традиційний тролейбус має суттєвий недолік – неможливість працювати автономно, тобто не отримуючи живлення від контактної мережі, також контактна мережа псує вид міста і тим самим обмежує широке розгортання тролейбусних систем.

На лінії тролейбус може бути заблокований іншим тролейбусом спереду або пошкодженою контактною мережею, що змушує його припинити рух, так як він не має можливості об'їхати перешкоду.

Щоб виправити цей недолік у 1970–х роках було запропоновано використання додаткового дизельного двигуна. Це робить можливим роботу поза мережею, а ділянки контактних ліній у певних областях можуть бути видалені, проте це технічне рішення негативно впливає на екологію, фактично знищуючи основну перевагу міського електричного транспорту – екологічність, тому ця технологія вважається перехідною.

В останні роки, з розвитком таких технологій накопичення енергії як акумуляторні батареї та суперконденсатори, оснащення тролейбуса ними та системою їх підзарядки в режимі руху повністю вирішило проблему роботи поза мережею та досить добре задовольнило потреби ринку [2].

Метою дипломного проекту є розробка електромеханічної системи тролейбуса з автономним ходом.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Виникнення і розвиток міського пасажирського транспорту

В історії розвитку міського пасажирського транспорту виділяють п'ять періодів:

- використання кінної тяги;
- використання парової тяги;
- використання електричної тяги на транспорті;
- широкого розповсюдження автомобілів;
- сучасний період використання інформаційних систем в управлінні пасажирськими перевезеннями.

Період кінної тяги почався в останній чверті XVII ст. і тривав приблизно до середини XIX ст. В другій половині XVII ст. було організовано регулярний рух у міжміському сполученні.

В кінці XVIII ст. в містах використовувалися карети, а потім з'явилися 10 – 20 місцеві диліжанси, омнібуси, лінійки. З середини XIX ст., як наслідок першої в історії транспортної кризи, яка виникла у зв'язку з розвитком міст з'явилися кінні залізні дороги – конки (Нью-Йорк, Петербург, Москва). Однак їх поява не вирішила транспортну проблему, використання кінних екіпажів вимагало широких вулиць, що призвело до спроб використання парової тяги.

Початок використання парової тяги для міських пасажирських перевезень пов'язують з міськими залізницями з паровою тягою, які були прокладені в Лондоні (1863 р.) під землею в тунелях і отримали назву Metropolitan Rail-Way (столична залізниця).

Метро було прокладено для розвантаження вулиць. Слідом за Лондоном метрополітен з'явився в Берліні (1872 р.), Нью-Йорку (1878 р.) і інших містах (в Берліні на насипу, в Нью-Йорку – на естакадах, тобто поза вулицями). Майже одночасно з'явилися і вуличні залізниці з паровою тягою.

Вперше побудовані в Лондоні винахідником і підприємцем О'Тремом,

вони отримали назву Tram-Way (дорога Трема). Згодом метрополітенom стали називати всі поза вуличні міські залізниці, а трамваєм – вуличні.

Парова тяга від кінної відрізнялася більшою економічністю і провізною здатністю. Паровози могли тягнути декілька вагонів, але при русі сильно забруднювали повітря, були пожежонебезпечними і мали низькі тягово-динамічні показники.

Початок використання електричної тяги в міських пасажирських перевезеннях пов'язують з винаходом електродвигуна і способів передачі електричної енергії на відстань.

Перший електричний трамвай в Києві був запущений в 1892 р. Електрична тяга істотно розширила перспективи розвитку метрополітенів. У 1882 р. в Німеччині на лінії Берлін – Шпандау був випробуваний перший дослідний зразок безрейкового екіпажу з електродвигуном, який живиться від контактних проводів – прообраз тролейбуса. Стрімкий розвиток тролейбусів почався після винаходу струмознімних штанг з роликoвим, а потім з ковзаючим контактом. Період електричної тяги почався в кінці XIX ст. і отримав найбільший розвиток у першій чверті XX ст.

Період автомобілізації, тобто розвитку автомобільного транспорту з двигунами внутрішнього згоряння, почався з 1920-х р., але його темпи, за винятком США, були низькими.

Масова автомобілізація почалась в 1950-і роки, після другої світової війни. Світовий автомобільний парк безперервно зростає завдяки перевагам автомобіля: висока маневреність, хороші тягово-динамічні показники, можливість безпересадочної поїздки, високий комфорт. Разом з легковими автомобілями для перевезення пасажирів широко використовуються автобуси різної місткості.

Масове автомобілів та автобусів спричинило ряд несприятливих наслідків: перевантаженість вулиць, забруднення довкілля.

Бурхливий розвиток сучасних міст та їх транспортних систем спричинив необхідність використання інформаційних систем в управлінні

міськими перевезеннями. Збільшення обсягу інформації, необхідної для обліку, аналізу та прийняття оперативних рішень призвело до використання комп'ютерів та спеціального програмного забезпечення.

Наприклад, сучасний метрополітен практично повністю працює в автоматичному режимі, тобто за допомогою інформаційних систем управляє рухом поїздів на всіх лініях.

При організації та регулюванні роботи наземного пасажирського транспорту також використовуються засоби зв'язку і комп'ютерного управління, подальший розвиток міських пасажирських перевезень не представляється можливим без комп'ютерних технологій [3].

1.2 Тролейбус

Тролейбус – безрейковий транспортний засіб, призначений для перевезення пасажирів, що приводиться в рух електричним двигуном і працює, отримуючи живлення від контактної мережі за допомогою струмознімачів з роликівим або ковзним контактом

Його пропускна здатність становить 8 – 9 тис. пасажирів на годину. Тролейбуси недорогі в експлуатації, прості та надійні, екологічні, мають високі динамічні показники. Однак будівництво контактної мережі вимагає витрат, вона захаращує вулиці та погіршує їх зовнішній вигляд, зв'язок із контактною мережею обмежує маневреність рухомого складу. Доцільно використовувати тролейбус у містах з населенням понад 250 тис. жителів, на лініях із постійним пасажиропотоком не менше 2 – 2,5 тис. пасажирів на годину як основний та допоміжний вид транспорту. Рухомий склад може мати середню, велику і особливо велику (зчленований тролейбус) пасажиромісткість [3], [4].

1.3 Класифікація тролейбусів

В основу сучасної класифікації тролейбусів покладені наступні параметри [4]:

- кількість поверхів;
- кількість секцій (з жорсткою базою, зчленований);
- кількість осей;
- конструкцію кузова та рами;
- система керування тяговими електродвигунами;
- призначення.

За кількістю поверхів тролейбуси поділяються на одноповерхові та двоповерхові.

В залежності від кількості секцій тролейбуси бувають з жорсткою базою (односекційні) і зчленовані, які в свою чергу підрозділяються на дво– і багатосекційні.

Тролейбуси з жорсткою базою по кількості осей розділяються на двухосні, трьохосні, чотирьохосні.

За конструкцією кузова та рами розрізняють:

- тролейбуси з дерев'яними кузовами (наразі не виробляються);
- тролейбуси з композитним кузовом, що складається з конструктивних дерев'яних елементів, що з'єднані металевими кріпильними елементами (наразі не виробляються);
- тролейбуси з ціЛЬНОметалевим несучим кузовом безрамної конструкції;
- тролейбуси з рамою та кузовом об'єднаної конструкції.

За системою управління та видом тягового приводу розрізняють наступні типи тролейбусів:

- з безпосередньою системою керування (в даний час не виробляються);
- з реостатно – контакторною напівавтоматичною системою

керування тяговим електродвигуном;

- з електронними системами керування двигуном постійного струму;
- з електронними системами керування асинхронним тяговим електродвигуном.

Тролейбуси при цьому можуть бути обладнаними одним або декількома тяговими двигунами.

За призначенням тролейбуси розділяються на дві категорії:

- пасажирські;
- вантажні та спеціальні (наприклад для обслуговування контактної мережі). Такі тролейбуси можуть оснащуватися системою з двигуном внутрішнього згорання для забезпечення можливості руху без контактної мережі або по її знеструмленим ділянкам.

1.4 Основні експлуатаційні характеристики

Тролейбус повинен бути призначений для експлуатування на тролейбусних лініях, споруджених відповідно до будівельних норм та правил на дорогах I та II категорій [5].

Вид кліматичного виконання тролейбуса – УХЛ (У), категорія 1.

Завантажений тролейбус повинен долати ухил не менше ніж 80 ‰.

Максимальна швидкість завантаженого тролейбуса на горизонтальній прямій ділянці шляху та номінальній напрузі контактної мережі – не менше ніж 55 км/год .

Час розгону завантаженого тролейбуса на горизонтальній ділянці шляху до швидкості 45 км/год – не більше ніж 20 с із максимальним пришвидшенням не більше ніж $1,2 \text{ м/с}^2$.

Тролейбус повинен мати низький рівень підлоги.

Конструкція кузова повинна виключати проникнення води у:

- відділення водія, пасажирський салон через дах та вікна;

- відсіки з електроустаткуванням, клемні коробки та кабельні канали.

Для повинні використовуватися матеріали, які стійкі до вологи, оливи, зношування та мають властивості, що унеможливають ковзання.

Елементи рами, каркаса, обшивки кузова повинні мати антикорозійний захист або бути виготовлені із матеріалів стійких до корозії.

У кузові тролейбуса повинні бути буксирні пристрої спереду та ззаду.

У конструкції кузова повинна бути передбачена можливість доступу обслуговувального персоналу до обладнання, розташованого на даху тролейбуса.

У конструкції пасажирського салону повинні бути місця для встановлення засобів для здійснення плати за проїзд.

При наявності в салоні тролейбуса робочого місця для кондуктора, його сидіння повинно бути встановлено в напрямку поперечної осі тролейбуса на узвишші з висотою не більшою ніж 0,25 м.

Відділення водія треба відокремити від пасажирського салону перегородкою з дверима, яка забезпечує оглядовість пасажирського салону через дзеркало заднього огляду, що розташоване у відділенні водія.

Відділення водія повинно мати двері для виходу водія назовні та два запасні виходи, один із яких – через двері в пасажирський салон, другий – через бокове скло або двері назовні.

Робоче місце водія треба обладнати так, щоб він мав можливість, не встаючи зі свого сидіння, виконувати всі дії щодо керування тролейбусом та його системами.

Водій з робочого місця повинен отримувати інформацію про стан систем тролейбуса.

Конструкція панелі приладів і розташованих на ній сигналізаторів та пристроїв підсвічування контрольних приладів повинна унеможливлювати дзеркальне відображення джерел світла у вітровому склі, та забезпечувати видимість світлових сигналів під час потрапляння сонячного проміння на

панель приладів.

На тролейбусі не можна застосовувати ресорну підвіску, система підвіски повинна забезпечувати незмінну висоту першої сходинки незалежно від навантаження тролейбуса.

Стиснене повітря для пневматичної системи повинно надходити від компресора, який має електропривод.

Для запобігання навантаження компресора стисненим повітрям із ресиверів на ділянці пневматичної системи (компресор – ресивер) повинен бути встановлений зворотний клапан.

Пневматична система повинна бути обладнана такими пристроями: попередження замерзання, очищення повітря, волого – і оливовідокремлювачами, автоматичним регулятором тиску, запобіжним клапаном.

Кожний ресивер (балон) пневматичної системи повинен мати пристрій для зливу конденсату.

У передній частині тролейбуса повинен бути клапан пневматичної системи для забезпечення його буксирування іншим транспортним засобом.

Для електроприводу гідروпідсилювача керма тролейбуса заборонено застосовувати двигун, що живиться від електричних кіл з номінальною напругою контактної мережі.

Тяговий двигун повинен мати можливість виконувати функцію гальмівного механізму.

Допоміжна (зносостійка) гальмівна система (ДГС) повинна діяти доти, поки швидкість тролейбуса не буде зменшена принаймні до 5 км/год або ДГС не буде вимкнена.

ДГС повинна діяти незалежно від наявності напруги в контактній мережі.

Тяговий електропривод повинен забезпечувати рух тролейбуса в таких режимах:

- маневровому (рух зі швидкістю до 10 км/год);

- тяги з регулюванням швидкості;
- вибігу;
- повторного запускання після вибігу за будь – якої швидкості руху;
- електродинамічного гальмування з регульованим сповільненням;
- руху заднім ходом.

Перемикання з одного режиму на іншій повинно здійснюватися безконтактними комутаційними апаратами, а керування режимами – за допомогою мікропроцесорної техніки.

Тяговий електропривод повинен забезпечити роботу тролейбуса під час руху в кожному з режимів за таких умов:

- за будь – якої полярності напруги в контактній мережі;
- під час пікового збільшення напруги в контактній мережі до 3000 В, на час не більше ніж 3 мс;
- у разі короткочасного зникнення й за наступного відновлення напруги на струмоприймачах під час проходження тролейбусом спецчастин контактної мережі.

Система керування тяговим електроприводом повинна забезпечувати:

- можливість проїзду зони для миття кузова тролейбуса за напруги на струмоприймачах, яка достатня для його руху зі швидкістю не більше ніж 10 км/год;
- передавання електричної енергії в контактну мережу за наявності споживача та автоматичне передавання енергії на резистори у разі його відсутності;
- пріоритетність реалізації режиму електродинамічного гальмування над тяговим режимом;
- рух тролейбуса без пасажирів, за умови вимкненого одного із двигунів.

Відмова будь – якого елементу тягового електроприводу не повинна призводити до неконтрольованого руху тролейбуса в тяговому режимі.

1.5 Типи застосовуваних тягових двигунів

В історії розвитку тролейбуса можна виділити наступні види використовуваних тягових двигунів (ТЕД) [6]:

- тихохідний ТЕД постійного струму послідовного збудження – такі двигуни використовувалися на перших тролейбусах;
- швидкохідний ТЕД постійного струму змішаного збудження – почали використовуватися 1945 р. і з тих пір є основним типом ТЕД для тролейбусів, його перевагами є: простота керування швидкістю; можливість швидкого переходу на електричне гальмування – як рекуперативне, так і реостатне; поєднання в одному двигуні властивостей ТЕД послідовного та паралельного збудження;
- асинхронний ТЕД – використовується в новітніх моделях тролейбусів, його основні переваги: простота конструкції та малі габарити. Через відсутність щітково – колекторного вузла, асинхронний двигун вільний від недоліків колекторних двигунів таких як знос щіток і елементів колектора від взаємного тертя, іскріння і підгоряння при поганому їхньому контакті, необхідності постійного контролю їх стану, проте асинхронний ТЕД для своєї роботи вимагає використання дороговартісної силової перетворювальної техніки.

1.6 Системи керування тяговими двигунами

Пристрій регулювання струму через ТЕД називається системою управління [6].

В найпростішому випадку керування струмом якоря ТЕД здійснюється за допомогою перемикачів пуско - гальмівних резисторів. Подібні системи керування розділяються на три види:

- безпосередня система керування (БСК) – перший тип систем

керування ТЕД, в ній водій за допомогою важелів та валів, що з'єднані з силовими контактами, безпосередньо виконує комутацію резисторів в силових колах ТЕД;

- непряма неавтоматична реостатно – контакторна система управління (РКСК) – в цій системі водій за допомогою педалі контролера здійснює комутацію в низьковольтних колах управління, що призводить до включення або відключення відповідних високовольтних контакторів, що здійснюють комутацію у силових колах;
- непряма автоматична РКСК – в даній системі керування замиканням і розмиканням контакторів управляє спеціальний серводвигун. Динаміка розгону та гальмування визначається заздалегідь запрограмованою часовою послідовністю в конструкції РКСК. Вузол комутації силового кола в зборі з пристроєм-посередником інакше називається контролером. Дана система керування ще використовується в серійних тролейбусах.

Тиристорно – імпульсна система керування (ТІСК) – система керування на базі тиристорів, що можуть вимикатися за керуючим електродом. В даній системі необхідне за величиною середнє значення струму ТЕД створюється за допомогою формування часової послідовності струмових імпульсів, тобто завдяки використанню широтно-імпульсної модуляції. Перевагою перед РКСК є більший коефіцієнт корисної дії, але гальмування ця система керування забезпечує, як правило, тільки електродинамічне.

Транзисторна система керування – найсучасніший тип, що будується на основі цифрових сигнальних процесорів та силових ключів, використовується разом з асинхронними ТЕД, зазвичай реалізує алгоритми векторного керування швидкістю або моментом ТЕД.

1.7 Порівняльний аналіз типів використовуваних акумуляторних батарей

Свинцево-кислотний акумулятор – був винайдений фізиком Гастоном Планте в 1859 р., після винайдення ставши першим комерційним типом акумулятора.

