

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

«На правах рукопису»
УДК 681.5

«До Захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА
(підпис)

«___» _____ 2022 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-науковою програмою «Електромеханічні системи

автоматизації, електропривод та електромобільність»

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка»

на тему

**«Електромеханічна система тролейбуса з автономним ходом на основі
асинхронного двигуна»**

Виконав: студент VI курсу, групи ЕП-01мн

_____ Гуцул Олег Олександрович _____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

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

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

Рецензент к.т.н., доцент, Чумак Вадим Володимирович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2022 р.

ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на магістерську дисертацію	2	
2	A4	141.7112.001.ДМ	Пояснювальна записка	122	

				141.7112.001.ДМ		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість магістерської дисертації	Лист	Листів
Розробн.	Гуцул О.О.		13.06.22		2	122
Керівн.	Ковбаса С.М.		13.06.22		КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-01мн	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Ковбаса С.М.		13.06.22			

Пояснювальна записка до магістерської дисертації

на тему: «Електромеханічна система тролейбуса з автономним ходом на
основі асинхронного двигуна»

Київ – 2022 р.

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-наукова програма – «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА
(підпис)

«___» _____ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

_____ Гуцулу Олегу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Електромеханічна система тролейбуса з автономним ходом на основі асинхронного двигуна»,

науковий керівник дисертації Ковбаса Сергій Миколайович, д.т.н., доцент.

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

затверджені наказом по університету від «___» _____ 2022 р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації 13.06.2022р.

3. Об'єкт дослідження Тролейбус з автономним ходом.

4. Вихідні дані: тролейбус типу «ЛАЗ Е183», $V_{\max} = 55$ км/год, $m_{\max} = 18000$ кг, ширина – 2550 мм, висота – 3450 мм, довжина – 12000 мм.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Аналітичний огляд науково-технічної літератури; 2. Розрахунок та вибір основних елементів; 3. Підсистема керування тяговою батареєю: основні задачі та вплив на електромеханічну систему; 4. Керування приводним двигуном; 5. Врахування характеристики зчеплення та реалізація спеціальних функцій; 6. Дослідження динамічних процесів методом математичного моделювання.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: _____

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття у Віснику Національного Вінницького НТУ, 2022 рік, на тему «Дослідження залежності еквівалентного моменту двигуна від профілю дороги»

8. Консультанти розділів дисертації*

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

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

9. Дата видачі завдання 10.02.2021

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналітичний огляд науково-технічної літератури.	28.01.2022	Виконано
2	Розрахунок та вибір основних елементів.	05.02.2022	Виконано
3	Підсистема керування тяговою батареєю.	25.02.2022	Виконано
4	Керування приводним двигуном.	15.03.2022	Виконано
5	Врахування характеристики зчеплення та реалізація спеціальних функцій	13.5.2022	Виконано
6	Дослідження динамічних процесів методом математичного моделювання	20.05.2022	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки. Підготовка презентації.	11.06.2022	Виконано

Студент

(підпис)

Олег ГУЦУЛ

Науковий керівник проекту

(підпис)

Сергій КОВБАСА

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація виконана на 122 сторінках та містить в собі 50 рисунків, 28 таблиць.

Основною метою даної магістерської дисертації є розробка електромеханічної системи тролейбуса з автономним ходом.

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

Для дослідження впливу профілю дороги на вибір двигуна та ємності батарей була побудована модель в програмному забезпеченні Matlab яка враховує силу аеродинамічного опору повітря, силу тертя коліс об дорогу та силу тяжіння.

ТРОЛЕЙБУС, АВТОНОМНИЙ ХІД, ПРОФІЛЬ ДОРОГИ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА, АЕРОДИНАМІЧНИЙ ОПІР, ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ТАХОГРАМА РУХУ, СИЛА ТЯЖІННЯ, ЛІТІЙ-ІОННИЙ АКУМУЛЯТОР, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ

					141.7112.001.ДМ						
Зм.	Лист	ПІБ	Підпис	Дата							
Розробив		Гуцул О.О.		13.06	Електромеханічна система тролейбуса з автономним ходом на основі асинхронного двигуна			Літ.	Лист	Листів	
Керівник		Ковбаса С.М.		13.06						6	122
Консультант								КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП – 01мн			
Н. Контр.											
Зав. каф.		Ковбаса С.М.		13.06							

ABSTRACT

Master's dissertation completed on 122 pages and contains 50 drawings, 28 tables.

The main purpose of this master's dissertation is to develop an electromechanical trolleybus system with autonomous travel.

The designed system can be used in a real vehicle to solve the problem of autonomous operation outside the catenary.

To study the influence of the road profile on the choice of engine and battery capacity, a model was built in Matlab software that takes into account the force of aerodynamic air resistance, the force of friction of the wheels on the road and the force of gravity.

TROLLEYBUS, AUTONOMOUS COURSE, ROAD PROFILE,
ELECTROMECHANICAL SYSTEM, AERODYNAMIC RESISTANCE,
TRACTION ELECTRIC DRIVE, TACHOGRAPH OF TRAFFIC

					141.7112.001.DM				
	Letter	№ of doc.	Sign	Date					
Devel.		O.Hutsul		13.06	Electromechanical system of the trolleybus with autonomous drive based on an induction motor	L.		Page	Pages
Checker		S.Kovbasa		13.06				7	122
						NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», FEA, EP – 01mn			
N. Contr.									
Approverd.		S.Kovbasa		13.06	ABSTRACT				

ЗМІСТ

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	13
1.1 Літій-іонна технологія виготовлення акумуляторів	17
1.2 Хімічні процеси Li-ion акумуляторів	17
1.3 Процеси на негативному електроді Li-ion акумулятора	19
1.4 Процеси на позитивних пластинах Li-ion акумулятора	20
1.4 Конструкція Li-ion акумуляторів.....	21
1.5 Характеристики Li-ion акумуляторів	23
1.6 Заряджання Li-ion акумуляторів.....	23
1.7 Збереження Li-ion акумуляторів.....	25
1.8 Механізми, що призводять до зменшення ємності Li-ion акумуляторів...	27
1.9 Типи тягових електродвигунів.....	29
1.10 Висновки до розділу	31
2 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	32
2.1 Розрахунок потужності двигуна та акумуляторної батареї.....	32
2.2 Вибір основних елементів силової частини перетворювача	39
2.2.1 Вибір IGBT транзисторів для автономного інвертора напруги	40
2.2.2 Розрахунок та вибір конденсаторів ємнісного фільтру	40
2.2.3 Вибір резистора та ключа клампера.....	42
2.2.4 Вибір давачів напруги та струму.....	44
2.3 Дослідження профілю шляху на параметри основних елементів електромеханічної системи	44
2.4 Висновки до розділу	49
3 ПІДСИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЯГОВОЮ БАТАРЕЄЮ. ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ТА ВПЛИВ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНУ СИСТЕМУ	50
3.1 Опис функцій підсистеми керування тяговою батареєю	50
3.2 Обмеження координат електромеханічної системи	57
3.3 Висновки до розділу	59
4 КЕРУВАННЯ ПРИВОДНИМ ДВИГУНОМ.....	60
4.1 Векторне керування моментом	60
4.2 Керування моментом з максимізацією співвідношення момент-струм....	61

4.2.1 Керування моментом-потокозчепленням при непрямому полеорієнтуванні	62
4.2.2 Керування моментом-потокозчепленням при прямому полеорієнтуванні.....	64
4.2.3 Формування заданого потокозчеплення з метою забезпечення умов МТРА оптимізації	67
4.2.4 Алгоритм керування моментом і потокозчепленням повного порядку .	70
4.2.5 Регулятора швидкості	74
5 Врахування характеристики зчеплення та реалізація спеціальних функцій.....	75
5.1 Врахування характеристики зчеплення приводного колеса з дорогою.....	75
5.2 Реалізація функції антибуксування.....	83
5.3 Реалізація функції антивідкат.....	90
6 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	92
6.1 Розрахунок параметрів динамічної моделі двигуна	92
6.2 Дослідження енергоефективності при використанні традиційного векторного керування	92
6.3 Дослідження енергоефективності при використанні методу керування моментом з максимізацією співвідношення момент-струм	97
6.4 Висновки до розділу	102
7. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ.....	104
Висновок до розділу 7.....	116
ВИСНОВКИ	117
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	119

ВСТУП

Актуальність роботи. В сучасних умовах життя тролейбуси є значною частиною громадського транспорту які їздять в багатьох містах країни.

Тролейбус в наш час є складною системою яка поєднує в собі ряд підсистем, а зокрема: електричну, пневматичну, електронну та механічну. Ці компоненти необхідні для забезпечення функціонування транспортного засобу.

Показники якості в тягових електричних та механічних системах є вагомим критерієм в характеристиках ефективності використання тролейбусів. Зокрема важливим питанням є модернізація наявного транспорту більш сучасним та економічним обладнанням [1].

Традиційний тролейбус має суттєвий недолік – неможливість працювати автономно, не отримуючи живлення від контактної мережі, яка в свою чергу заважає прокладенню іншим лініям та комунікаціям, що тим самим і обмежує широке розгортання тролейбусних ліній.

Під час руху по маршруту тролейбус може бути заблокованим іншим транспортним засобом або пошкодженою контактною мережею, так як він не зможе об'їхати перешкоду, так як цього не дозволяє контактна мережа.

За останні роки, з розвитком технологій накопичення енергії, зокрема акумуляторних батарей, обладнання тролейбусів батареями та системою підзарядки в режимі руху вирішило проблему руху поза контактною мережею та повністю задовольнило потреби ринку [2].

Метою дослідження є покращення експлуатаційних характеристик тролейбуса з автономним ходом шляхом застосування підібраних методів керування.

Об'єктом дослідження є процес перетворення енергії в тяговому асинхронному двигуні.

Предметом дослідження є алгоритми векторного керування тяговими асинхронними двигунами тролейбусів

Задачі які будуть вирішуватися в роботі

1. Дослідження впливу профілю дороги на розрахункові показники системи.
2. Розробка алгоритму обмеження струму.
3. Розробка підсистем запобігання відкочування, буксування та круїзконтролю.
4. Дослідження енергетичних показників в системах векторного керування з постійним потокощепленням та МТРА алгоритму.
5. Розробка стартап проекту.

Методи дослідження

1. Теорія автоматичного керування.
2. Теорія електропривода.
3. Методи експериментального дослідження.
4. Методи математичного моделювання.

Публікації:

1) Гуцул О.О. Дослідження залежності еквівалентного моменту двигуна тролейбуса від профілю дороги / Гуцул О.О., Ковбаса С.М. Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи», ВНТУ, Вінниця, 2022.

2) Гуцул О.О., Мудра О.О., Бур'ян С.О. «Дослідження системи стабілізації тиску двоагрегатної насосної установки в пакеті sim-hydraulics при

варіаціях гідравлічного опору». Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузі «Електротехніка та електромеханіка», м. Кам'янське, 2020р.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Усі основні види громадського транспорту можна розділити на два види:

- паливні транспортні засоби (автобуси);
- електротранспорт (трамваї, тролейбуси).

Основна проблема полягає в тому, що не існує конкретного оптимального виду транспорту, який поєднує переваги інших транспортних засобів, уникаючи їх недоліків. Кожен вид громадського транспорту має свої плюси та мінуси, які роблять його кращим у чомусь і гіршим за інших.

Розглянемо основні види громадського транспорту більш детально.

Автобуси. Автобуси є одним із найпоширеніших видів транспорту в місті, випереджаючи електротранспорт у цьому плані.

Основними перевагами автобусів є:

- Значно вища мобільність порівняно з електромобілем;
- немає необхідності прокладати доріжки для експлуатації цього типу транспортних засобів.

Основні недоліки автобусів:

- Забруднення навколишнього середовища;
- високі експлуатаційні витрати через ціни на паливо;
- значно вища вартість проїзду.

Тролейбуси нині є менш поширеним видом транспорту, ніж автобуси. Однак ця тенденція поступово змінюється через очевидні переваги тролейбусів, які значно переважають недоліки.

Недоліки тролейбусів:

- Початкова вартість розгортання тролейбусної системи вища, ніж автобусної, оскільки вона потребує будівництва підстанцій та повітряних ліній.

- Пропускна спроможність тролейбусної лінії не перевищує пропускну здатність автобусної лінії і, звичайно, завжди нижча, ніж трамвайна.

- Тролейбус дуже чутливий до стану дорожнього покриття та повітряного дроту. Якщо необхідно проїхати пошкоджену ділянку дороги, швидкість необхідно значно знизити, щоб уникнути опускання прутів з проводів контактної мережі.

- Через підключення до повітряної лінії тролейбусна мережа має відносно невелику гнучкість. Однак використання автономних систем і двоповерхових автобусів вирішує цю проблему.

- На відміну від трамвая, кузов тролейбуса не заземлений, тому необхідно вжити додаткових заходів щодо забезпечення електробезпеки: контролювати струм витоку, забезпечити подвійну ізоляцію ланцюгів, періодично перевіряти ізоляцію.

- Практично неможливо обігнати один тролейбус іншим, якщо для цього не призначена контактна мережа – для цього потрібно опустити планки на одному з тролейбусів.

- Тролейбусна контактна мережа забиває вулиці та площі міста; Безлад проводів і повітряних ліній виглядає неестетично і псує історичний вигляд міста.

- тролейбус, не обладнаний системою автономного керування, не повинен відхилятися від контактної мережі більше ніж на 4,5 метра, що іноді призводить до труднощів уникнення заторів та пошкодження контактної мережі. Навіть при значному відхиленні від контактної мережі швидкість

необхідно зменшити, щоб уникнути опускання стовпів від проводів контактної мережі.

Далі розглянемо тягові системи автобусів та електромобілів, їх переваги та недоліки; Познайомимось з механізмом живлення електромобіля та видами його схем.

У цей період також існувало багато типів систем управління двигуном в цілому, вони поділяються на:

➤ залежно від типу регулювання напруги:

- реостати;
- тиристорний імпульс;
- на транзисторах IGBT;

➤ залежно від типу контрольних пристроїв:

- градуйовані;
- гладкі;

➤ із способу керування електрообладнанням:

- системи прямого спостереження;
- системи непрямого контролю;

➤ за принципом управління;

- автоматично;
- не автоматично.

Реостатичні системи керування в режимі пуску регулюють напругу двигуна шляхом зміни опору пускового реостата, який з'єднаний послідовно з двигуном.

Тиристорні імпульси забезпечують регулювання напруги двигуна шляхом подачі на нього імпульсної напруги постійної амплітуди, ширини і частоти, яка може змінюватися за необхідним законом.

Сучасні тролейбуси використовують тягові приводи з транзисторами IGBT (біполярні транзистори із ізольованим затвором) або системою управління імпульсами транзисторів (TRIC), яка є найдосконалішою з усіх систем, які зараз використовуються.

У порівнянні з тиристорною імпульсною системою управління (TISK) і особливо системою управління реостатним контактором (RKSK), TrisK набагато компактніше, легше і не потребує постійного обслуговування. Ця система має секцію перемикання, яка дозволяє підключити ПК для діагностики приводу та налаштування його елементів керування.

Крім того, TrICK економить електроенергію, усуваючи втрати при перемиканні та в реостатах, оскільки дає можливість безконтактного та безреостатного пуску та прискорення тролейбуса.

Переваги тролейбусів перед автобусами:

- Тролейбуси не викидають вихлопні гази в навколишнє середовище, тоді як автобуси та інші паливні транспортні засоби є основними забруднювачами повітря в цьому місці
- термін служби тролейбуса довший за термін служби автобуса.
- Вартість утримання тролейбусного парку нижча, ніж вартість утримання автобусного парку.
- Транспортні витрати на тролейбусі нижчі, ніж на автобусі.
- При роботі на гірських стежках тролейбус не потребує встановлення спеціального сповільнювача, оскільки його роль успішно виконує тяговий двигун.

- двигун тролейбуса допускає дуже значні короточасні перевантаження. Електродвигун може розвивати свою повну потужність у всіх діапазонах швидкостей, що також важливо для використання в гірській місцевості.

- Тролейбус може бути обладнаний системою рекуперації енергії в повітряній лінії, що дозволяє економити електроенергію, особливо при роботі на важкодоступній місцевості.

- Тяговий двигун надійніший за двигун внутрішнього згоряння.

- Сучасний тролейбус набагато тихіше автобуса.

Основними джерелами шуму в тролейбусах є компресор, системи опалення та кондиціонування повітря, а на деяких моделях головна коробка передач, двигун-генератор та системи керування двигуном. У сучасних тролейбусах ці шуми або виключені, або значно зменшені. Теоретично тролейбуси можна зробити майже безшумними, але повна тиша може бути небезпечною для пішоходів.

- Тролейбус використовує електроенергію, вироблену електростанціями з більшою ефективністю, ніж двигун автобуса. А джерелом живлення для тролейбуса може бути будь-яка наявна електростанція.

- Місткість низькопідлогового тролейбуса зазвичай більша, ніж низькопідлого автобуса, тому що не потрібно місця для розміщення паливних баків, двигун тролейбуса і блоки трансмісії набагато компактніші, а деяке електрообладнання можна розмістити на дах.

1.1 Літій-іонна технологія виготовлення акумуляторів

Літій-іонні батареї мають набагато кращі параметри. Ви можете їсти, що Ni-Cd батареї мають значну перевагу: висоту, високу вантажопідйомність. Ця функція не є критичною, але ноутбуки чи мобільні телефони можна вмикати струмом (де Li-Ion антена готова на 80% і використовується їх антена), але є

багато пристроїв, які споживають багато електроенергії. В. різні електроінструменти, електростійки тощо .

Ви можете дуже швидко прочитати ці прилади, маючи Ni-Cd акумулятори. Власне, окрім поєднання з обмеженням використання кадмію, відповідно до лінії RoHS, будуть дослідження з виробництва безкадмієвих акумуляторів з високим навантаженням у [6].

Праймери («батарейки») з літєвим анодом 70-х років 20 років. Тому давно існує бажання створити хімічне джерело енергії з найактивнішого відновника — лужного металу, який би різко підвищив як робочу напругу батареї, так і її питому енергію. Оскільки розробка праймерів з літєвим анодом відбувається відносно швидко, вона працює, і відзначаються лише елементи. це виробництво літєвих батарей на, це виробництво літєвих батарей на, це виробництво літєвих батарей на службу та сонце

Після багатьох випробувань у 1980-х роках була визначена проблема літєвих батарей в літєвих електродах. Точніше пише про активність літію: процеси, що призводять до операції, призводять до подібної реакції, «Політ полум'я» відомий.

У 1991 році було перероблено велику кількість літєвих акумуляторів від виробників, які були зареєстровані як мобільні телефони. Заземлення - при цьому, коли струм на максимумі, батарея горить, користувач мобільного телефону підключений.

Виходячи з властивості літію нестабільності, незначного значення Ладенса, було проведено дослідження з виробництва акумуляторів без з'єднання Лі, але під егідою його іонів. Хоча літій-іонні акумулятори є одним з найпотужніших джерел енергії в літєвих акумуляторах, але літій-іонні акумулятори безпечні, але при відповідному режимі зарядки та обслуговування вони доступні.

1.2 Хімічні процеси Li-ion акумуляторів

Революція в розробці багаторазових літійових батарей пов'язана з використанням японських акумуляторів з негативним електродом з мідних матеріалів. Вуглець також є дуже поширеною матрицею для інтеркаляції літію.

Для підтримки напруги використовується акумулятор, а японські дослідники також продають позитивний електрод з кобальту як активний матеріал. Оксид кобальту має потенціал близько 4 літійових електродів, крім робочої напруги Li-ion акумулятора, характерне значення 3 В і більше.

Під час заряджання літій-іонного акумулятора літій в мідненому матеріалі (на негативному електроді) проміжно охолоджується, а літій в оксиді (на позитивній пластині) проміжно охолоджується. Якщо батарея заряджена, значить, робота в зазначеному напрямку правильна. а також процес зарядки та зарядки, літій транспортується від одного електрода до іншого і використовуються лише «літій-іонні» акумуляторні батареї або батареї крісла-гойдалки.

1.3 Процеси на негативному електроді Li-ion акумулятора

У всіх Li-ion акумулятори, доведених до комерціалізації, анод виготовляється з вуглецевих матеріалів. Інтеркаляція літію в вуглецеві матеріали являє собою складний процес, механізм і кінетика якого істотно залежать від природи вуглецевого матеріалу і природи електроліту.

Вуглецева матриця, що застосовується в якості анода, може мати впорядковану шарувату структуру, як у природного або синтетичного графіту, неупорядковану аморфну або частково впорядковану (кокс, піролізний або мезофазних вуглець, сажа та ін.).

Іони літію при впровадженні розсовують шари вуглецевої матриці і розташовуються між ними, утворюючи інтеркалати різноманітних структур. Питомий обсяг вуглецевих матеріалів в процесі інтеркаляції-деінтеркаляції іонів літію змінюється незначно.

Крім вуглецевих матеріалів в якості матриці негативного електрода вивчаються структури на основі олова, срібла і їх сплавів, сульфід олова, фосфориди кобальту, композити вуглецю з наночастинками кремнію.

1.4 Процеси на позитивних пластинах Li-ion акумулятора

Якщо в первинних літєвих елементах застосовуються різноманітні активні матеріали для позитивного електрода, то в літєвих акумуляторах вибір матеріалу позитивного електрода обмежений. Позитивні електроди літій-іонних акумуляторів створюються виключно з літірованих оксидів кобальту або нікелю і з літій-марганцевих шпинелей.

В даний час в якості катодних матеріалів все частіше застосовуються матеріали на основі змішаних оксидів або фосфатів. Показано, що з катодами із змішаних оксидів досягаються найкращі характеристики акумулятора. Освоюються і технології покриття поверхні катодів тонкодисперсними оксидами.

При заряді Li-ion акумулятора відбуваються реакції:

на позитивних пластинах: $LiCoO_2 \rightarrow Li_{1-x}CoO_2 + xLi^+ + xe^-$;

на негативних пластинах: $C + xLi^+ + xe^- \rightarrow CLi_x$.

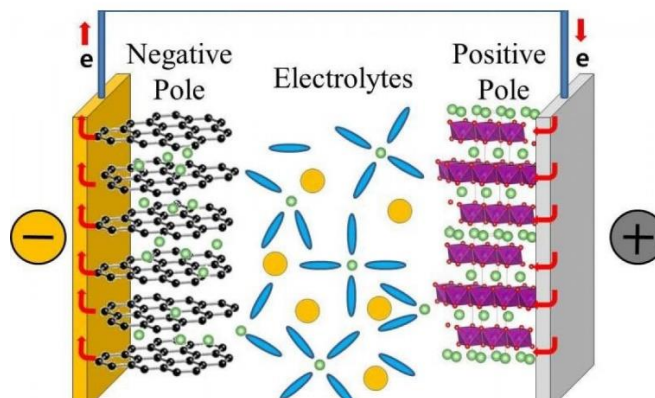


Рисунок 1.1 Процес заряджання літій-іонного акумулятора

1.4 Конструкція Li-ion акумуляторів

Конструктивно Li-ion акумулятори, як і лужні (Ni-Cd, Ni-MH), виробляються в циліндричному і призматичному варіантах. В циліндричних акумуляторах згорнутий у вигляді рулону пакет електродів і сепаратора розміщений в сталевому або алюмінієвому корпусі, з яким з'єднаний негативний електрод. Позитивний полюс акумулятора виведений через ізолятор на кришку. Призматичні акумулятори виробляються складанням прямокутних пластин один на одного. Призматичні акумулятори забезпечують більш щільну упаковку в акумуляторній батареї, але в них важче, ніж в циліндричних, підтримувати стискаючі зусилля на електроди. У деяких призматичних акумуляторах застосовується рулонна збірка пакету електродів, який скручується в еліптичну спіраль. Це дозволяє об'єднати переваги двох описаних вище модифікацій конструкції.

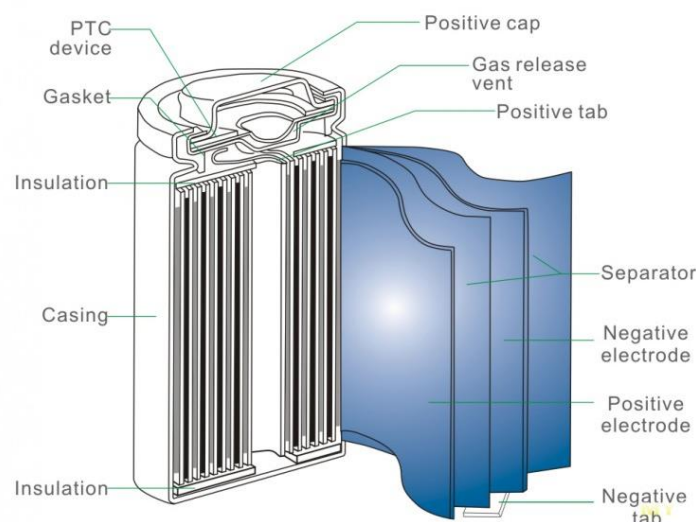


Рисунок 1.2 Конструкція літій-іонного акумулятора

Деякі конструктивні заходи зазвичай робляться і для попередження швидкого розігріву і забезпечення безпеки роботи Li-ion акумуляторів. Під кришкою акумулятора є пристрій, що реагує на позитивний температурний коефіцієнт збільшення опору, і інше, яке розриває електричну зв'язку між катодом і позитивною клемою при підвищенні тиску газів всередині

акумулятора вище допустимого рівня.

Для підвищення безпеки експлуатації Li-ion акумуляторів в складі батареї обов'язково застосовується також і зовнішній електронний захист, мета якого не допустити можливість перезаряду і перерозряду кожного акумулятора, короткого замикання і надмірного розігріву.

Більшість Li-ion акумуляторів виготовляють в призматичних варіантах, оскільки основне призначення Li-ion акумуляторів - забезпечення роботи стільникових телефонів і ноутбуків. Як правило, конструкції призматичних акумуляторів не уніфіковані і більшість фірм-виробників стільникових телефонів, ноутбуків і т.д. не допускають застосування в пристроях акумуляторів сторонніх фірм.

Різноманітні електроди в літєвих та літій-іонних акумуляторах поділяються сепаратором з пористого поліпропілену.

Конструкція Li-ion і інших літєвих акумуляторів, як і конструкція всіх первинних джерел струму ("батареєнок") з літєвим анодом, відрізняється абсолютною герметичністю.

Вимога абсолютної герметичності визначається як неприпустимістю витікання рідкого електроліту (негативно діє на апаратуру), так і неприпустимістю потрапляння в акумулятор кисню і парів води з навколишнього середовища. Кисень і пари води реагують з матеріалами електродів і електроліту і повністю виводять акумулятор з ладу.

Технологічні операції виробництва електродів і інших деталей, а також збірку акумуляторів проводять в особливих сухих кімнатах або в герметичних боксах в атмосфері чистого аргону. При складанні акумуляторів застосовують складні сучасні технології зварювання, складні конструкції гермовиводів і т.д.

Закладка активних мас електродів є компромісом між бажанням досягти максимуму розрядної ємності акумулятора і вимогою гарантувати безпеку його роботи, яка забезпечується при співвідношенні $C^- / C^+ \Rightarrow 1,1$ для попередження утворення металевих літій (і тим самим можливості загоряння).

1.5 Характеристики Li-ion акумуляторів

Сучасні Li-ion акумулятори мають високі питомі характеристики: 100-180 Вт· год/ кг і 250-400 Втч / л. Робоча напруга - 3,5-3,7 В. Якщо ще кілька років тому розробники вважали досяжною ємність Li-ion акумуляторів не вище декількох ампер-годин, то зараз більшість причин, що обмежують збільшення ємності, подолано і багато виробників стали випускати акумулятори ємністю в сотні ампер-годин.

Сучасні малогабаритні акумулятори працездатні при токах розряду до 2 С, потужні - до 10-20С. Інтервал робочих температур: від -20 до +60 ° С. Проте багато виробників вже розробили акумулятори, працездатні при -40 ° С. Можливо розширення температурного інтервалу в область більш високих температур.

Саморозряд Li-ion акумуляторів становить 4-6% за перший місяць, потім - істотно менше: за 12 місяців акумулятори втрачають 10-20% запасеної ємності. Втрати ємності у Li-ion акумуляторів в кілька разів менше, ніж у нікель-кадмієвих акумуляторів, як при 20 ° С, так і при 40 ° С. Ресурс- 500-1000 циклів.

1.6 Зарядження Li-ion акумуляторів

Li-ion акумулятори заряджаються в комбінованому режимі: спочатку при постійному струмі (в діапазоні від 0,2 С до 1 С) до напруги 4,1-4,2 В (в залежності від рекомендацій виробника), далі при постійній напрузі. Перша стадія заряду може тривати близько 40 хв, друга стадія довше. Більш швидкий заряд може бути досягнутий при імпульсному режимі.

У початковий період, коли тільки з'явилися Li-ion акумуляторні батареї, що використовують графітову систему, потрібно обмеження напруги заряду з розрахунку 4,1 В на елемент. Хоча використання більш високої напруги дозволяє підвищити енергетичну щільність, окислювальні реакції, які відбуваються в елементах такого типу при напругах, що перевищують поріг 4,1 В, призводили до скорочення їх терміну служби. Згодом цей недолік

ліквідували за рахунок застосування хімічних добавок, і в даний час Li-ion елементи можна заряджати до напруги 4,20 В. Допустиме відхилення напруги становить лише близько $\pm 0,05$ В на елемент.

Li-ion акумуляторні батареї промислового і військового призначення повинні мати більший термін служби, ніж батареї для комерційного використання. Тому для них гранична напруга кінця заряджання становить 3,90 В на елемент. Хоча енергетична щільність (кВт·год / кг) у таких батареї нижче, підвищений термін служби при невеликих розмірах, малій вазі і більш висока в порівнянні з батареями інших типів енергетична щільність ставлять Li-ion батареї поза конкуренцією.

При заряді Li-ion акумуляторних батареї струмом 1С час заряду становить 2-3 год. Li-ion батарея досягає стану повного заряду, коли напруга на ній стає рівною напрузі відсікання, а струм при цьому значно зменшується і складає приблизно 3% від початкового струму заряду.