Свинцево-кислотні акумулятори підрозділяються на:

- герметичні (або необслуговувані) – такий акумулятор містить в собі набагато менше електроліту, в порівнянні з залитим. Основна перевага даного типу – можливість рекомбінації кисню та водно назад в воду, що дозволяє йому бути незалежним від додавання води в електроліт ззовні. Рекомбінація відбувається при тиску 0,14 бар, для запобігання перевищення внутрішнього тиску такі батареї обладнуються запобіжними клапанами. Існує два основні види герметичних батарей: гелеві свинцево-кислотні батареї з регулювальним клапаном (Valve Regulated Lead Acid Battery або скорочено VRLA) в яких електроліт має гелеподібну консистенцію, і батареї з технологією AGM (Absorbent Glass Mat) в якій в якості сепаратора використовується пористий сорбент, що просочений електролітом;
- стартерні акумулятори – використовуються для запуску двигунів внутрішнього згорання, їхня конструкція оптимізована для забезпечення високого пускового струму та дуже низького внутрішнього опору, це досягається додаванням додаткових пластин для збільшення сумарної площі поверхні. Стартерний акумулятор працює в режимі підзарядки після запуску двигуна, тому його розряд, як правило, неглибокий; акцент робиться на потужності, а не на ємності;
- акумулятори глибокого розряду – використовуються для забезпечення безперервного живлення. Дані акумулятори

оптимізовані під максимальну ємність і достатньо велику кількість циклів розряд/заряду. Це досягається шляхом збільшення товщини свинцевих пластин. Хоча даний акумулятор і призначений для циклічного режиму роботи, проте повний розряд є шкідливим.

Стартерний акумулятор не може бути заміненим акумулятором глибокого розряду і навпаки.

Переваги:

- простота та дешевизна в виготовленні;
- найнижчий показник саморозряду серед всіх типів АКБ;
- висока питома потужність, можливість забезпечувати високі пускові струми;

Недоліки:

- низька питома енергоемність;
- повільний процес зарядки, 14 – 16 годин;
- необхідність зберігання в зарядженому стані для запобігання сульфатації;
- обмежене число циклів заряд/розряд, повний розряд зменшує час життя;
- залиті акумулятори потребують обслуговування;
- обмеження в монтажі залитих моделей;
- потребують спеціальної утилізації [7].

Нікель-кадмієвий акумулятор (NiCd) - була винайдений в 1899 році Вальдмаром Юнгнером, він мав переваги перед свинцево-кислотою батареєю, єдиною на той час, але був дорожчим через використовувані матеріали.

Розвиток цієї технології відбувався повільно, але в 1932 р. був зроблений значний прорив – в якості електроду почав використовуватися пористий матеріал з активною речовиною всередині. У 1947 р. була вирішена проблема поглинання газу, що дозволило створити герметичну нікель-

кадмієву батарею, що не потребує обслуговування.

Протягом багатьох років нікель-кадмієві батареї використовуються для живлення радіостанцій, медичного обладнання, електроінструменту. Наприкінці 1980-х років були розроблені акумулятори великої ємності.

Переваги:

- надійність, велика кількість циклів розряд/заряд при правильному обслуговуванні;
- можливість ультрашвидкої зарядки з мінімальним стресом для акумулятора;
- довгий строк зберігання, можливість зберігання в розрядженому стані;
- відсутність спеціальних вимог до зберігання та транспортування;
- сама низька вартість одного циклу роботи серед усіх акумуляторів;
- доступний в широкому діапазоні розмірів та варіантів виконання.

Недоліки:

- відносно низька питома ємність;
- має ефект «пам'яті» тобто при порушенні рекомендованого циклу зарядки акумулятор «пам'ятає», що його ємність не була використана повністю, тому при наступному розряді він віддає енергію лише до певного рівня;
- кадмій є токсичним матеріалом, тому необхідна спеціальна утилізація;
- високий саморозряд;
- низька напруга однієї комірки в 1,2 В [8].

Нікель-метал-гідридний акумулятор (NiMH) – дослідження нікель-метал-гідридної технології почалось в 1967 р., проте нестабільність метал-гідриду призупинила розробку. Нові сплави, винайдені в 1980 р., вирішили проблеми з безпекою та дозволили створити акумулятор з питомою енергоемністю на 40% більше ніж у стандартного нікель-кадмієвого. Однак

процес зарядки нікель-метал-гідридної батареї складніший, ніж нікель-кадмієвої, також нікель-метал-гідридна батарея має високий відсоток саморозряду (20% у перший день після зарядки та 10% щомісяця).

Переваги:

- на 30 – 40% більша ємність ніж у нікель-кадмієвих АКБ;
- менш схильні до ефекту «пам'яті»;
- прості вимоги до зберігання та транспортування;
- містять помірно токсичні матеріали;
- наявність нікелю робить утилізацію самоокупною;
- широкий діапазон робочих температур.

Недоліки:

- обмежений строк служби, глибокі розряди прискорюють його зменшення;
- складний алгоритм зарядки, чутливість до перезаряду;
- виділяють тепло під час швидкої зарядки або розрядки потужним споживачем;
- високий саморозряд [8].

Літій-іонний акумулятор – піонером розробки даного типу акумуляторів вважається Г. Н. Льюїс, який зробив перші дослідження в цій сфері в 1912 р. Але тільки в 1970-х технології дозволили створити першу комерційно виправдану літієву батарею. Спроби розробити акумуляторну батарею робилися в 1980-х, але через нестабільність металевого літію зазнали невдачі (метал-літієва батарея використовує літій в якості анода, а літій-іонна – графіт, активний матеріал знаходиться в ній на катоді).

Літій є найлегшим з усіх металів, має найбільший електрохімічний потенціал і забезпечує найбільшу питому енергоємність на одиницю ваги.

Акумуляторні батареї з літієвим анодом можуть забезпечувати надзвичайно високу щільність енергії, але в 1980-х було виявлено, що циклічний режим роботи призводить до утворення дендритів на аноді. Ці небажані утворення можуть проникати в сепаратор і приводити до короткого

замикання. При цьому буде швидко рости температура і літій розплавиться, що призведе до займання або навіть вибуху. Більшість батарей з металевим літієм були відкликані після випадків нанесення опіків людям.

Властива металічному літію нестійкість, особливо під час зарядки, призвела до пошуку неметалевих рішень з використанням іонів літію. Уже в 1991 році корпорація Sony випустила першу комерційну версію літій-іонного акумулятора, і зараз ця електрохімічна система є найбільш перспективною і швидкозростаючою на ринку. Хоча, в порівнянні з літій-металевою батареєю, літій-іонна має більш низьку питому енергоємність, проте вона безпечніше (за умови дотримання значень напруги і граничного струму).

Винайдення літій-кобальт-оксидної батареї, прообразу сучасної літій-іонної, належить Джону Б. Гуденафу.

У 1994 році собівартість літій-іонної комірки типорозміру 18650 (циліндр 65 мм довжиною і 18 мм в діаметрі) була 10 \$, а ємність становила 1100 мА·год. У 2001 році ціна знизилась до 3 \$, а ємність зросла до 1900 мА·год. Сьогодні ж ємність високоенергетичних моделей типорозміру 18650 доходить до 3000 мА·год, а витрати на виробництво знизилися ще більше.

Ключовим моментом високого показника питомої енергоємності є висока напруга комірки акумулятора – 3,60 В.

Переваги:

- висока питома енергоємність;
- довгий термін служби;
- даний тип акумулятора не потребує обслуговування;
- низький внутрішній опір;
- простий алгоритм і досить короткий час зарядки;
- низький саморозряд.

Недоліки:

- необхідність у вбудованій системі захисту;
- деградаційні процеси при високих значеннях струму і напруги;
- необхідність в додатковому обігріві при низьких температурах

зарядки;

- необхідність дотримання спеціальних правил транспортування батарей у великих кількостях [9].

Порівняння різних типів акумуляторних батарей наведено в табл. 1.1. [10].

Таблиця 1.1 – Порівняння різних типів акумуляторних батарей

Характеристика	Тип акумуляторної батареї					
	Свинцево-кислотна	Нікель-кадмієва (NiCd)	Нікель-метал-гідридна (NiMH)	Літій-іонна		
				Літій-кобальтовий акумулятор (LiCoO ₂)	Літій-марганцевий акумулятор (LiMn ₂ O ₄)	Літій-залізо-фосфатний акумулятор (LiFePO ₄)
Питома енергоємність	30 – 50	45 – 80	60 – 120	150 – 250	100 – 150	90 – 120
Внутрішній опір	Дуже низький	Дуже низький	Низький	Помірний	Низький	Дуже низький
Кількість циклів заряду/розряду (зі збереженням 80% ємності)	200 – 300	1000	300 – 500	500 – 1000	500 – 1000	1000 – 2000
Час заряду, годин	8 – 16	1 – 2	2 – 4	2 – 4	1 – 2	1 – 2
Стійкість до надлишкового перезаряду	Висока	Помірна	Низька	Низька, мають вбудований захист		
Саморозряд в місяць	5%	20%	30%	<5%, саморозряд спричинений вбудованим захистом складає 3%		
Напруга комірки (номінальна)	2 В	1,2 В	1,2 В	3,6 В	3,7 В	3,2 – 3,3 В
Напруга відсічки при заряді (вольт на комірку)	2,4 В	Система виявлення повного заряду	1,4 В	3,6 В		
Напруга відсічки при розрядці (вольт на комірку 1С)	1,75 В	1,0 В	1,0 – 1,1 В	2,5 В		
Піковий струм навантаження	5С	20С	5С	2С	>30С	>30С
Температура при заряді	від –20 до 50 °С	від 0 до 45 °С	від 0 до 45 °С			
Робоча температура	від –20 до 50 °С	від –20 до 65 °С	від –20 до 60 °С			
Технічне обслуговування	раз в 3 – 6 місяців, долив води	Повний цикл заряд/розряд кожні 90 днів	Необслуговувані			
Вимоги безпеки	Термічна стабільність	Термічна стабільність, запобіжник	Обов'язкова наявність системи захисту			
В використанні	Кінець 1800–х	1950	1990	1991	1996	1999
Токсичність	Дуже висока	Дуже висока	Низька			
Вартість	Низька	Помірна	Висока			

1.8 Суперконденсатори

Суперконденсатор, також відомий як ультраконденсатор або двошаровий конденсатор, відрізняється від звичайного конденсатора тим, що має дуже велику ємність. Конденсатор накопичує енергію за допомогою статичного заряду, на відміну від використання електрохімічних реакцій у акумуляторі.

Інженери General Electric експериментували з ранньою версією суперконденсатора ще в 1957 році, але ці розробки не викликали комерційного інтересу. У 1966 році Standart Oil знову випадково виявила ефект двошарового конденсатора при роботі з експериментальними конструкціями паливних елементів. Двошарова структура значно покращила здатність накопичувати енергію. Технологія знову не комерціалізувалась і знайшла своє застосування лише в 1990-х.

Розвиток суперконденсаторів тісно пов'язаний з технологіями електрохімічних джерел струму, саме звідти були запозичені спеціальні електроди і електроліт.

Напруга суперконденсатора обмежена на рівні 2,5 – 2,7 В. Підвищення напруги вище цього рівня можливо, але негативно позначається на тривалості терміну служби.

Питома енергоємність суперконденсатора коливається від 1 до 30 Вт·год/кг, що в 10 – 50 разів менше показника літій-іонного акумулятора. Ще одним недоліком є крива розряду. В той час як електрохімічні батареї забезпечують постійну напругу в корисному діапазоні потужності, напруга суперконденсаторів зменшується лінійно, що зменшує діапазон доступної потужності, рис. 1.1.

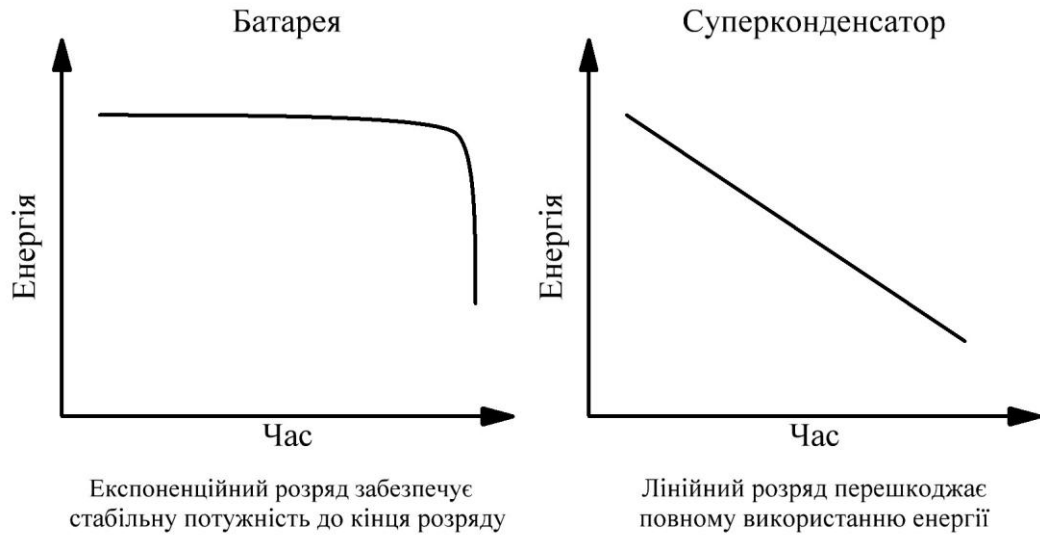


Рисунок 1.1 – Розрядні криві

На рис. 1.2 показана характеристика струму і напруги при заряді і розряді суперконденсатора. При зарядці напруга експоненційно збільшується, а струм експоненційно зменшується. Коли конденсатор повністю зарядився, струм знижується майже до нуля, внаслідок цього навіть відпадає необхідність використання системи детектування повного заряду. При розрядці напруга та струм також зменшується експоненційно.

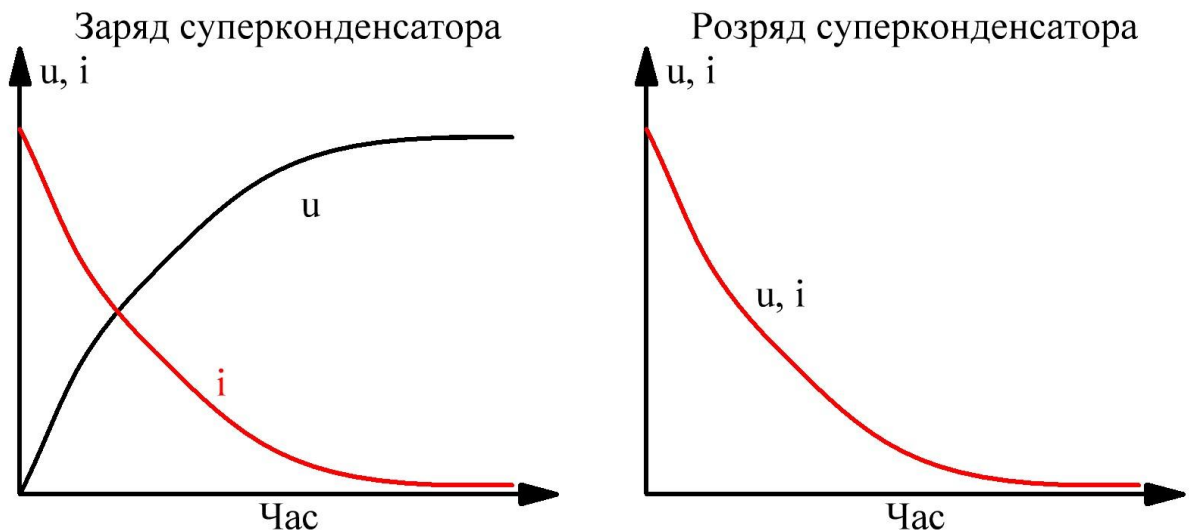


Рисунок 1.2 – Характеристика струму і напруги при заряді і розряді суперконденсатора

Таблиця 1.2 – Порівняння суперконденсатора та літій-іонного акумулятора

Характеристика	Суперконденсатор	Літій-іонний акумулятор
Час зарядки	1 – 10 секунд	10 – 60 хвилин
Кількість циклів	до 1 мільйона	500 і вище
Напруга комірки	від 2,3 до 2,75 В	3,2 – 3,6 В
Питома енергоемність (Вт·год/кг)	5	120 – 240
Питома потужність (Вт/кг)	до 10000	1000 – 3000
Час життя	10 – 15 років	5 – 10 років

Саморозряд суперконденсатора значно вище звичайних конденсаторів і трохи перевищує показник електрохімічної батареї. Причиною такого високого саморозряду, головним чином, виступають властивості органічного електроліту.

Суперконденсатори є ідеальним вибором у випадках, коли існує короткочасна потреба в електроживленні і існує можливість швидкої зарядки. Маховик (інерційний акумулятор) має подібні властивості, тому суперконденсатор може виступати альтернативою йому в певних процесах, наприклад, транспортній сфері. На відміну від цього, електрохімічні батареї оптимізовані для забезпечення тривалого живлення.

Переваги:

- практично необмежений життєвий цикл, може бути перезаряджаючи мільйони разів;
- висока питома потужність і низький внутрішній опір забезпечують високі струми навантаження;
- процес зарядки займає секунди та припиняється самостійно;
- безпечний, стійкий до неправильної експлуатації;
- відмінні показники роботи при низьких температурах.

Недоліки:

- низька питома енергоемність;

- лінійний характер зниження напруги не дозволяє використовувати всю накопичену енергію;
- високий саморозряд, вище, ніж у електричних батарей;
- низька напруга одного елемента, необхідність послідовного з'єднання і балансування систем;
- висока вартість одного вата енергії [11].

1.9 Основні українські та світові виробники тролейбусів та тягових електроприводів

Українські виробники тролейбусів [12]: корпорація «Богдан», відкрите акціонерне підприємство «Український інститут автобусо - тролейбусобудування», ПрАТ «Чернігівський автозавод», завод «Електронмаш», корпорація «Електрон», державне підприємство «Виробниче об'єднання Південний машинобудівний завод ім. О. М. Макарова».

Українські виробники електроприводів: підприємство "Техносервіспривод" [13], ПрАТ "Запорізький електроапаратний завод" [14], ДП «Завод «Електроважмаш» [15].

Зарубіжні виробники тролейбусів [16]: БАТ «ККХ «БКМ» (Білорусь), Van Hool (Бельгія), Neoplan (Німеччина), Tecnomasio Italiano–Brown–Boweri (Італія), New Flyer Industries Inc. (Канада), Solaris Bus & Coach S.A. (Польща), «Энгельсский завод электрического транспорта» (Росія), Carrosserie Hess AG (Швейцарія).

Зарубіжні виробники електроприводів [17]: ABB (Швейцарія), Siemens (Німеччина), General Electric (США), Toshiba (Німеччина), Eaton (Ірландія), CG Power and Industrial Solutions (Індія), Mitsubishi Electric (Японія), Kawasaki Heavy Industries (Японія), Voith (Німеччина), Bombardier Transportation (Канада), Alstom SA (Франція), Hyundai Rotem (Південна Корея).

1.10 Висновок до першого розділу

Метою дипломного проекту є розробка електромеханічної системи тролейбуса з автономним ходом. Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. На підставі графіку руху тролейбуса та його масо-габаритних показників побудувати діаграму тягового зусилля. Знаючи параметри кінематичної схеми тролейбуса виконати приведення тягового зусилля до валу приводного двигуна, отримати тахограму двигуна та навантажувальну діаграму двигуна;
2. З навантажувальної діаграми двигуна визначити еквівалентний момент, що дозволить здійснити вибір тягового двигуна;
3. Для обраного тягового двигуна розрахувати параметри динамічної моделі, необхідні для математичного моделювання системи керування;
4. Задавшись відстанню автономного руху, провести розрахунок тягової батареї на базі акумуляторів та суперконденсаторів, порівнявши масо-габаритні показники обох варіантів тягової батареї, обрати доцільний варіант;
5. Розробити алгоритм прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна, який забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту та модуля вектора потокозчеплення, асимптотичне полеорієнтування та асимптотичну розв'язку процесів керування моментом та модулем вектора потокозчеплення ротора;
6. Методом математичного моделювання перевірити працездатність алгоритму керування та досягнення цілей керування;
7. Розрахувати та обрати основні елементи силової частини перетворювача та розробити схему електричну принципову керуючого контролера, що в подальшому дозволить практично реалізувати тяговий електропривод.

2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Розрахунок параметрів електромеханічної системи будемо проводити для тролейбуса типу Богдан Т701.17. Його основні технічні характеристики зведено до табл. 2.1 [18].

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики тролейбуса

Порожня маса тролейбуса у спорядженому стані, кг	11860
Максимальна маса тролейбуса, кг	19000
Максимальна швидкість руху повністю завантаженого тролейбуса на горизонтальній прямолінійній ділянці дороги з сухим асфальтобетонним покриттям, км/год, не менше	55
Час розгону повністю завантаженого тролейбуса до швидкості 45 км/год, с, не більше	18
Довжина, мм	11960
Ширина, мм	2550
Висота, мм	3800
Ведуча вісь	AV-132/80
Виробник	ZF
Загальне передавальне число	9,871
Шини	безкамерні, низькопрофільні 275/70R22,5

2.1 Розрахунок потужності двигуна

Для визначення потужності двигуна перш за все треба знати графік руху транспортного засобу. Цей графік показує залежність швидкості транспортного засобу від часу, продиференціювавши його можна отримати залежність прискорення від часу. Рух тролейбуса між зупинками складається з наступних етапів: розгін, рух з усталеною швидкістю, гальмування до зупинки, посадка та висадка пасажирів (пауза), далі цей цикл повторюється.

Відповідно до [5] максимальна швидкість завантаженого тролейбуса на горизонтальній прямій ділянці шляху та номінальній напрузі контактної мережі – не менше ніж 55 км/год, час розгону завантаженого тролейбуса на

горизонтальній ділянці шляху до швидкості 45 км/год – не більше ніж 20 с. із максимальним пришвидшенням не більше ніж $1,2 \text{ м/с}^2$. Відповідно до цих вимог будуємо графік руху тролейбуса, який наведено на рис. 2.1.

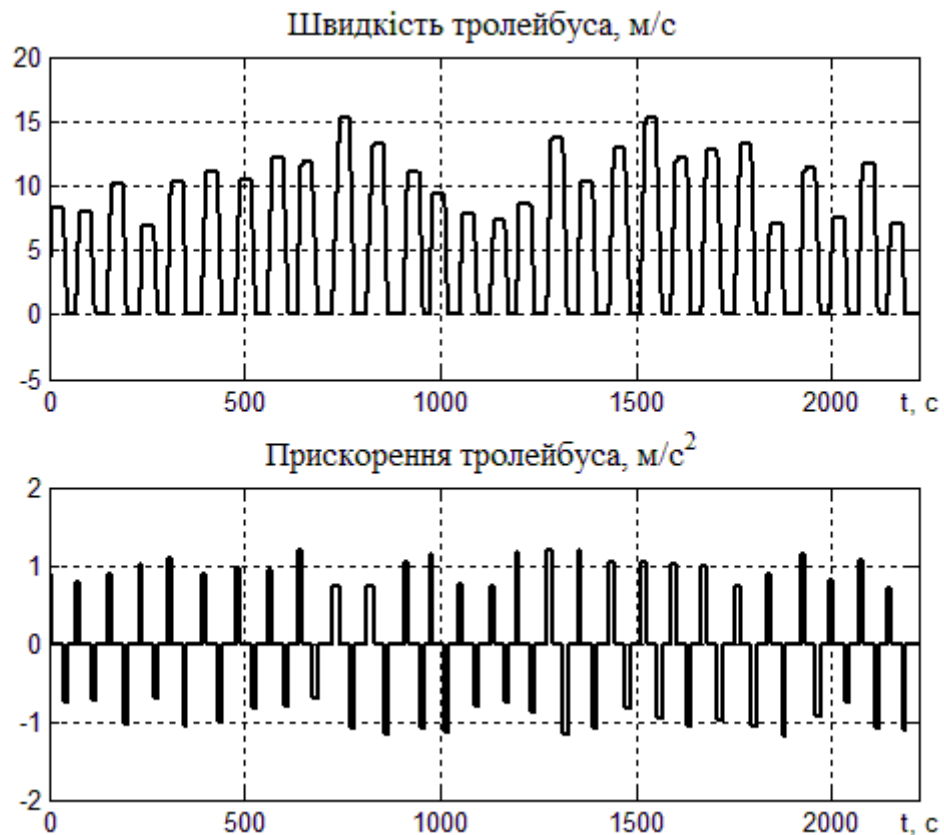


Рисунок 2.1 – Графік руху тролейбуса

Сумарний час руху тролейбуса склав 2219 с, протяжність маршруту – 11898 м, мінімальна швидкість руху – 7 м/с, максимальна швидкість руху – 15 м/с, максимальне прискорення обмежене на рівні $1,2 \text{ м/с}^2$.

Рівняння динаміки руху транспортного засобу записується як [19]:

$$m \frac{dV}{dt} = F_t - F_r - F_w - F_g, \quad (2.1)$$

де m – маса транспортного засобу, кг; V – швидкість транспортного засобу, м/с; F_t – сила тяги, Н; F_r – сила опору коченню транспортного засобу, Н; F_w – сила аеродинамічного опору, Н; F_g – сила опору підйому, Н.

З (2.1) виражаємо значення сили тяги:

$$F_t = F_r + F_w + F_g + ma, \quad (2.2)$$

де $a = \frac{dV}{dt}$ – лінійне прискорення транспортного засобу, м/с^2 .

Сила опору коченню розраховується за формулою:

$$F_r = m \cdot g \cdot f_r \cdot \cos(\alpha), \quad (2.3)$$

де g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; f_r – коефіцієнт опору коченню; α – кут нахилу дороги.

Коефіцієнт опору коченню є функцією швидкості руху транспортного засобу [20]:

$$f_r = f_0 (1 + 6,5 \cdot 10^{-4} \cdot V^2), \quad (2.4)$$

де f_0 – коефіцієнт опору коченню при русі транспортного засобу з малою швидкістю (менше 14 м/с), для цементобетонного і асфальтобетонного покриття в задовільному стані можна прийняти $f_0 = 0,02$ [20].

Сила аеродинамічного опору визначається як [19]:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A_f C_d V^2, \quad (2.5)$$

де ρ – густина повітря, для температури повітря $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$; A_f – лобова площа транспортного засобу, м^2 ; C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору, для автобусів та тролейбусів $C_d = 0,7$ [19].

Враховуючи, що лобова проекція тролейбуса являє собою прямокутник з відомою висотою та шириною, її площа обчислюється так:

$$A_f = h \cdot b, \quad (2.6)$$

де h – висота тролейбуса, м; b – ширина тролейбуса, м.

$$A_f = 3,8 \cdot 2,55 = 9,7 \text{ м}^2.$$

Сила опору підйому визначається як [19]:

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\alpha). \quad (2.7)$$

При розрахунку тягового зусилля тролейбуса для спрощення приймемо, що він рухається по рівній дорозі, тобто $\alpha = 0$, тоді вираз для F_t буде:

$$F_t = m \cdot g \cdot f_0 \left(1 + 6,5 \cdot 10^{-4} \cdot V^2\right) + \frac{1}{2} \rho A_f C_d V^2 + m a. \quad (2.8)$$

Для розрахунку (2.8) використано моделюючу програму створену в пакеті MATLAB/Simulink. Результат моделювання наведено на рис. 2.2.

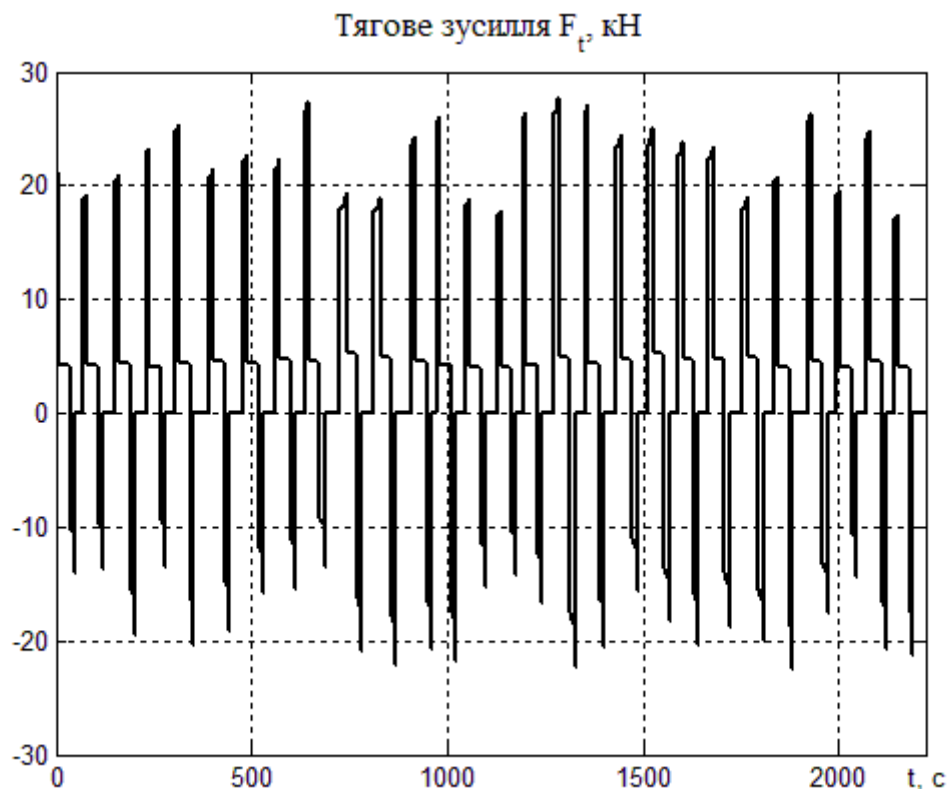


Рисунок 2.2 – Графік тягового зусилля

Для визначення потужності двигуна тягове зусилля F_t та швидкість транспортного засобу V необхідно привести до валу приводного двигуна,

тобто знайти момент двигуна M_d та його швидкість ω_d .

Тягове зусилля приводиться до двигуна за формулою:

$$M_d = F_t \frac{R_k}{i_r \cdot \eta_r}, \quad (2.9)$$

де R_k – радіус приводного колеса, м; i_r – передатне число редуктора; η_r – коефіцієнт корисної дії редуктора.

Визначити R_k можна знаючи тип шини тролейбуса (275/70R22,5), в позначенні шини: 275 – ширина профілю в міліметрах, 70 – процентне відношення висоти профілю шини до його ширини, R – радіальний тип шини, 22,5 – посадочний діаметр (діаметр внутрішнього кола) в дюймах [21].

Тоді радіус колеса визначається як:

$$R_k = \frac{0,7 \cdot 275}{1000} + \frac{22,5 \cdot 0,0254}{2} = 0,48 \text{ м.} \quad (2.10)$$

Коефіцієнт корисної дії редуктора можна приблизно розрахувати за формулою [20]:

$$\eta_r = 0,985^{K_1} \cdot 0,975^{K_2} \cdot 0,99^{K_3}, \quad (2.11)$$

де K_1, K_2, K_3 – відповідно число пар циліндричних і конічних шестерень і число карданів, які передають крутний момент від двигуна в даній передачі.

$$\eta_r = 0,985^2 \cdot 0,975^1 \cdot 0,99^1 = 0,94. \quad (2.12)$$

Швидкість руху транспортного засобу приводиться до двигуна за формулою:

$$\omega_d = V \frac{i_r}{R_k}. \quad (2.13)$$

На підставі (2.9) та (2.13) будується відповідно навантажувальна

діаграма двигуна та його тахограма, рис. 2.3.

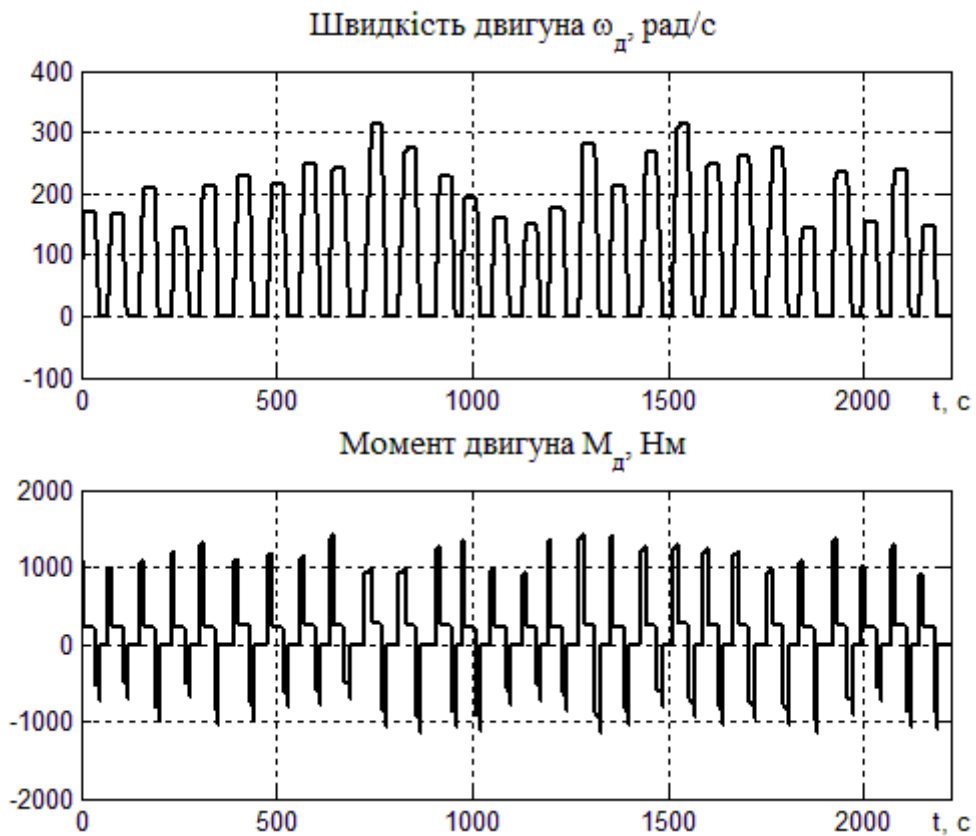


Рисунок 2.3 – Тахограма двигуна та навантажувальна діаграма двигуна

Маючи навантажувальну діаграму двигуна можемо визначити значення еквівалентного моменту за формулою [22]:

$$M_e = \sqrt{\frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} M_d^2(t) dt}, \quad (2.14)$$

де t_u – тривалість циклу, с; $M_d(t)$ – залежність моменту двигуна від часу.