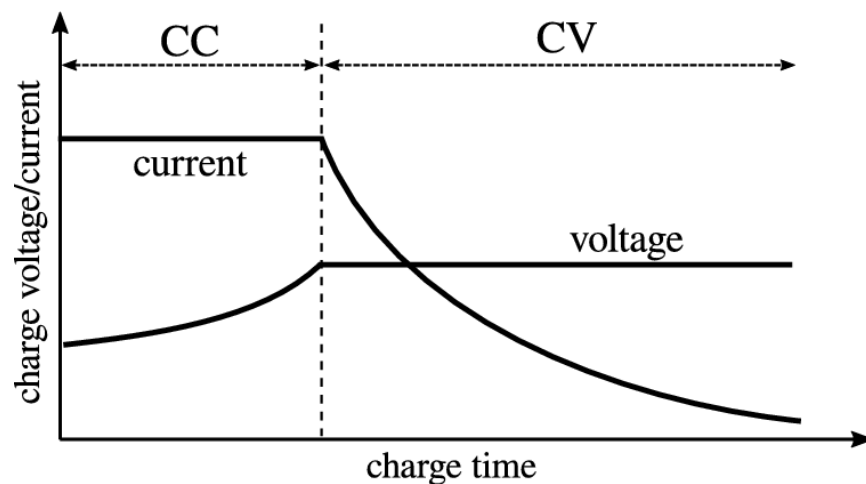


Рисунок 1.3 Залежність напруги та струму від часу при заряджанні літій-іонного акумулятора

Отже, Li-ion акумулятори мають низьку стійкість до перезаряджання. На негативному електроді на поверхні вуглецевої матриці при значному перезаряджанні стає можливим осадження металевого літію (у вигляді дрібно

роздробленого моховитого осаду), що володіє великою реакційною здатністю до електроліту, а на катоді починається активне виділення кисню. Виникає загроза теплового розгону, підвищення тиску і розгерметизації. Тому заряджання Li-ion акумуляторів можна вести тільки до напруги, рекомендованої виробником. При збільшеній напрузі заряджання ресурс акумуляторів знижується.

Безпечній роботі Li-ion акумуляторних батарей повинна приділятися серйозна увага. В Li-ion батареях комерційного призначення є спеціальні пристрої захисту, що запобігають перевищенню напруги заряджання вище певного порогового значення. Додатковий елемент захисту забезпечує завершення заряджання, якщо температура батареї досягне 90 ° C. Найбільш досконалі за конструкцією батареї мають ще один елемент захисту - механічний вимикач, який спрацьовує при збільшенні внутрішньо корпусного тиску батареї. Вбудована система контролю напруги налаштована на дві напруги відсікання - верхню і нижню.

Є й винятки - Li-ion акумуляторні батареї, в яких пристрої захисту взагалі відсутні. Це акумуляторні батареї, до складу яких входить марганець. Завдяки його наявності, при перезаряджанні реакції металізації анода і виділення кисню на катоді відбуваються настільки повільно, що стало можливим відмовитися від застосування пристроїв захисту.

1.7 Збереження Li-ion акумуляторів.

Всі літієві акумулятори характеризуються досить гарною схоронністю. Втрата ємності за рахунок саморозряду 5-10% в рік.

Наведені показники слід розглядати як деякі номінальні орієнтири. Для кожного конкретного акумулятора, наприклад, напруга розряджання залежить від струму розряджання, рівня розрядженості, температури; ресурс залежить від режимів (струмів) розряджання і заряджання, температури, глибини розряджання; діапазон робочих температур залежить від рівня вироблення ресурсу, допустимих робочих напруг і т.д.

До недоліків Li-ion акумуляторів слід віднести чутливість до перезарядження і перерозрядження, через це вони повинні мати обмежувачі зарядження і розрядження.

З рисунків видно, що з ростом струму розрядження розрядна ємність акумулятора знижується несуттєво, але зменшується робоча напруга. Такий же ефект з'являється при розрядженні при температурі нижче 10 ° С. Крім цього, при низьких температурах має місце початкова просадка напруги.

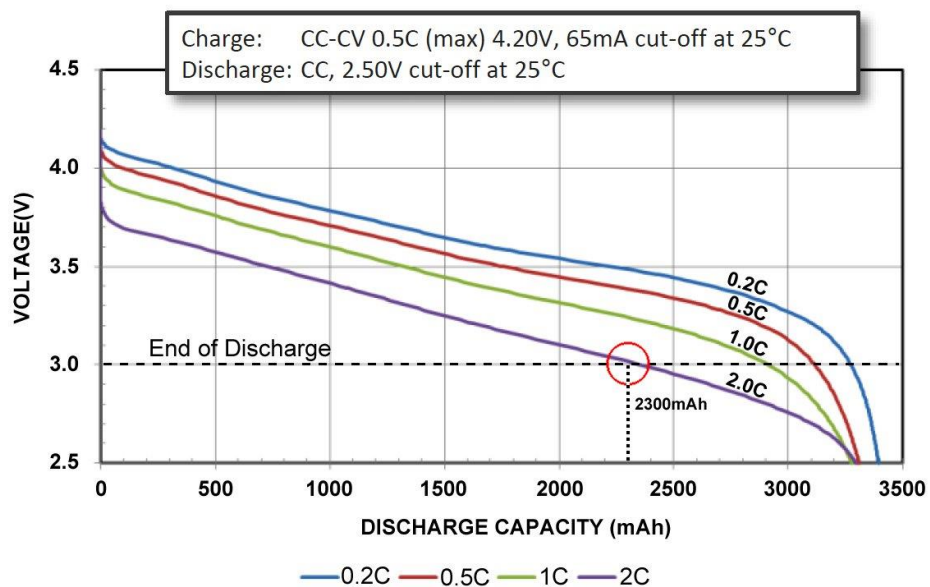


Рисунок 1.4 Розрядні характеристики літій-іонного акумулятора при різних струмах

Що стосується експлуатації Li-ion акумуляторів взагалі, то, з огляду на всі конструктивні і хімічні способи захисту акумуляторів від перегріву і вже стало уявлення про необхідність зовнішнього електронного захисту акумуляторів від перезарядження і перерозрядження, можна вважати проблему безпеки експлуатації Li-ion акумуляторів вирішеною. А нові катодні матеріали часто забезпечують ще більшу термічну стабільність Li-ion акумуляторів.

Безпека Li-ion акумуляторів. При розробці літієвих і літій-іонних акумуляторів, як і при розробці первинних літієвих елементів, питанню

безпеки зберігання та використання приділялася особлива увага. Всі акумулятори мають захист від внутрішніх коротких замикань (а в окремих випадках - і від зовнішніх коротких замикань). Ефективним способом такого захисту є застосування двошарового сепаратора, один з шарів якого виготовляється не з поліпропілену, а з матеріалу, аналогічного поліетилену.

У випадку короткого замикання (наприклад, через проростання дендритів літію до позитивного електрода) за рахунок локального розігріву цей шар сепаратора підплавляється і стає непроникним, запобігаючи, таким чином, подальшому проростанню дендритів.

1.8 Механізми, що призводять до зменшення ємності Li-ion акумуляторів

При циклюванні Li-ion акумуляторів серед можливих механізмів зниження ємності найбільш часто розглядаються наступні:

- руйнування кристалічної структури катодного матеріалу (особливо LiMn_2O_4);
- розшарування графіту;
- нарощування пасивної плівки на обох електродах, що призводить до зниження активної поверхні електродів і блокування дрібних пор;
- осадження металевого літію;
- механічні зміни структури електрода в результаті об'ємних коливань активного матеріалу при циклюванні.

Дослідники розходяться в думці, який з електродів зазнає великих змін при циклюванні. Це залежить як від природи обраних електродних матеріалів, так і від їх чистоти. Тому для Li-ion акумуляторів вдається описати тільки якісно зміну їх електричних і експлуатаційних параметрів в процесі експлуатації.

Зазвичай ресурс комерційних Li-ion акумуляторів до зниження розрядної ємності на 20% становить 500-1000 циклів, але він значно залежить

від величини граничної зарядної напруги. Зі зменшенням глибини циклювання ресурс підвищується.

Спостережуване підвищення терміну служби пов'язують зі зменшенням механічної напруги, що викликається, змінами обсягу електродів впровадження, які залежать від ступеня їх зарядженості.

В результаті пошуків найкращого матеріалу для катода сучасні Li-ion акумулятори перетворюються в ціле сімейство хімічних джерел струму, помітно відрізняються один від одного як енергоємністю, так і параметрами режимів заряджання / розряджання.

Це, в свою чергу, вимагає істотного збільшення інтелектуальності схем контролю, які до теперішнього часу стали невід'ємною частиною акумуляторних батарей і питомих пристроїв - в іншому випадку можливе пошкодження (в тому числі незворотне) як батарей, так і пристроїв.

Завдання ускладнюється ще й тим, що розробники намагаються максимально повно використовувати енергію акумуляторів, домагаючись підвищення часу автономної роботи при мінімально займаному джерелом живлення обсязі і вазі.

Це дозволяє досягти істотних конкурентних переваг. На думку Д. Хикока, віце-президента Texas Instruments з силових компонентів мобільних систем, при використанні катодів з нових матеріалів розробники акумуляторів далеко не відразу досягають тих же конструкційних і експлуатаційних характеристик, що і у випадку з більш традиційними катодами. В результаті нові акумулятори часто мають значні обмеження діапазону умов експлуатації.

Мало того, останнім часом на ринок крім традиційних виробників акумуляторних осередків і батарей - Sanyo, Panasonic і Sony - дуже активно пробиваються нові виробники, здебільшого з Китаю. На відміну від традиційних виробників, вони поставляють продукцію з істотно великим розкидом параметрів в межах однієї технології або навіть однієї партії. Це пов'язано з їх бажанням конкурувати в основному за рахунок низької ціни продукції, що часто призводить до економії на дотриманні вимог

технологічного процесу.

Отже, в даний час істотно зростає важливість інформації, що надається т.зв. "Розумними акумуляторами": ідентифікація акумулятора, температура акумулятора, залишковий заряд і допустиме перенапруження. За словами Хикока, якщо розробники готових пристроїв будуть конструювати підсистему живлення, що враховує як умови експлуатації, так і параметри осередків, це дозволить нівелювати відмінності в параметрах акумуляторів і підвищити ступінь свободи для кінцевих користувачів, що надасть їм можливість вибирати не тільки рекомендовані виробником пристрої, але і акумулятори інших компаній.

Відзначимо, що виробники акумуляторів докладають великих зусиль до розробки катодів на основі літєвих сполук, які дозволили б Li-ion акумуляторам замінити Ni-Cd в пристроях з великим споживаним струмом. У цій сфері є перспективним використання катодів на основі LiMn_2O_4 .

1.9 Типи тягових електродвигунів

В сучасному електротранспорті використовують двигуни змінного струму, тому що вони дозволяють використовувати практично будь-який промисловий трифазний двигун, чим спрощується пошук необхідного двигуна за типорозміром, конструктивним виконанням, потужністю тощо. Двигуни змінного струму та контролери часто мають функцію рекуперації. Під час гальмування, руху на спуск та накатом двигун працює в генераторному режимі, підзаряджаючи батарею.

Головною частиною електромобіля є його електричний двигун. Розвиток у сфері силової електроніки та методів керування електричними двигунами дозволили розширити різноманіття доступних для використання електричних двигунів. Вибір типу двигуна є критичним при проектуванні електромобіля, адже при цьому враховуються багато факторів: ККД, надійність, вартість, густина потужності, розвиненість технології, контрольованість двигуна. До основних типів тягових двигунів, які використовуються в електромобілях, відносять:

- Асинхронний електродвигун дозволяє практично повністю виключити технічне обслуговування протягом призначеного безпечного ресурсу автомобіля. При живленні електродвигуна від акумуляторної батареї через перетворювач частоти і напруги (інвертор) в відношенні мінімальної маси до електромагнітної потужності необхідно враховувати масу електронного блоку і втрати в цьому блоці. Збільшення маси двигуна зазвичай не служить перешкодою при проектуванні електропривода електромобіля, так як маса двигуна зазвичай не перевищує 2-5% повної маси електромобіля і незрівнянно менше маси акумуляторної батареї, але в порівнянні з синхронним двигуном масогабаритні показники значно гірші у асинхронного двигуна із врахуванням однакових потужностей.

- Синхронний електродвигун з постійними магнітами схожий за конструкцією з асинхронним, головна відмінність між синхронним двигуном з постійними магнітами (СДПМ) і асинхронним електродвигуном полягає в роторі. Проведені дослідження 1 показують, що СДПМ має ККД приблизно на 2% більше, ніж високо ефективний (ІЕ3) асинхронний електродвигун, за умови, що статор має однакову конструкцію, а для управління використовується один і той же частотний перетворювач. При цьому синхронні електродвигуни з постійними магнітами в порівнянні з іншими електродвигунами мають кращі показники: потужність / обсяг, момент / інерція.

Тяговий електродвигун по суті, являє собою електродвигун з передачею крутного моменту на рушій транспортного засобу (колесо, гусеницю або гребний гвинт). Реалізувати в якості тягового приводу допомогло рішення встановити понижувальний редуктор, це дало можливість значно збільшити потужність і розвинути достатню для масового застосування ТЕД на транспортних засобах силу тяги.

Окрім основного режиму, тягові електродвигуни можуть працювати в реверсивному режимі (зворотне обертання валу), а також в режимі генератора (при електричному гальмуванні, рекуперації).

Отже, вибір параметрів та типу двигуна не може розглядатися ізольовано поза всієї енергетичної системи: акумуляторна батарея - перетворювач-інвертор частоти - двигун.

При проектуванні тягових електродвигунів використовують різні критерії оптимальності, наприклад: мінімум вартості, мінімум маси, мінімум провідникових матеріалів, мінімум втрат або максимум ККД, мінімальні віброшумові характеристики та ін. Критерієм оптимальності можуть бути мінімальні втрати, так як таким чином збільшується пробіг електромобіля протягом одного циклу розряду акумуляторної батареї (АБ). Вирішальним критерієм при виборі типу електроприводу є найбільш повне використання енергії АБ.

1.10 Висновки до розділу

В цьому розділі було зроблено аналітичний огляд електромеханічних систем тролейбуса, що використовуються, описано всі переваги та недоліки.

Таким чином, можна зробити висновок, що для вдосконалення існуючих електромеханічних систем необхідно впроваджувати тролейбуси з автономним ходом. Це дозволить знизити енергетичні та експлуатаційні витрати, не проводити електрифікацію віддалених маршрутів, підвищити комфортність поїздки пасажирів.

Акумулятор дасть змогу тролейбусу продовжити свій рух у випадку зникнення напруги контактної мережі та в разі потреби об'їхати ділянку з заторами та аваріями або виїхати за місто. Тобто мобільність такого виду транспорту вже значно краща ніж у звичайного тролейбуса і є досить співставною з мобільністю автобуса. В той же час беручи до уваги вартість електроенергії та палива тролейбус з акумулятором є значно більш дешевим, і окрім цього, екологічним видом транспорту, ніж автобус.

2 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1 Розрахунок потужності двигуна та акумуляторної батареї

Розрахунок параметрів електромеханічної системи будемо проводити для тролейбуса типу ЛАЗ Е183. Його основні технічні характеристики зведено до табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики тролейбуса

Порожня маса тролейбуса у спорядженому стані, кг	11200
Максимальна маса тролейбуса, кг	18000
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 50 км/год, с, не більше	22
Довжина, мм	12000
Ширина, мм	2550
Висота, мм	3450
Шини	безкамерні, низькопрофільні 275/80R22,5

Для визначення потужності двигуна потрібно знати графік руху транспортного засобу. Цей графік показує залежність швидкості транспортного засобу від часу, диференціалом якого є 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.

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 50 км/год – не більше ніж 22 секунди із максимальним пришвидшенням не більше ніж 1 м/с^2 .

Згідно цих вимог будуюмо графік руху тролейбуса, який наведено на рис.

2.1.

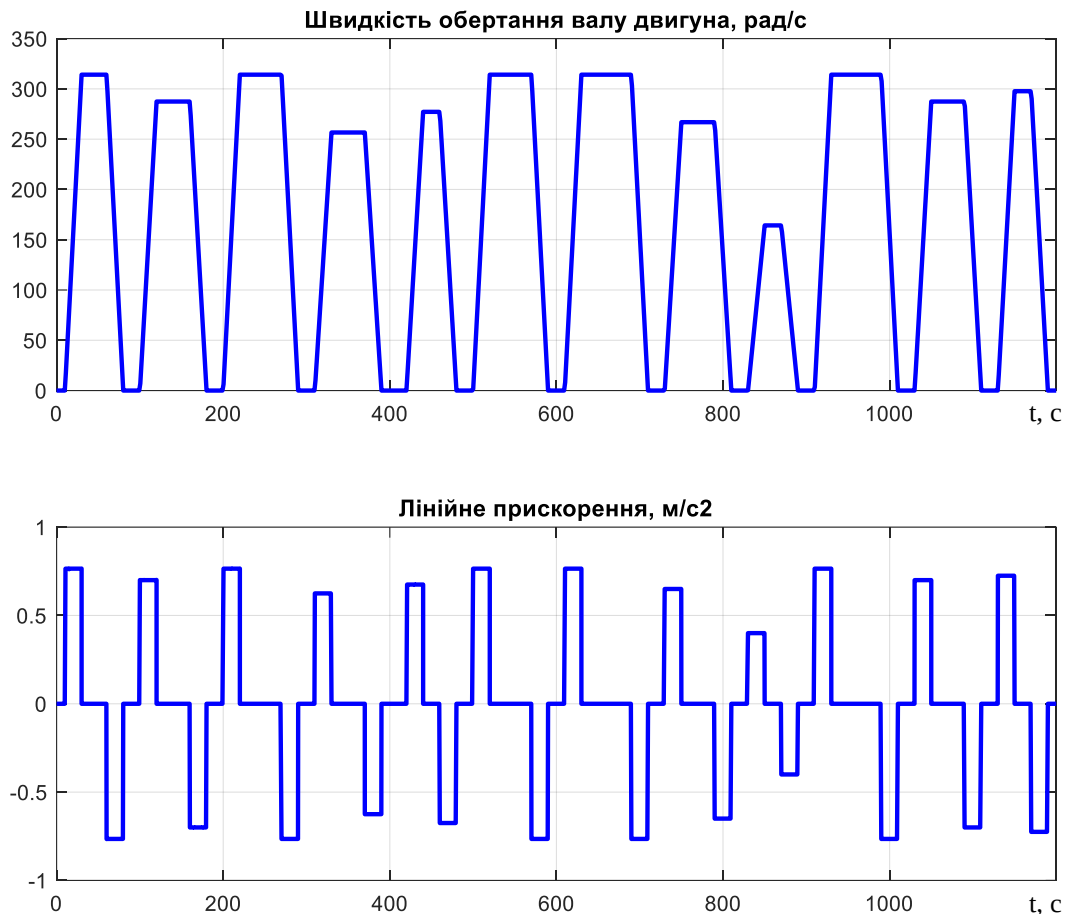


Рисунок 2.1 – Графік руху тролейбуса

Сумарний час руху тролейбуса склав 1200 с, протяжність маршруту – 10 000 м, мінімальна швидкість руху – 10 м/с, максимальна швидкість руху – 15.3 м/с, максимальне прискорення обмежене на рівні 0.8 м/с^2 .

Рівняння динаміки руху транспортного засобу записується як [7]:

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

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 рівняння (2.1) виражаємо значення сили тяги:

$$F_t = F_r + F_w + F_g + ma$$

Сила опору кочення розраховується за формулою [8]:

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

де g – прискорення вільного падіння; f_r – коефіцієнт опору коченню; α – кут нахилу дороги.

Для розрахунку тягового зусилля використаємо моделюючу програму в пакеті MATLAB/Simulink. Результати зображені на рис.2.2.

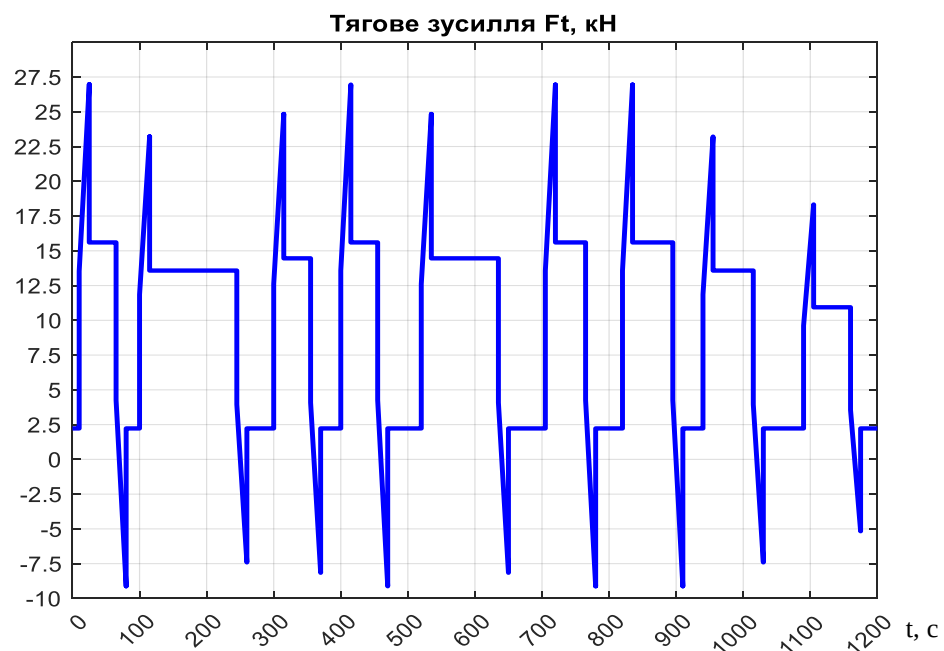


Рисунок 2.2 – Графік тягового зусилля

Для визначення потужності двигуна, тягове зусилля та швидкість трамваю потрібно привести до валу приводного двигуна, а саме знайти момент та швидкість двигуна.

Приводиться тягове зусилля за формулою [9]:

$$M_{\text{д}} = F_t \frac{R_k}{i_r \cdot \eta_r}$$

Де R_k – радіус колеса, i_r – передатне число редуктора, η_r – коефіцієнт корисної дії редуктора.

$$R_k = \frac{0.8 \cdot 275}{1000} + \frac{22,5 \cdot 0,0254}{2} = 0,5$$

Швидкість руху тролейбуса приводиться до двигуна за допомогою формули (2.2). ККД редуктора = 0.94

$$\omega_{\text{д}} = V \frac{i_r}{R_k} \quad (2.2)$$

На основі вище вказаних формул будуються навантажувальна діаграма двигуна та його тахограма, рис.2.3

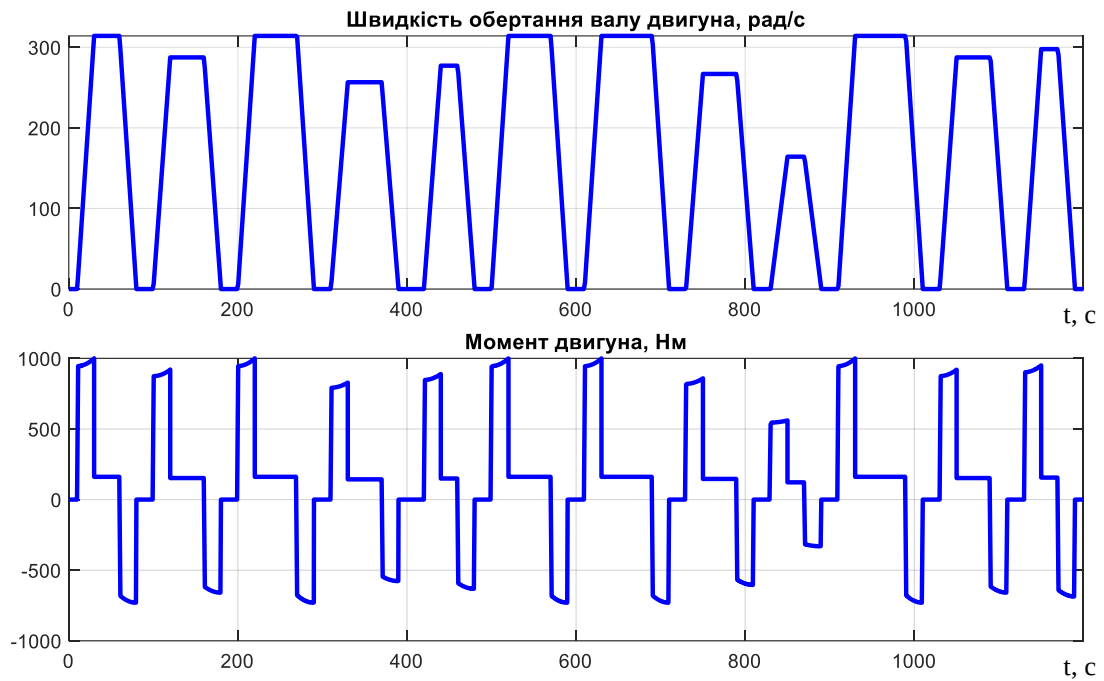


Рисунок 2.3 – Тахограма двигуна та навантажувальна діаграма двигуна

Маючи навантажувальну діаграму двигуна використаємо функцію `trapz()` пакету MATLAB, в результаті обчислень отримаємо значення еквівалентного моменту $M_e = 500$ Нм. Також обчислюємо середньоквадратичну потужність використовуючи формулу (2.3)

$$P_{сep.} = \frac{P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots + P_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} = 179 \text{ кВт} \quad (2.3)$$

Обираємо двигун типу ДТА – 2У1, параметри якого наведені в таблиці [10], [11] 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні параметри двигуна ДТА – 1У1

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 , Гн	0,000308
Індуктивність розсіювання ротора L_2 , Гн	0,000306
Активний опір статора R_1 , Ом	0,0196
Активний опір ротора R_2 , Ом	0,00859

Для розрахунку потрібної ємності АКБ приймаємо рух тролейбуса зі швидкістю 55 км/год. Бажаний запас ходу – 10 км.

Розрахунок необхідної ємності проводимо за наступною формулою:

$$I = \frac{W}{V \cdot 3600} = \frac{130000000}{540 \cdot 3600} = 66 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Таблиця 2.3 – Вихідні параметри для розрахунку

Тип АКБ	Мін/ном/макс напруги, В $U_{min}, U_{nom}, U_{max}$	Номинальний тривалий струм розряду, А, I_{nom}	Бажана ємність АКБ, ВТ*Г	Напруга живлення системи, В, U_{dc}
Li-Ion, LG HG2	3.2/3.7/4.2	20	14	120

Знаходимо кількість з'єднаних послідовно акумуляторів:

$$N_{ser} = \frac{U_{bat}}{U_{cell}} = \frac{540}{3.7} = 146 \text{ шт.}$$

Знаходимо струм на АКБ:

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{U_{bat}} = \frac{28630}{540} = 53 \text{ А} \cdot год$$

Знаходимо кількість з'єднаних паралельно акумуляторів:

$$N_{par} = \frac{I_{bat}}{I_{cell}} = \frac{66}{14} = 5 \text{ гілок}$$

Розраховуємо мінімально та максимально допустимі напруги АКБ:

$$U_{dcmin} = U_{dcmin1} \cdot N_{ser} = 3.2 \cdot 146 = 467.2 \text{ В}$$

$$U_{dcmax} = U_{dcmax1} \cdot N_{ser} = 4.2 \cdot 146 = 613.2 \text{ В}$$

Визначаємо максимальний допустимий струм, враховуючи заокруглення кількості паралельно з'єднаних гілок:

$$I_{bat} = N_{par} \cdot I_{bat} = 66 \cdot 5 = 330 \text{ A} \cdot \text{год}$$

2.2 Вибір основних елементів силовій частини перетворювача

Номінальне діюче значення фазної напруги розраховуються наступним чином:

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}},$$

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

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

Номінальне діюче значення струму статора визначається як:

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

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

$$I_n = \frac{179000}{3 \cdot 234,98 \cdot 0,93 \cdot 0,9} = 303,37.$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора визначаються як:

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

$$I_{na} = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 303,37 = 429,03$$

2.2.1 Вибір IGBT транзисторів для автономного інвертора напруги

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

$$I_{\max} = k \cdot I_{na} = 1,5 \cdot 429,03 = 643,54$$

Вибір IGBT здійснюється за критерієм:

$$I_c = I_{\max}, U_{CE \max} > U_{CE}$$

де $I_c, U_{CE \max}$ – відповідно тривалий струм колектора та напруга колектор – емітер, які вказані в паспортних даних IGBT.

Обираємо транзисторну збірку типу FF900R12IP4D, яка має $I_c = 900A, U_{CE \max} = 1200V$.

2.2.2 Розрахунок та вибір конденсаторів ємнісного фільтру

Ємність конденсатора фільтра визначається за формулою:

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

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; 106 – коефіцієнт для переходу від Φ до мкФ.

Еквівалентний опір розраховується як:

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}},$$

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

$$I_{dc} = \frac{P_{2n}}{U_{dcn} \cdot \eta \cdot \eta_{inv}},$$

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

$$I_{dc} = \frac{179000}{540 \cdot 0,93 \cdot 0,95} = 377,3 \text{ А},$$

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

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, який має ємність 15000 мкФ та робочу напругу 450 В.

Конденсатори в ланці постійного струму будуть з'єднані як показано на рис. 2.4, 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.

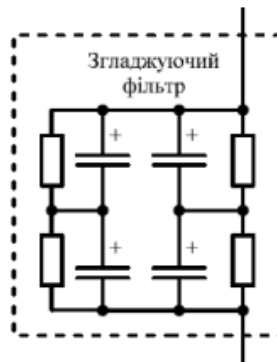


Рисунок 2.4 – Схема включення конденсаторів ланки постійного струму

2.2.3 Вибір резистора та ключа клампера

Клампер складається з резистора, діода та напівпровідникового ключа (рис. 2.5), який підключає цей резистор паралельно в ланку постійного струму для розсіювання надлишкової енергії, яка має місце в гальмівному режимі привода.