Для обчислення в (2.14) визначеного інтегралу $\int_0^{t_u} M_d^2(t) dt$ від отриманої математичним моделюванням залежності $M_d = f(t)$ використаємо функцію `trapz()` пакету MATLAB, в результаті розрахунку (2.14) отримуємо значення еквівалентного моменту $M_e = 531$ Нм.

Обираємо двигун у якого $M_n \geq M_e$, де M_n – номінальний момент

двигуна, Нм. Обираємо двигун типу ДТА – 2У1, основні параметри якого наведено в табл. 2.2 [23], [24].

Таблиця 2.2 – Основні параметри двигуна ДТА – 2У1

Номінальна потужність на валу, кВт (S2 = 60 хв)	180
Номінальна лінійна напруга, В	407
Номінальний лінійний струм, А	305
Частота напруги живлення, Гц	50
Номінальна синхронна частота обертання, об/хв	1500
Максимальна синхронна частота обертання, об/хв	4000
Число пар полюсів	2
Номінальний момент на валу, Нм	1150
Коефіцієнт потужності	0,9
Коефіцієнт корисної дії, %	93
Число фаз обмотки статора	3
Схема з'єднання обмотки	зірка
Ковзання, %	1,5
Маса двигуна, кг	780
Індуктивність намагнічуючого контуру L_m , Гн	0,006621
Індуктивність розсіювання статора $L_{1\sigma}$, Гн	0,000308
Індуктивність розсіювання ротора $L_{2\sigma}$, Гн	0,000306
Активний опір статора R_1 , Ом	0,0196
Активний опір ротора R_2 , Ом	0,00859

2.2 Розрахунок параметрів динамічної моделі двигуна

Методика розрахунку параметрів динамічної моделі наведена в [25].

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_\mu + L_{1\sigma} = 0,006621 + 0,000308 = 0,006929 \text{ Гн}, \quad (2.15)$$

$$L_2 = L_\mu + L_{2\sigma} = 0,006621 + 0,000306 = 0,006927 \text{ Гн}. \quad (2.16)$$

Розрахунок параметрів моделі:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0,00859}{0,006927} = 1,2401, \quad (2.17)$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 L_2}\right) = 0,006929 \cdot \left(1 - \frac{0,006621^2}{0,006929 \cdot 0,006927}\right) = 6,005 \cdot 10^{-4}, \quad (2.18)$$

$$\beta = \frac{L_\mu}{L_2 \sigma} = \frac{0,006621}{0,006927 \cdot 6,005 \cdot 10^{-4}} = 1591,76, \quad (2.19)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_\mu \beta = \frac{0,0196}{6,005 \cdot 10^{-4}} + 1,2401 \cdot 0,006621 \cdot 1591,76 = 45,71. \quad (2.20)$$

2.3 Розрахунок акумуляторної батареї

Для розрахунку ємності акумуляторної батареї необхідно визначити енергію, яка буде спожита тролейбусом при автономному русі на задану відстань. Для визначення цієї енергії необхідно отримати залежність потужності, що споживається від батареї електроприводом, проінтегрувавши її можна визначити енергію, спожиту електроприводом за весь час автономного руху.

При розрахунку споживаної електроприводом потужності необхідно враховувати, що перетворювач в електроприводі тролейбуса може мати можливість рекуперації енергії при гальмуванні, а може і не мати її. Розрахунок акумуляторної батареї буде проведено для обох випадків, дальність автономного ходу прийнята 6 км.

Механічна потужність на валу двигуна розраховується як:

$$P_d(t) = M_d(t) \cdot \omega_d(t). \quad (2.21)$$

Потужність, що споживається від батареї в режимі тяги розраховується за формулою:

$$P_a = \frac{P_d(t)}{\eta_{\text{інв.}} \cdot \eta_d}, \quad (2.22)$$

де $\eta_{\text{інв.}}$ – ККД інвертора, приймаємо $\eta_{\text{інв.}} = 0,95$; η_d – ККД двигуна, $\eta_d = 0,93$ (див. табл. 2.2).

Потужність, що повертається до батареї в режимі рекуперативного

гальмування розраховується за формулою:

$$P_a = \eta_{\text{інв.}} \cdot \eta_d \cdot P_d(t). \quad (2.23)$$

Враховуючи (2.22) та (2.23), для споживаної електроприводом потужності остаточно отримаємо:

– з рекуперацією енергії:

$$P_{a1} = \begin{cases} P_d \geq 0, & \frac{P_d(t)}{\eta_{\text{інв.}} \cdot \eta_d} \\ P_d < 0, & \eta_{\text{інв.}} \cdot \eta_d \cdot P_d(t) \end{cases}, \quad (2.24)$$

– без рекуперації енергії:

$$P_{a2} = \begin{cases} P_d \geq 0, & \frac{P_d(t)}{\eta_{\text{інв.}} \cdot \eta_d} \\ P_d < 0, & 0 \end{cases}. \quad (2.25)$$

Результат математичного моделювання рівнянь (2.24), (2.25) наведено на рис. 2.4.

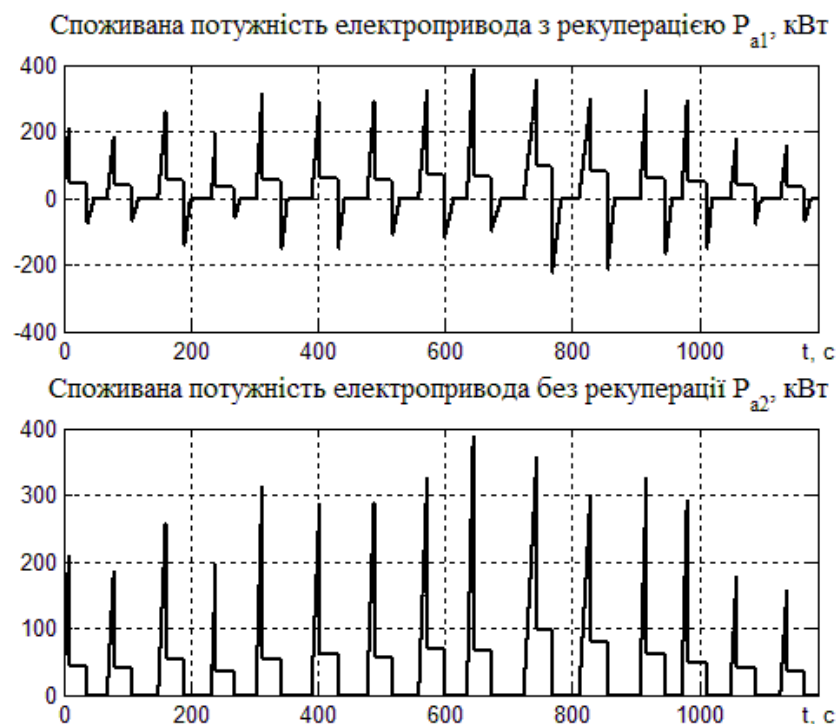


Рисунок 2.4 – Графіки залежностей споживаної потужності

Проінтегрувавши (2.24), (2.25) отримаємо залежність спожитої електроприводом енергії (рис. 2.5), ордината останньої точки графіка буде сумарною спожитою енергією за весь час автономного руху.

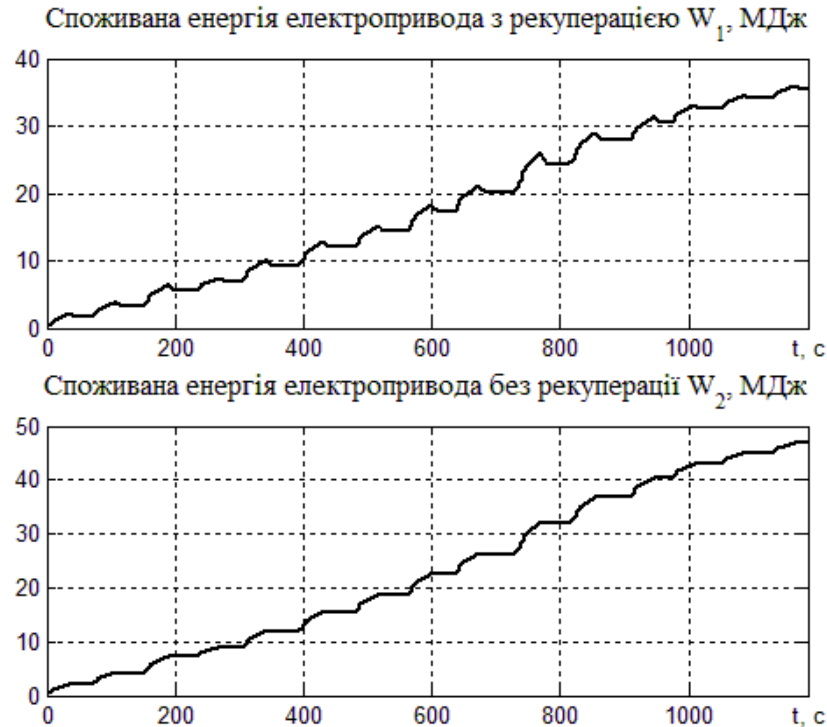


Рисунок 2.5 – Залежності спожитої електроприводом енергії

З рис. 2.5 визначаємо:

– для електроприводу з можливістю рекуперації:

$$W_1 = 35542690 \text{ Дж},$$

– для електроприводу без можливості рекуперації:

$$W_2 = 46769363 \text{ Дж}.$$

Енергія, запасена акумуляторною батареєю визначається як:

$$W_{\text{акб}} = U_{\text{акб}} \cdot I_{\text{h}\Sigma} \cdot 3600, \quad (2.26)$$

де $U_{\text{акб}}$ – напруга акумуляторної батареї (напруга батареї дорівнює напрузі ланки постійного струму $U_{\text{акб}} = U_{\text{dc}} = 540 \text{ В}$), В; $I_{\text{h}\Sigma}$ – сумарна ємність акумуляторної батареї, А·год.

З (2.26) визначаємо необхідну ємність акумуляторної батареї:

$$I_{h\Sigma} = \frac{W_{\text{акб}}}{U_{\text{акб}} \cdot 3600}. \quad (2.27)$$

Знаходимо необхідну сумарну ємність батареї для обох варіантів електроприводу, підставляючи в (2.27) значення енергії W_1, W_2 .

– для електроприводу з можливістю рекуперації:

$$I_{h\Sigma 1} = \frac{35542690}{540 \cdot 3600} = 18 \text{ А} \cdot \text{год},$$

– для електроприводу без можливості рекуперації:

$$I_{h\Sigma 2} = \frac{46769363}{540 \cdot 3600} = 24 \text{ А} \cdot \text{год}.$$

Так як акумуляторна батарея складається з окремих комірок, необхідно знайти число послідовно з'єднаних комірок для отримання необхідної напруги батареї, а також кількість паралельно з'єднаних гілок для отримання необхідної ємності. Результати даних розрахунків будуть округлені до найближчого більшого цілого числа.

Число послідовно з'єднаних комірок визначається за формулою:

$$N_{\text{series}} = \frac{U_{\text{акб}}}{U_{\text{cell}}}, \quad (2.28)$$

де U_{cell} – номінальна напруга однієї комірки, В.

Для обох варіантів електроприводу число послідовно з'єднаних комірок буде однаковим:

$$N_{\text{series}} = \frac{540}{3,2} = 168,75 \approx 169 \text{ шт.}$$

Число паралельно з'єднаних гілок визначається за формулою:

$$N_{\text{parallel}} = \frac{I_{h\Sigma}}{I_{\text{hcell}}}, \quad (2.29)$$

де I_{hcell} – номінальна ємність однієї комірки, А·год.

Для тягової акумуляторної батареї будуть використовуватися комірки LiFePO_4 , з $U_{\text{cell}} = 3,2 \text{ В}$.

Так як на ринку представлені комірки з різною ємністю та масою, то для остаточного вибору конкретного типу комірки буде використовуватися критерій найменшої маси тягової батареї (зібраної з даного типу комірки).

Для цього буде проаналізована кількість паралельних гілок, що необхідна для досягнення потрібної ємності тягової батареї при варіації ємності однієї комірки, далі буде визначена сумарна кількість комірок та маса зібраного тягового акумулятора в кожному з випадків.

Потім буде визначена оптимальна ємність однієї комірки для досягнення найменшої маси тягового акумулятора.

Маса тягової батареї визначається як:

$$m_{\text{batt}} = m_{\text{cell}} \cdot N_{\text{series}} \cdot N_{\text{parallel}}, \quad (2.30)$$

де m_{cell} – маса однієї комірки, кг.

Дані для аналізу взяті з [26], [27] залежності маси тягової батареї від ємності однієї комірки наведено на рис. 2.6.

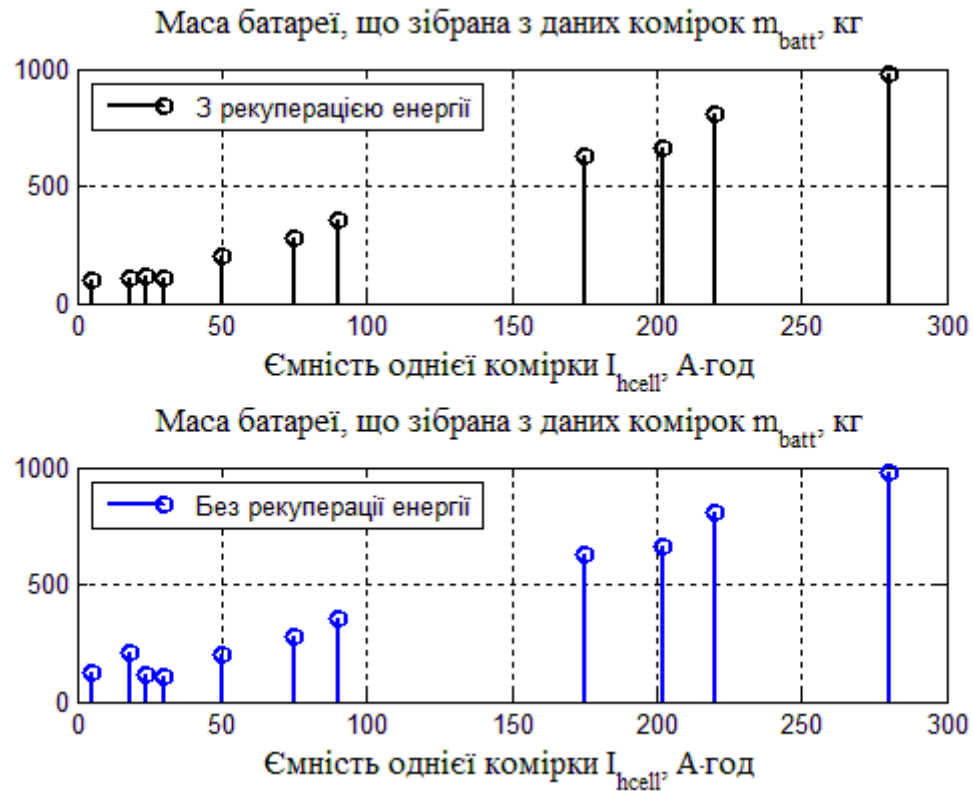


Рисунок 2.6 – Залежності маси тягової батареї від ємності однієї комірки

З рис. 2.6 визначено, що для електроприводу з рекуперацією енергії оптимальною ємністю однієї комірки буде 5,5 А·год; для електроприводу без рекуперацією енергії – 30 А·год.

Визначаємо число паралельно з'єднаних гілок:

– для електроприводу з можливістю рекуперації:

$$N_{parallel1} = \frac{I_{h\Sigma1}}{I_{hcell1}} = \frac{18}{5,5} = 3,27 \approx 4,$$

– для електроприводу без можливості рекуперації:

$$N_{parallel2} = \frac{I_{h\Sigma2}}{I_{hcell2}} = \frac{24}{30} = 0,8 \approx 1.$$

Визначаю масу акумуляторної батареї для обох випадків електроприводу:

– для електроприводу з можливістю рекуперації:

$$m_{\text{batt}1} = 0,15 \cdot 169 \cdot 4 = 101 \text{ кг},$$

– для електроприводу без можливості рекуперації:

$$m_{\text{batt}2} = 0,63 \cdot 169 \cdot 1 = 106 \text{ кг}.$$

2.4 Розрахунок батареї суперконденсаторів

Враховуючи розрядну криву суперконденсатора, задамося максимальною та мінімальною напругами робочої ділянки на якій він буде віддавати накопичену енергію, приймемо $U_{\text{cap.max}} = 700 \text{ В}$, $U_{\text{cap.min}} = 350$.

Величину енергії, що накопичена конденсатором можна розрахувати за формулою:

$$W_{\text{cap}} = C \frac{U_{\text{cap}}^2}{2}, \quad (2.31)$$

де C – ємність конденсатора, Ф; U_{cap} – напруга, до якої конденсатор був заряджений, В.