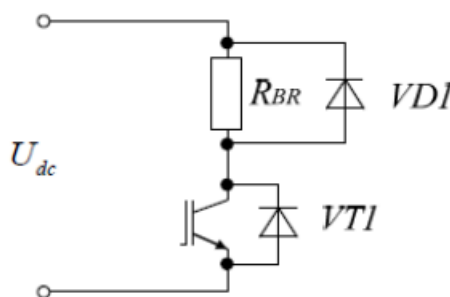


Рисунок 2.5 – Схема клампера

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:

$$I_{BR} = \frac{P_{2n}}{U_{clamp}}$$

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

$$I_{BR} = \frac{179000}{750} = 238,6 \text{ А}$$

З графіку руху тролейбуса було визначено, що час гальмування складає 20 % від усього часу руху. Знайдемо середнє значення потужності, що необхідно розсівати на резисторі клампера з врахуванням часу гальмування:

$$P_{cp} = 0,20 \cdot P_{2n} = 0,20 \cdot 179000 = 35800 \text{ Вт}.$$

Опір резистора клампера буде складати:

$$R_{BR} = \frac{U_{clamp}}{I_{BR}} = \frac{750}{238,6} = 3,15 \text{ Ом}.$$

В якості ключа клампера обираємо модуль типу F4-250R17MP4_B11, $I_C = 250 \text{ А}$, $U_{CE \max} = 1700 \text{ В}$.

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

2.2.4 Вибір давачів напруги та струму

Обираємо в якості давача струму давач типу IT 700– SB ULTRASTAB, який має номінальний вимірюваний струм 700 А. Враховуючи значення $U_{dc\max}$, обираємо в якості давача напруги давач типу CV 3–1200, який має номінальне значення вимірюваної напруги 840 В, максимальне значення 1200 В.

2.3 Дослідження профілю шляху на параметри основних елементів електромеханічної системи

Для дослідження системи маємо наступні параметри ТЗ: повна маса спорядженого тролейбуса $m = 18000$ кг; радіус коліс $R_k = 0.5$ м; передатне відношення диференціала $i_\phi = 10.265$;

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 50 км/год – не більше ніж 22 секунди із максимальним пришвидшенням не більше ніж 1 м/с^2 .

Коефіцієнт тертя кочення коліс по асфальту $f_r = 0.012$, Щільність повітряного потоку $\xi = 1.225$ (кг/м³), аеродинамічний коефіцієнт $C_d = 0.7$ Фронтальна площа $A_f = 8.8$ (м²).

Згідно цих вимог будуємо графік швидкості руху, лінійного прискорення, швидкості обертання двигуна та навантажувальна діаграма двигуна які наведено на рис.2.4. Даний дослід виконано при умові руху тролейбуса по прямій дорозі без спусків та підйомів.

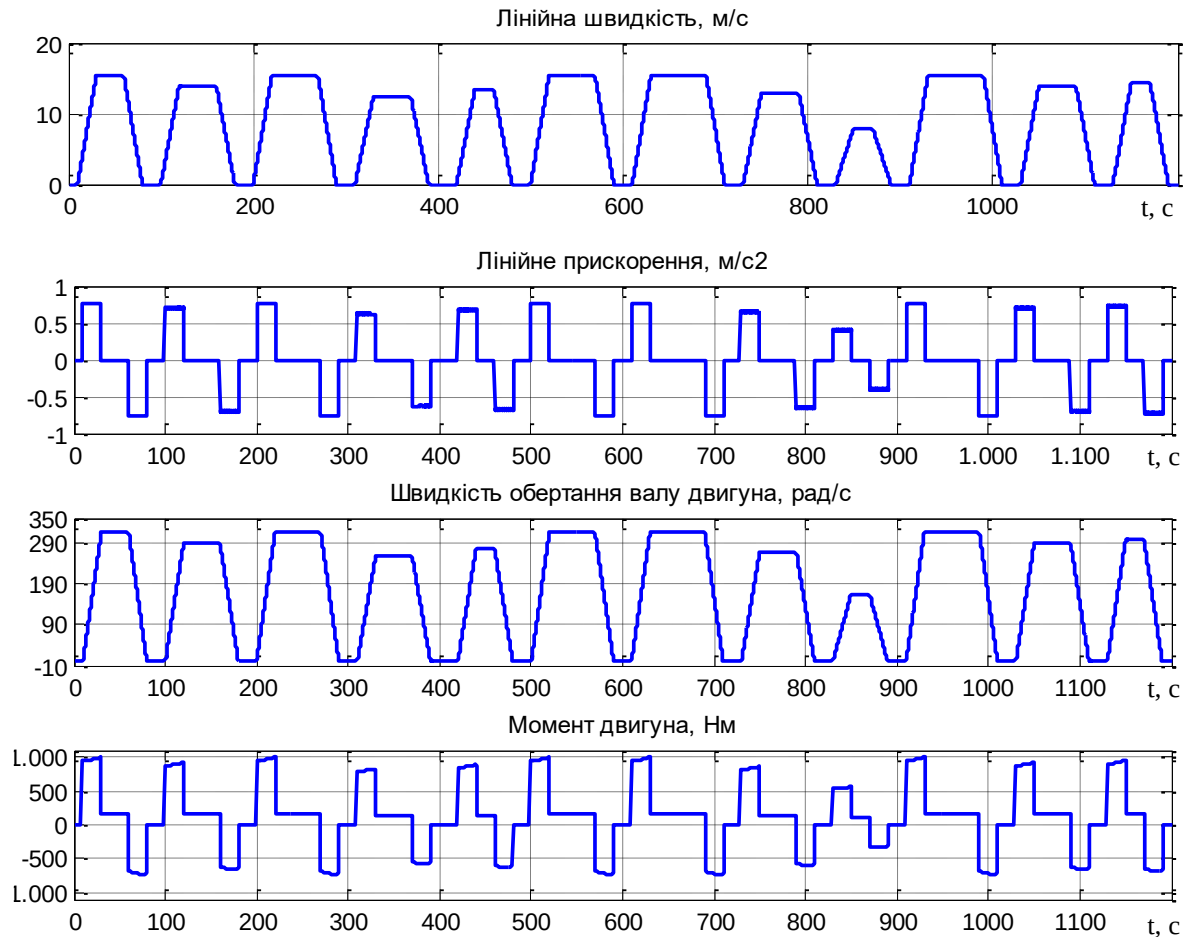


Рисунок 2.4 – Траєкторії швидкості руху, лінійного прискорення, швидкості обертання та моменту двигуна тролейбуса

Визначення значення еквівалентного моменту двигуна відбувається шляхом чисельного інтегрування навантажувальної діаграми. Отримаємо:

$$M_e = \sqrt{\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} M^2(t) dt} = 500 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Потужність двигуна, що буде задовільняти даний цикл, розраховується за формулою:

$$P_{\text{дв}} = k_z \cdot M_e \cdot \omega_n = 180 \text{ (кВт)}$$

де k_3 – коефіцієнт запасу. Приймаємо рівним $k_3=1.3$, ω_n – номінальна швидкість обертання вала двигуна.

Тепер виконаємо дослідження при умові, що тролейбус буде рухатись під гору увесь маршрут. Всі інші умови такі ж як і у попередньому досліді. Момент двигуна зображено на рис.2.5.

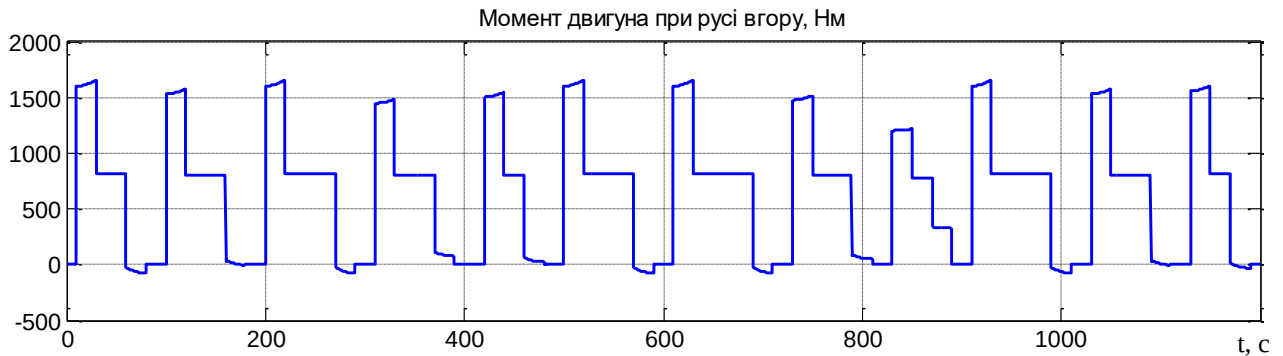


Рисунок 2.5 – Графік моменту двигуна тролейбусу при русі вгору

Визначення значення еквівалентного моменту двигуна:

$$M_e = \sqrt{\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} M^2(t) dt} = 857 \text{ (Н} \cdot \text{м)},$$

Потужність двигуна, що буде задовільняти даний цикл:

$$P_{\partial\partial} = k_3 \cdot M_e \cdot \omega_n = 349 \text{ (кВт)}$$

Тепер виконаємо дослідження при умові, що першу половину маршруту тролейбус буде рухатись під гору, а 2 половину з гори. Кут поступово буде підніматись в першій половині маршруту, та опускатись в другій половині

маршруту. Всі інші умови такі ж як і у попередньому досліді. Момент двигуна зображено на рис.2.6.

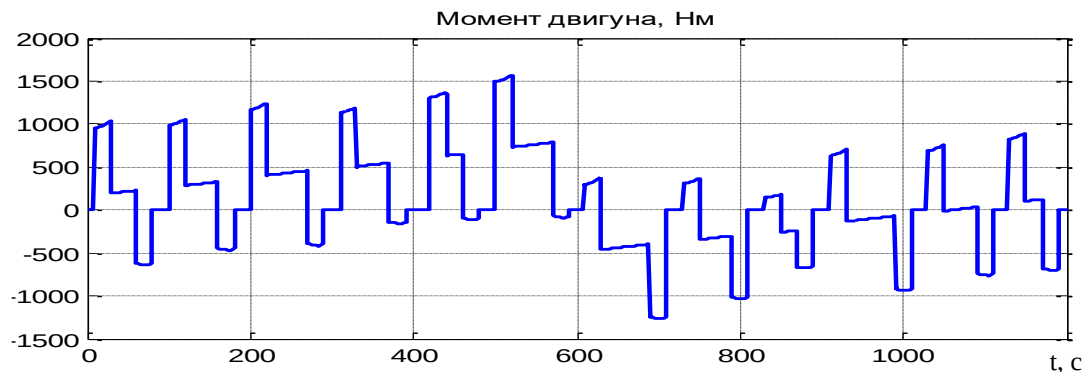


Рисунок 2.6 – Графік моменту двигуна тролейбусу при русі вгору та згори

Визначення значення еквівалентного моменту двигуна:

$$M_e = \sqrt{\frac{1}{T_y} \int_0^{T_y} M^2(t) dt} = 585 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Потужність двигуна, що буде задовільняти даний цикл:

$$P_{\partial в} = k_z \cdot M_e \cdot \omega_n = 238 \text{ (кВт)}$$

З результатів (табл.2.4., рис.2.7) видно, що профіль дороги суттєво впливає на вибір двигуна, адже для подолання сили тяжіння потрібно прикласти більший момент, і відповідно необхідний двигун більшої потужності.

Таблиця 2.4 – Результати дослідження

Профіль дороги	Еквівалентний момент, Нм	Середня потужність, кВт
Рівна дорога	500	179
Під гору і згори	585	238
Під гору	857	349



Рисунок 2.7 – Графік залежності еквівалентного моменту двигуна від нахилу дороги

2.4 Висновки до розділу

В цьому розділі на базі знайденої потужності двигуна розрахована потужність акумуляторної батареї. Елементи для АКБ вибрано фірми LG, типорозміром 18650 на 3000 mAh Li-ion, їх кількість - 146 штук. Для обраної батареї вираховано кількість паралельних та послідовних гілок акумуляторів.

Було розраховано та обрано елементи силової частини, такі як ключі, давачі струму та напруги, ємнісний фільтр і т.д. Також досліджено вплив різних факторів при виборі двигуна, а зокрема розглянуто вплив профілю дороги. Можна зробити висновок, що профіль дороги суттєво впливає на вибір компонентів системи, що показано в результатах дослідження.

3 ПІДСИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЯГОВОЮ БАТАРЕЄЮ. ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ТА ВПЛИВ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНУ СИСТЕМУ

3.1 Опис функцій підсистеми керування тяговою батареєю

Система керування батареєю (**BMS**) — це будь-яка електронна система, яка керує акумуляторною батареєю (елементом або акумуляторною батареєю), наприклад, захищає батарею від роботи за межами її безпечної робочої зони, контролює її стан, обчислює вторинні дані, звітує ці дані, які контролюють середовище, аутентифікують їх та балансують.

Акумуляторна батарея побудована разом з системою управління батареєю з шиною даних з смарт - блоків батарей. Розумний акумулятор повинен заряджатися за допомогою розумного зарядного пристрою.

BMS може контролювати стан акумулятора, представлений різними елементами, такими як:

- **Напруга** : загальна напруга, напруга окремих елементів або напруга періодичних відводів.
- **Температура** : середня температура, температура на вході охолоджуючої рідини, температура на виході охолоджуючої рідини або температури окремих осередків.
- Потік охолоджуючої рідини: для батарей з повітряним або рідинним охолодженням.
- **Струм** : струм в батареї або з неї.

BMS також буде контролювати перезарядку акумулятора, перенаправляючи відновлену енергію (тобто від рекуперативного гальмування) назад в акумулятор (як правило, складається з ряду модулів батареї, кожен з яких складається з певної кількості елементів).

Системи керування температурою батареї можуть бути як пасивними, так і активними, а охолоджуючим середовищем може бути повітря, рідина

або будь-яка форма зміни фази. Повітряне охолодження вигідно своєю простотою. Такі системи можуть бути пасивними, покладаючись тільки на конvekцію навколишнього повітря, або активними, з використанням вентиляторів для потоку повітря. У комерційних цілях Honda Insight і Toyota Prius використовують активне повітряне охолодження своїх акумуляторних систем.

Основним недоліком повітряного охолодження є його неефективність. Для роботи механізму охолодження необхідно використовувати велику кількість енергії, набагато більше, ніж активне рідинне охолодження. Додаткові компоненти механізму охолодження також додають вагу BMS, знижуючи ефективність батарей, що використовуються для транспортування.

Рідинне охолодження має вищий потенціал природного охолодження, ніж повітряне, оскільки рідкі охолоджуючі рідини, як правило, мають вищу теплопровідність, ніж повітря. Акумулятори можуть бути або безпосередньо занурені в охолоджуючу рідину, або охолоджуюча рідина може протікати через BMS без безпосереднього контакту з акумулятором. Непряме охолодження може створювати великі теплові градієнти через BMS через збільшення довжини каналів охолодження.

Це можна зменшити, прокачуючи охолоджуючу рідину швидше через систему, створюючи компроміс між швидкістю перекачування та тепловою консистенцією.

Крім того, BMS може обчислювати значення на основі вищезазначених пунктів, таких як:

- Напруга : мінімальна і максимальна напруга елемента
- Стан заряду (SOC) або глибина розряду (DOD), щоб вказати рівень заряду акумулятора

- Стан здоров'я (SOH), різноманітне вимірювання залишкової ємності батареї як % від початкової ємності
- Стан потужності (SOP), кількість потужності, доступна протягом певного інтервалу часу з урахуванням поточного споживання електроенергії, температури та інших умов
- Стан безпеки (SOS)
- Максимальний струм заряду як межа струму заряду (CCL)
- Максимальний струм розряду як межа струму розряду (DCL)
- Енергія [кВт·год], отримана з моменту останнього заряду або циклу зарядки
- Внутрішній опір елемента (для визначення напруги холостого ходу)
- Заряд [Ah] доставлений або збережений (іноді цю функцію називають лічильником Кулона)
- Загальна кількість енергії, отримана з моменту першого використання
- Загальний час роботи з моменту першого використання
- Загальна кількість циклів

Центральний контролер BMS взаємодіє всередині з його апаратним забезпеченням, що працює на рівні осередку, або зовні з апаратним забезпеченням високого рівня, таким як ноутбуки або НМІ.

Зовнішні комунікації високого рівня прості та використовують кілька методів:

- Різні види послідовного зв'язку.
- Зв'язок по шині CAN, зазвичай використовується в автомобільних середовищах.
- Різні види бездротового зв'язку.

Низьковольтні централізовані BMS переважно не мають внутрішніх комунікацій.

Розподілені або модульні BMS повинні використовувати низький рівень внутрішнього зв'язку клітинка-контролер (модульна архітектура) або контролер-контролер (розподілена архітектура). Ці види комунікацій складні, особливо для високовольтних систем. Проблема полягає в зсуві напруги між елементами. Перший сигнал заземлення елемента може бути на сотні вольт вище, ніж сигнал заземлення іншого елемента.

Крім програмних протоколів, існують два відомі способи апаратного зв'язку для систем зміни напруги: оптичний ізолятор і бездротовий зв'язок. Іншим обмеженням для внутрішніх комунікацій є максимальна кількість комірок. Для модульної архітектури більшість апаратних засобів обмежена максимум 255 вузлами.

Для систем високої напруги час пошуку всіх осередків є ще одним обмеженням, що обмежує мінімальні швидкості шини та втрачає деякі параметри обладнання. Вартість модульних систем важлива, оскільки вона може бути порівнянна з ціною осередку. Поєднання обмежень апаратного та програмного забезпечення призводить до кількох варіантів внутрішньої комунікації:

- Ізольований послідовний зв'язок
- бездротовий послідовний зв'язок

BMS може захистити свою батарею, запобігаючи її роботі за межами безпечної робочої зони, наприклад:

- Перевантаження по струму (може відрізнитися в режимах зарядки та розрядки)
- Перенапруга (під час зарядки), особливо важливо для свинцево-кислотних та літій-іонних елементів

- Низька напруга (під час розрядки)
- Перевищення температури
- Низька температура
- Надлишковий тиск (NiMH батареї)
- Виявлення замикання на землю або струму витoku (система контролює, що високовольтна батарея електрично від'єднана від будь-якого струмопровідного об'єкта, до якого можна торкатися, як кузов автомобіля)

BMS може запобігти роботі за межами безпечної робочої зони акумулятора:

- Включаючи внутрішній перемикач (наприклад, реле або твердотілий пристрій), який розмикається, якщо акумулятор експлуатується за межами безпечної робочої зони
- Запит на пристрої, до яких підключено акумулятор, зменшити або навіть припинити використання батареї.
- Активно контролює навколишнє середовище, наприклад, за допомогою обігрівачів, вентиляторів, кондиціонування повітря або рідинного охолодження.

BMS також може мати систему попереднього заряду, що дозволяє безпечно підключати батарею до різних навантажень і усуває надмірні пускові струми для навантажувальних конденсаторів.

Підключення до навантаження зазвичай контролюється за допомогою електромагнітних реле, які називаються контакторами. Схема попереднього заряду може бути або силовими резисторами, з'єднаними послідовно з навантаженнями, поки конденсатори не будуть заряджені.

В якості альтернативи, блок живлення з імпульсним режимом, підключений паралельно навантаженню, можна використовувати для

заряджання напруги ланцюга навантаження до рівня, достатньо близького до напруги батареї, щоб дозволити замикати контактори між акумулятором і ланцюгом навантаження. BMS може мати ланцюг, який може перевірити, чи реле вже замкнене перед попередньою зарядкою (наприклад, через зварювання), щоб запобігти виникненню пускових струмів.

Щоб максимально збільшити ємність батареї та запобігти локальному недозарядженню або перезарядженню, BMS може активно гарантувати, що всі елементи, які складають батарею, підтримують однакову напругу або стан заряду за допомогою балансування. BMS може збалансувати клітини за допомогою:

- Витрата енергії з найбільш заряджених елементів шляхом підключення їх до навантаження (наприклад, через пасивні регулятори)
- Перемішування енергії від найбільш заряджених клітин до найменш заряджених (балансери)
- Зменшення зарядного струму до достатньо низького рівня, який не пошкодить повністю заряджені елементи, в той час як менш заряджені елементи можуть продовжувати заряджатися (не стосується літєвих хімічних елементів).

Технологія BMS відрізняється за складністю і продуктивністю:

- Прості пасивні регулятори досягають балансу між батареями або елементами, минаючи зарядний струм, коли напруга елемента досягає певного рівня. Напруга елемента є поганим індикатором SOC елемента (а для певних літєвих хімічних речовин, таких як LiFePO₄, він взагалі не є індикатором), таким чином, встановлення рівності напруги елемента за допомогою пасивних регуляторів не балансує SOC, що є метою BMS. Тому такі пристрої, безперечно корисні, мають серйозні обмеження в їх ефективності.

- Активні регулятори розумно вмикають і вимикають навантаження, коли це необхідно, знову ж таки для досягнення балансу. Якщо в якості параметра для активації активних регуляторів використовується лише напруга елемента, для пасивних регуляторів застосовуються ті самі обмеження, зазначені вище.
- Повна система BMS також повідомляє про стан батареї на дисплей і захищає батарею.

Топології BMS діляться на 3 категорії:

- Централізовано: один контролер підключений до елементів батареї за допомогою безлічі проводів
- Розподілений: плата BMS встановлена на кожній комірці з одним кабелем зв'язку між акумулятором і контролером
- Модульний: кілька контролерів, кожен з яких обробляє певну кількість комірок, зі зв'язком між контролерами

Централізовані системи BMS є найбільш економічними, найменш розширюваними і страждають від великої кількості проводів. Розподілені BMS є найдорожчими, найпростішими в установці та пропонують найчистішу збірку. Модульні BMS пропонують компроміс з особливостей і проблем двох інших топологій.

Вимоги до BMS в мобільних додатках (наприклад, електромобілі) і стаціонарних додатках (наприклад, резервні ДБЖ у серверній кімнаті) дуже відрізняються, особливо вимогами щодо обмеження простору та ваги, тому апаратні та програмні реалізації мають бути пристосовані до конкретного використання. У разі електричних або гібридних транспортних засобів BMS є лише підсистемою і не може працювати як самостійний пристрій. Він повинен зв'язуватися щонайменше із зарядним пристроєм (або зарядною

інфраструктурою), підсистемою навантаження, управління тепловим режимом та аварійним відключенням.

Тому в хорошому дизайні автомобіля BMS тісно інтегрована з цими підсистемами. Деякі невеликі мобільні додатки (наприклад, візки для медичного обладнання, моторизовані інвалідні візки, скутери та виловні підйомники) часто мають зовнішнє обладнання для зарядки, однак вбудований BMS все ще має бути інтегрованим із зовнішнім зарядним пристроєм.

Використовуються різні методи балансування батареї, деякі з них засновані на теорії стану заряду.

3.2 Обмеження координат електромеханічної системи

Однією з основних задач BMS є інформування тягового електроприводу про максимальний струм споживання, і якщо водій натискає педаль більше ніж потрібно то струм буде обмежений, а разом із ним і момент, і тролейбус буде повільніше їхати.

Звідси, $I_{\max}$ - максимальний струм від АКБ. I_{BAT} - струм АКБ.

Тоді, потужність на виході двигуна:

$$P_2 = M \cdot \omega$$

Це значення задається BMS, у нас максимальна потужність яку ми будемо споживати від батареї це напруга на заданий струм, який нам надає батарея. Звідси потужність яку ми споживаємо від батареї:

$$P_e = U_{AKB} \cdot I_{BAT} = U_{AKB} \cdot I_{\max}^*$$

Оскільки ці потужності є однаковими, максимальний момент $M_{\max}$ буде дорівнювати:

$$M_{\max} = \frac{U_{AKB} \cdot I_{\max}^*}{\omega}$$

Отже, виконаємо дослідження системи BMS на обмеження струму батареї (рис.3.1). Ця функція необхідна щоб завадити перегріву батареї та виходу її з ладу.

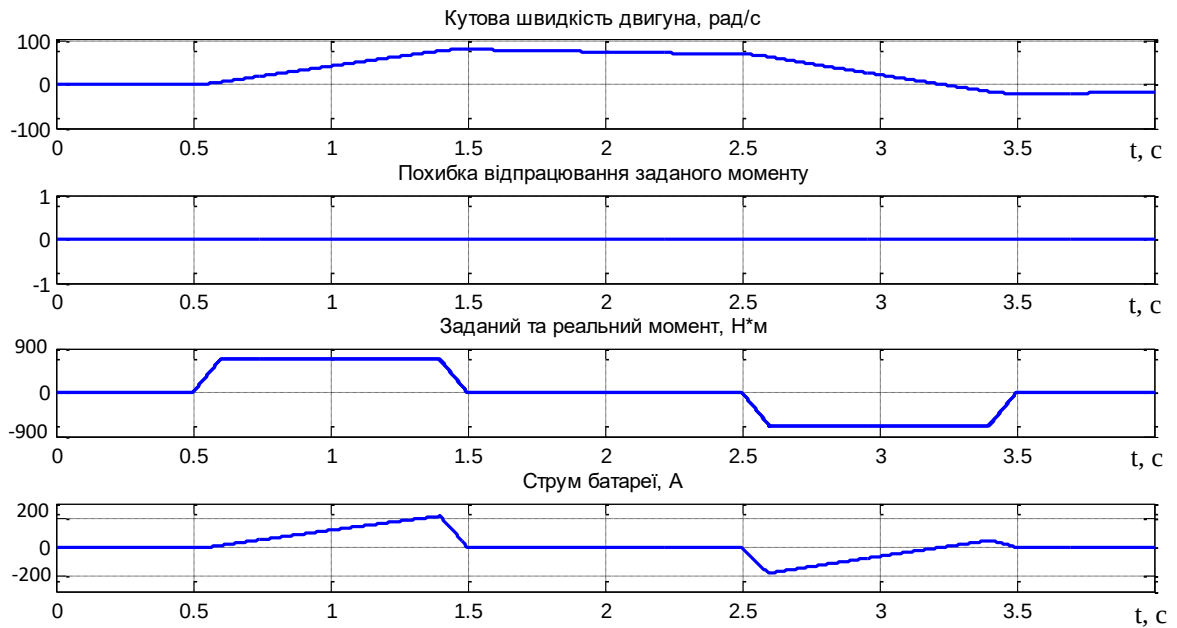


Рисунок 3.1 – Графіки перехідних процесів системи без обмеження струму на виході батареї

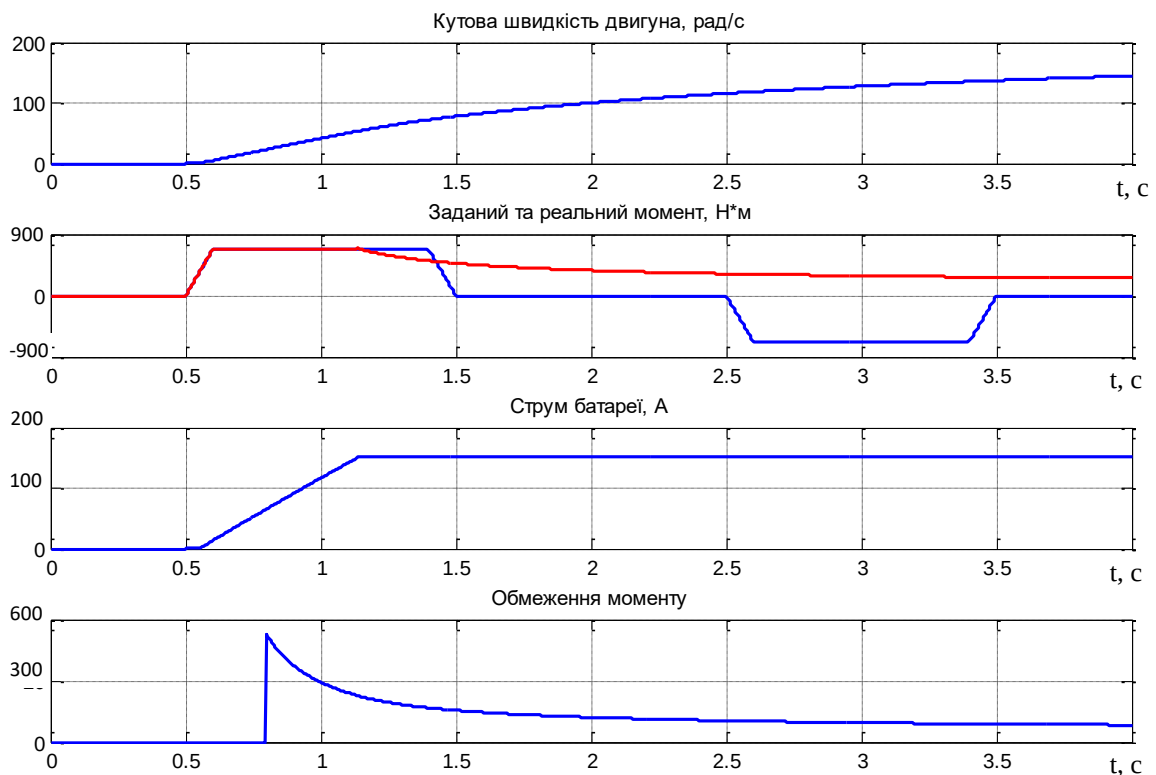


Рисунок 3.2 – Графіки перехідних процесів системи з обмеження струму на виході батареї в межах 150 А

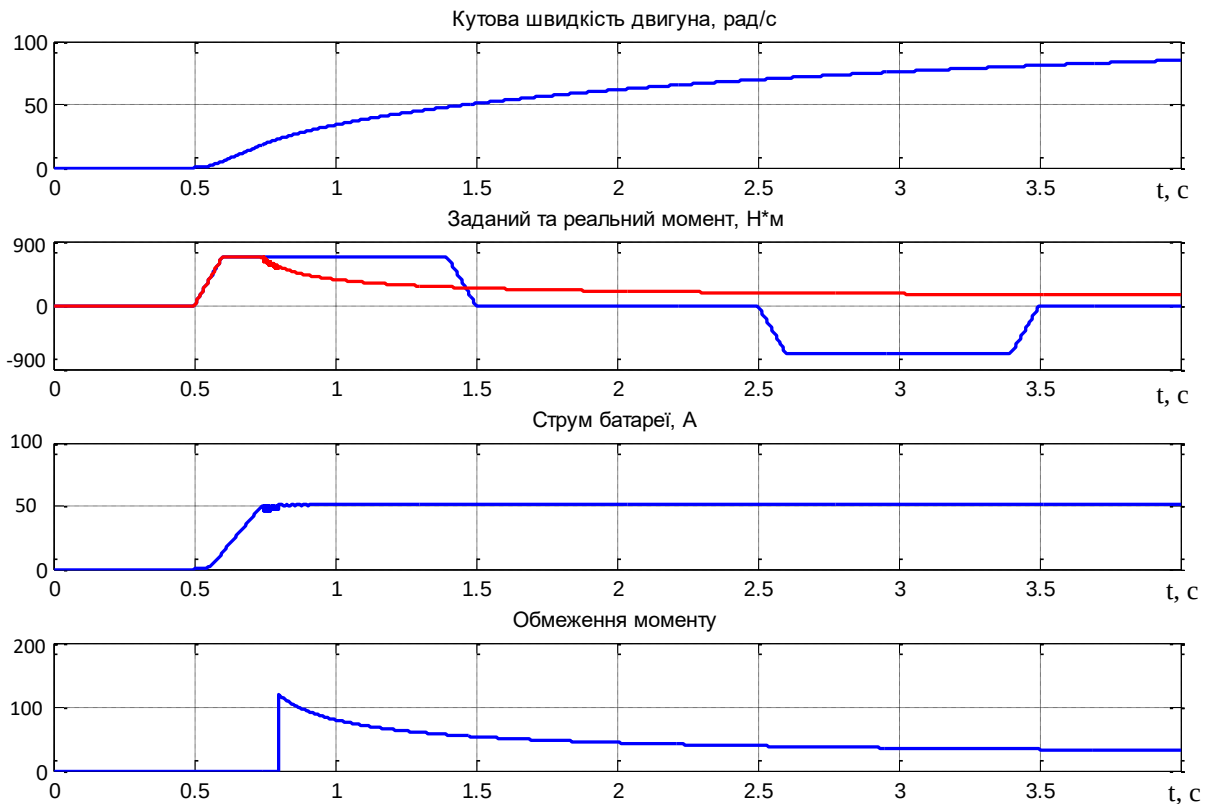


Рисунок 3.3 – Графіки перехідних процесів системи з обмеження струму на виході батареї в межах 50 А

Отже виконавши дослідження по обмеженню струму на виході батареї за допомогою системи BMS та проаналізувавши результати які зображені на рис.3.1, рис.3.2, рис.3.3, можна зробити висновок, що система працює та виконує поставлене завдання по захисту батареї від великих струмів, обмежуючи при цьому момент на валу двигуна.