Величина енергії, що запасена в батареї суперконденсаторів розраховується наступним чином:

$$W_{\text{cap.batt}} = \frac{C_{\text{cap.batt}}}{2} (U_{\text{cap.max}}^2 - U_{\text{cap.min}}^2). \quad (2.32)$$

де $C_{\text{cap.batt}}$ – сумарна ємність батареї суперконденсаторів, Ф.

З (2.32) знаходимо необхідну ємність батареї суперконденсаторів:

$$C_{\text{cap.batt}} = \frac{2W_{\text{cap.batt}}}{(U_{\text{cap.max}}^2 - U_{\text{cap.min}}^2)}. \quad (2.33)$$

Знаходимо необхідну сумарну ємність батареї суперконденсаторів для обох варіантів електроприводу, підставляючи в (2.33) значення енергії W_1, W_2 .

– для електроприводу з рекуперацією енергії:

$$C_{\text{cap.batt1}} = \frac{2W_1}{(700^2 - 350^2)} = \frac{2 \cdot 35542690}{(700^2 - 350^2)} = 193 \text{ Ф},$$

– для електроприводу без рекуперації енергії:

$$C_{\text{cap.batt2}} = \frac{2W_2}{(700^2 - 350^2)} = \frac{2 \cdot 46769363}{(700^2 - 350^2)} = 255 \text{ Ф}.$$

Кількість суперконденсаторів, що потрібно з'єднати послідовно для досягнення необхідної напруги батареї визначається за формулою:

$$N_{\text{cap.series}} = \frac{U_{\text{cap.max}}}{U_{\text{cap.cell}}}, \quad (2.34)$$

де $U_{\text{cap.cell}}$ – номінальна напруга одного суперконденсатора, В.

$$N_{\text{cap.series}} = \frac{700}{2,7} = 259,26 \approx 260 \text{ шт.}$$

Прийmemo в якості однієї комірки суперконденсатор типу ВСАР 3000 Р270 К04/К05 з номінальною ємністю 3000 Ф та номінальною напругою 2,7 В [29].

При послідовному з'єднанні конденсаторів з однаковою ємністю еквівалентна ємність гілки визначається за формулою:

$$C_{\text{екв}} = \frac{C}{n}, \quad (2.35)$$

де C – ємність одного конденсатора, Ф; n – кількість послідовно з'єднаних конденсаторів.

В нашому випадку:

$$C_{\text{екв}} = \frac{3000}{260} = 11,5 \text{ Ф.}$$

Кількість паралельних гілок, що потрібні для досягнення необхідної ємності батареї визначається за формулою:

$$N_{\text{cap.parallel}} = \frac{C_{\text{cap.batt}}}{C_{\text{екв}}}. \quad (2.36)$$

– для електроприводу з рекуперацією енергії:

$$N_{\text{cap.parallel1}} = \frac{193}{11,5} = 16,78 \approx 17 \text{ шт.},$$

– для електроприводу без рекуперації енергії:

$$N_{\text{cap.parallel2}} = \frac{255}{11,5} = 22,17 \approx 22 \text{ шт.}$$

Сумарна маса батареї суперконденсаторів визначається за формулою:

$$m_{\text{cap.batt}} = m_{\text{cap}} \cdot N_{\text{cap.series}} \cdot N_{\text{cap.parallel}}, \quad (2.37)$$

де m_{cap} – маса одного суперконденсатора, кг $m_{\text{cap}} = 0,51 \text{ кг}$ [29].

– для електроприводу з рекуперацією енергії:

$$m_{\text{cap.batt1}} = 0,51 \cdot 260 \cdot 17 = 2254 \text{ кг.},$$

– для електроприводу без рекуперації енергії:

$$m_{\text{cap.batt1}} = 0,51 \cdot 260 \cdot 22 = 2917 \text{ кг.}$$

Порівняння тягової акумуляторної батареї на базі літій-іонних акумуляторів та на базі суперконденсаторів наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняння варіантів виконання тягової батареї [27, 29]

Параметр	Електропривод з можливістю рекуперації енергії		Електропривод без можливості рекуперації енергії	
	Літій-іонна батарея	Батарея суперконденсаторів	Літій-іонна батарея	Батарея суперконденсаторів
Маса комірки, кг	0,15	0,51	0,63	0,51
Висота комірки, мм	32,5	138	142	138
Ширина комірки, мм	32,5	60,4	22	60,4
Довжина комірки, мм	70	–	100	–
Робоча температура комірки, °С	–20...+60	–40...+65	–20...+60	–40...+65
Ємність комірки	5,5 А·год	3000 Ф	30 А·год	3000 Ф
Номінальна напруга комірки, В	3,2	2,7	3,2	2,7
Маса тягової батареї, кг	101	2254	106	2917
Реально отримана напруга тягової батареї, В	540	702	540	702
Реально отримана ємність тягової батареї, А·год	22	19	30	25
Реально отриманий запас енергії тягової батареї, кВт·год	12	13	16	17
Вартість, тис. грн	73	7397	123,4	9572

3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ПРЯМОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

3.1 Струмове керування моментом при ідеальному полеорієнтуванні

Двофазна модель симетричного АД, записана в довільній системі координат $(d - q)$, має вигляд:

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta} &= \omega \\
 \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) \\
 M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}) \\
 \dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \omega \psi_{2q} + \frac{1}{\sigma} u_{1d} \\
 \dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + \frac{1}{\sigma} u_{1q} \\
 \dot{\psi}_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2q} + \alpha L_m i_{1d} \\
 \dot{\psi}_{2q} &= -\alpha \psi_{2q} - (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q} \\
 \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0, \varepsilon_0(0) = 0,
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

де ω_0 – кутова швидкість довільної системи координат $(d - q)$; ε_0 – кутове положення рухомої системи координат $(d - q)$ відносно нерухомої системи координат статора $(a - b)$.

Координатні перетворення задаються виразами:

$$\begin{aligned}
 x^{(d-q)} &= e^{-J\varepsilon_0} x^{(a-b)}, \\
 x^{(a-b)} &= e^{J\varepsilon_0} x^{(d-q)}, \\
 e^{-J\varepsilon_0} &= \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_0) & \sin(\varepsilon_0) \\ -\sin(\varepsilon_0) & \cos(\varepsilon_0) \end{bmatrix}, \\
 e^{J\varepsilon_0} &= \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_0) & -\sin(\varepsilon_0) \\ \sin(\varepsilon_0) & \cos(\varepsilon_0) \end{bmatrix},
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

де $x^{(y-z)}$ – визначає двомірні вектори на потокозчеплень, струмів та напруг.

В моделі АД (3.1) можна виміряти вектор змінних $y = (\theta, \omega, i_{ld}, i_{lq})^T$, в той час як потокозчеплення ротора не вимірюється. Задача векторного керування – керувати вимірюваним вектором y .

Вихідні змінні, що мають відпрацьовуватися, визначаються як нелінійні функції часу:

$$y_1 = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2d} i_{lq} - \psi_{2q} i_{ld}) \\ \sqrt{\psi_{2d}^2 + \psi_{2q}^2} \end{bmatrix} \triangleq \begin{pmatrix} M \\ |\Psi_2| \end{pmatrix}. \quad (3.3)$$

Якщо розглядати струми i_{ld}, i_{lq} в (3.1) як керуючі впливи (струмове керування) то модель АД спрощується:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - M_c) \\ M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2d} i_{lq} - \psi_{2q} i_{ld}) \\ \dot{\psi}_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2q} + \alpha L_m i_{ld} \\ \dot{\psi}_{2q} &= -\alpha \psi_{2q} - (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2d} + \alpha L_m i_{lq} \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0, \varepsilon_0(0) = 0. \end{aligned} \quad (3.4)$$

При реалізації векторного керування з орієнтацією за полем АД в ідеальному випадку, коли кутове положення вектора потокозчеплення ротора ε_ψ вважається відомим, умова $\varepsilon_0 = \varepsilon_\psi$ в (3.2) гарантує, що вісь d системи координат $(d - q)$ співпадає з напрямком вектора потокозчеплення ротора, тобто:

$$\begin{aligned} \psi_{2d} &= |\Psi_2|, \\ \psi_{2q} &\equiv 0. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Умова (3.5) досягається при $\varepsilon_0 = \varepsilon_\psi$ в (3.2) і визначає ідеальну орієнтацію за вектором потокозчеплення ротора, а система координат $(d - q)$ називається ідеально орієнтованою за вектором потокозчеплення ротора.

За цих умов з (3.4) отримаємо перетворені рівняння динаміки АД в системі координат $(d - q)$, яка орієнтована за вектором потокозчеплення ротора:

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) \quad ,\end{aligned}\tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} |\Psi_2| i_{lq} \\ |\dot{\Psi}_2| &= -\alpha |\Psi_2| + \alpha L_m i_{ld} \quad ,\end{aligned}\tag{3.7}$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = p_n \omega + \alpha L_m \frac{i_{lq}}{|\Psi_2|} .\tag{3.8}$$

Система рівнянь (3.6) описує електромеханічну підсистему АД, а рівняння (3.7), (3.8) визначають динаміку електромагнітної підсистеми АД.

При цьому рівняння (3.6) співпадають з рівняннями двигуна постійного струму з електромагнітним збудженням. Рівняння (3.7), що описує динамічну поведінку модуля потокозчеплення ротора, є лінійною системою першого порядку, яка повністю розв'язана відносно електромеханічної підсистеми.

Рівнянням (3.8) визначається динаміка кутового положення вектора потокозчеплення ротора і воно є відомим рівнянням для синхронної швидкості поля АД згідно

$$\omega_0 = p_n \omega + \omega_2 ,$$

де $\omega_2 = \alpha L_m \frac{i_{lq}}{|\Psi_2|}$ – частота ковзання.

Перетворення координат (3.2) при $\varepsilon_0 = \varepsilon_\psi$ має вигляд:

$$\begin{pmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{pmatrix} = e^{-j\varepsilon_0} \begin{pmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \end{pmatrix}, e^{-j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_0) & \sin(\varepsilon_0) \\ -\sin(\varepsilon_0) & \cos(\varepsilon_0) \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \cos(\varepsilon_0) &= \frac{\psi_{2a}}{|\Psi_2|}, \\ \sin(\varepsilon_0) &= \frac{\psi_{2b}}{|\Psi_2|}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

За рахунок цього перетворення здійснюється декомпозиція початкової моделі АД на дві підсистеми:

- електромеханічну, що задана рівнянням (3.6);
- електромагнітну, що задана рівняннями (3.7), (3.8) з лінійною динамічною поведінкою модуля вектора потокозчеплення ротора.

Частково лінеаризована модель АД, яка задана рівняннями (3.6) – (3.8) має наступні властивості:

- керування моментом здійснюється за допомогою формування моментної складової струму статора i_{lq} ;
- регулювання модуля вектора потокозчеплення $|\Psi_2|$ здійснюється за допомогою формування поле утворюючої компоненти струму статора i_{ld} .
- кутове положення вектора потокозчеплення ротора $\varepsilon_0 = \varepsilon_\Psi$ є координатою, що задається рівнянням (3.8);
- у випадку АД орієнтація здійснюється відносно вектора потокозчеплення ротора Ψ_2 , кутове положення якого в просторі визначається згідно (3.8). Це вимагає для реалізації ідеалізованого керування вимірювання координат вектора потокозчеплення ротора відповідно до (3.10).

В реальному АД координати потокозчеплення ротора не вимірюються, тому даний алгоритм є ідеалізованим. В реальних системах керування замість вимірних координат потокозчеплення ротора використовуються їх оцінені значення, отримані за допомогою спостерігача.

Визначимо задане значення модуля потокозчеплення ротора $\psi^* > 0$, як обмежену функцію з відомою першою похідною за часом. Згідно задачі відпрацювання моменту необхідно сформувати вектор керуючих дій $(i_{1d}, i_{1q})^T$ в (3.6), (3.7), який гарантує асимптотичність відпрацювання регульованих координат в (3.3), забезпечуючи умови:

$$\begin{aligned}\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} &= 0, \\ \tilde{\psi} &= |\psi_2| - \psi^*.\end{aligned}\tag{3.11}$$

У формі похибок відпрацювання рівняння (3.6), (3.7) запишуться:

$$M^* + \tilde{M} = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \psi^* i_{1q} + \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \tilde{\psi} i_{1q},\tag{3.12}$$

$$\dot{\tilde{\psi}} = -\alpha \tilde{\psi} - \alpha \psi^* + \alpha L_m i_{1d} - \dot{\psi}^*.\tag{3.13}$$

З (3.12) сконструюємо алгоритм керування моментом у вигляді:

$$i_{1q} = \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \right)^{-1} \frac{M^*}{\psi^*}.\tag{3.14}$$

За умов припущення про вимірювання вектора потокозчеплення ротора для (3.13) сконструюємо такий регулятор модуля потокозчеплення:

$$\begin{aligned}i_{1d} &= \frac{1}{\alpha L_m} \left(\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_{\psi 1} \tilde{\psi} - x_{\psi} \right), \\ \dot{x}_{\psi} &= k_{\psi i} \tilde{\psi}\end{aligned}\tag{3.15}$$

де $(k_{\psi 1}, k_{\psi i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної і інтегральної дії регулятора модуля потокозчеплення ротора.

Підставивши алгоритми відпрацювання моменту (3.14) та модуля потокозчеплення ротора (3.15), в (3.12), (3.13), отримаємо рівняння динаміки

похибок відпрацювання:

– моменту АД:

$$\tilde{M} = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\tilde{\psi} i_{1q}), \quad (3.16)$$

– модуля потокозчеплення:

$$\begin{aligned} \dot{x}_\psi &= k_{\psi i} \tilde{\psi}, \\ \dot{\tilde{\psi}} &= -(\alpha + k_{\psi 1}) \tilde{\psi} - x_\psi, \end{aligned} \quad (3.17)$$

Лінійна система (3.17) є асимптотично стійкою для всіх $(k_{\psi 1}, k_{\psi i}) > 0$.

Дві підсистеми відпрацювання координат в електромеханічній підсистемі (3.16) та електромагнітній (3.17) є лінійними, повністю розв'язаними і асимптотично стійкими, тобто:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{M}, x_\psi, \tilde{\psi}) = 0$$

з експоненційним рівнем сходимості. Тобто, задача відпрацювання моменту та модуля потокозчеплення АД за умов вимірювання вектора потокозчеплення ротора (ідеальної орієнтації за вектором потокозчеплення ротора) забезпечується глобально.

Алгоритм відпрацювання моменту та потокозчеплення ротора АД при ідеальній орієнтації за вектором потокозчеплення ротора задається рівняннями (3.14), (3.15). Керуючі струми визначаються виразом:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix} &= e^{J_{\varepsilon_0}} \begin{pmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{pmatrix}, e^{J_{\varepsilon_0}} = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_0) & -\sin(\varepsilon_0) \\ \sin(\varepsilon_0) & \cos(\varepsilon_0) \end{bmatrix}, \\ \cos(\varepsilon_0) &= \frac{\Psi_{2a}}{|\Psi_2|}, \sin(\varepsilon_0) = \frac{\Psi_{2b}}{|\Psi_2|}, |\Psi_2| > 0. \end{aligned}$$

3.2 Пряме векторне керування моментом АД на основі принципу розділення

Базуючись на розглянутій концепції ідеальної орієнтації за полем машини необхідно для моделі АД, що задана рівняннями (3.1), синтезувати керуючі дії $\mathbf{u}_1^{(d-q)} = (u_{1d}, u_{1q})^T$ на основі вимірюваного вектора змінних стану $\mathbf{y} = (\theta, \omega, i_{1d}, i_{1q})^T$, які гарантують асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту M^* та модуля вектора потокозчеплення ротора $\psi^* > 0$, тобто забезпечити:

$$\begin{aligned}\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} &= 0, \\ \tilde{\psi} &= |\Psi_2| - \psi^*,\end{aligned}$$

при додатковій умові досягнення асимптотичної орієнтації за вектором потокозчеплення ротора:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_{2q} = 0. \quad (3.18)$$

Згідно з принципом розділення невимірювані змінні (ψ_{2a}, ψ_{2b}) в алгоритмі керування (3.9), (3.10), (3.15) замінюються на оцінені значення $(\hat{\psi}_{2a}, \hat{\psi}_{2b})$ які отримують за допомогою спостерігача із властивостями експоненційної стійкості, тобто:

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} \dot{i}_{1d} \\ \dot{i}_{1q} \end{pmatrix} &= e^{-J\varepsilon_0} \begin{pmatrix} \dot{i}_{1a} \\ \dot{i}_{1b} \end{pmatrix}, e^{-J\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_0) & \sin(\varepsilon_0) \\ -\sin(\varepsilon_0) & \cos(\varepsilon_0) \end{bmatrix}, \\ \cos(\varepsilon_0) &= \frac{\hat{\psi}_{2a}}{|\hat{\Psi}_2|}, \sin(\varepsilon_0) = \frac{\hat{\psi}_{2b}}{|\hat{\Psi}_2|}.\end{aligned} \quad (3.19)$$

Використаємо спостерігач вектора потокозчеплення ротора в формі рівнянь роторного кола, записаних в стаціонарній системі координат статора (a – b) (див. рівняння (3.1) з $\omega_0 = 0$) у вигляді:

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

Припустимо, що зовнішні сигнали ω, i_{1a}, i_{1b} в (3.20) є обмеженими, тоді розімкнений спостерігач для (3.20) запишеться:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\psi}}_{2a} &= -\alpha\hat{\psi}_{2a} - p_n \omega \hat{\psi}_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\ \dot{\hat{\psi}}_{2b} &= -\alpha\hat{\psi}_{2b} + p_n \omega \hat{\psi}_{2a} + \alpha L_m i_{1b}.\end{aligned}\quad (3.21)$$

Визначимо похибки оцінювання потокозчеплень як:

$$\begin{aligned}\tilde{\psi}_{2a} &= \psi_{2a} - \hat{\psi}_{2a}, \\ \tilde{\psi}_{2b} &= \psi_{2b} - \hat{\psi}_{2b}.\end{aligned}\quad (3.22)$$

З врахуванням (3.20), (3.21) їхня динаміка набуває вигляду:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_{2a} &= -\alpha\tilde{\psi}_{2a} - p_n \omega \tilde{\psi}_{2b}, \\ \dot{\tilde{\psi}}_{2b} &= -\alpha\tilde{\psi}_{2b} - p_n \omega \tilde{\psi}_{2a}.\end{aligned}\quad (3.23)$$

Для аналізу стійкості (3.23) розглянемо наступну функцію Ляпунова:

$$V = \frac{1}{2}(\tilde{\psi}_{2a}^2 + \tilde{\psi}_{2b}^2) > 0, \quad (3.24)$$

похідна якої вздовж траєкторій (3.23) дорівнює:

$$\dot{V} = -\alpha(\tilde{\psi}_{2a}^2 + \tilde{\psi}_{2b}^2) = -2\alpha V < 0. \quad (3.25)$$

З (3.24), (3.25) безпосереднє використання теореми Ляпунова про стійкість свідчить, що положення рівноваги $(\tilde{\psi}_{2a}, \tilde{\psi}_{2b})^T = 0$ є глобально експоненційно стійким. Формула (3.25) дає більш строгу оцінку у вигляді:

$$e_\psi \leq e_\psi(0)e^{-\alpha t},$$

$$\text{де } e_\psi = \sqrt{(\tilde{\psi}_{2a}^2 + \tilde{\psi}_{2b}^2)}.$$

Тобто модуль похибок оцінювання $e_\psi(t)$ експоненційно затухає в нуль зі швидкістю, що визначається зворотною сталою часу роторного кола АД $T_r = \alpha^{-1}$.