3.3 Висновки до розділу

Система BMS важлива технологія яка необхідна при використанні електротранспорту з автономним ходом. Ця система оберігає батареї від розряду, перезаряду, великих струмів які можуть зашкодити обладнанню та самій батареї вплинувши на строк служби, або виходу з ладу, внаслідок перегріву і т.д.

Було досліджено метод обмеження координат струму на виході батареї, який є робочим та дійсно обмежує струм в необхідних межах.

4 КЕРУВАННЯ ПРИВОДНИМ ДВИГУНОМ

4.1 Векторне керування моментом

Динамічна модель асинхронного двигуна має вигляд:

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta} &= \omega \\
 \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) \\
 M &= \frac{3}{2} p_n (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}) \\
 \dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta \omega \psi_{2q} + \frac{1}{\sigma} u_{1d} \\
 \dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2q} - \beta \omega \psi_{2d} + \frac{1}{\sigma} u_{1q} \\
 \dot{\psi}_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2q} + \alpha L_m i_{1d} \\
 \dot{\psi}_{2q} &= -\alpha \psi_{2q} - (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q} \\
 \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 \\
 \varepsilon_0(0) &= 0
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

де $(i_{1d}, i_{1q})^T$, $(u_{1d}, u_{1q})^T$, $(\psi_{2d}, \psi_{2q})^T$ – компоненти векторів струму

статора, напруги статора, потокозчеплення ротора;

M – електромагнітний момент;

ω – кутова швидкість ротора;

ε_0 – кутове положення системи координат $(d - q)$ відносно нерухомої

системи координат статора.

Додатні константи в (4.1), які визначаються електричними параметрами АД визначені стандартним чином

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}; \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}; \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m; \sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}\right),$$

де R_1, R_2, L_1, L_2 – активні опори та індуктивності статора і ротора

L_m – індуктивність намагнічуючого контуру.

Спостерігач магнітного потоку АД:

$$\begin{aligned} |\dot{\hat{\psi}}_2| &= -\alpha |\hat{\psi}_2| + \alpha L_m i_{1d}, \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = p_n \omega + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{|\hat{\psi}_2|}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Регулятор моменту:

$$\begin{aligned} i_{1q}^* &= \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \right)^{-1} \frac{M^*}{\psi^*}, \\ i_{1d}^* &= \left(\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{\dot{M}^*}{\psi^*} - \frac{M^* \dot{\psi}^*}{\psi^{*2}} \right). \end{aligned} \quad (4.3)$$

Регулятор потоку:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} \left(\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_\psi \tilde{\psi} - x_\psi \right), \\ \dot{x}_\psi &= k_\psi \tilde{\psi}, \\ \dot{i}_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} \left(\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - \alpha L_m k_\psi \tilde{i}_{1d} + \left[k_\psi (\alpha + k_\psi) - k_{\psi i} \right] \tilde{\psi} - k_{\psi i} \tilde{\psi} \right). \end{aligned} \quad (4.4)$$

Регулятор струму по осі (d):

$$\begin{aligned} u_d &= \sigma \left(\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1d} - \alpha \beta |\hat{\psi}_2| + \dot{i}_{1d}^* - k_{id} \tilde{i}_{1d} - x_d \right), \\ \dot{x}_d &= -k_{id} \tilde{i}_{1d}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Регулятор струму по осі (q):

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma \left(\gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} - \beta \omega p_n |\hat{\psi}_2| + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq} \tilde{i}_{1q} - x_q \right), \\ \dot{x}_q &= -k_{iq} \tilde{i}_{1q}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.2 Керування моментом з максимізацією співвідношення момент-струм

Нехай для моделі асинхронного двигуна виконуються наступні припущення:

А1. Струми статора та кутова швидкість ротора доступні для вимірювання. Всі параметри двигуна відомі. Всі параметри, що залежать від насичення є відомими функціями струму намагнічування.

A2. Задана траєкторія зміни моменту є обмеженою функцією, яка має обмежену першу та другу похідну.

В умовах цих припущень необхідно синтезувати нелінійний регулятор моменту, який гарантує досягнення наступних цілей керування:

CO1. Асимптотичне відпрацювання моменту при обмеженні всіх внутрішніх сигналів

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} = 0 \quad (4.7)$$

CO2. Максимізацію співвідношення момент-струм в усталеному режимі роботи

$$\max \left(\frac{M}{I_1} \right), I_1 = \sqrt{i_{1d}^2 + i_{1q}^2} \quad (4.8)$$

де I_1 – амплітуда струму статора.

CO3. Асимптотичне полеорієнтування

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_{2q} = 0 \quad (4.9)$$

4.2.1 Керування моментом-потокотчепленням при непрямому полеорієнтуванні

Ідея непрямого полеорієнтування дозволяє синтезувати алгоритми векторного керування асинхронних двигунів, які забезпечують високі показники якості керування координатами двигуна та є простими з точки зору практичної реалізації.

Відповідно до ідеї непрямого полеорієнтування розглянемо розімкнений регулятор потокотчеплення у формі:

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega + \alpha L_m \frac{i_{q1}}{\psi^*}, \quad (4.10)$$

$$i_{1d} = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*). \quad (4.11)$$

Регулятор (4.10) – (4.11) за умов струмового керування забезпечує глобальне асимптотичне полеорієнтування та відпрацювання заданих траєкторій модуля вектора потокозчеплення:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_d = 0 \quad (4.12)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_q = 0 \quad (4.13)$$

де e_d і e_q – похибки відпрацювання потокозчеплення, визначені як:

$$e_d = \psi_{2d} - \psi^*, e_q = \psi_{2q} \quad (4.14)$$

Рівняння похибки відпрацювання моменту може бути отримано використовуючи рівняння та визначення (4.14):

$$\tilde{M} = \mu_1 [\psi^* i_{1q} + e_d i_{1q} - e_q i_{1d}] - M^*, \quad (4.15)$$

звідки лінеаризуючий зворотним зв'язком контролер записується у вигляді:

$$i_{1q} = \frac{M^*}{\mu_1 \psi^*}. \quad (4.16)$$

Рівняння (4.10), (4.11), (4.16) визначають алгоритм керування моментом-потокотчеплення при непрямому полеорієнтуванні, запишемо динаміку похибок як:

$$\begin{aligned}\tilde{M} &= \mu_1 (e_d i_{1q} - e_q i_{1d}), \\ \dot{e}_d &= -\alpha e_d + \omega_2 e_q, \\ \dot{e}_q &= -\alpha e_q - \omega_2 e_d.\end{aligned}\tag{4.17}$$

З обмеженості заданих траєкторій моменту та модуля вектора потокотчеплення слідує, що струми i_d та i_q в (4.11) і (4.16) є обмеженими. Точка рівноваги $(e_d, e_q)=0$ є стійкою, відповідно похибка відпрацювання моменту експоненційно затухає до нуля, тобто $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{T} = 0$.

З незаведеного аналізу слідує, що відпрацювання моменту (CO1), полеорієнтування (CO3) та відпрацювання модуля вектора потокотчеплення ($\psi^* > 0$) досягаються.

Зазначимо, що розв'язком процесів керування моментом-потокотчепленням для змінного в часі заданого потокотчеплення є можливими лише при наявності властивостей відпрацювання заданих траєкторій потокотчеплення.

Формування завдання потокотчеплення у відповідність з умовою $\psi^* > 0$ гарантує уникнення точки виродженості алгоритму керування (4.10), (4.11), (4.16).

4.2.2 Керування моментом-потокотчепленням при прямому полеорієнтуванні

Розглянемо спостерігач пониженого порядку для моделі при лінійному представленні кривої намагнічування.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\psi}} &= -\alpha\hat{\psi} + \alpha L_m i_{1d}, \\ \dot{\hat{\varepsilon}}_0 &= \omega_0 = \omega + \frac{\alpha L_m i_{1q}}{\hat{\psi}}.\end{aligned}\quad (4.18)$$

Спостерігач (4.18) гарантує, що похибки оцінювання:

$$\begin{aligned}\tilde{\psi}_d &= \psi_{2d} - \hat{\psi}, \\ \tilde{\psi}_q &= \psi_{2q},\end{aligned}\quad (4.19)$$

Похибки експоненційно згасають в нуль, забезпечуючи $\hat{\psi} > 0$. Використовуючи визначення (4.19) рівняння похибки відпрацювання моменту може бути записаним у наступному вигляді:

$$\tilde{M} = \mu_1 \tilde{\psi}_d i_{1q} + \mu_1 \hat{\psi} i_{1q} - \mu_1 \tilde{\psi}_q i_{1d} - M^*, \quad (4.20)$$

З виразу (4.20) знаходимо лінеаризуючий зворотний зв'язком регулятора моменту:

$$i_{1q} = \frac{M^*}{\mu_1 \hat{\psi}}. \quad (4.21)$$

Використовуючи (4.19), (4.20) і (4.21), запишемо динаміку похибок оцінювання потокозчеплення та відпрацювання моменту наступним чином:

$$\tilde{M} = \mu_1 \left(\tilde{\psi}_d \frac{M^*}{\mu_1 \hat{\psi}} - \tilde{\psi}_q i_{1d} \right), \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha \tilde{\psi}_d + \omega_2 \tilde{\psi}_q, \\ \dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha \tilde{\psi}_q - \omega_2 \tilde{\psi}_d.\end{aligned}\quad (4.23)$$

Для обмеженого M^* і $\hat{\psi}(t) > 0$, компонента струму статора i_{1q} також буде обмеженою. Додатково підсистема (4.23) є глобально-експоненційно стійкою:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q) = 0. \quad (4.24)$$

Відповідно похибка відпрацювання моменту $\tilde{M}$ в (4.22) експоненційно затухає в нуль, якщо компонента струму статора i_{1d} є обмеженою.

Для того, щоб забезпечити бажану динаміку оціненого модуля вектора потокозчеплення $\hat{\psi}(t)$ застосуємо наступний регулятор потокозчеплення:

$$\begin{aligned} i_{1d} &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_\psi e_\psi - x_\psi), \\ \dot{x}_\psi &= k_{\psi i} e_\psi, \end{aligned} \quad (4.25)$$

де $e_\psi = \hat{\psi} - \psi^*$.

З (4.18) та (4.25), динаміка похибки відпрацювання оціненого потокозчеплення можна записати наступним чином:

$$\begin{aligned} \dot{e}_\psi &= -(\alpha + k_{\psi p}) e_\psi - x_\psi, \\ \dot{x}_\psi &= k_{\psi i} e_\psi. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Якщо $e_\psi(0) = 0$, тоді всі розв'язки (4.26) $e_\psi(t) \equiv 0 \quad \forall t \geq 0$. З цієї умови слідує, що $\hat{\psi}(t) = \psi^*(t) > 0$, i_{1d} є обмеженими, відповідно $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{M}, e_\psi) = 0$. Представлений аналіз доводить, що цілі керування (CO1), (CO3) досягаються. З умови $\hat{\psi}(t) = \psi^*(t) > 0$ також слідує, що регулятор (4.18), (4.21) не вироджений.

Зазначимо, що пряме асимптотичне полеорієнтування не потребує властивостей відпрацювання траєкторій потокозчеплення і моменту. Разом з тим для малих значень $\psi^* > 0$ (які необхідні для МТРА оптимізації) та швидких траєкторій завдання, похибки регулювання потокозчеплення стають критичними.

В цьому випадку завдяки властивості відпрацювання траєкторій досягається $\tilde{\psi}(t) \equiv 0 \quad \forall t \geq 0$, що дозволяє уникнути роботи системи в точках виродженості алгоритму керування.

4.2.3 Формування заданого потокозчеплення з метою забезпечення умов МТРА оптимізації

Властивості відпрацювання заданих траєкторій моменту-потокозчеплення контролера (4.18), (4.21), (4.25) дозволяють сформувати завдання потокозчеплення таким чином, щоб умови МТРА оптимізації в статиці (CO2) задовольнялися. Умови МТРА для всіх значень заданого потокозчеплення наступні:

- похідна $\dot{\psi}^*$ є обмеженою;
- задане потокозчеплення в усталеному режимі задовольняє:

$$\bar{\psi}^* = \psi_0^* + L_m |\bar{i}_q|, \quad (4.27)$$

де $|\bar{i}_q|$ усталене значення $|\bar{i}_{1q}|$ і $\psi_0^* > 0$ – мале значення потокозчеплення, для уникнення виродженості в (4.18), (4.21) при нульовому завданні на момент $M^* = 0$.

З (4.27) і (4.25) слідує, що умова МТРА в статиці досягається при виконанні наступної умови:

$$\bar{i}_{1d} = |\bar{i}_{1q}| + \psi_0^* / L_m, \quad (4.28)$$

де $\bar{i}_{1d}$ – усталене значення струму i_{1d} , ψ_0^*/L_m – мала константа. Відмітимо, що відомий результат є частковим рішенням умов (4.27), (4.28).

У відповідності до припущення A2, заданий момент M^* і його похідна є обмеженими, відповідно задана траєкторія потокозчеплення $\psi^* > 0$ може бути розрахована напряду з (4.16) і (4.27) з $\bar{\psi}^* = \psi^*$, $\bar{i}_{1q} = i_{1q}$ як розв’язок квадратного рівняння :

$$\psi^* = \frac{\psi_0^*}{2} + \xi_T, \quad \xi_T = \sqrt{\frac{\psi_0^{*2}}{4} + \frac{2}{3} L_2 |M^*|}. \quad (4.29)$$

Похідна від ψ^* можна зобразити у вигляді:

$$\dot{\psi}^* = \frac{L_2 \dot{M}^* \text{sign}(M^*)}{3\xi_T}. \quad (4.30)$$

З (4.11) і (4.25) та представленого аналізу стійкості слідує, що обрана траєкторія заданого потокозчеплення (4.29) задовольняє умові усталеного режиму (4.28) і має обмежену похідну. Відповідно, всі три цілі керування СО1 – СО3 досягаються.

Підсистема регулювання [12] потокозчеплення при струмовому керуванні представляє собою фільтр першого порядку, в той час як підсистема моменту не має власної динаміки. Тому, для зменшення сплесків струму збудження i_{1d} при відпрацюванні «швидких» траєкторій моменту, необхідно застосовувати додаткові фільтри для сигналу заданого потокозчеплення.

Одне з можливих рішень може бути знайдене з використанням рівнянь (4.11), (4.16) (або з (4.25) (4.21) для алгоритму прямого векторного керування при $\tilde{\psi}(t) \equiv 0$) у вигляді нелінійної динамічної системи:

$$\dot{\psi}^* = -\alpha\psi^* + \frac{2}{3} \frac{\alpha L_2 |M^*|}{\psi^*} + \alpha\psi_0^*. \quad (4.31)$$

В більш загальному випадку, задане потокозчеплення може визначатися як вихід згладжувального фільтру, в якому вхідним сигналом ψ^r є значення потокозчеплення, розраховане за формулою (4.29). Такий фільтр дозволяє виконувати реконструкцію похідних від заданого сигналу, що зменшує обчислювальне навантаження на керуючий контролер. Зокрема можна використати фільтр другого порядку заданий рівняннями:

$$\begin{aligned} \psi^* &= \zeta, \\ \dot{\zeta} &= \zeta_1, \\ \dot{\zeta}_1 &= -k_1\zeta_1 - k_2\zeta + k_2\psi^r, \end{aligned} \quad (4.32)$$

де k_1 і k_2 – коефіцієнти налаштування фільтру. Обираючи одиничний коефіцієнт демпфування, при співвідношенні $k_2 = k_1^2 / 4$, умова $\psi^* > 0$ забезпечується. Фільтр (4.32) дозволяє реконструювати першу і другу похідні від сигналу завдання потокозчеплення ψ^* (друга похідна необхідна для алгоритму керування повного порядку, який буде синтезовано далі).

За необхідності, швидкодія фільтру може бути заданою максимально високою за рахунок впливу на коефіцієнти налаштування. Достатньо високі коефіцієнти k_1 та k_2 , у відповідності до теорії сингулярно вироджених систем, забезпечать завдання потокозчеплення відповідно до виразу (4.29).

Результуюча система керування моментом з МТРА має один вхід – завдання на момент M^* та три виходи: момент двигуна M , кутове положення та модуль вектора потокозчеплення ротора.

Зазначимо, що алгоритми керування при прямій та непрямій орієнтації забезпечують однакові показники якості керування при однакових траєкторіях завдання.

4.2.4 Алгоритм керування моментом і потокозчепленням повного порядку

Струми розраховані [13] за виразами (4.11), (4.16) для непрямого, та (4.25), (4.21) для прямого керування описують лише їх бажану динамічну поведінку для моделі. В реальному електроприводі (4.11), (4.16), (4.25), (4.21) для відпрацювання заданих траєкторій зміни компонент струму статора i_d^* та i_q^* необхідно спроектувати швидкодіючі регулятори струмів, які б забезпечили в реальній системі умови, наближені до умов струмового керування.

Для відпрацювання компонент вектора струму статора використаємо наступні регулятори:

$$u_{1d} = \sigma \left(\gamma i_d^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \hat{\psi} + \dot{i}_d^* - k_{ipd} \tilde{i}_d \right), \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sigma \left(\gamma i_q^* + \omega_0 i_{1d} + \beta \omega \hat{\psi} + \dot{i}_q^* - k_{ipq} \tilde{i}_q + x_q \right), \\ \dot{x}_q &= -k_{iiq} \tilde{i}_q. \end{aligned} \quad (4.34)$$

Зазначимо, що похідні від заданих струмів в (4.33), (4.34) є відомими функціями $\dot{M}^*$ і $\ddot{M}^*$ у відповідності до припущення A2.

Розглянемо модифікований спостерігач вектора потокозчеплення, заданий рівняннями:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\psi}} &= -\alpha \hat{\psi} + \alpha L_m i_{1d}, \\ \dot{\hat{\omega}}_0 &= \omega_0 = \omega + \frac{\alpha L_m i_{1q}}{\hat{\psi}} + \frac{\gamma_1 \beta \omega \tilde{i}_d}{\hat{\psi}}. \end{aligned} \quad (4.35)$$

де $\gamma_1 > 0$ коригуючий коефіцієнт. Важливо відмітити, що коригуючий зв'язок $\gamma_1 \beta \omega \tilde{i}_d / \hat{\psi}$ забезпечує підсистемі регулювання [14] потокозчеплення властивості замкненої системи, відповідно спостерігач (4.35) є робастним по відношенню до варіацій активного опору ротора, якщо $\omega \neq 0$.

З (4.33) – (4.35) динаміка похибок оцінювання та регулювання визначається трьома підсистемами

- підсистема оцінювання потокозчеплення:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha\tilde{\psi}_d + \omega_2\tilde{\psi}_q, \\ \dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha\tilde{\psi}_q - \omega_2\tilde{\psi}_d - \gamma_1\beta\omega\tilde{i}_d, \\ \dot{\tilde{i}}_d &= -k_{id}\tilde{i}_d + \alpha\beta\tilde{\psi}_d + \beta\omega\tilde{\psi}_q;\end{aligned}\tag{4.36}$$

- підсистема регулювання оціненого потокозчеплення:

$$\begin{aligned}\dot{e}_\psi &= -(\alpha + k_\psi)e_\psi - x_\psi + \alpha L_m\tilde{i}_d, \\ \dot{x}_\psi &= k_{\psi i}e_\psi;\end{aligned}\tag{4.37}$$

- підсистема регулювання моменту:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{i}}_q &= -k_{iq}\tilde{i}_q + \alpha\beta\tilde{\psi}_q - \beta\omega\tilde{\psi}_d + x_q, \\ \dot{x}_q &= -k_{iq}\tilde{i}_q;\end{aligned}\tag{4.38}$$

де $k_{id} = \gamma + k_{ipd}$, $k_{iq} = \gamma + k_{ipq}$.

Для дослідження стійкості системи (4.36) – (4.38) спочатку розглянемо для підсистеми потокозчеплення (4.36) наступну кандидатуру на функцію Ляпунова:

$$V = \frac{1}{2}[\tilde{\psi}_d^2 + \tilde{\psi}_q^2 + \gamma_1\tilde{i}_d^2] > 0.\tag{4.39}$$

Похідна за часом від (4.39) вздовж траєкторій (4.36) може бути записана як:

$$\dot{V} = -\alpha\tilde{\psi}_d^2 - \alpha\tilde{\psi}_q^2 - \gamma_1 k_{id} \tilde{i}_d^2 + \gamma_1 \alpha \beta \tilde{i}_d \tilde{\psi}_d. \quad (4.40)$$

При виконанні умови:

$$k_{id} > \frac{\gamma_1 \alpha \beta^2}{4}, \quad (4.41)$$

функція (4.39) є функцією Ляпунова задовольняючи умову:

$$V > 0, \quad \dot{V} < 0. \quad (4.42)$$

У відповідності до критерію стійкості систем за Ляпуновим можна зробити висновок, що точка рівноваги:

$$(\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{i}_d)^T = 0 \quad (4.43)$$

є глобально експоненційно стійкою. Оскільки підсистеми (4.36), (4.37), (4.38) включені послідовно (див. рис. 4.13), то при обмеженій кутовій швидкості ω точка рівноваги $(\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{i}_d)^T = 0, (\tilde{i}_q, x_q)^T = 0, (e_\psi, x_\psi)^T = 0$ є глобально експоненційно стійкою.

Це означає, що похибка відпрацювання моменту $\tilde{M}(M^*, \tilde{i}_d, \tilde{i}_q, \tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q)$ експоненційно затухає в нуль, при одночасному забезпеченні асимптотичного полеорієнтування і умов МТРА в усталених режимах роботи, тобто цілі керування (СО1)-(СО3) досягаються.

Параметрами налаштування контролера (4.25), (4.33) – (4.35) є пропорційний $k_{\psi p}$ та інтегральний $k_{\psi i}$ коефіцієнти регулятора потокозчеплення, пропорційні k_{ipd} , k_{ipq} та інтегральний k_{iiq} коефіцієнти регуляторів струму, коригуючий коефіцієнт спостерігача вектора потокозчеплення γ_1 . Для лінійних систем другого порядку (4.37), (4.38) може

використовуватися стандартна процедура налаштування, співвідношення між k_{ipd} та γ_1 задається умовою (4.41).

Необхідно відмітити, що регулятори струмів повного порядку (4.33) і (4.34) потребують похідних від сигналів завдання струму. Це складні нелінійні функції, які залежать від траєкторії заданого моменту та її першої і другої похідних за часом. В реальних системах, при відпрацюванні плавних траєкторій заданого моменту, регулятори струмів можуть бути спрощені за рахунок нехтування похідними i_d^* , i_q^* , компенсація яких буде виконана за рахунок «великих» коефіцієнтів контурів регулювання струму.

Для уникнення роботи двигуна в режимі [15] насичення, діапазон зміни компоненти струму статора i_{1d} має бути обмежений так, щоб потокозчеплення не перевищувало номінального значення.

Для наочності розглянемо експериментальні графіки перехідних процесів в системі векторного керування, які отримані при русі тролейбуса з розробленою системою векторного керування моментом по рівній ділянці дороги представлено на рис. 4.2., рис.4.3.

Максимальна швидкість двигуна під час тесту складає 300 рад/с, що відповідає лінійній швидкості тролейбуса на рівні 50 км/год.

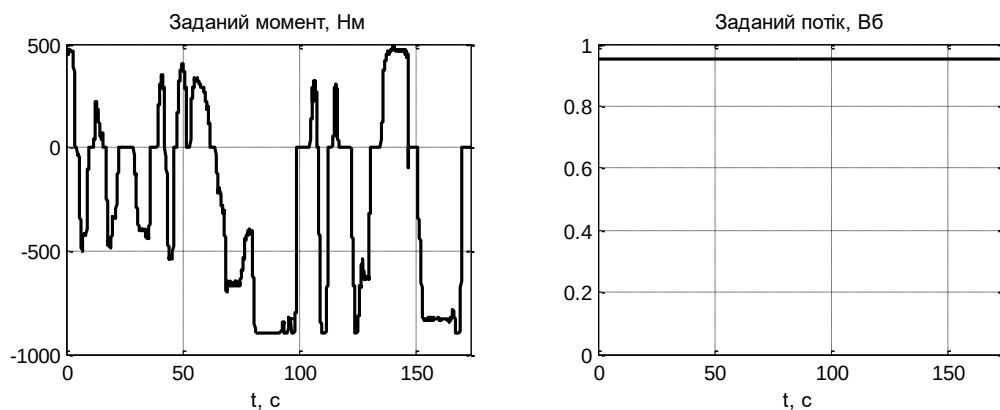


Рисунок 4.2 – Графіки перехідних процесів в системі векторного керування в умовах руху реального транспортного засобу

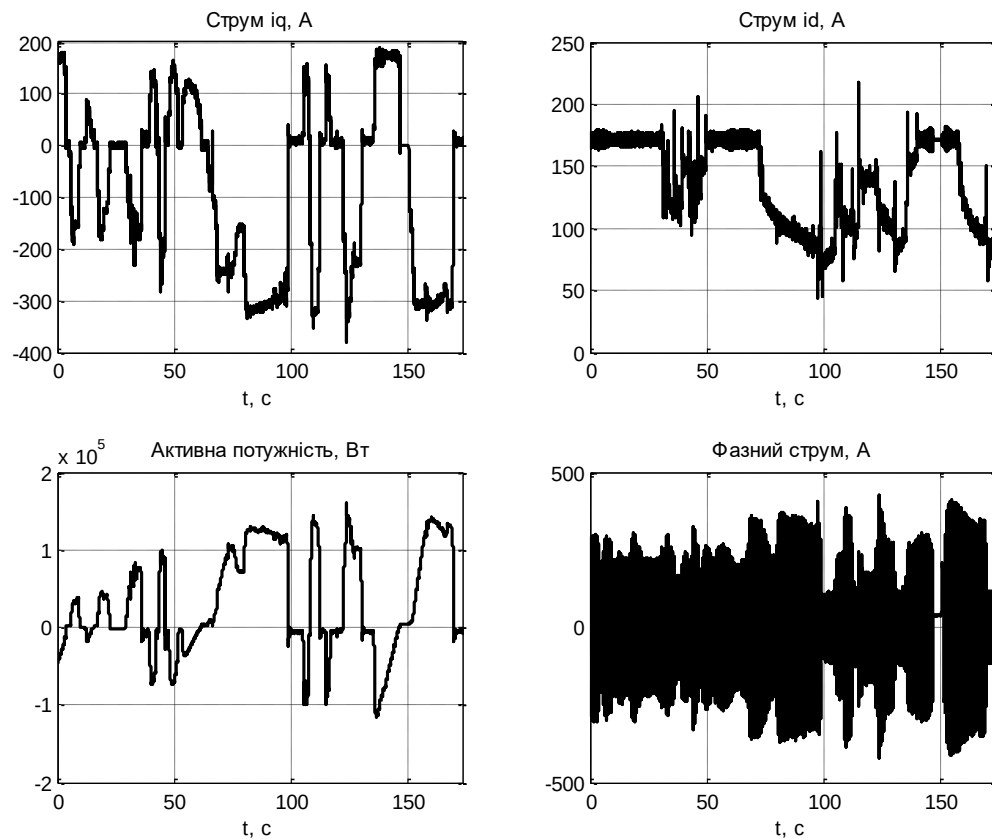


Рисунок 4.3 – Графіки перехідних процесів в системі векторного керування в умовах руху реального транспортного засобу

З графіків видно, що в реальних [16] умовах їзди по місту, водій тролейбуса не задає велике значення моменту, і в основний час момент не досягає навіть значення номінального моменту.