Застосуємо до моделі (3.1) керуючі дії у вигляді

$$\begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix} = e^{J\varepsilon_0} \left[\sigma \begin{pmatrix} -\omega_0 i_{1q} + v_d \\ \omega_0 i_{1d} + v_q \end{pmatrix} \right],$$

при цьому модель перепишеться:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) \\ M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}) \\ \dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \omega \psi_{2q} + v_d \\ \dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + v_q \\ \dot{\psi}_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2q} + \alpha L_m i_{1d} \\ \dot{\psi}_{2q} &= -\alpha \psi_{2q} - (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q}. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Визначимо похибки оцінювання потокозчеплень в системі координат $(d - q)$:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_{2d} &= \psi_{2d} - |\hat{\psi}_2|, \\ \tilde{\psi}_{2q} &= \psi_{2q}. \end{aligned} \quad (3.27)$$

З останніх двох рівнянь (3.26) отримаємо динаміку похибок оцінювання потокозчеплення в системі координат $(d - q)$:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\psi}}_{2d} &= -\alpha \tilde{\psi}_{2d} + \omega_2 \tilde{\psi}_{2q}, \\ \dot{\tilde{\psi}}_{2q} &= -\alpha \tilde{\psi}_{2q} - \omega_2 \tilde{\psi}_{2d}. \end{aligned} \quad (3.28)$$

З (3.28) маємо:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_{2d} = 0,$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_{2q} = 0.$$

З (3.26) електромеханічна підсистема:

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - M_c) \\ M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2d} i_{1q} - \tilde{\psi}_{2q} i_{1d}) \\ \dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} + \alpha \beta \tilde{\psi}_{2q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + v_q.\end{aligned}\tag{3.29}$$

З (3.26) електромагнітна підсистема:

$$\begin{aligned}|\dot{\hat{\psi}}_2| &= -\alpha \hat{\psi}_2 + \alpha L_m i_{1d} \\ \dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2q} + v_d \\ \dot{\tilde{\psi}}_{2d} &= -\alpha \tilde{\psi}_{2d} + \omega_2 \tilde{\psi}_{2q} \\ \dot{\tilde{\psi}}_{2q} &= -\alpha \tilde{\psi}_{2q} - \omega_2 \tilde{\psi}_{2d} \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = p_n \omega + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{|\hat{\psi}_2|}.\end{aligned}\tag{3.30}$$

Визначимо похибки відпрацювання струмів статора у вигляді:

$$\begin{aligned}\tilde{i}_{1d} &= i_{1d} - i_{1d}^*, \\ \tilde{i}_{1q} &= i_{1q} - i_{1q}^*.\end{aligned}\tag{3.31}$$

З урахуванням (3.31) рівняння (3.29), (3.30) у формі похибок відпрацювання запишуться:

$$\begin{aligned}\tilde{M} &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \psi^* \tilde{i}_{1q} + \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \tilde{\psi}_{2d} (\tilde{i}_{1q} + i_{1q}^*) - \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \tilde{\psi}_{2q} (\tilde{i}_{1d} + i_{1d}^*), \\ \dot{\tilde{i}}_{1q} &= -\gamma \tilde{i}_{1q} + \alpha \beta \tilde{\psi}_{2q} - \beta p_n \omega (|\hat{\psi}_2| + \tilde{\psi}_{2d}) - \gamma i_{1q}^* - \dot{i}_{1q}^* + v_q,\end{aligned}\tag{3.32}$$

$$\begin{aligned}\ddot{\tilde{\psi}} &= -\alpha\tilde{\psi} + \alpha L_m \ddot{i}_{1d} - \alpha\dot{\psi}^* + \alpha L_m \dot{i}_{1d}^* - \dot{\psi}^*, \\ \dot{i}_{1d} &= -\gamma\tilde{i}_{1d} + \alpha\beta(|\hat{\psi}_2| + \tilde{\psi}_{2d}) - \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2q} - \gamma i_{1d}^* - \dot{i}_{1d}^* + v_d,\end{aligned}\quad (3.33)$$

де $\tilde{\psi} = |\hat{\psi}_2| - \psi^*$, а i_{1q}^* визначено в (3.14) у вигляді:

$$i_{1q}^* = \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \right)^{-1} \frac{M^*}{\psi^*}. \quad (3.34)$$

Керуюча дія в (3.32) формується у вигляді:

$$\begin{aligned}v_q &= -k_{iq1} \tilde{i}_{1q} - x_q + \gamma i_{1q}^* + \beta p_n \omega |\hat{\psi}_2| + \dot{i}_{1q}^*, \\ \dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_{1q},\end{aligned}\quad (3.35)$$

де $(k_{iq1}, k_{iiq}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегрально дії регулятора струму по осі (q), i_{1q}^* розраховується з (3.34) у вигляді:

$$\dot{i}_{1q}^* = \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{\dot{M}^*}{\psi^*} - \frac{M^* \dot{\psi}^*}{\psi^{*2}} \right).$$

Для електромагнітної підсистеми (3.33) синтезуємо регулятор потокозчеплення (оціненого):

$$\begin{aligned}\dot{i}_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} \left(\alpha \dot{\psi}^* + \dot{\psi}^* - k_{\psi 1} \tilde{\psi} - x_{\psi} \right), \\ \dot{x}_{\psi} &= k_{\psi i} \tilde{\psi},\end{aligned}\quad (3.36)$$

а також регулятор польової компоненти струму статора i_{1d} :

$$\begin{aligned}v_d &= -k_{id1} \tilde{i}_{1d} - x_d + \gamma i_{1d}^* - \alpha\beta|\hat{\psi}_2| + \dot{i}_{1d}^*, \\ \dot{x}_d &= -k_{iid} \tilde{i}_{1d},\end{aligned}\quad (3.37)$$

де $(k_{\psi 1}, k_{\psi i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії регулятора

модуля потокозчеплення ротора, $(k_{idl}, k_{iid}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії регулятора струму по осі (d), i_{ld}^* розраховується з (3.36) у вигляді:

$$i_{ld}^* = \frac{1}{\alpha L_m} \left(\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - \alpha L_m k_{\psi l} \tilde{i}_{ld} + \left[k_{\psi l} (\alpha + k_{\psi l}) - k_{\psi i} \right] \tilde{\psi} - k_{\psi i} \tilde{\dot{\psi}} \right).$$

Після підстановки (3.34) – (3.37) в (3.32) – (3.33) отримаємо рівняння похибок відпрацювання моменту:

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

$$\begin{aligned} \dot{x}_q &= k_{iq} \tilde{i}_{lq} \\ \dot{\tilde{i}}_{lq} &= -k_{iq} \tilde{i}_{lq} - x_q - \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2d} + \alpha \beta \tilde{\psi}_{2q}, \end{aligned} \quad (3.39)$$

та координат електромагнітної підсистеми АД:

$$\begin{aligned} \dot{x}_\psi &= k_{\psi i} \tilde{\psi} \\ \dot{\tilde{\psi}} &= -(\alpha + k_{\psi l}) \tilde{\psi} - x_\psi + \alpha L_m \tilde{i}_{ld}, \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= k_{id} \tilde{i}_{ld} \\ \dot{\tilde{i}}_{ld} &= -k_{id} \tilde{i}_{ld} - x_d + \alpha \beta \tilde{\psi}_{2d} + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2q}, \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\psi}}_{2d} &= -\alpha \tilde{\psi}_{2d} + \omega_2 \tilde{\psi}_{2q} \\ \dot{\tilde{\psi}}_{2q} &= -\alpha \tilde{\psi}_{2q} - \omega_2 \tilde{\psi}_{2d}. \end{aligned} \quad (3.42)$$

де $k_{iq} = k_{iq1} + \gamma, k_{id} = k_{idl} + \gamma$.

З (3.42) слідує, що $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\psi}_{2d}, \tilde{\psi}_{2q}) = 0$, тому з (3.39) – (3.41) маємо

$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\psi}, x_\psi, \tilde{i}_{ld}, x_d, \tilde{i}_{lq}, x_q) = 0$, при цьому з (3.38) маємо $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{M}) = 0$, отже цілі

керування досягаються.

3.3 Алгоритм прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна

Спостерігач магнітного потоку АД:

$$\begin{aligned} \left| \dot{\hat{\psi}}_2 \right| &= -\alpha \left| \hat{\psi}_2 \right| + \alpha L_m i_{1d}, \\ \dot{\hat{\epsilon}}_0 &= \omega_0 = p_n \omega + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{\left| \hat{\psi}_2 \right|}. \end{aligned}$$

Регулятор моменту:

$$\begin{aligned} i_{1q}^* &= \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \right)^{-1} \frac{M^*}{\psi^*}, \\ i_{1q}^* &= \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{\dot{M}^*}{\psi^*} - \frac{M^* \dot{\psi}^*}{\psi^{*2}} \right). \end{aligned}$$

Регулятор потоку:

$$\begin{aligned} i_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} \left(\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_\psi \tilde{\psi} - x_\psi \right), \\ \dot{x}_\psi &= k_{\psi i} \tilde{\psi}, \\ i_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} \left(\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - \alpha L_m k_\psi \tilde{i}_{1d} + \left[k_\psi (\alpha + k_\psi) - k_{\psi i} \right] \tilde{\psi} - k_{\psi i} \tilde{\psi} \right). \end{aligned}$$

Регулятор струму по осі (d):

$$\begin{aligned} u_d &= \sigma \left(\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \left| \hat{\psi}_2 \right| + \dot{i}_{1d}^* - k_{id} \tilde{i}_{1d} - x_d \right), \\ \dot{x}_d &= -k_{iid} \tilde{i}_{1d}. \end{aligned}$$

Регулятор струму по осі (q):

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma \left(\gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta \omega p_n \left| \hat{\psi}_2 \right| + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq} \tilde{i}_{1q} - x_q \right), \\ \dot{x}_q &= -k_{iiq} \tilde{i}_{1q}. \end{aligned}$$

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Для математичного моделювання системи прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна необхідно визначити сумарний приведений до валу двигуна момент інерції. Сумарний приведений момент інерції визначається за формулою:

$$J'_{\Sigma} = \frac{m \cdot R_k^2}{i_r^2} + J_d, \quad (4.1)$$

де J_d – момент інерції двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, з [28] для двигуна подібної потужності визначаю $J_d = 3,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

$$J'_{\Sigma} = \frac{19000 \cdot 0,48^2}{9,871^2} + 3,6 = 48,53 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Опис тесту:

- збудження двигуна по траєкторії 2-го порядку за час 0,5 с;
- в момент часу 0,75 с. початок відпрацювання заданої траєкторії моменту з максимальним значенням (по модулю) 1150 Нм, часом наростання та спадання 0,1 с;
- час прикладання трапеції моменту на розгін та на гальмування підібрано таким чином, щоб при розгоні двигун досягав своєї номінальної швидкості, а при гальмуванні швидкість не входила в від'ємні значення.

Параметри регуляторів:

$$k_{\psi} = 200, k_{\psi i} = k_{\psi}^2 / 2 = 20000; k_i = 500, k_{ii} = k_i^2 / 2 = 125000.$$

Перехідні процеси в системі прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна наведено на рис. 4.1.

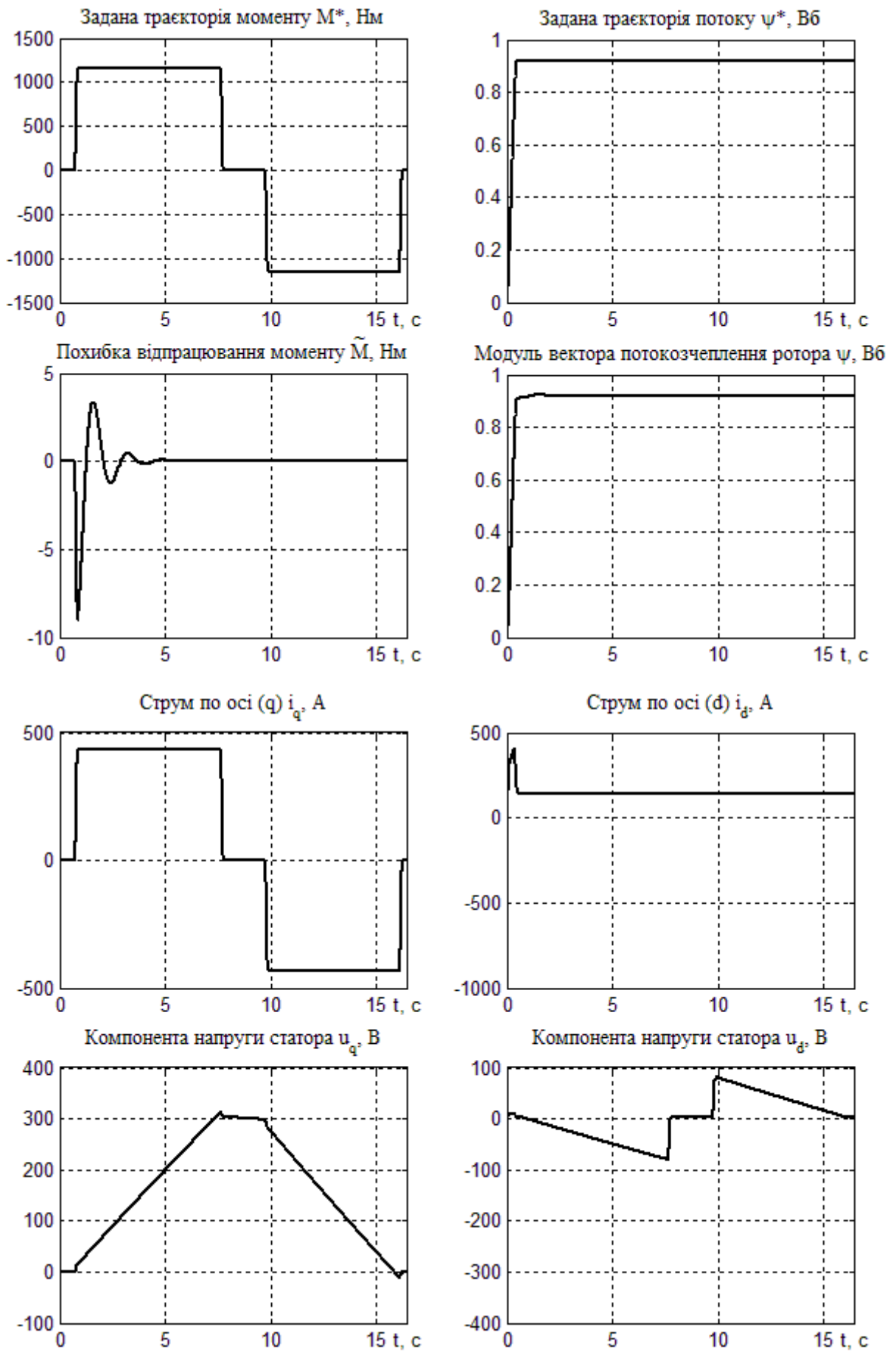


Рисунок 4.1 - Перехідні процеси в системі керування моментом АД

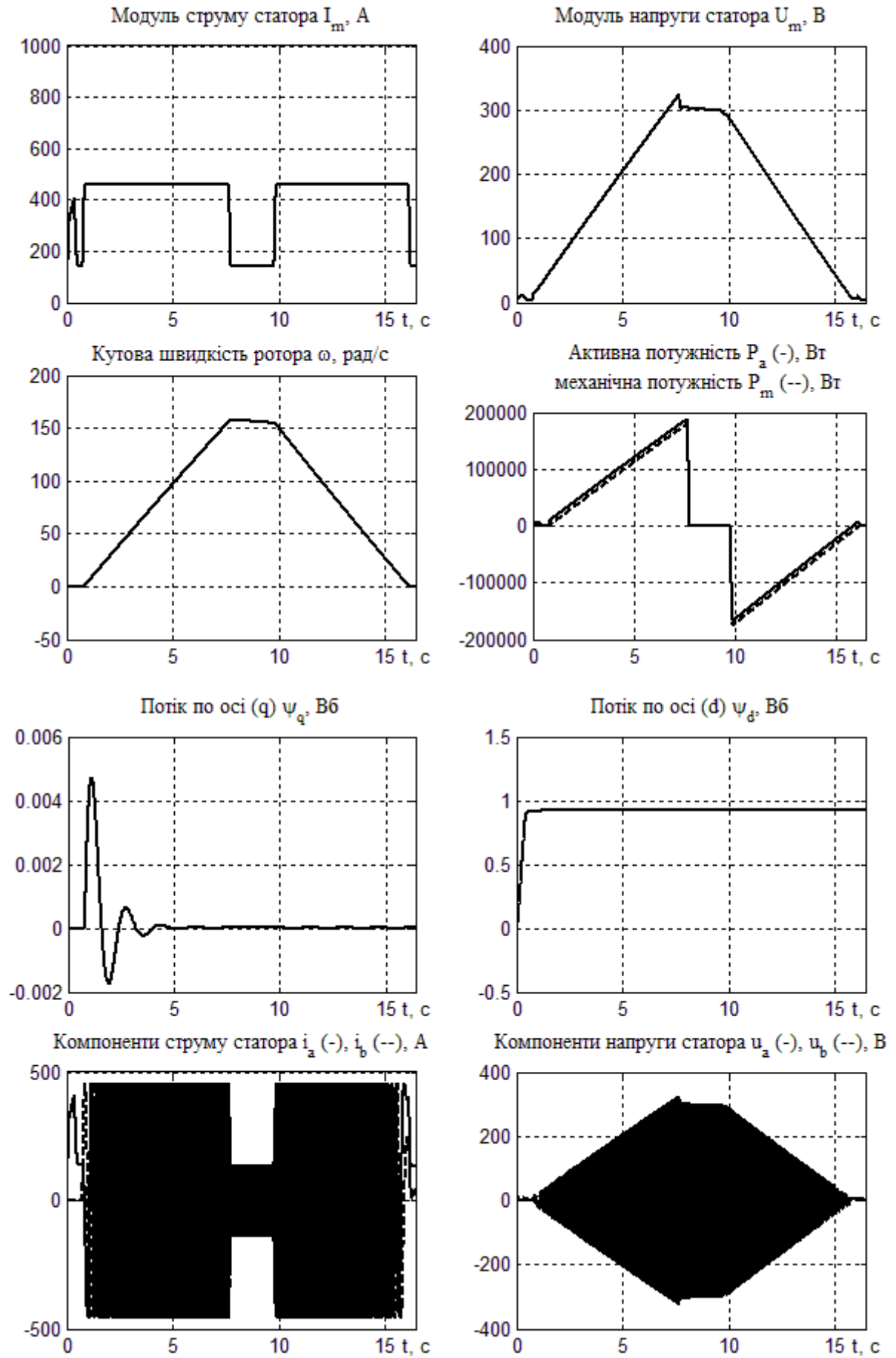


Рисунок 4.1, аркуш 2

Як видно з рис. 4.1, система прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна забезпечує асимптотичне відпрацювання заданої траєкторії моменту ($\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} = 0$), заданої траєкторії модуля вектора потокозчеплення ($\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0$) та полеорієнтування ($\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_{2q} = 0$), також забезпечується розв'язка процесів керування моментом та модулем вектора потокозчеплення.

4.1 Дослідження динамічних показників системи керування моментом при ослабленні поля

Ослаблення поля використовується для того, щоб інвертор не потрапляв в обмеження по напрузі при досягненні швидкостей, що більші за номінальну, при цьому задане значення модуля вектора потокозчеплення ротора формується наступним чином:

$$\psi^* = \begin{cases} \omega > \omega_n, & \psi_1^* \frac{\omega_n}{\omega}, \\ \omega \leq \omega_n, & \psi_1^* \end{cases} \quad (4.2)$$

де ψ_1^* – сигнал задатчика інтенсивності потокозчеплення, Вб; ω_n – номінальна швидкість двигуна, рад/с.

Для того, щоб при ослабленні поля значення моментної компоненти вектора струму статора i_q залишалося незмінним необхідно також зменшувати значення заданого моменту:

$$M^* = M_1^* \frac{\psi^*}{\psi_n^*}, \quad (4.3)$$

де M_1^* – сигнал задатчика інтенсивності моменту, Нм; ψ_n^* – номінальне значення модуля вектора потокозчеплення, враховуючи початкові умови в задатчику інтенсивності потокозчеплення $\psi_n^* = 0,92$ Вб.

Опис тесту:

- збудження двигуна по траєкторії 2-го порядку за час 0,5 с;
- в момент часу 0,75 с. початок відпрацювання заданої траєкторії моменту з максимальним значенням (по модулю) 1150 Нм, часом наростання та спадання 0,1 с;
- час прикладання трапеції моменту на розгін та на гальмування підібрано таким чином, щоб при розгоні двигун досягав подвійної номінальної швидкості, а при гальмуванні швидкість не входила в від’ємні значення.

Параметри регуляторів:

$$k_{\psi} = 200, k_{\psi i} = k_{\psi}^2 / 2 = 20000; k_i = 500, k_{ii} = k_i^2 / 2 = 125000.$$

Перехідні процеси в системі прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна з ослабленням поля наведено на рис. 4.2.

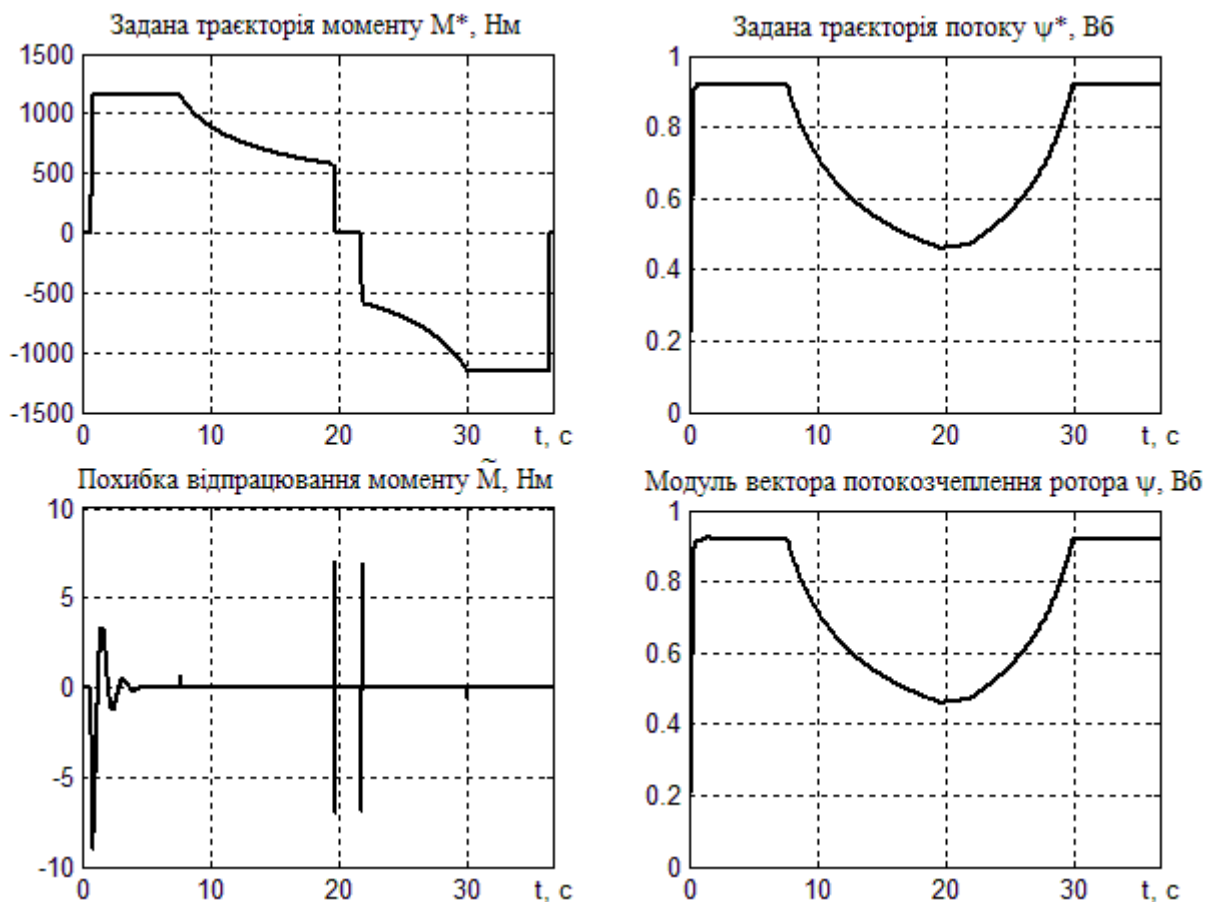


Рисунок 4.2 – Перехідні процеси в системі керування моментом АД з ослабленням поля

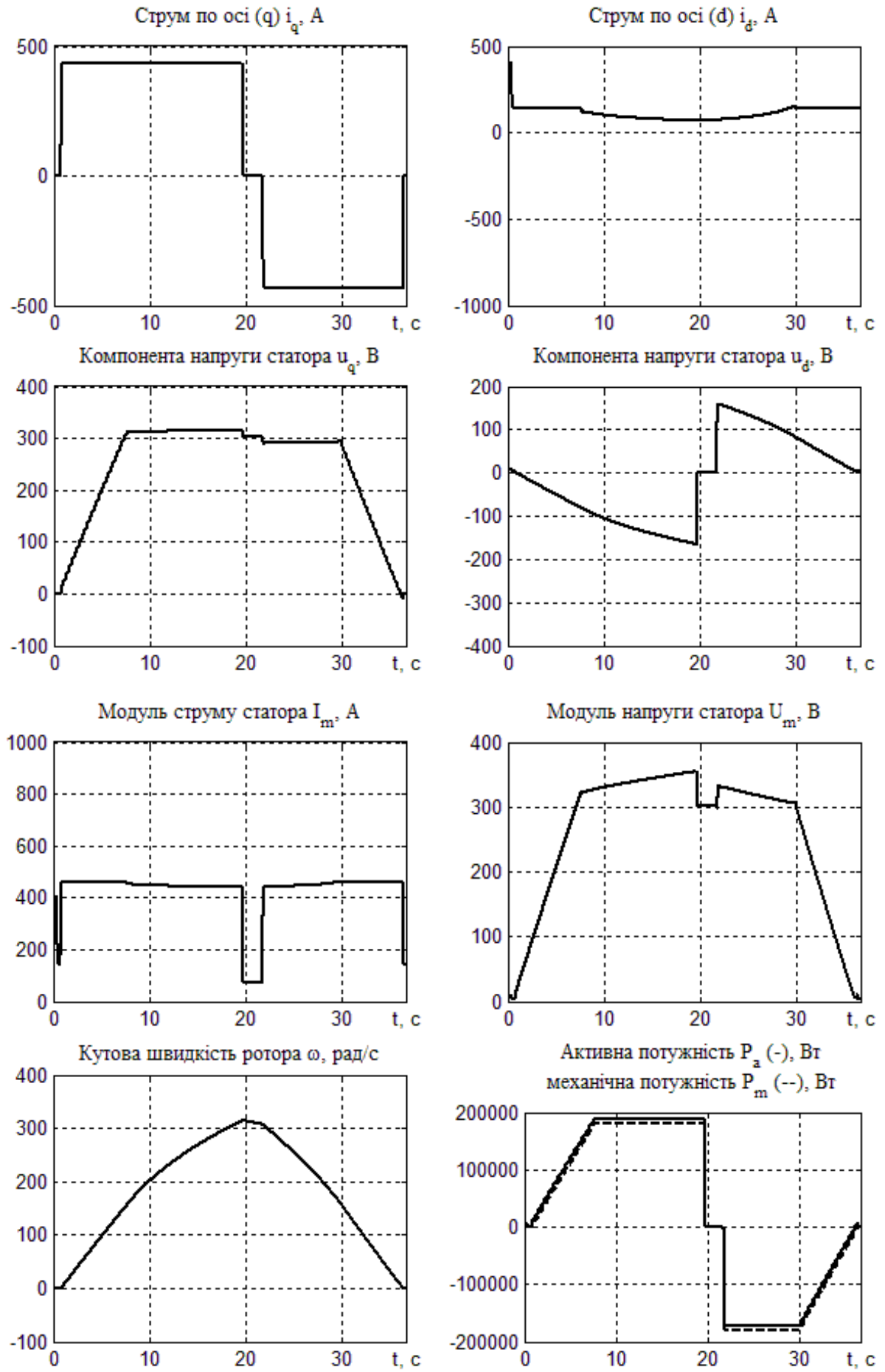


Рисунок 4.2, аркуш 2

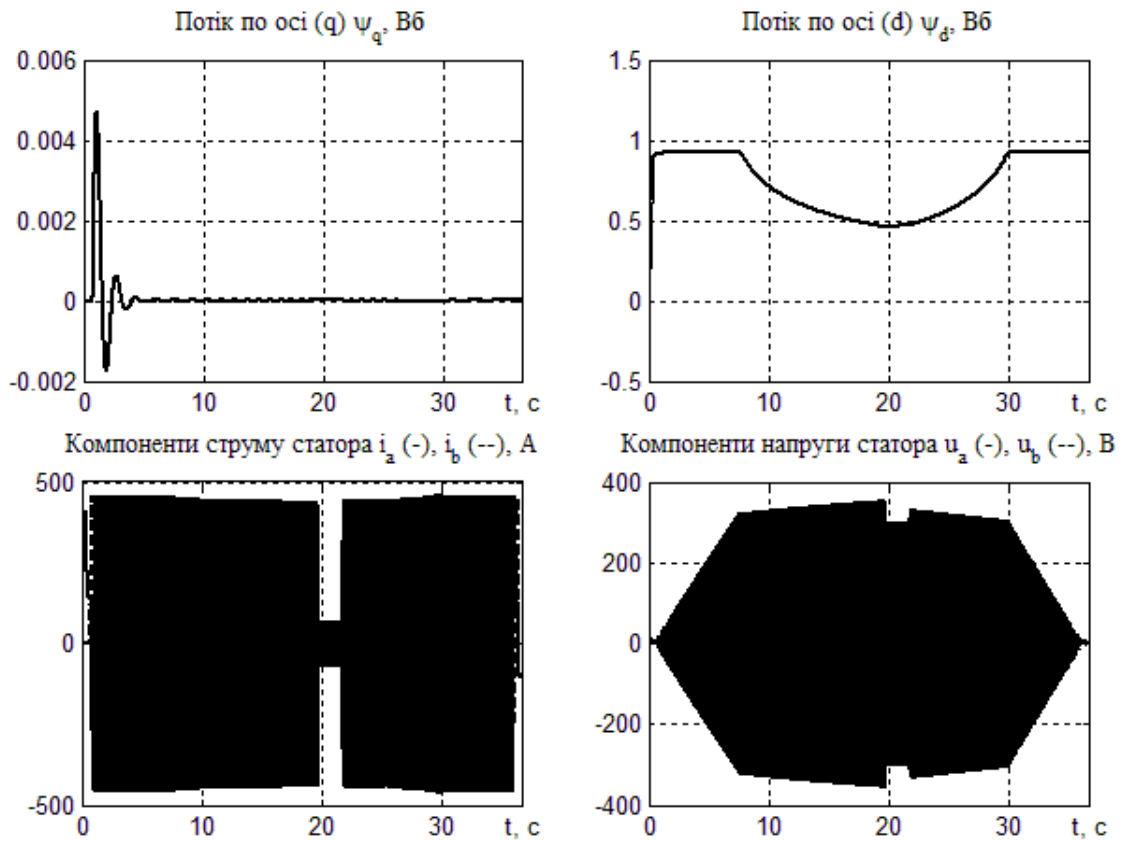


Рисунок 4.2, аркуш 3

Як видно з рис. 4.2 система прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна при роботі в режимі ослаблення поля забезпечує асимптотичне відпрацювання заданої траєкторії моменту ($\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} = 0$), заданої траєкторії модуля вектора потокозчеплення ($\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0$) та полеорієнтування ($\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_{2q} = 0$), також забезпечується розв'язка процесів керування моментом та модулем вектора потокозчеплення.