4.2.5 Регулятора швидкості

$$\begin{aligned} i_q^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* \right), \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \end{aligned} \quad (4.44)$$

де $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ – похибка відпрацювання заданої траєкторії швидкості;

$\hat{M}_c$ – оцінене значення невідомого постійного моменту навантаження;

$(k_\omega, k_{\omega i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної частин ПІ регулятора швидкості.

5 ВРАХУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЧЕПЛЕННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ

5.1 Врахування характеристики зчеплення приводного колеса з дорогою

Транспортні засоби з електричними приводними [17] двигунами формують окремий спеціальний клас електромеханічних систем, в яких рух об'єкта керування здійснюється за рахунок тертя кочення. Аналітичному опису цього типу тертя присвячена значна кількість робіт, де представлено математичні моделі які описують динамічні процеси змін механічних координат за рахунок зусиль, що формуються в контактних поверхнях елементів кочення.

Розглянемо схематизацію об'єкта з кінематичною парою кочення, як показано на рис. 5.1. Нехай тіло з масою m рухається за рахунок тягового зусилля F , що формується в контактній поверхні колесо-дорога та виникає внаслідок дії моменту приводного електродвигуна Д через редуктор Р на вісь колеса; ω_w – кутова швидкість колеса, v – лінійна швидкість маси m .

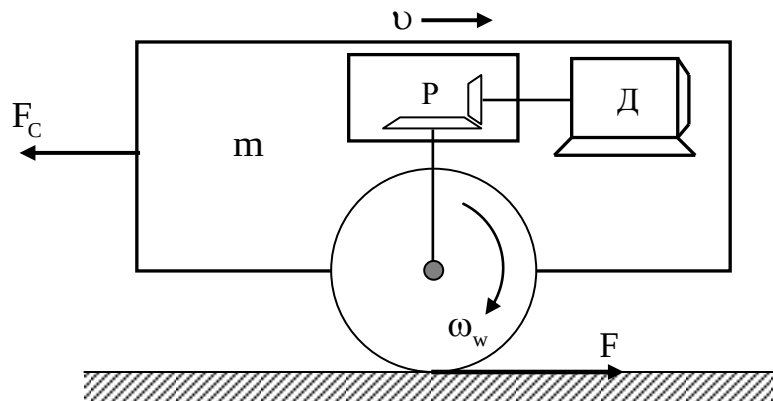


Рисунок 5.1 – Об'єкт з кінематичною парою кочення

Результуюча динаміка [18] механічної частини об'єкту на рис. 2.1 складається з динаміки приводної осі та рухомої маси і описується рівнянням:

$$\dot{\omega}_w = J^{-1}(M_w - M_{cw}) \quad (4.44)$$

$$\dot{v} = m^{-1}(F - F_C) \quad (4.45)$$

де $M_w = nM$, M_{Cw} – рушійний момент та момент навантаження відносно осі колеса;

M – момент приводного двигуна;

n – передаточне число редуктора;

J – повний момент інерції колеса, редуктора та приводного двигуна;

F – рушійна сила;

F_C – зовнішнє зусилля спротиву.

$$\begin{aligned} M_{Cw} &= rF \\ v_\omega &= r\omega_w, \end{aligned} \quad (4.46)$$

де r – радіус колеса,

v_ω – лінійна швидкість точки контакту колеса та дорожнього покриття.

Тягове зусилля колеса визначається у відповідності до контактного закону:

$$F = \varphi(\lambda), \quad (4.47)$$

де ковзання λ розраховується згідно виразу:

$$\lambda = \frac{v_\omega - v}{v_\omega} \quad (4.48)$$

У відповідності з підходом, апроксимація характеристики зчеплення у кінематичній парі кочення в статиці може бути записана у вигляді:

$$F_{CT} = k_f s \left(a_0 + a_1 e^{-\left(\frac{\lambda}{\lambda_{01}}\right)^2} \right), s = \begin{cases} \frac{\lambda}{\lambda_{01}}, \forall |\lambda| \leq \lambda_{01} \\ \text{sign}(\lambda), \forall |\lambda| > \lambda_{01} \end{cases}. \quad (4.49)$$

де F_{CT} – статичне тягове зусилля;

ω_{01}, a_0, a_1 – параметри характеристики зчеплення;

k_f – масштабуючий коефіцієнт.

Необхідно відзначити що параметри реальної характеристики [19] зчеплення характеризуються значною нестаціонарністю та залежать від багатьох фізичних факторів, при яких відбувається рух: температура, вологість, матеріал покриття, зношеність матеріалу колеса, забруднення шляхового покриття та інше.

Загальний вигляд характеристики зчеплення показано на рис. 5.2, а характеристики зчеплення для різних значень параметрів λ_{01}, a_0, a_1 при $k_f = 5000$ показані на рис. 5.3.

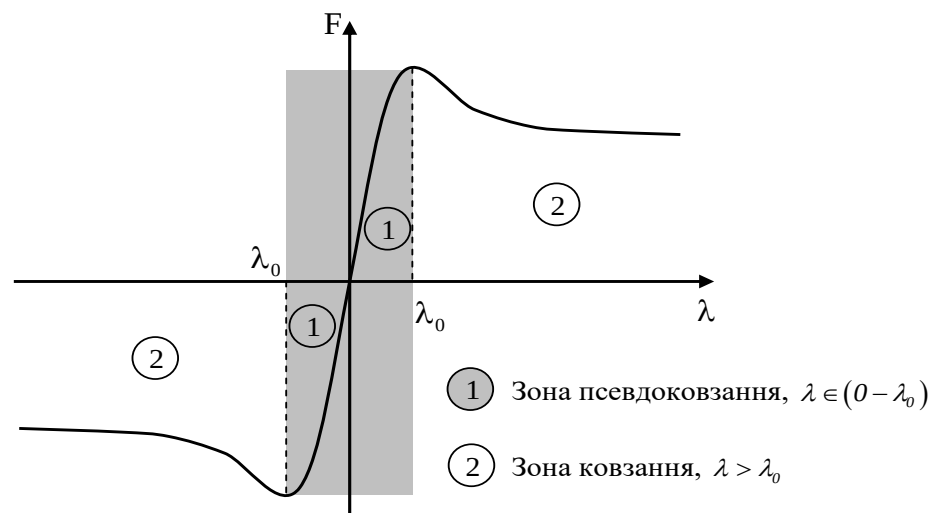


Рисунок 5.2 – Вигляд функції зчеплення $\varphi(\lambda)$

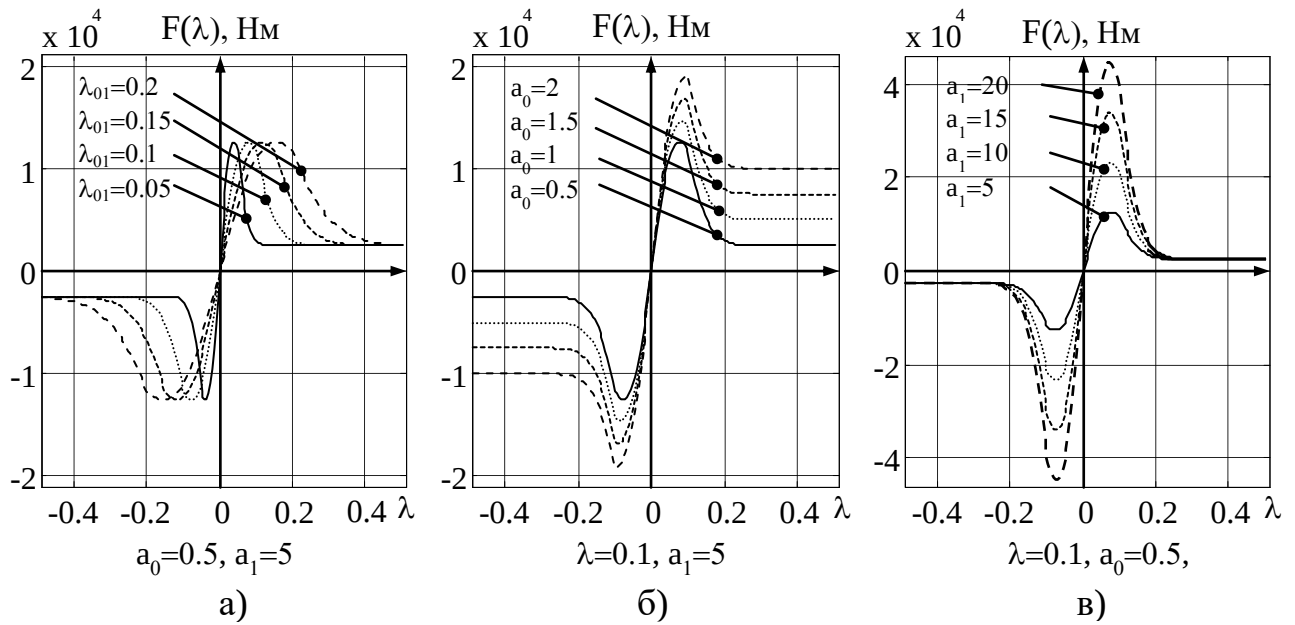


Рисунок 5.3 – Вигляд функції зчеплення при різних значеннях параметрів апроксимуючої функції (4.49)

Структурна схема механічної частини транспортного засобу з одним приводним двигуном і врахуванням характеристики зчеплення показана на рис. 5.4.

В розглядуваному об'єкті основним невимірюваним координатним збуренням є зусилля спротиву руху F_C , яке включає постійну та залежну від швидкості руху v складові. Основними параметричними збуреннями є параметри, які характеризують функцію $\varphi(\lambda)$.

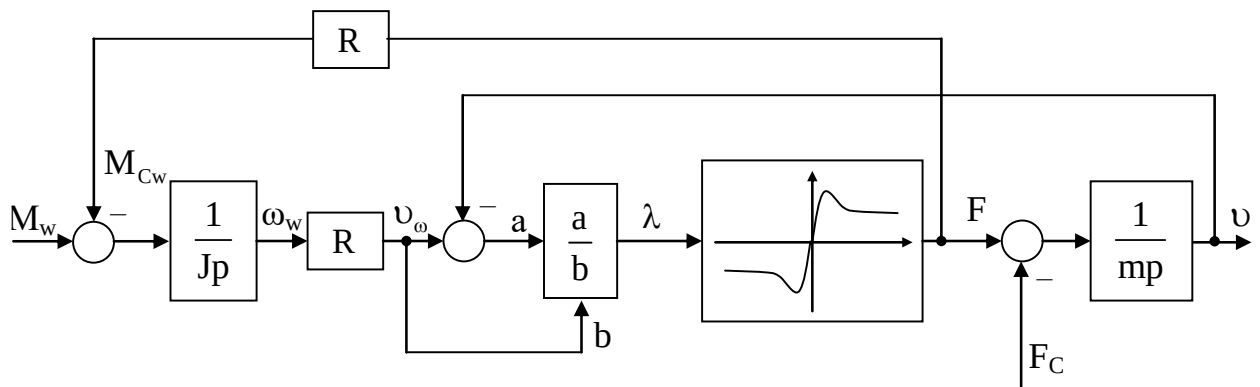


Рисунок 5.4 – Структурна схема механічної частини транспортного засобу з одним приводним двигуном

Повна математична модель транспортного засобу з одним приводним двигуном задається рівнянням (4.49), а також нелінійними рівняннями динаміки електричної підсистеми АД.

Орієнтуючись на застосування [20] векторних методів керування асинхронними двигунами, їх динамічну модель доцільно представити в синхронній системі координат $(d - q)$, яка обертається з кутовою швидкістю ω_0 . За умов симетричного живлення динамічного модель двигуна має вигляд:

$$\begin{aligned}
 M &= \mu_1 (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}) \\
 \dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta \omega \psi_{2q} + \frac{1}{\sigma} u_{1d} \\
 \dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2q} - \beta \omega \psi_{2d} + \frac{1}{\sigma} u_{1q} \\
 \dot{\psi}_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + (\omega_0 - \omega) \psi_{2q} + \alpha L_m i_{1d} \\
 \dot{\psi}_{2q} &= -\alpha \psi_{2q} - (\omega_0 - \omega) \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q} \\
 \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0
 \end{aligned} \tag{4.50}$$

де $(i_{1d}, i_{1q})^T$, $(u_{1d}, u_{1q})^T$, $(\psi_{2d}, \psi_{2q})^T$ – компоненти векторів струму статора,

напруги статора, потокозчеплення ротора;

M – електромагнітний момент;

ω – кутова швидкість ротора;

ε_0 – кутове положення системи координат $(d - q)$ відносно нерухомої системи координат статора.

Додатні константи в (4.50), які визначаються електричними параметрами АД визначені стандартним чином:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}; \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}; \quad \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m; \quad \sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}\right); \quad \mu_1 = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2},$$

де R_1, R_2, L_1, L_2 – активні опори та індуктивності статора і ротора відповідно;

L_m – індуктивність намагнічуючого контуру.

Без втрати загальності, в моделі електричної частини АД (4.50) прийнято одну пару полюсів.

Змінні в системі координат $(d-q)$ зв'язані із змінними в системі координат статора $(a-b)$ перетворенням:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{(d-q)} &= e^{-J\varepsilon_0} \mathbf{x}^{(a-b)} \\ \mathbf{x}^{(a-b)} &= e^{J\varepsilon_0} \mathbf{x}^{(d-q)}, \end{aligned} \quad e^{-J\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.51)$$

де $\mathbf{x}$ – двомірний вектор напруг, струмів чи потокозчеплень.

В моделі АД (4.50) основними [21] параметричними збуреннями є варіації активних опорів статора та ротора.

Необхідно відзначити, що в розглядуваних системах, побудованих на основі автономних інверторів напруги з високочастотною широтно-імпульсною модуляцією, загальноприйнятою практикою при розробці алгоритмів керування двигунами є представлення IGBT-інвертора ідеальною підсилювальною ланкою з коефіцієнтом передачі, рівним одиниці.

Входами електромеханічного об'єкта заданого рівнянням (4.50) є двомірний вектор напруги статора АД, а виходом – лінійна швидкість транспортного засобу. Об'єкт описується системою нелінійних диференціальних рівнянь шостого порядку та нелінійною характеристикою тертя кочення.

З метою визначення особливостей та вимог до систем керування приводними двигунами транспортних засобів виконаємо дослідження динамічної поведінки розглянутих структур механічних частин при моментному керуванні, тобто при нехтуванні динамікою приводних двигунів. За умов моментного керування вхідною керуючою дією є момент двигуна, формування якого визначає режими руху транспортного засобу.

На першому етапі розглянемо динамічну поведінку тролейбуса, який є типовим електромеханічним об'єктом з одним приводним двигуном.

Розглянемо тест який включає в себе розгін транспортного засобу, рух у режимі вибігу та гальмування до нульової швидкості (див. рис. 5.5). Розгін та гальмування транспортного засобу здійснюється з прискоренням, яке відповідає номінальному моменту приводного двигуна.

Перший тест виконано при ідеальному зчепленні, тобто коли тягове зусилля в повній мірі визначається моментом [22] приводного колеса. Графіки перехідних процесів заданого моменту, моменту приводного колеса, тягового зусилля та лінійної швидкості транспортного засобу показані на рис. 5.5. Зусилля опору руху тролейбуса задавалося як $F_C = \nu_1 \nu$, де $\nu_1 = 0.3 \text{ Н/м}^2$ – коефіцієнт в'язкого тертя.

При відпрацюванні заданої траєкторії моменту в ідеальній кінематичній парі кочення формується тягове зусилля на рівні близько 20.1 кН, що дозволяє в умовах тесту розігнати транспортний засіб до швидкості 4.2 м/с.

Для дослідження динамічної поведінки механічної частини при виникненні режиму псевдоковзання сформуємо характеристику зчеплення, яка показана на рис. 5.6

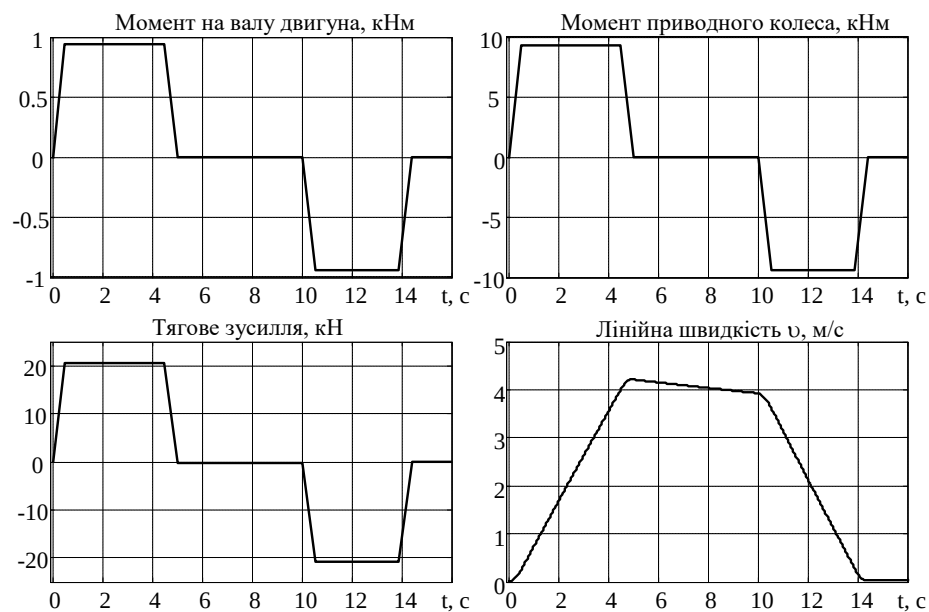


Рисунок 5.5 – Графіки перехідних процесів без врахування характеристики зчеплення

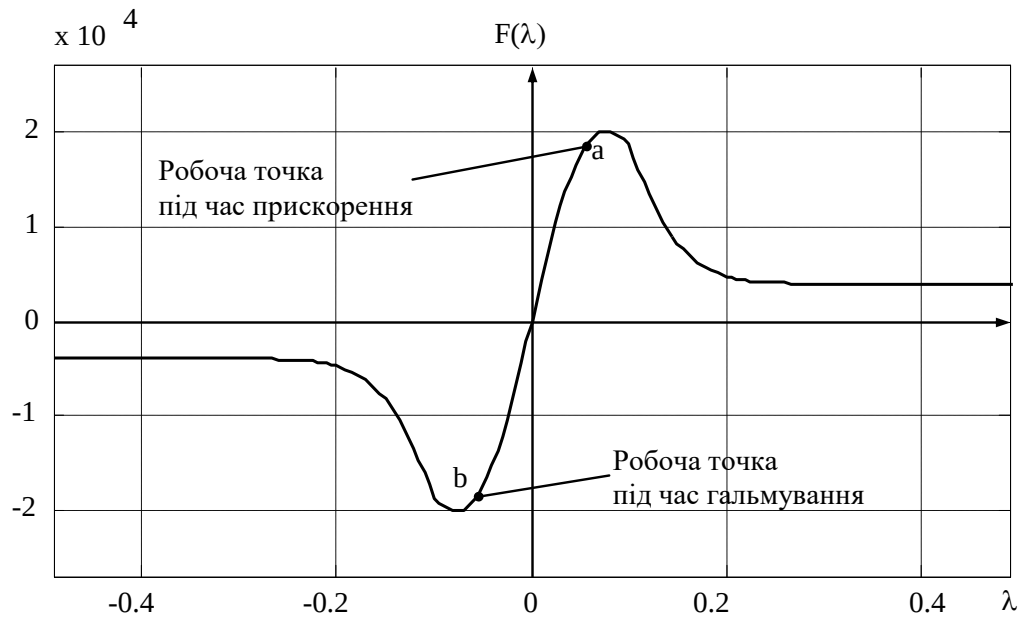


Рисунок 5.6 – Характеристика зчеплення

Графіки перехідних процесів з врахуванням характеристики зчеплення рис. 5.5 показані на рис. 5.6. З представлених графіків видно що в кінематичній парі кочення виникає ковзання на рівні 0.055 як при розгоні та і при гальмуванні транспортного засобу. Тягове зусилля [23], що забезпечує прискорення рівне приблизно 18.4 кН і є меншим, ніж у випадку показаному на рис. 5.5, коли характеристика зчеплення не враховується. Різниця лінійних швидкостей, показана на графіках перехідних процесів, визначається як $e_v = v_w - v$.

Прискорення транспортного засобу при розгоні дорівнює близько 0.95 м/с^2 , а при гальмуванні приблизно 1 м/с^2 . Положення робочих точок на станичній характеристиці зчеплення під час відпрацювання рушійного та гальмівного моментів показано на рис. 5.7 (точки а та b відповідно).

Розглянутий режим руху відповідає ідеальному випадку з точки зору передачі тягового зусилля, оскільки робоча точка знаходиться близько до максимуму на стійкій ділянці характеристики зчеплення. Підтримання робочої точки в околі точки а характеристики зчеплення при розгоні, або точки b при гальмуванні (див. рис. 5.9) при зміні форми характеристики визначає сутність максимізації тягового та гальмівного зусилля в кінематичній парі кочення.

5.2 Реалізація функції антибуксування

Розглянемо режими роботи механічної частини транспортного засобу за умов, коли характеристика зчеплення ослаблена так, що максимальне тягове зусилля складає близько 16.8 кН.

Перехідні процеси розгону [24] транспортного засобу при ослабленій характеристиці зчеплення демонструють явище втрати зчеплення між колесом та дорогою, тобто режим буксування. Внаслідок того, що максимальне тягове зусилля характеристики зчеплення не дозволяє відпрацювати прикладений момент, в час 0.48 с ковзання досягає значення 0.1, робоча точка переходить максимум характеристики зчеплення, при цьому тягове зусилля спадає до мінімального значення, рівного 6.9 кН. Оскільки ковзання в цьому режимі продовжує збільшуватися до значення 0.91, то робоча точка рухається по характеристиці зчеплення в напрямку точки b' , яка знаходиться за межами області.

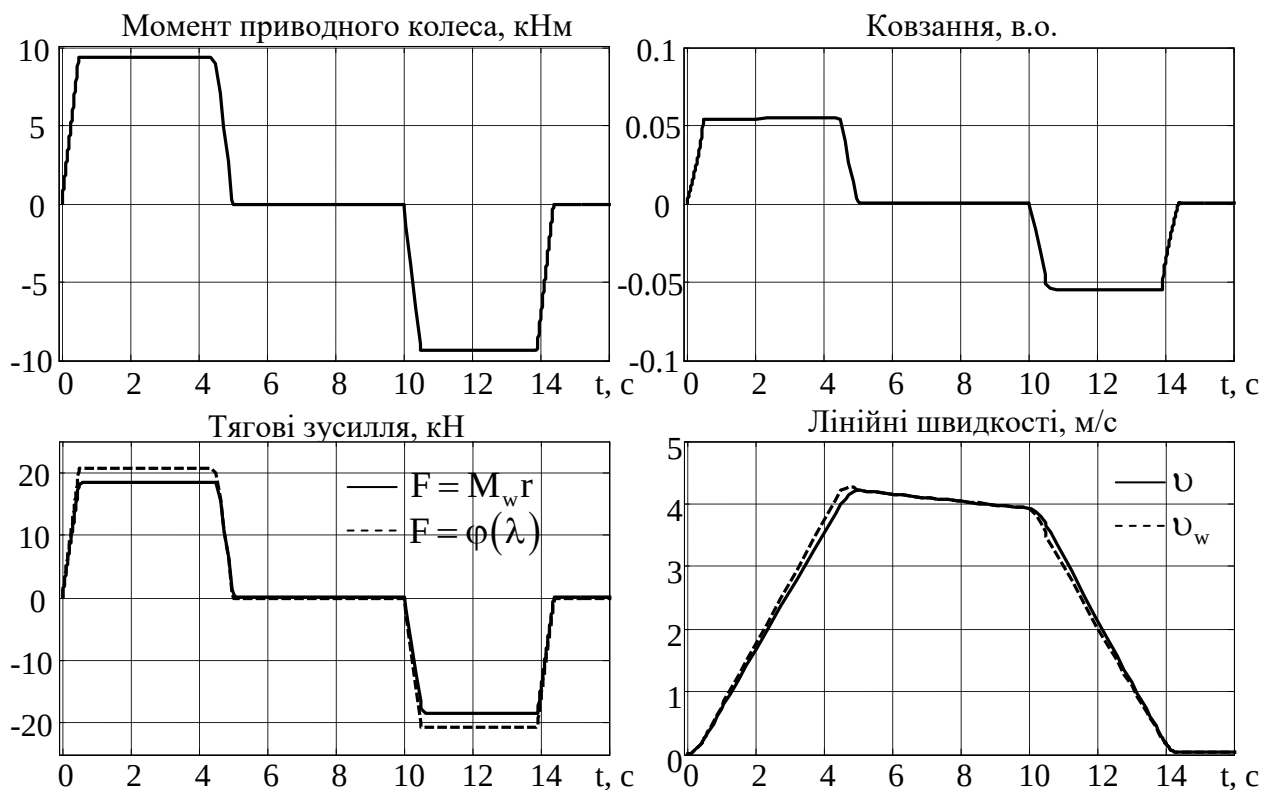


Рисунок 5.8 – Перехідні процеси при псевдоковзанні

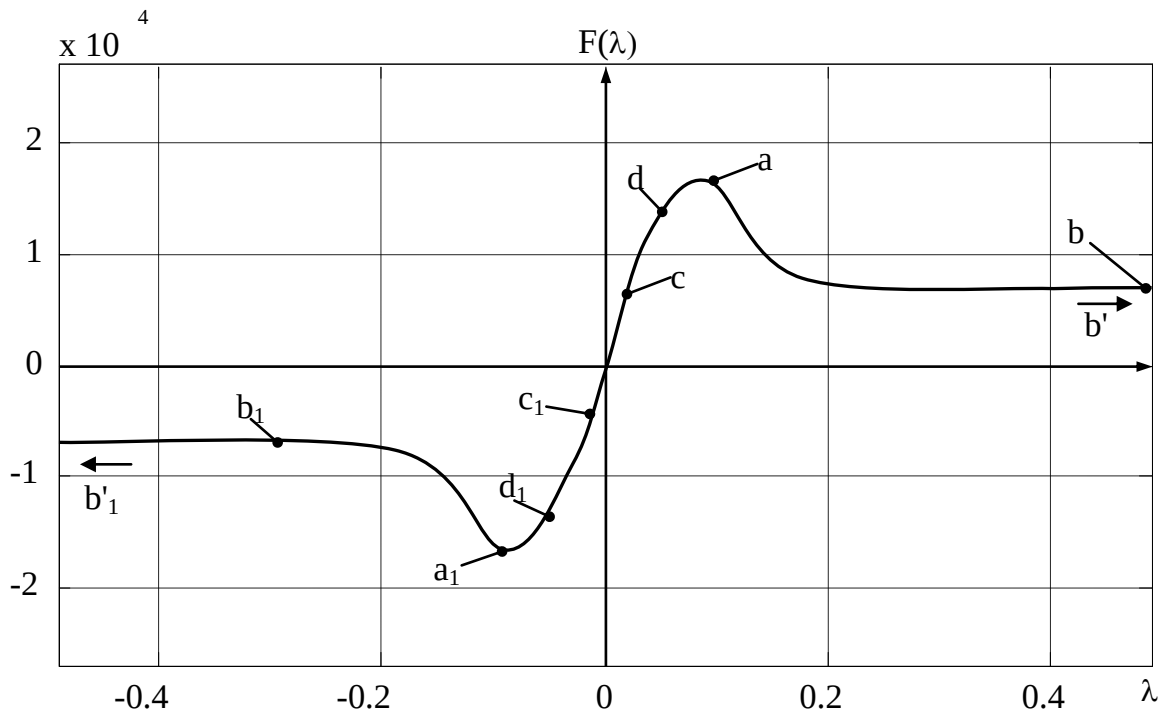


Рисунок 5.9 – Погіршена характеристика зчеплення

Втрата зчеплення [25] призводить до суттєвого зменшення прискорення транспортного засобу, в той час як лінійна швидкість ободу колеса стрімко зростає внаслідок значного зменшення моменту опору M_{Cw} на осі колеса.

З аналізу процесів на рис. 5.10 видно, що для запобігання виникненню режиму втрати зчеплення заданий момент має бути сформований так, щоб розрахункове значення тягового зусилля не перевищувало максимального значення зусилля на характеристиці зчеплення. Разом з тим режим втрати зчеплення може виникати внаслідок зміни характеристики зчеплення, наприклад при проїзді колесом покритої льодом ділянки дороги.

Розглянемо процес виводу механічної [26] частини транспортного засобу із стану повного проковзування на графіках, показаних на рис. 5.11. Як і в попередньому випадку, в момент часу 0.48 с в системі відбувся зрив зчеплення, прискорення транспортного засобу зменшується від 0.88 м/с^2 до 0.35 м/с^2 , а робоча точка на характеристиці зчеплення перейшла точку a і прямує до точки b .