При використанні стандартного алгоритму ослаблення поля досягається стабілізація моментоутворюючої компоненти вектора струму статора i_q , при цьому рівень напруги u_q змінюється мало, що в результаті забезпечує обмеження рівня напруги на виході інвертора. Хоча модуль напруги і перевищує допустиме значення (311 В), проте це перевищення набагато менше ніж в випадку системи керування без ослаблення поля. Для досягнення кращого результату необхідно використовувати складніші алгоритми ослаблення поля.

5 ВИБІР ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Методика розрахунку та вибору основних елементів силової частини електроприводу наведена в [30].

Номінальне діюче значення фазної напруги розраховуються наступним чином:

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} \text{ В}, \quad (5.1)$$

де U_{1n} – номінальна лінійна напруга статора, В.

$$U_n = \frac{407}{\sqrt{3}} = 234,98 \text{ В}.$$

Номінальне діюче значення струму статора визначається як:

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3U_n \eta \cos \varphi}, \quad (5.2)$$

де P_{2n} – номінальна потужність двигуна, Вт; η – номінальний ККД двигуна; $\cos \varphi$ – номінальне значення коефіцієнта потужності двигуна.

$$I_n = \frac{180000}{3 \cdot 234,98 \cdot 0,93 \cdot 0,9} = 305,06 \text{ А}.$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора визначаються як:

$$U_{na} = \sqrt{2}U_n = \sqrt{2} \cdot 234,98 = 332,31 \text{ В},$$

$$I_{na} = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 305,06 = 431,43 \text{ А}.$$

5.1 Вибір IGBT транзисторів для автономного інвертора напруги

Прийнявши перевантажувальну здатність $k = 1,5$, розрахуємо максимальний струм на виході перетворювача:

$$I_{\max} = k \cdot I_{\text{на}} = 1,5 \cdot 431,43 = 647,14 \text{ А.} \quad (5.3)$$

Вибір IGBT здійснюється за критерієм:

$$I_C > I_{\max}, U_{\text{CEmax}} > U_{\text{CE}}, \quad (5.4)$$

де I_C , U_{CEmax} – відповідно тривалий струм колектора та напруга колектор – емітер, які вказані в паспортних даних IGBT.

Обов'язковою є умова наявності антипаралельного діода, який в більшості випадків є вбудованим в один корпус із транзистором і не потребує окремого розрахунку. Обираємо транзисторну збірку (напівміст) типу SEMiX703GB12M7p [31], яка має $I_C = 700 \text{ А}$, $U_{\text{CEmax}} = 1200 \text{ В}$.

5.2 Розрахунок та вибір конденсаторів ємнісного фільтра

Ємність конденсатора фільтра визначається за формулою:

$$C = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m \cdot k_p \cdot R_0}, \quad (5.5)$$

де f – частота напруги мережі живлення, Гц; m – число фаз випрямляча; k_p – коефіцієнт пульсацій напруги, який для перетворювачів частоти вибирають в діапазоні (0,02 ... 0,05); R_0 – еквівалентний опір навантаження ланки постійного струму, Ом; 10^6 – коефіцієнт для переходу від Φ до мкФ.

Еквівалентний опір розраховується як:

$$R_0 = \frac{U_{\text{dcn}}}{I_{\text{dc}}}, \quad (5.6)$$

де U_{dcn} – номінальна напруга ланки постійного струму, $U_{\text{dcn}} = 540 \text{ В}$; I_{dc} – величина струму в ланці постійного струму, яка визначається як:

$$I_{\text{dc}} = \frac{P_{2n}}{U_{\text{dcn}} \cdot \eta \cdot \eta_{\text{inv}}}, \quad (5.7)$$

де η_{inv} – ККД перетворювача, прийmemo $\eta_{inv} = 0,95$.

$$I_{dc} = \frac{180000}{540 \cdot 0,93 \cdot 0,95} = 377,3 \text{ А},$$

$$R_0 = \frac{540}{377,3} = 1,4 \text{ Ом}.$$

Значення ємності фільтра при $k_p = 0,05$ буде дорівнювати:

$$C = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3 \cdot 0,05 \cdot 1,4} = 14827 \text{ мкФ}.$$

Обираємо конденсатор типу B43707A5159M600 [32], який має ємність 15000 мкФ та робочу напругу 450 В. Конденсатори в ланці постійного струму будуть з'єднані як показано на рис. 5.1, в результаті буде отримана ємність 15000 мкФ, та допустима напруга 900 В, яка перевищує максимальне значення напруги в ланці постійного струму (800 В). Резистори потрібні для рівномірного розподілення напруги по конденсатором в гілці.

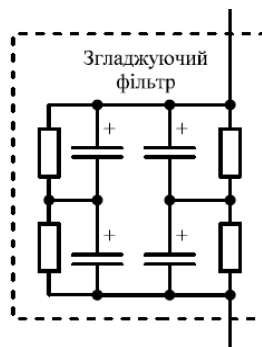


Рисунок 5.1 – Схема включення конденсаторів ланки постійного струму

5.3 Вибір резистора та ключа клампера

Клампер складається з резистора, діода та напівпровідникового ключа (рис. 5.2), який підключає цей резистор паралельно в ланку постійного струму для розсіювання надлишкової енергії, яка має місце в гальмівному режимі привода.

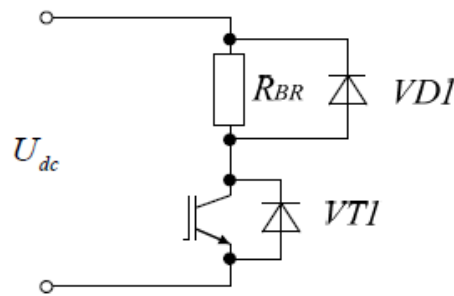


Рисунок 5.2 – Схема клампера

Ключ клампера вибирається за струмом I_{BR} , який протікає через нього в тривалому режимі. Якщо в процесі гальмування вся активна потужність передається у ланку постійного струму, то:

$$I_{BR} = \frac{P_{2n}}{U_{clamp}}, \quad (5.8)$$

де U_{clamp} – напруга ланки постійного струму при якій починає працювати клампер, $U_{clamp} = 750$ В.

$$I_{BR} = \frac{180000}{750} = 240 \text{ А.}$$

З графіку руху тролейбуса було визначено, що час гальмування складає 14 % від усього часу руху. Знайдемо середнє значення потужності, що необхідно розсівати на резисторі клампера з врахуванням часу гальмування:

$$P_{cp} = 0,14 \cdot P_{2n} = 0,14 \cdot 180000 = 25450 \text{ Вт.} \quad (5.9)$$

Опір резистора клампера буде складати:

$$R_{BR} = \frac{U_{clamp}}{I_{BR}} = \frac{750}{240} = 3,13 \text{ Ом.} \quad (5.10)$$

В якості ключа клампера обираємо модуль типу SKM300GAL12T4 [33], який має $I_C = 300$ А, $U_{CEmax} = 1200$ В, а також захисний та антипаралельний діоди.

В якості резистора клампера обираємо резистор типу PM240–2 FSE [34], який має потужність розсіювання 30 кВт, та опір 4,5 Ом.

5.4 Вибір давачів напруги та струму

Враховуючи (5.3), обираємо в якості давача струму давач типу IT 700–SB ULTRASTAB [35], який має номінальний вимірюваний струм 700 А.

Враховуючи значення $U_{dc,max}$, обираємо в якості давача напруги давач типу CV 3–1200 [36], який має номінальне значення вимірюваної напруги 840 В, максимальне значення 1200 В.

5.5 Опис схеми електричної принципової керуючого контролера

Керуючий контролер побудовано на базі 32 розрядного цифрового сигнального процесора TMS320F28069PN, який має 128 кБайт Flash пам'яті (16-bit word), 50 кБайт ROM пам'яті (16-bit word), 6 каналів ШІМ з високою роздільною здатністю, 12 бітний аналого-цифровий перетворювач, апаратний математичний модуль для роботи з числами з плаваючою комою [37].

Контролер отримує живлення +15 В через роз'єм XT1; в контролері передбачено п'ять дискретних входів, роз'єм XT2; три аналогових біполярних входів напруги +–10 В, роз'єми XT5, XT9, XT13; один аналоговий вихід 0...10 В, роз'єм XT15; три дискретні виходи, роз'єми XT12, XT14, XT16; інтерфейс CAN, роз'єм XT8; інтерфейс RS485, роз'єм XT6; інтерфейс I2C, роз'єм XT3; для відображення інформації використовується дисплей LCD1602, що підключається до XT4; для вводу інформації використовуються 4 кнопки, що підключаються до XT10. Також контролер має годинник реального часу та EEPROM пам'ять. Драйвери транзисторів АІН та клампера керуються за допомогою сигналів з роз'єма XT7, програмування та відлагодження контролера відбувається через JTAG інтерфейс, роз'єм XT11.

ВИСНОВКИ

1. Метою дипломного проекту є розробка електромеханічної системи тролейбуса з автономним ходом. На підставі аналітичного огляду було сформовано вимоги до тягового електроприводу тролейбуса, а також сформульовано етапи дослідження, які необхідно виконати для досягнення поставленої мети;

2. На основі кінематичної схеми тролейбуса, його масо-габаритних показників та заданої тахограми руху були побудовані: діаграма тягового зусилля, тахограма двигуна та навантажувальну діаграма двигуна, був обраний асинхронний тяговий двигун типу ДТА – 2У1 потужністю 180 кВт. Для обраного двигуна були розраховані параметри динамічної моделі.

3. Для електроприводу з рекуперацією енергії та без неї було розраховано два варіанти тягової батареї: на базі літій-іонних акумуляторів та на базі суперконденсаторів. Порівнявши масо-габаритні показники та вартість варіантів реалізації тягової батареї, було встановлено, що в даній електромеханічній системі використання суперконденсаторів недоцільне, а рекуперація дозволяє зменшити габарити та масу тягової батареї;

4. Був розроблений алгоритм прямого векторного керування моментом асинхронного двигуна, який забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту та модуля вектора потокозчеплення, асимптотичне полеорієнтування та асимптотичну розв'язку процесів керування моментом та модулем вектора потокозчеплення ротора. Методом математичного моделювання алгоритму керування моментом було встановлено, що задачі керування досягаються;

5. Розраховані та обрані основні елементи силової частини електропривода, розроблена схема електрична принципова та схема електрична функціональна керуючого контролера на базі цифрового сигнального процесора TMS320F28069PN, що дозволить в майбутньому практично реалізувати даний електропривод.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Черных М. Внедрение энергоэффективного оборудования и технологий на подвижном составе городского электротранспорта Украины / М. Черных, В. Качимов [Электронный ресурс]. – Коммунальное хозяйство городов. – 2009. – №88. – с 263–266. – Режим доступа к журн.: http://eprints.kname.edu.ua/13758/1/263–266_Черны_М.pdf
2. X. Zhu, "A Dual–Active–Bridge Converter for Novel Trolleybus Powertrain System," 2018 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/ACEPT.2018.8610670.
3. Ларин О.Н. Организация пассажирских перевозок: Учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 104 с.
4. Максимов А. Н. Городской электротранспорт: Троллейбус: Учебник для нач. проф. образования / Анатолий Николаевич Максимов. – М.: Издательский центр "Академия", 2004. – 256 с.
5. ДСТУ 4905: 2008 Колісні транспортні засоби. ТРОЛЕЙБУСИ ПАСАЖИРСЬКІ. Загальні технічні вимоги – Київ: ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2008. – 36 с.
6. Ефремов И.С. Троллейбусы (теория, конструкция и расчет). Изд. 3, испр. и доп. Учебник для вузов по спец. «Городской электрический транспорт». М. «Высш. школа», 1969. 488 с. с илл., 1 л. вкл.
7. Abramova O. Как устроена свинцово – кислотная батарея [Электронный ресурс] / Olesya Abramova. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-201>.
8. Abramova O. Аккумуляторы на основе никеля [Электронный ресурс] / Olesya Abramova. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-203>.
9. Abramova O. Как устроен аккумулятор на основе лития? [Электронный ресурс] / Olesya Abramova. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-204>.
10. Abramova O. Сравнительная таблица вторичных батарей

[Электронный ресурс] / Olesya Abramova. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-107>.

11. Abramova O. Как устроен суперконденсатор [Электронный ресурс] / Olesya Abramova. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-209>.

12. Производители троллейбусов Украины [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F:%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8_%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%B9%D0%B1%D1%83%D1%81%D0%BE%D0%B2_%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D0%B8%D0%BD%D1%8B.

13. Предприятие "Техносервиспривод" [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://tsdrive.com.ua/>.

14. Запорожский электроаппаратный завод [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.zeaz.com.ua/>.

15. ДП «Завод «Электроважмаш» [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.spetm.com.ua/>.

16. Производители троллейбусов по странам [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F:%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8_%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%B9%D0%B1%D1%83%D1%81%D0%BE%D0%B2_%D0%BF%D0%BE_%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BC.

17. Electric Traction Motor Market by Type (AC and DC), Power Rating (Below 200 kW, 200–400 kW, and Above 400 kW), Application (Railways, Electric Vehicles, Elevators, Conveyors, and Industrial Machinery), and Region:

Global Forecast to 2025 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/electric-traction-motor-market-248269129.html>.

18. Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина : навч. посібник / В. Х. Далека, М. В. Хворост, В. І. Скуріхін, Д. І. Скуріхін. ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 388 с.

19. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design / [E. Mehrdad, Y. Gao, A. Emadi та ін.]. – United States of America: CRC Press, 2004. – 424 с.

20. Филькин Н.М., Шаихов Р.Ф., Буянов И.П. Теория транспортных и транспортно-технологических машин: Учеб. пособие. – Пермь: ФГБОУ ВО Пермская ГСХА, 2016. – 230 с.

21. Расшифровка маркировки шин [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: https://shiny-diski.com.ua/info/sovety/rasshifrovka-markirovki-shin.html?gclid=Cj0KCQjw4ImEBhDFARIsAGOTMj-xb2665Wh4spnHJ06tX_DuO_iw2gnAgUCuLpHnMXaICjrUy0_U8aApA3EALw_wcB&gclsrc=aw.ds&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=promodo.

22. Основы автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, М. М. Соколов, В. М. Терехов, А. В. Шинянский. – М.: «Энергия», 1974. – 568 с.

23. Электродвигатели тяговые асинхронные для приведения в движение троллейбуса, серии ДТА (ТАД) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://se33.ru/traction-motors/29-traction-motors/158-dta.html>.

24. Электродвигатели тяговые асинхронные для приведения в движение троллейбуса [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: http://pemz.ru/catalog/izdeliya_dlya_gorodskogo_elektrotransporta/Asynchronous_traction_motors_for_driving_a_trolleybus/.

25. Керування електроприводами: Методичні вказівки до виконання курсового проекту [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.М. Пересада, Є.О. Ніконенко. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 52 с.

26. Аккумуляторы LiFePO₄ [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://greent.com.ua/akkumulyatornye-elementy/akkumulyatory-lifepo4/>.

27. Ячейки, элементы для аккумуляторов LiFePO₄ [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://logicpower.ua/production/Akkumulyatory-Lifepo4>.

28. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А.Э. Кравчик, М.М Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с., ил.

29. Ultracapacitor cells [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/cells>.

30. Силлові перетворювачі електроприводів: Методичні вказівки до розрахунково – графічної роботи для студентів напряму підготовки бакалавра спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, спеціалізації "Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність" / Уклад: С.М. Ковбаса, І.А. Шаповал – К.: "КПІ ім. Ігоря Сікорського", 2019 р. 25 с.

31. IGBT Modules SEMiX 3p SEMiX703GB12M7p [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbt-modules/detail/semix703gb12m7p-27895801.html>.

32. Aluminum electrolytic capacitors – Capacitors with screw terminals – B43707, B43727 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/20/30/db/aec/B43707_B43727.pdf.

33. IGBT Modules SEMITRANS 3 SKM300GAL12T4 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
<https://www.semikron.com/products/product-classes/igbt-modules/detail/skm300gal12t4-22892330.html>.

34. Fa. Heine Breaking resistor FOR POWERMODULE PM240–2 FSE P_MAX=30kW/12S/5% ED R=4,5 ОМ [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/?mlfb=JJY%3a023423320001>.

35. Current Transducer IT 700–SB ULTRASTAB [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/it_700-sb_ultrastab.pdf.

36. Voltage Transducer CV 3–1200 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/cv_3-1200.pdf.

37. TMS320F2806x Piccolo™ Microcontrollers [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
<https://datasheets.diptrace.com/ti/TMS320F2806x.pdf>.