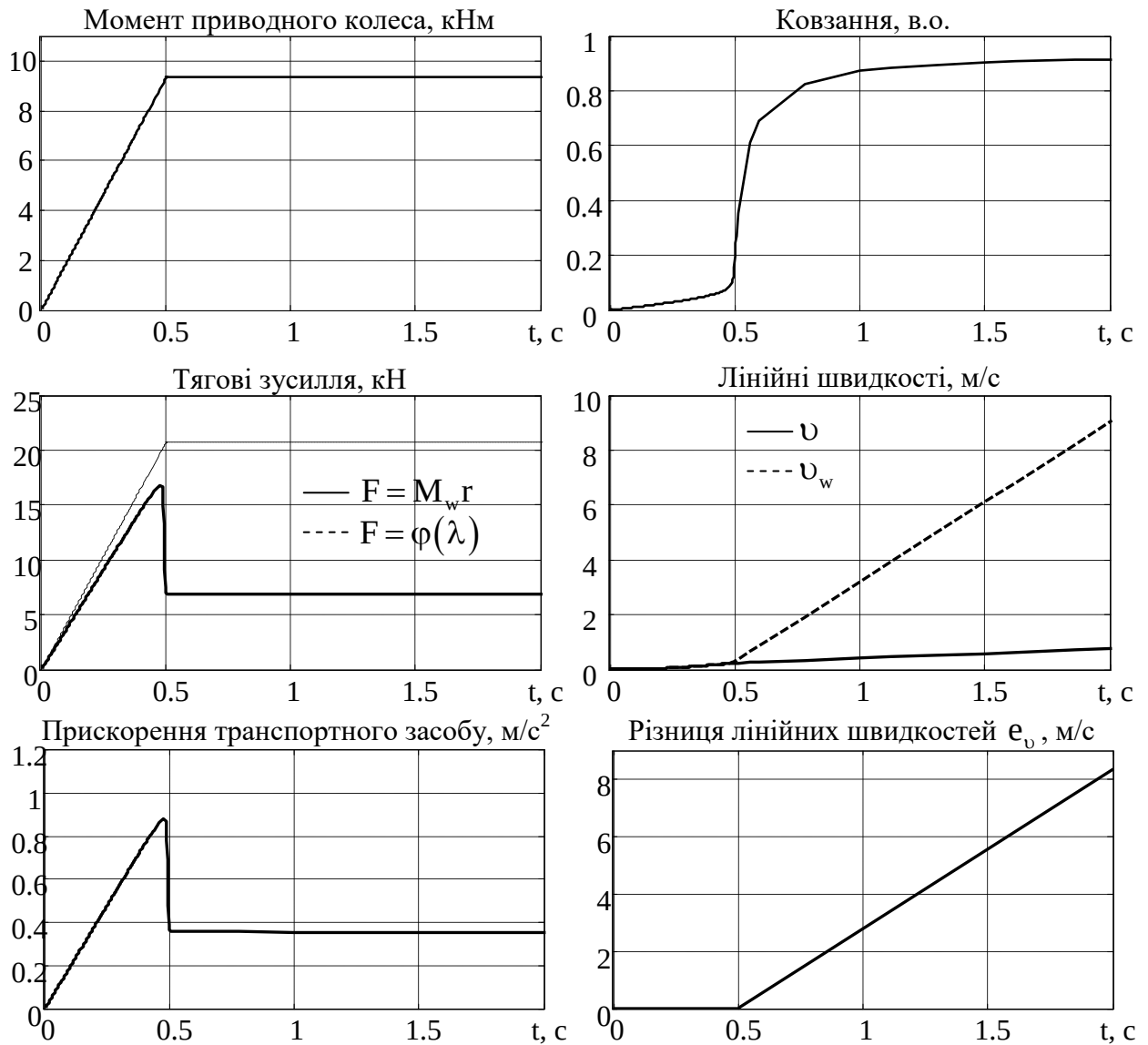


Рисунок 5.10 – Перехідні процеси при втраті зчеплення під час розгону транспортного засобу

На інтервалі $t \in (0.5; 0.575)$ с момент, що створюється колесом, зменшено до рівня 2.3 кНм. Це призводить до поступового гальмування колеса при зменшеному M_{Cw} , наближення лінійної швидкості обода [27] колеса до швидкості транспортного засобу, тобто до зменшення ковзання, робоча точка рухається від позиції b у напрямку точки c . Відмітимо, що тягове зусилля (як і прискорення транспортного засобу) при цьому залишається незмінним.

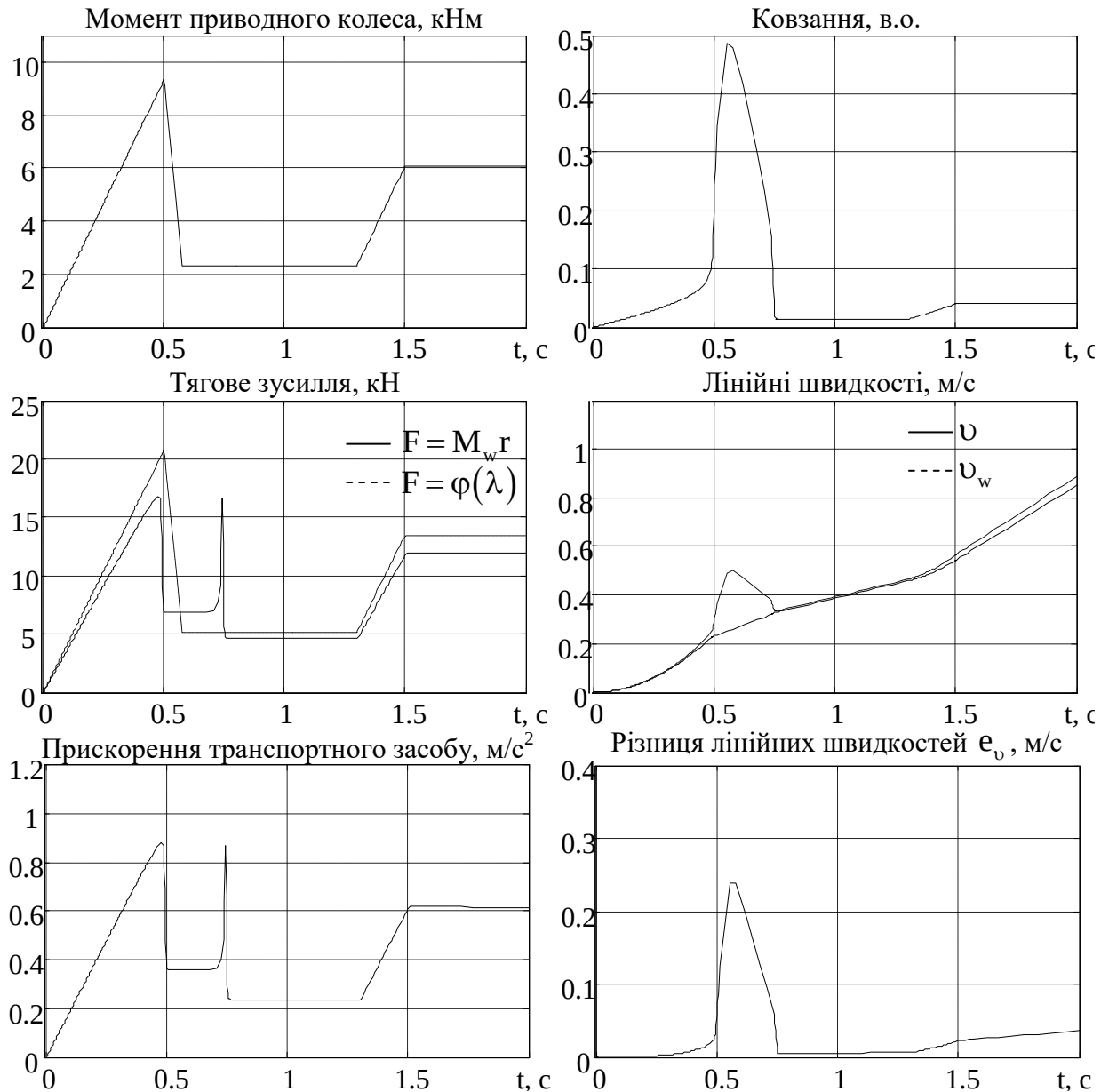


Рисунок 5.11 – Перехідні процеси при втраті та відновленні зчеплення під час розгону

При $t \in (0.74; 0.75)$ с відбувається відновлення [28] зчеплення, ковзання стає рівним $\lambda = 0.014 < 0.1$, що відповідає робочій точці c на характеристиці рис. 5.9. Після відновлення зчеплення в кінематичній парі кочення, нарощування керуючої дії до рівня 6 кНм призводить до підвищення тягового зусилля до 13.5 кН, і відбувається рівноприскорений рух транспортного засобу з прискоренням 0.61 м/с^2 в робочій точці d статичної характеристики зчеплення.

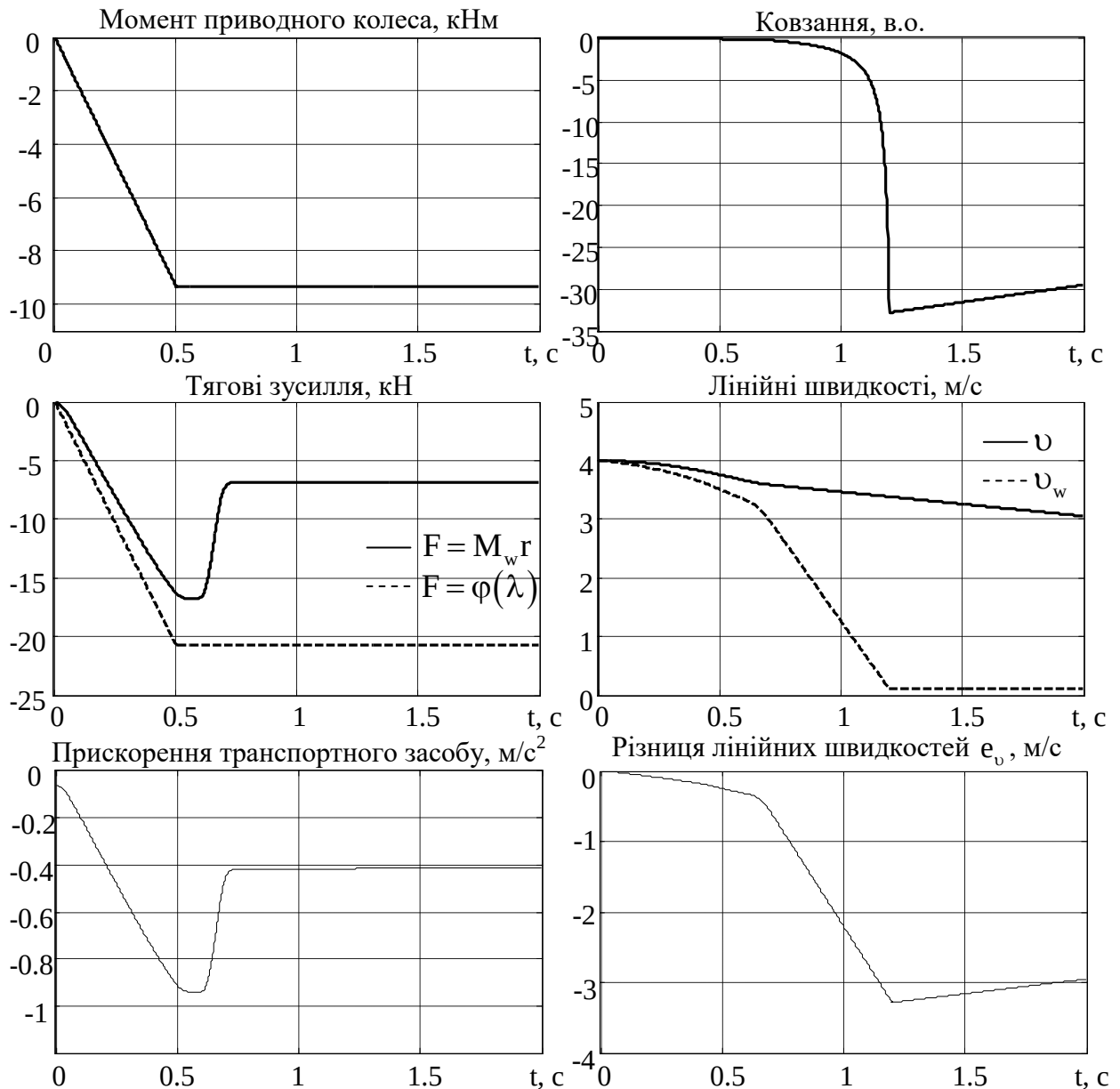


Рисунок 5.12 – Перехідні процеси при втраті зчеплення при гальмуванні транспортного засобу

Аналогічний аналіз можна [29] виконати для режиму гальмування транспортного засобу. Для цього проведено ряд тестів, при яких задавалися початкові умови по лінійній швидкості транспортного засобу та відповідній їй кутовій швидкості колеса $v(0) = 4$ м/с, $\omega_w = 8.9$ рад/с і прикладалась задана траєкторія гальмівного моменту, як показано на рис. 5.12 (режим втрати зчеплення при гальмуванні) та рис. 5.13 (режим втрати та відновлення гальмівного зчеплення).

Як видно з графіків перехідних процесів на рис. 5.12, при зриві зчеплення лінійна швидкість ободу колеса зменшується до нуля за час, менший ніж одна секунда, прискорення транспортного засобу зменшується до рівня 0.42 м/с^2 , що призводить до завищеного часу гальмування [30] транспортного засобу із заблокованими колесами протягом близько 10 с. При моделюванні тесту рис. 5.12 лінійну швидкість ободу колеса було обмежено на рівні 0.1 м/с з метою запобігання наближення режиму до точки виродженості у формулі розрахунку ковзання (4.48).

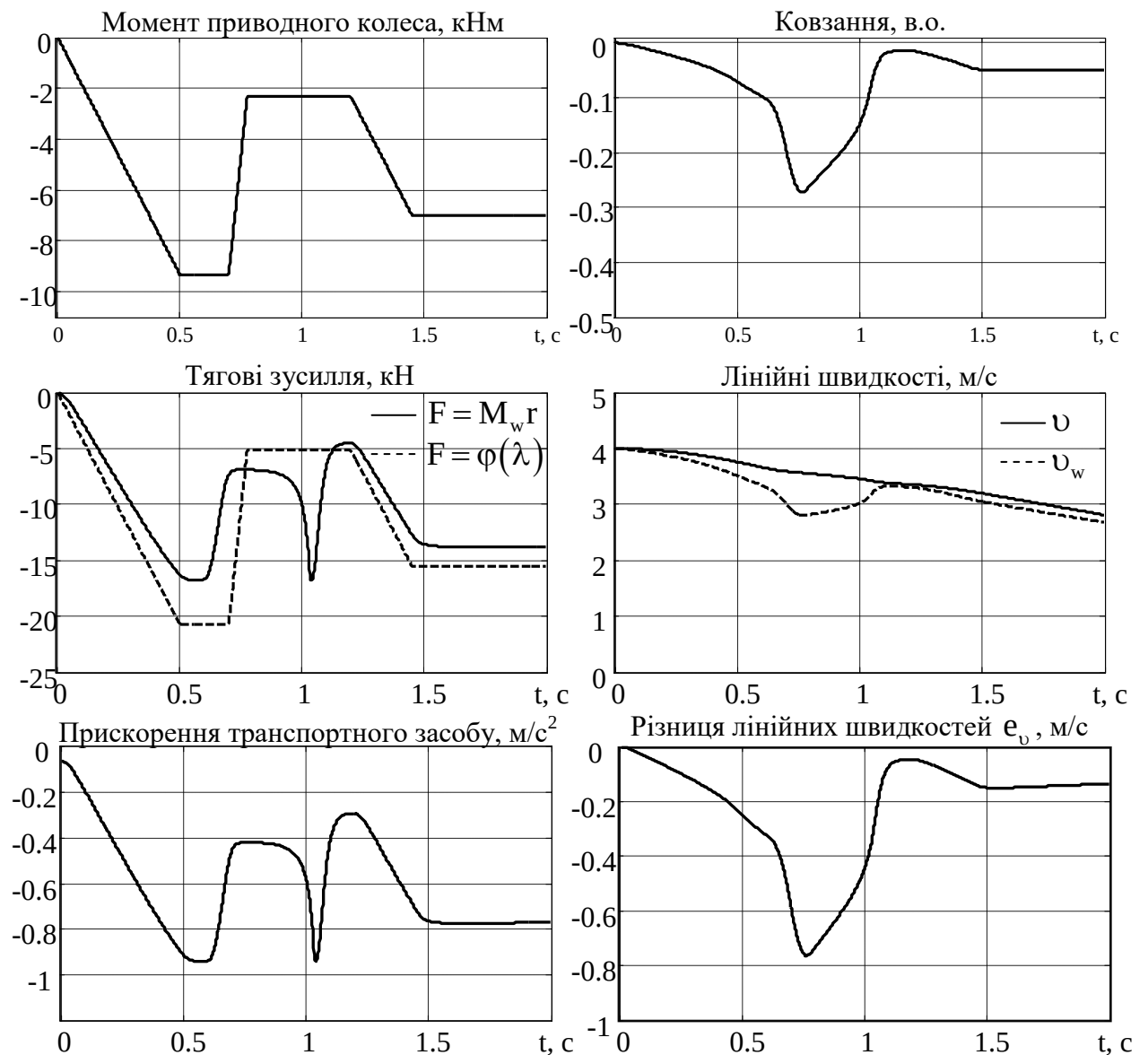


Рисунок 5.13 – Перехідні процеси при втраті та відновленні зчеплення під час гальмування

Використання розглянутої для випадку розгону транспортного засобу процедури відновлення зчеплення за рахунок зменшення та відновлення на зменшеному рівні приводного моменту дозволяє підвищити ефективність гальмування, як показано на рис. 5.13. Завдяки відновленню зчеплення прискорення транспортного засобу підтримується на рівні 0.78 м/с^2 , що дозволяє загальмувати систему до нульової лінійної швидкості за час близький до 5 с (вдвічі швидше, ніж при втраті зчеплення). Робочі точки на статичній характеристиці зчеплення які відповідають розглянутим процесам при гальмуванні показані на рис. 5.9 з індексами «1».

Втрата зчеплення в кінематичній парі кочення можлива не лише за рахунок погіршення самої характеристики зчеплення, а також під час динамічних процесів, які пов'язані з керуванням приводними двигунами.

Зокрема на рис. 5.14 показано [31] приклад процесу зриву зчеплення, коли після досягнення усталеного режиму прискорення, проілюстрованого на рис. 5.8, робоча точка знаходиться близько до максимуму (точка а на рис. 5.7) і короткочасне збільшення приводного моменту переводить механічну систему в режим проковзування. Таке явище може виникнути внаслідок наявності перерегулювання моменту приводного двигуна, яке може мати місце зокрема в системах частотного керування.

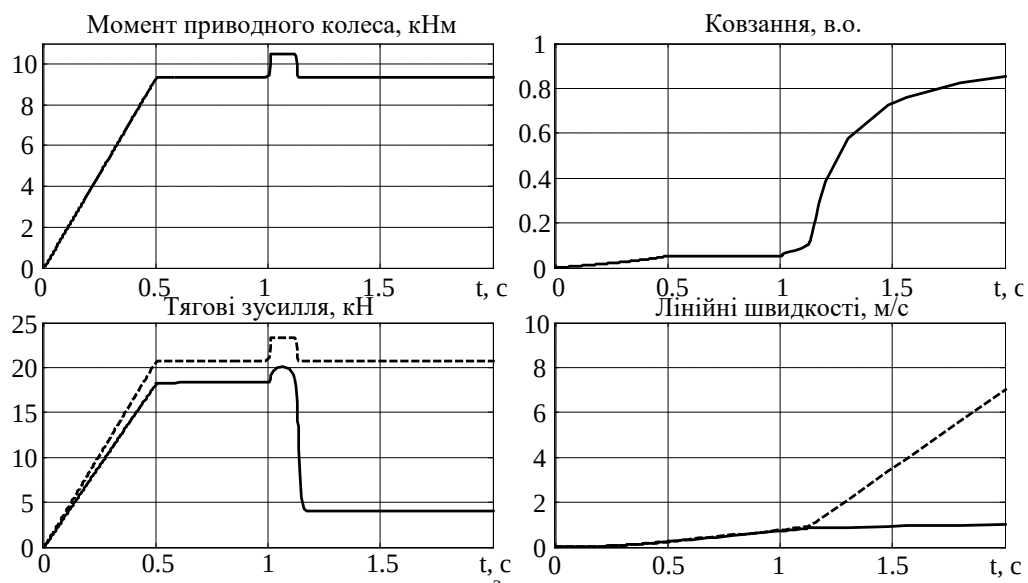


Рисунок 5.14 – Перехідні процеси при втраті зчеплення при перерегулюванні під час розгону

5.3 Реалізація функції антивідкат

Відповідно, задача полягає в тому, що коли ми досягли нульової швидкості і в нас працює функція антивідкат ми маємо переключитися на інший регулятор, а саме з регулятора моменту на регулятор швидкості.

Виконаємо дослідження системи (рис.5.15), за принципом, що тролейбус розігнався за вказаною траєкторією і під кінець циклу відпрацювання, коли тролейбус досягнув нульової швидкості і мав зупинитись, в межах 35-40 секунд він почав рухатись назад, бо зупинився під гору і статичний момент тягне його назад, що і показано в дослідженні. Швидкість змінилась на від'ємну бо функція антивідкат вимкнена. Момент на протидію руху назад не подається, струм також відсутній.

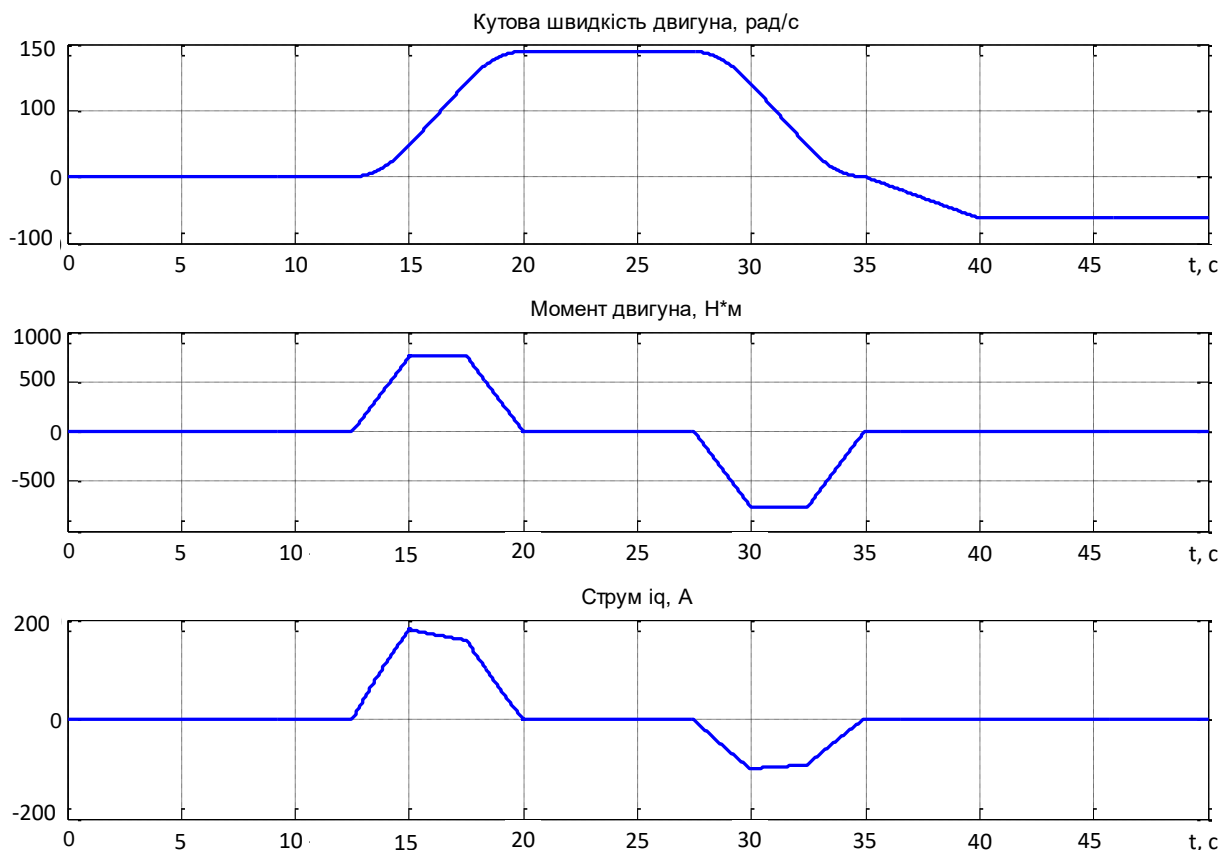


Рисунок 5.15 – Дослідження системи тролейбуса без функції антивідкату

Виконаємо дослідження системи з ввімкненою функцією антивідкату (рис.5.16), в період часу 35-40 секунд подається статичний момент еквівалентний третині номінально моменту :

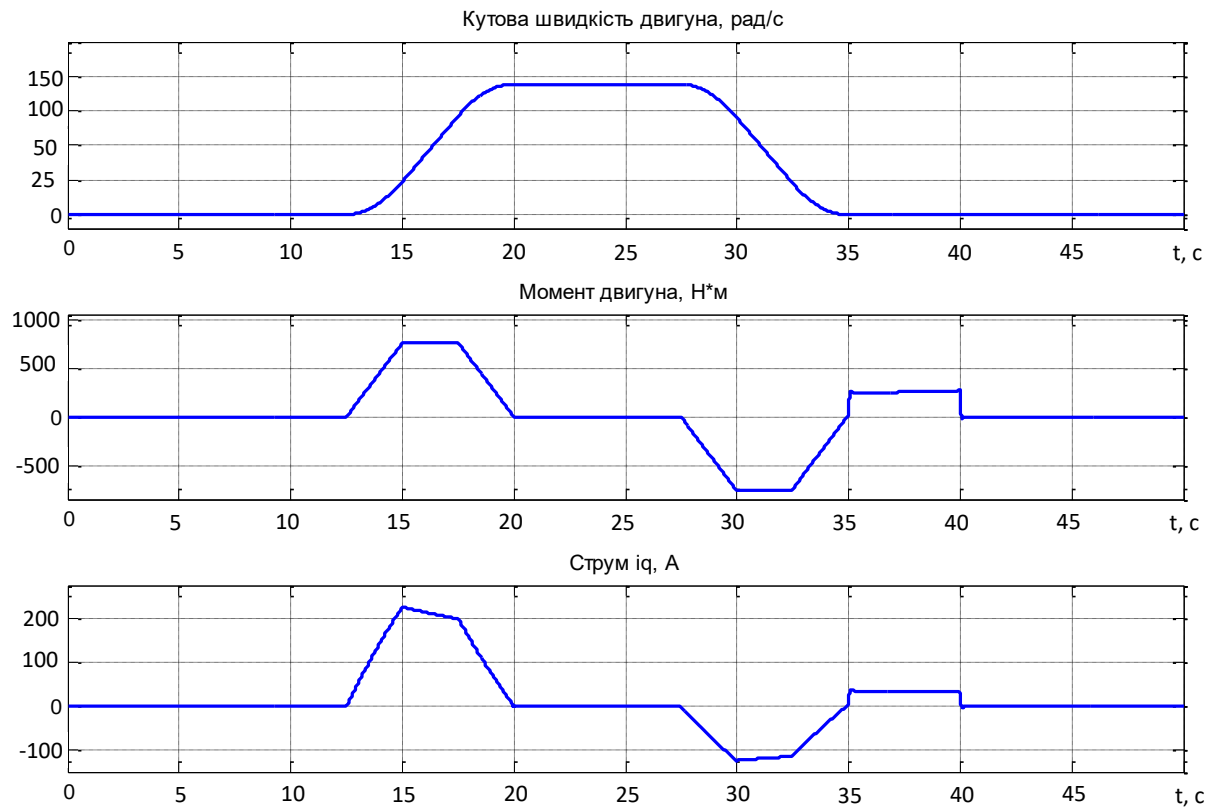


Рисунок 5.16 – Дослідження системи тролейбуса з функцією антивідкату

З результатів дослідження можна зробити висновок, що система антивідкату розроблена на базі ПІ-регулятора швидкості в повній мірі справляється з поставленою задачею та компенсує статичний момент тролейбуса, це видно з того, що в момент прикладання статичного моменту прикладається динамічний момент для утримання тролейбуса на місці, при цьому швидкість $\omega = 0$.

Також для наочності працездатності системи наведено реальний струм i_q , з графіку якого видно, що струм для формування моменту прикладається.

6 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

6.1 Розрахунок параметрів динамічної моделі двигуна

Методика розрахунку параметрів динамічної моделі наведена в [32].

Індуктивності статора і ротора:

$$L1 = L_{\mu} + L_{1\sigma} = 0.006621 + 0.000308 = 0.006929$$

$$L2 = L_{\mu} + L_{2\sigma} = 0.006621 + 0.000306 = 0.006927$$

Розрахунок параметрів моделі:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.00859}{0.006927} = 1.2401$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 L_2}\right) = 6.005 \cdot 10^{-4}$$

$$\beta = \frac{L_{\mu}}{L_2 \sigma} = 1591.76$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_{\mu} \beta = 45.71$$

6.2 Дослідження енергоефективності при використанні традиційного векторного керування

Виконаємо дослідження енергоефективності двигуна тролейбуса при використанні традиційного векторного керування, прийнявши, що за час циклу тролейбус розганяється до швидкості 9-10 м/с і проїжджає шлях довжиною 300 метрів. Потрібно виконати досліди споживання струму та активної потужності двигуном для різних значень моменту завдання. Результати дослідження зображені на рис.6.1 – рис.6.7.

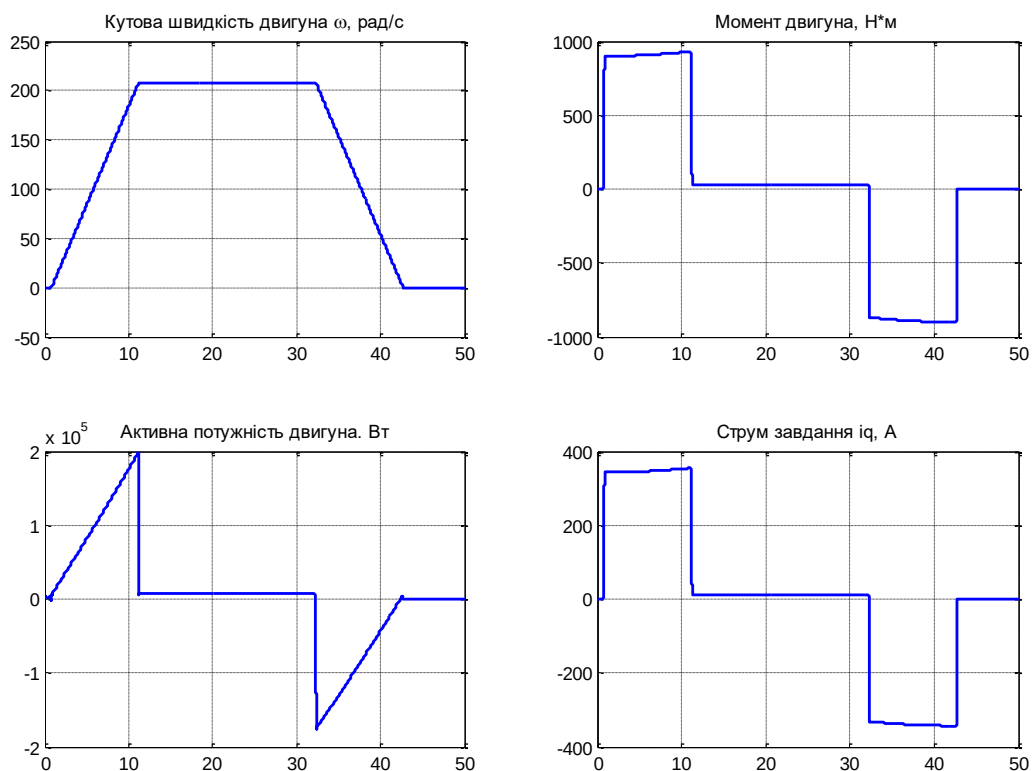


Рисунок 6.1 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 900
 $H \cdot m$

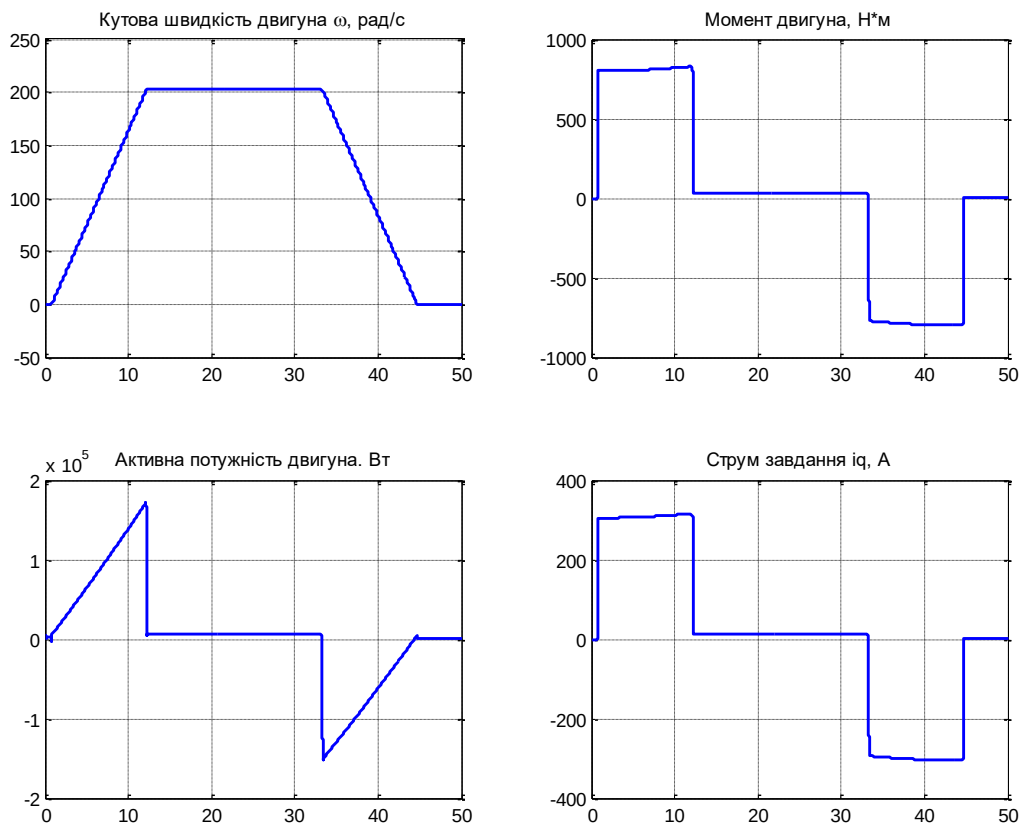


Рисунок 6.2 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 800
 $H \cdot m$

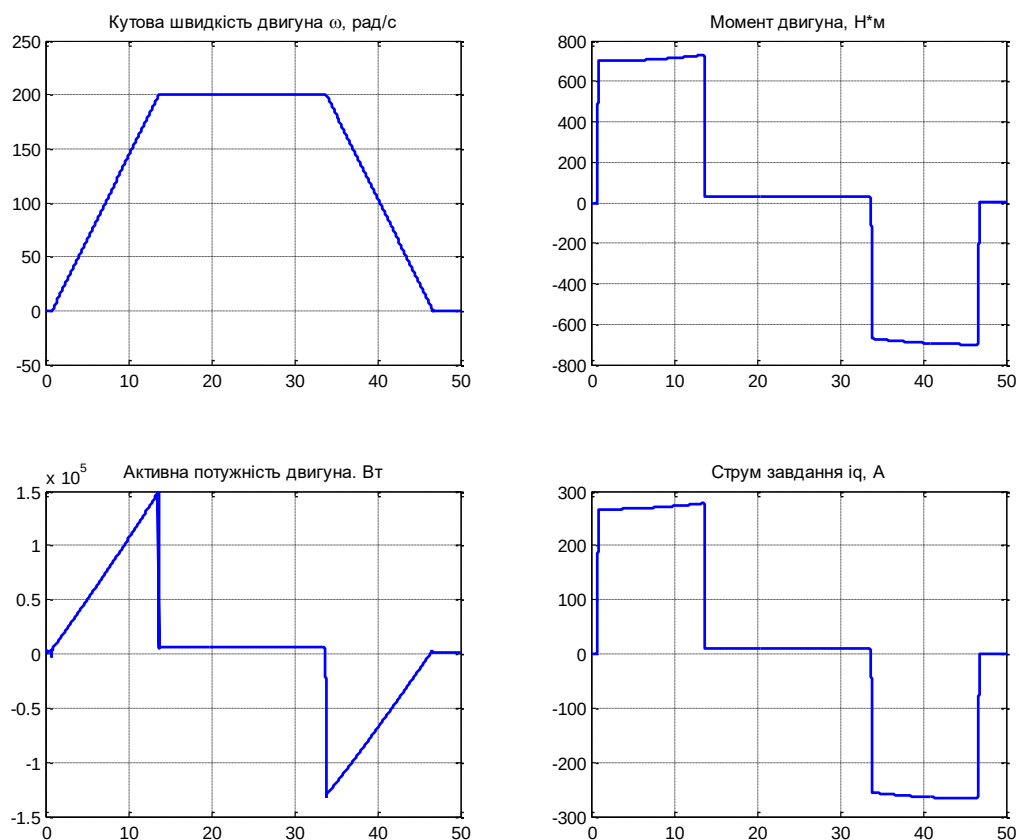


Рисунок 6.3 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 700

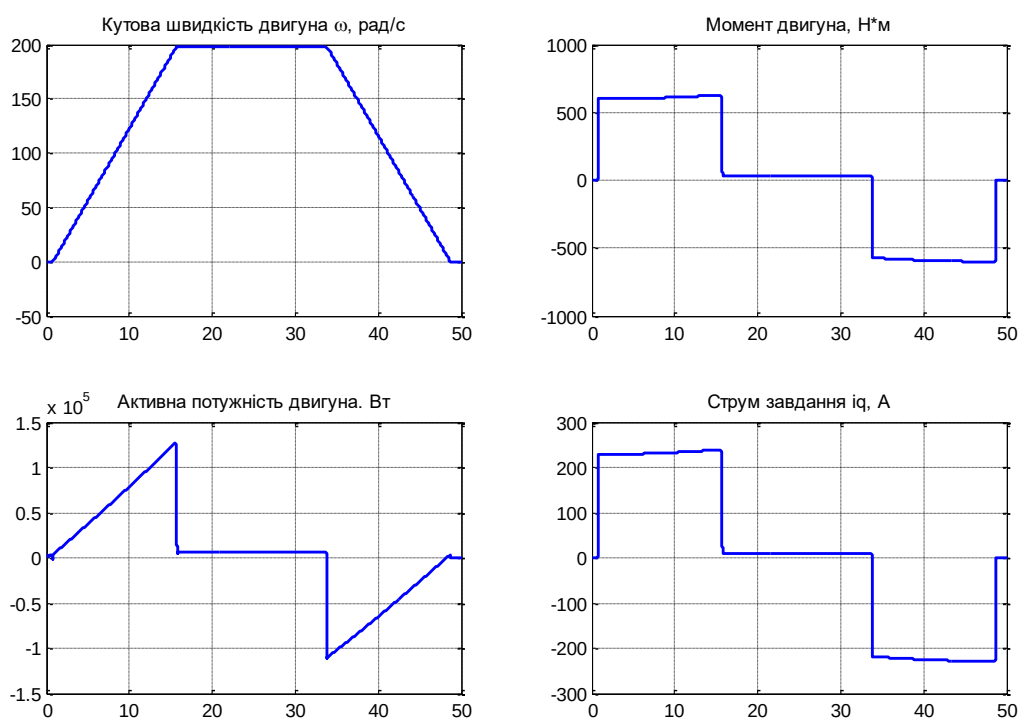
 $H \cdot m$ 

Рисунок 6.4 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 600

 $H \cdot m$

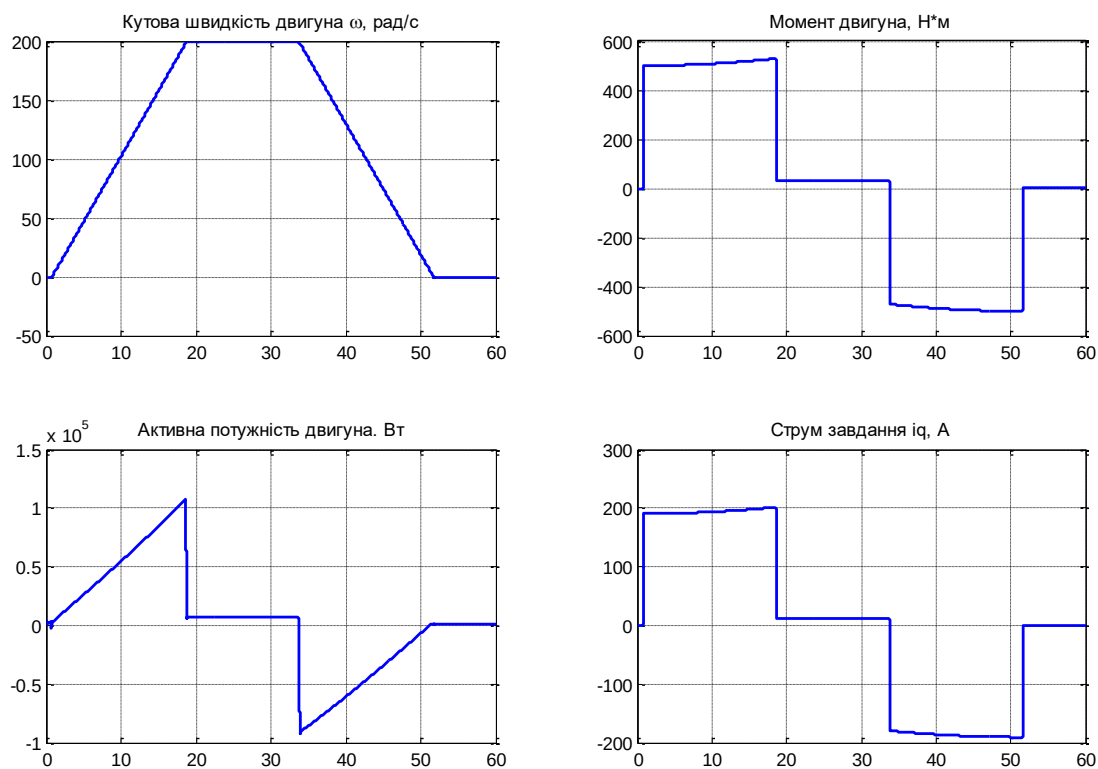


Рисунок 6.5 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 500

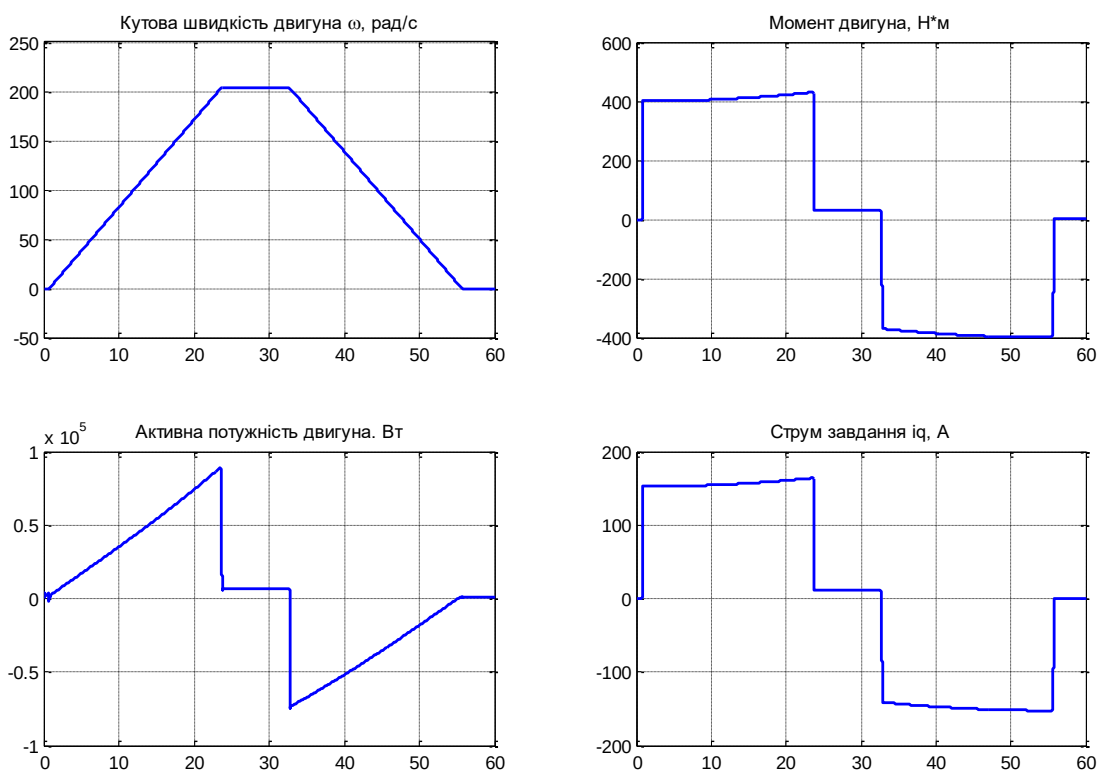
 $H \cdot m$ 

Рисунок 6.6 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 400

 $H \cdot m$

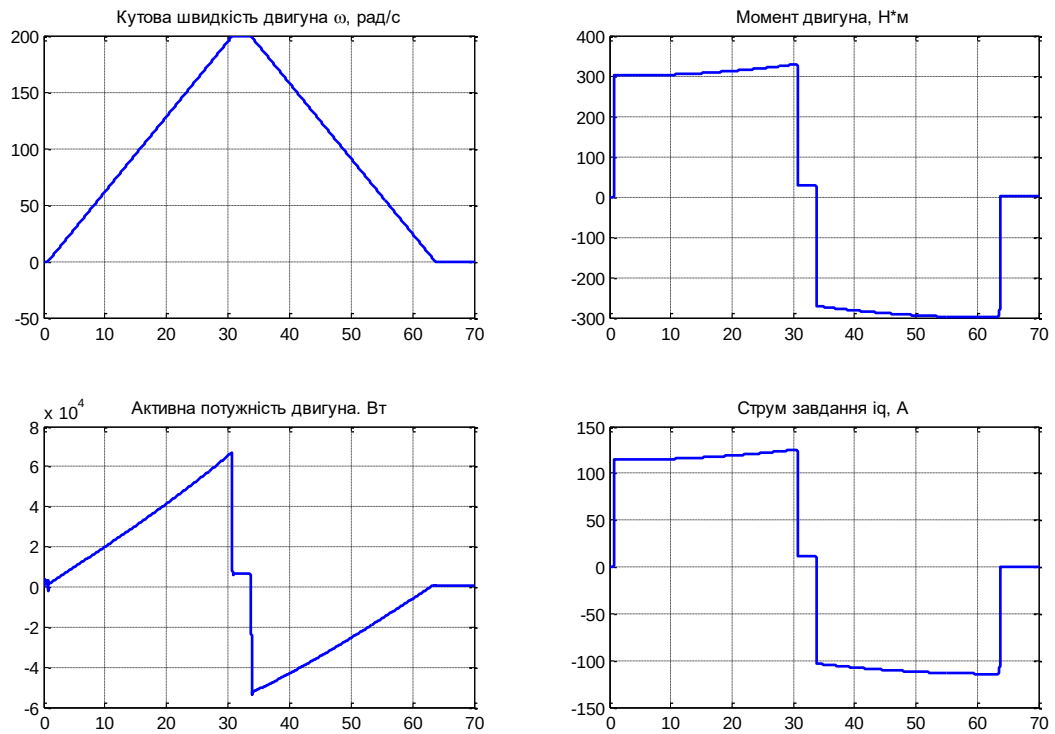


Рисунок 6.7 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 300

$H \cdot m$

Результати стандартного векторного керування наведені в табл.6.1, в ній зазначені експериментальні значення активної потужності та струму завдання для кожного моменту.

Таблиця 6.1 – Результати дослідження стандартного векторного керування

Момент завдання M , Нм	Активна потужність P_A , кВт	Струм завдання I_q , А	Енергія, Дж
900	198.6	354	$1.2 \cdot 10^6$
800	172.2	316	$1.130 \cdot 10^6$
700	150.6	277	$1.108 \cdot 10^6$
600	127.5	239.5	$1.097 \cdot 10^6$
500	107.2	201.5	$1.050 \cdot 10^6$
400	89.2	164	$1.027 \cdot 10^6$

6.3 Дослідження енергоефективності при використанні методу керування моментом з максимізацією співвідношення момент-струм

Виконаємо дослідження енергоефективності двигуна тролейбуса при використанні методу керування моментом з максимізацією співвідношення момент-струм. Дослід виконаємо при таких же умовах, що і минулий дослід.

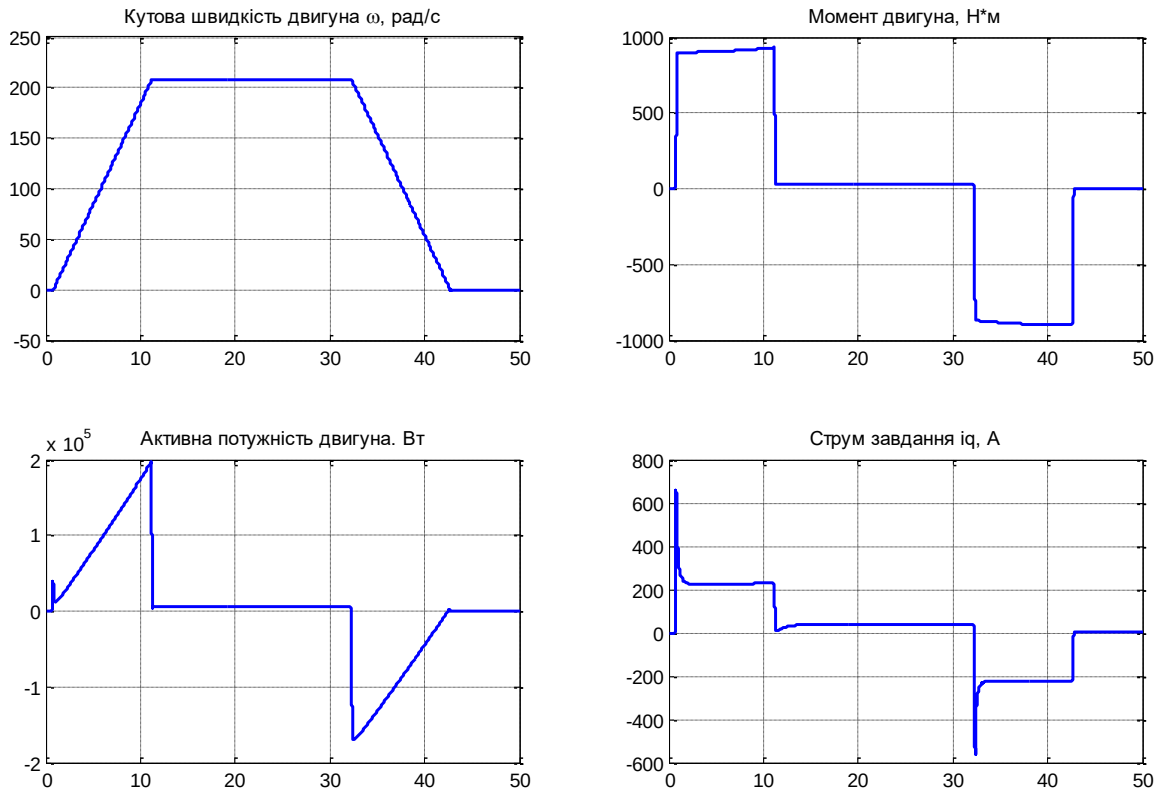


Рисунок 6.8 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 900

$H \cdot m$

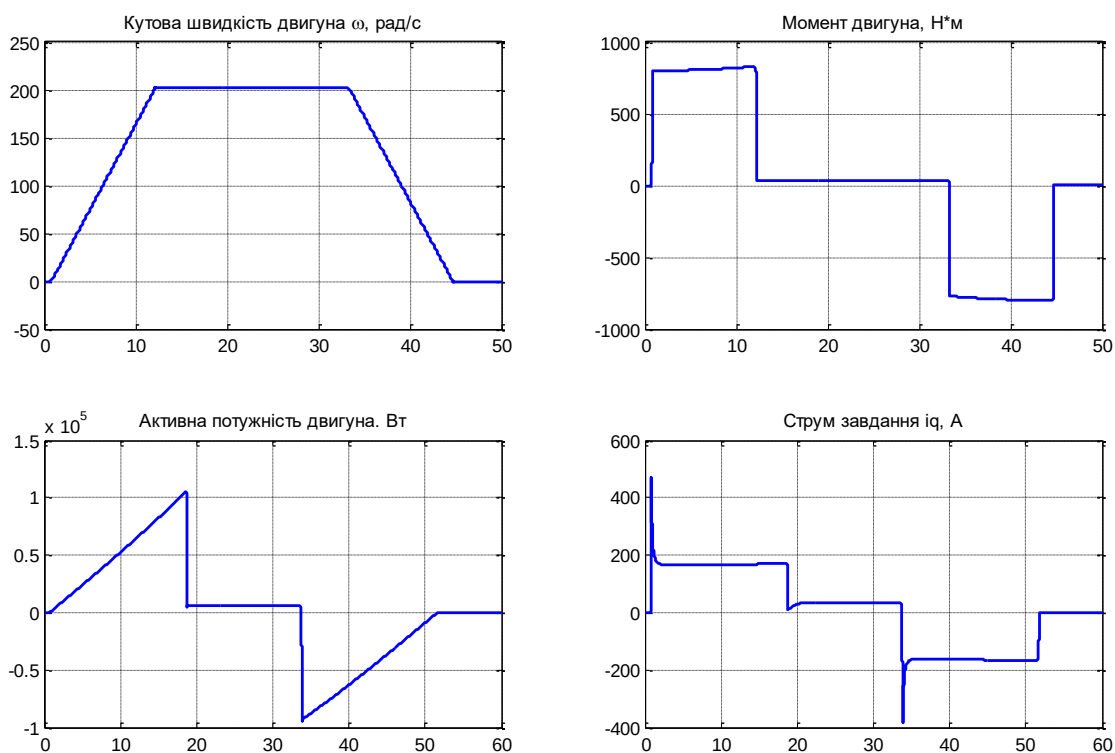


Рисунок 6.9 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 800

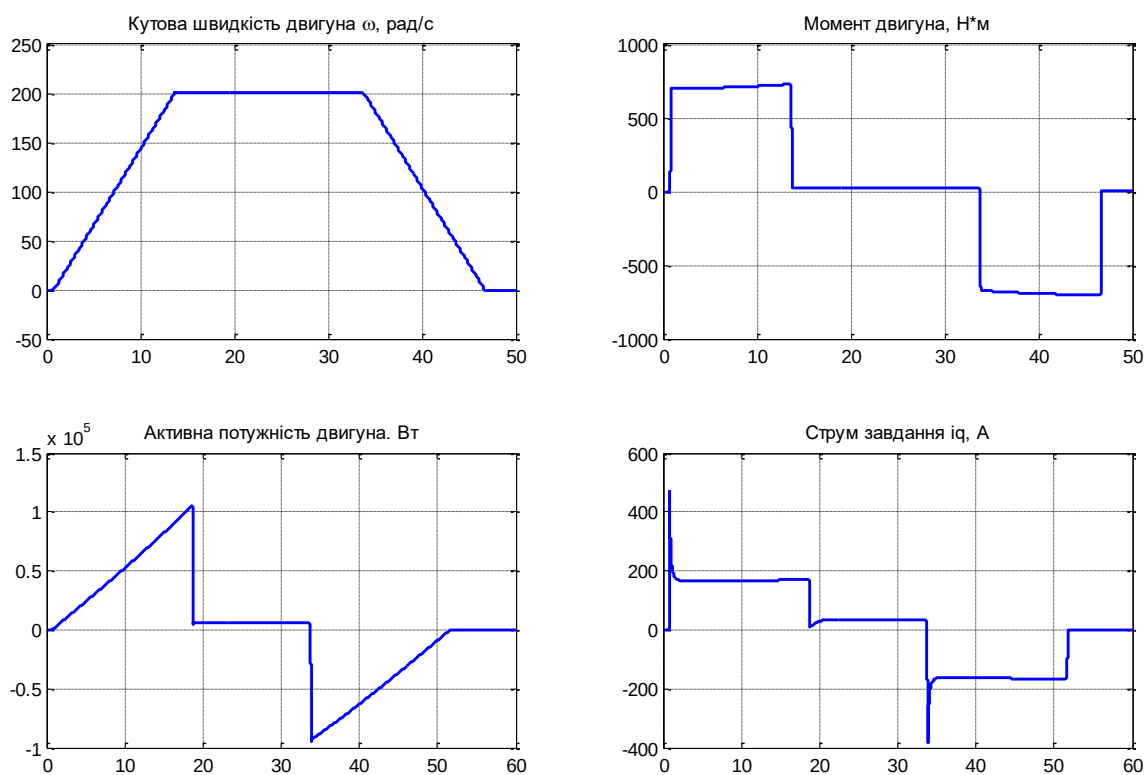
 $H \cdot m$ 

Рисунок 6.10 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 700

 $H \cdot m$

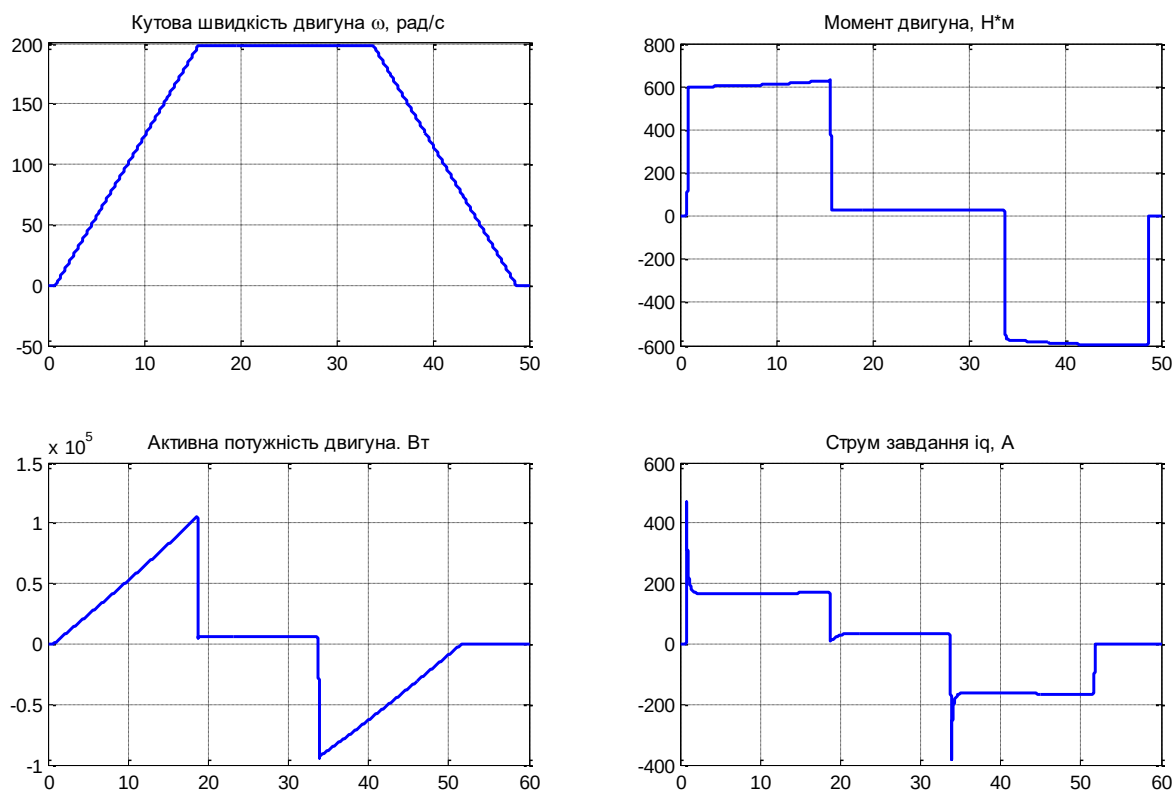


Рисунок 6.11 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 600

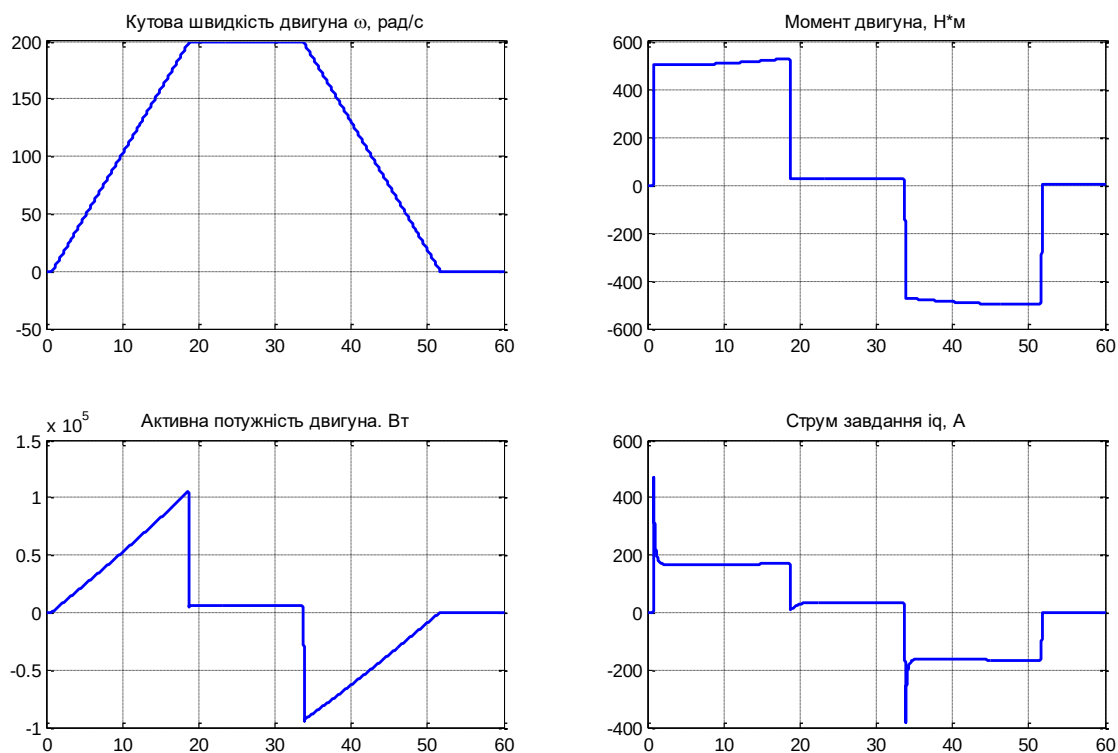
 $H \cdot m$ 

Рисунок 6.12 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 500

 $H \cdot m$

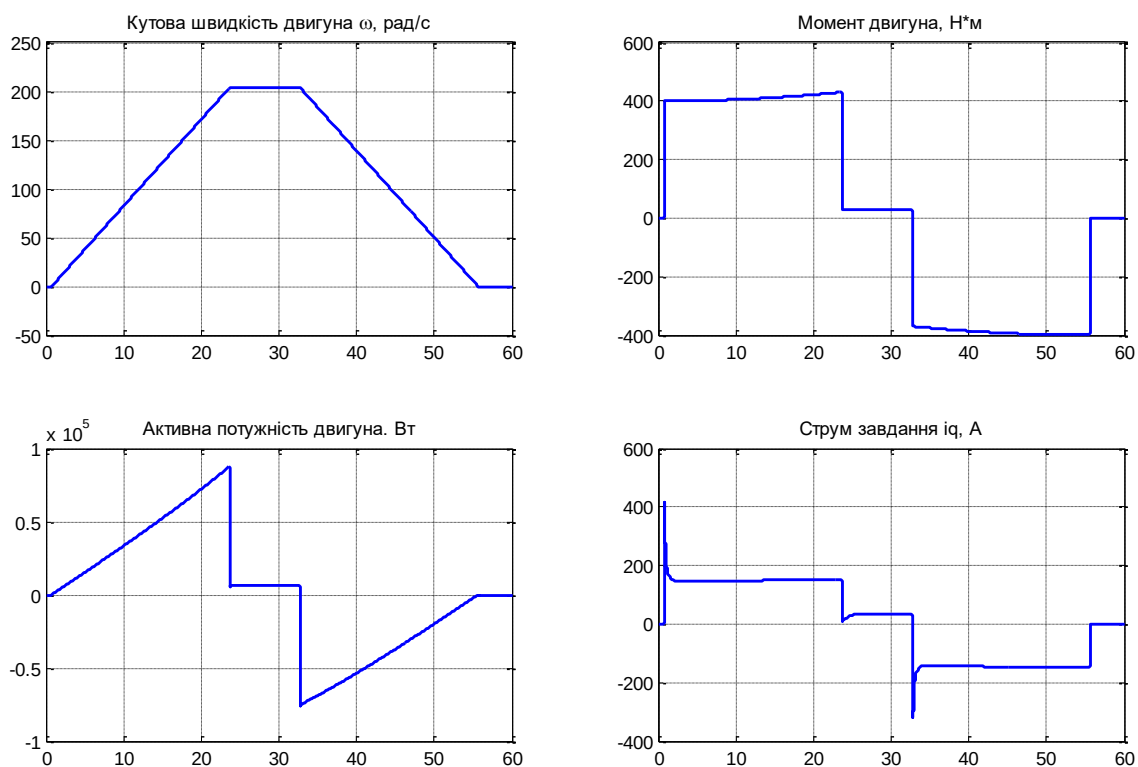


Рисунок 6.13 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 400

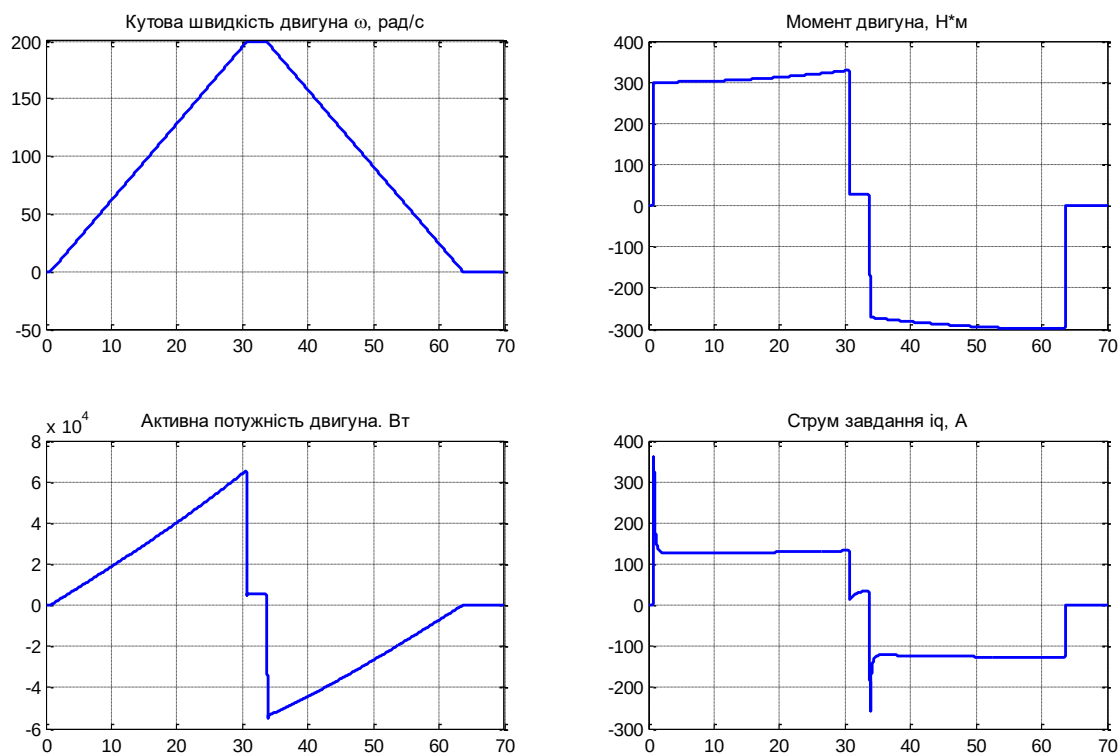
 $H \cdot m$ 

Рисунок 6.14 – Дослідження енергоефективності при моменті завдання 300

 $H \cdot m$

Таблиця 6.2 – Результати дослідження при максимізації момент-струм

Момент завдання M , Нм	Активна потужність P_A , кВт	Струм завдання I_q , А	Енергія, Дж
900	190.7	228	$1.175 \cdot 10^6$
800	167.4	219	$1.115 \cdot 10^6$
700	145.6	201	$1.089 \cdot 10^6$
600	124.4	186	$1.057 \cdot 10^6$
500	105	170.5	$1.046 \cdot 10^6$
400	87.4	152.5	$1.001 \cdot 10^6$
300	65.5	132.2	$978 \cdot 10^5$

Дослідивши 2 методи керування було отримано дані які зображені на рис.6.15 та рис.6.16:

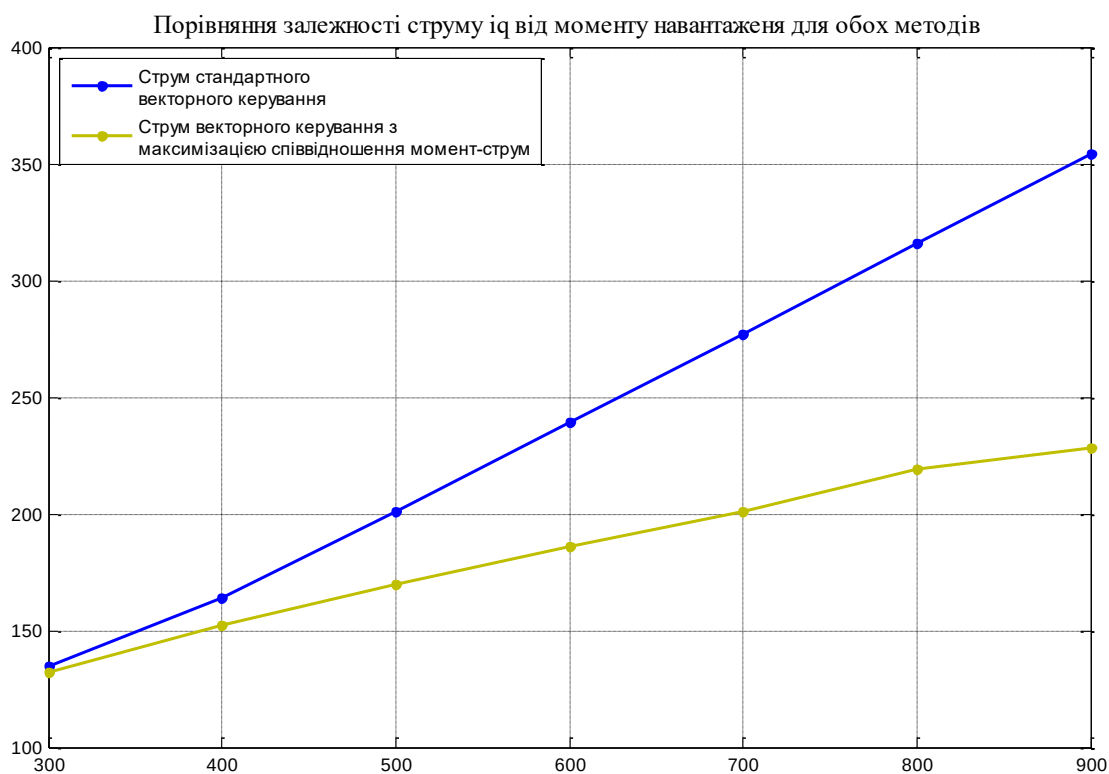


Рисунок 6.15 – Результати дослідження двох методів керування

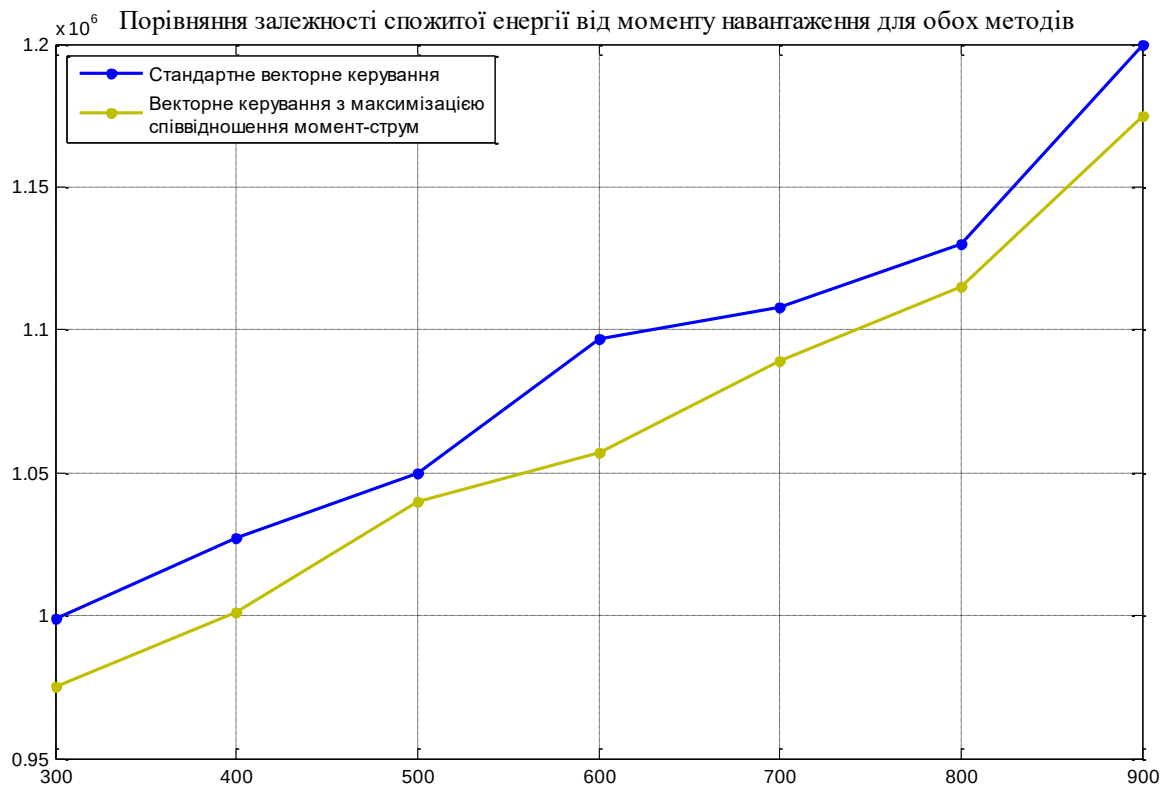


Рисунок 6.16 – Результати дослідження двох методів керування

6.4 Висновки до розділу

Проаналізувавши отримані дані з дослідження 2 методів керування, можна зробити висновок, що метод керування моментом з максимізацією момент-струм є більш енергоефективним ніж стандартний метод векторного керування на 3-7%. Варто відмітити, що струм при такому керуванні споживається менший, це дозволить менше навантажувати прилади великими струмами, що позитивно вплине в економічному плані на вибір обладнання.

Такий метод дозволить менше навантажувати акумуляторну батарею та захистить від великих струмів на виході. Отже можна зробити висновок, що метод керування моментом з максимізацією момент-струм більше підходить для керування приводним двигуном, адже має ряд переваг, зокрема на автономний хід.

Також згідно графіків моменту, знятих на реальному тролейбусі (рис.4.2) видно, що водій зазвичай подає момент менший за номінальний, отже метод максимізації момент-струм досить гарно підходить для системи, адже економія для такого методу спостерігається саме на малих значеннях моменту.

7. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

Було досліджено та спроектовано електромеханічну систему автоматизації тролейбуса з автономним ходом, для якої було обрано двигун, батареї, та інше необхідне обладнання. Дана система дозволить зекономити енергію необхідну для поїздки, адже була досліджена та обрана сама оптимальна система керування тяговим двигуном яка є самою енергоефективною. Також дана система дозволить не витратити додаткові кошти для монтування нових тролейбусних ліній, адже в даній системі врахований варіант їзди на заряді від влаштованих батарей.

Даний пункт покаже маркетингові аспекти реалізації схожого стартап-проекту. Описання товару та визначення його недоліків та сильних сторін наведені в табл. 7.1-7.2.

Таблиця 7.1 – Описання ідеї проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Налагодження виробництва в реальних проектах, застосування електромеханічної системи для компаній які займаються перевезеннями пасажирів	1. Дослідження фізичної моделі системи автоматизації тролейбуса.	Представлення динамічних характеристик при зміні моменту.
	2. Моделювання при фізичному проектуванні системи.	Ефективний підбір коефіцієнтів регуляторів та обладнання системи.

Можна сформулювати техніко-економічні властивості для електромеханічної системи автоматизації тролейбуса з автономним ходом: врахування профілю дороги при проектуванні системи, розрахунок батареї для тривалого автономного ходу, енергоефективний алгоритм керування

двигуном, реалізація спеціальних функцій (анти-букс, анти-відкат, круїз-контроль).

Для визначення конкурентоспроможності необхідно порівняти проект із існуючими рішеннями і визначити його сильні, слабкі та нейтральні сторони.

Таблиця 7.2 – Перелік слабких, нейтральних та сильних сторін проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характеристики і ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабк а сторон а)	N (нейтра льна сторона)	S (силь на сторона)
		Мій проект	Конкур ент1	Конкур ент2	Конку- рент3			
1.	Врахування профілю дороги при проектуванні системи	Так	Ні	Ні	Так		+	
2.	Розрахунок батареї для тривалого автономного ходу	Так	Так	Ні	Ні			+
3.	Енергоефективний алгоритм керування двигуном	Так	Ні	Так	Так			+
4.	Реалізація спеціальних функцій (анти-букс, анти-відкат, круїз-контроль).	Так	Ні	Ні	Ні			+

Щоб оцінити можливість реалізації проекту виконаємо аудит технологій створення товару, який розміщений в табл. 7.3.

Таблиця 7.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1.	Розробка моделі для проведення моделювання	Реалізація моделі в середовищі Matlab.	Наявна	Доступна
2.	Налагодження моделі тролейбуса	Інструкції для самостійного налагодження моделі.	Потрібно допрацювати	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: розробка моделей і їх налагодження у відповідності до реальної установки. Таке рішення є наявним та доступним для реалізації виконавцем проекту.				

Виконаємо аналіз ринкових можливостей запуску проекту результати якого розміщені у табл. 7.4-7.13.

Таблиця 7.4 – Характеристика можливого ринку стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1 400 000
3	Якісна оцінка динаміки ринку	Зростає
4	Обмеження для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	ARR=30%

Таблиця 7.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги від споживачів до товару</i>
1.	Потреба збільшити запас автономного ходу для тролейбусів на маршруті.	В основному це пасажирські перевізники.	Цільова група не має обмежень, крім наявності потрібних коштів.	Можливість налаштування моделі.

Таблиця 7.6 – Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Конкуренція	Є декілька серйозних фірм які займаються покращенням автономності та енергоефективності електротранспорту.	Розгортання рекламних компаній та покращення сервісу.
2.	Модернізація	Для використання методу потрібно мати висококваліфікований персонал та потужне обладнання з програмним забезпеченням.	Забезпечення безкоштовним налаштуванням системи.

Таблиця 7.7 – Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Зростання потреб потенційних користувачів	Зменшення витрат на реалізацію виробництва запровадивши якісний аналіз на етапі проектування	Збільшення рекламних оголошень та знижка на послуги.
2.	Вихід на міжнародний ринок	Продаж тролейбусів за кордон.	Спільна робота з іноземними виробниками.

Таблиця 7.8 – Аналіз ступеневий для конкуренції на ринку товарів

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Тип конкуренції олігополістична	Налічується близько 3 великих компаній	Для входження на ринок потрібно реалізувати рекламну компанію та дещо знизити ціну продукції.
2. Рівень конкурентної боротьби міжнародна	Конкуренція міжнародними виробниками	Розгортання рекламних компаній в промислових містах, пропонування продукції великим підприємствам
3. За галузевою ознакою використання внутрішньогалузева	Застосування даної системи для місцевого перевезення.	Розширення функціоналу методу для конкурентоспроможності

Таблиця 7.8 - Продовження

4. Конкуренція за видами товарів товарно-видова	В компаній конкурентів використовуються інші методи керування двигуном.	Модернізація іншого електротранспорту.
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Модернізація системи шляхом покращення аналізу результатів досліджень	-
6. За інтенсивністю марочна	Наявні великі компанії конкуренти	Заклучення партнерських відносин з великими компаніями

Таблиця 7.9 –Конкурентний аналіз в галузі за М. Портером

Елементи аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку товарів замінників
Висновки:	В цілому ринок має 3-х конкурентів, які пропонують майже систему керування	Так як наявні 3 компанії і вони можуть нав'язати конкуренцію. Є можливість вступу в ринок	Немає компаній для постачання. Тому покупець напямую домовляється про умови покупки	Фактичні покупці самі роблять вибір на основі аналізу ринку, ціни та якості	Менша ціна за схожий функціонал запропонованого методу

Таблиця 7.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1.	Врахування профілю дороги на маршруті.	Дозволяє обрати необхідне обладнання для системи без великих запасів, а саме те, що потрібно, дозволяє не переплачувати за не потрібний запас.
2.	Використання спеціальних методів керування двигуном	Дозволяє ефективніше витратити електроенергію з мережі з меншими втратами, також впливає на запас автономного ходу.

Таблиця 7.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Електромеханічної системи автоматизації тролейбуса з автономним ходом»

<i>№ n/ n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Бали 1-20</i>	<i>Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з запропонованим проектом</i>						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Врахування профілю дороги на маршруті.	15			+				
2	Використання спеціальних методів керування двигуном	18		+					

Таблиця 7.12 – Аналіз SWOT для стартап-проекту

<i>Сильні сторони проекту</i>	<i>Слабкі сторони проекту</i>
Невисока ціна розробки, відносно не складний метод дослідження електромеханічних систем тролейбусів	Неможливість моделювання без кваліфікованого персоналу та ліцензійного забезпечення програми
<i>Можливості:</i> перехід на міжнародний рівень та покращення аналізу проведених досліджень	<i>Загрози:</i> конкуренція з боку великих компаній

Таблиця 7.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1.	Зацікавленість споживачів методом проведення рекламних компаній	50%	6 місяці
2.	Покращення якості інструкції для користування продуктом	60%	6 місяців

Проаналізувавши альтернативи впровадження в ринок можна зробити висновок що другий варіант має більші шанси отримати ресурси для реалізації.

Проведемо розробку ринкової стратегії проекту результат якої знаходиться в табл. 7.14-7.17.

Таблиця 7.14 –Визначення цільових груп потенційних споживачів

<i>№ п / п</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів в сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1.	Для комунальних підприємств та пасажирських перевізників	Повна готовність прийняти продукт	Високий попит який зв'язаний з ціною нижчою на ринку та енергоефективністю	Збільшення конкуренції з часом	Висока можливість виходу на ринок, так як система має ряд переваг над конкурентами

Таблиця 7.14 - Продовження

2.	Підприємств а	Не повна готовність сприйняття продукту			Шанс вийти на ринок високий, але необхідне доопрацювання системи для даних цілей
Які цільові групи обрано: обрано основну цільову групу –житлово-комунальні підприємства та великі житлові комплекси, так як для них важливе питання правильного підбору обладнання та зменшення активних втрат установок, і додаткову –підприємства, але необхідне доопрацювання методики отримання характеристик.					

Таблиця 7.15 –Формування стратегій розвитку стартап-проекту

<i>№ п/ п</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспромо жні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>
1.	Покращення алгоритму аналізу та написання покращених інструкцій використання	Міжнарод ний маркетинг	Відносно не висока ціна, гнучкість для використання в різних галузях	Використання стратегії диференціації

Таблиця 7.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ п/п</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки</i>
1.	Ні, є компанії які створюють схожі системи	Компанія націлена на знаходження нових споживачів	Так, але робити аналоги систем з покращеними характеристиками та збільшеним функціоналом	Наслідування основних компаній ринку

Таблиця 7.17 – Визначення стратегії позиціонування

<i>№ n/ n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспро- можні позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформува- ти комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1.	Зручність використан- ня та висока точність методики	Стратегія диференц- іації	Максимально ефективний підбір обладнання та двигунів	Моделювання системи автоматизації тролейбусу
2.	Можливість гнучкого налаштуван- ня	Стратегія диференц- іації	Можливість використання системи на готових тролейбусах	Реалізація найменшої кількості розрахунків

З маркетинговою програмою стартапу можна ознайомитися з даних у табл.. 7.18-7.22.

Таблиця 7.18 –Формування основних переваг які має потенційний товар

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1.	Дізнатися яке обладнання забезпечує потрібні параметри для тролейбусів	Правильний вибір обладнання установки що гарантує зменшення активних втрат за рахунок роботи в номінальному режимі	Систему можна використовувати на вже готових продуктах

Таблиця 7.19 – Описання трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Суть та складові товару</i>		
I. Виконання товару за ідеєю	Метод отримання точних статичних та динамічних характеристик електромеханічної системи автоматизації тролейбусу з автономним ходом		
II. Реальне виконання товару	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Врахування профілю дороги при проектуванні системи 2. Розрахунок батареї для тривалого автономного ходу 3. Енергоефективний алгоритм керування двигуном 4. Реалізація спеціальних функцій (анти-букс, анти-відкат, круїз-контроль).	-	-
	Маркування присутнє		
	Запропонований проект. Електромеханічна система автоматизації тролейбусу з автономним ходом.		
III. Товар або послуга яка надається з продуктом	Безкоштовне встановлення моделюючої програми		
	Постійне надання кваліфікованих спеціалістів для налагодження системи		
Як товар буде захищено від копіювання: ключ доступу для кожного окремого продукту та запатентування методики.			

Таблиця 7.20 – Визначення границь встановлення ціни

<i>№ п/п</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники</i>	<i>Рівень цін на товари- аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня границі встановлення ціни на товар або послугу</i>
1.	Вищий рівень	Однаковий	Вище середнього	Нижня – 150000 Верхня – 200000

Таблиця 7.21 – Формування системи збуту

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1.	Надання доступу до системи з її подальшим налаштуванням.	Торгівля	0 – напряму, 1 – через одного посередника	Власний канал збуту та залучений

Таблиця 7.22 – Концепція маркетингового комунікування

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій , якими користуют ься цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонуванн я</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1.	Зменшенн я величини втрат	Website для продажу товару, месенджери та номер телефону компанії	Зручність використання продукту і підвищення енергетичної ефективності	Порівняти метод моделювання з рішеннями які наявні на ринку(зрівнян ня з конкурентом)	Використанн я реклами на сайтах

Висновок до розділу 7

Був реалізований стартап проект по впровадженню на ринок для продажу, електромеханічної системи автоматизації тролейбусу з автономним ходом. На основі ринкової стратегії проекту можна сказати що основною цільовою групою даної системи є перевізники з громадським транспортом.

При аналізі результатів даного розділу можна зробити висновок що вихід на ринок можливий при умові знаходження фінансів на рекламну компанію для реклами бренду. Система є корисною для покупців, оскільки вона збільшує ефективність вибору обладнання для тролейбусу, що тягне за собою збільшення енергетичної ефективності системи. Основною перешкодою для виходу на ринок є конкуренція з відомими компаніями.

ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації поставлені задачі, мета і роботи по її досягненню виконані в повному обсязі.

В ході виконання роботи набули подальшого розвитку системи тягового призначення:

1. Кут профілю дороги впливає на момент і потужність тягового двигуна, а отже необхідно враховувати його при виборі двигуна.
2. Розроблено систему захисту для обмеження струму акумуляторної батареї для контролю струму на виході.
3. Реалізовано систему анти-відкат для безпечного фіксування положення тролейбуса в режимі зупинки.
4. Реалізовано систему круїз-контролю для зручності водія, який повинен підтримувати мінімальний момент для подолання аеродинамічного опору, опору тертя кочення, сили тяжіння і тд.
5. Досліджено та порівняно дві системи векторного керування, традиційну з постійним потокощепленням та з максимізацією співвідношення момент струм. Обрано більш економічну систему МТРА, яка забезпечує економію енергії до 5-7% в умовах низького моменту.

На основі магістерської роботи було виконано наступні пункти роботи:

- Проведений аналітичний огляд конструкцій тролейбусів та електричних акумуляторів.
- Було сформовано вимоги які висуваються до тролейбусів та акумуляторів.
- Були розраховані параметри двигуна та батарей.
- По розрахованим значенням було обрано двигун та тягову батарею.
- Було виконано розрахунок параметрів двигуна, а саме активного опору статора, індуктивності статора, приведенного активного опору ротора,

приведеної індуктивності ротора, необхідних для проведення моделювання в Matlab.

- Було розроблено модель тролейбуса з використанням блоків бібліотеки Simulink в середовищі Matlab. Така модель дозволяє дослідити поведінку двигуна тролейбуса в різних умовах, а саме в умовах руху та зупинок.

- Було досліджено вплив профілю дороги на вибір двигуна по потужності та еквівалентному моменті.

- Було розроблено систему антивідкат.

- Було досліджено та порівняно 2 системи векторного керування та обраний більш енергоефективний метод керування приводним двигуном.

Можна зробити висновок, що робота виконана в повній мірі, та всі вимоги та завдання виконані. Розроблена електромеханічна система тролейбуса з автономним ходом має ряд переваг, технологічну новизну, рентабельність та енергоефективні переваги відносно інших варіантів на ринку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електронний ресурс. Режим доступу: 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. Електронний ресурс. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Інс-титут_електродинаміки_НАН_України
4. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://ied.org.ua/pro-instytut/>
5. Устройство троллейбуса: Учебное пособие по специальности: водитель троллейбусов; під редакцією М.Ю. Зайцева, А.И. Штамлер. С.22
6. Тихоненко Б.Г. Перспективи впровадження асинхронного приводу з векторним управлінням
7. Силові перетворювачі електроприводів: Методичні вказівки до домашньої контрольної 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.
8. 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.
9. Филькин Н.М., Шаихов Р.Ф., Буянов И.П. Теория транспортных и транспортно-технологических машин: Учеб. по-сobie. – Пермь: ФГБОУ ВО Пермская ГСХА, 2016. – 230 с.
10. Основы автоматизированного электропривода / М. Г.Чиликин, М. М. Соколов, В. М. Терехов, А. В. Шинянский. – М.: «Энергия», 1974. – 568 с.
11. 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>.

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

13. 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.

14. Anderson B.D.O., Luenberger D.C. Design of multivariable feedback systems // Proc. IEEE. – 1967. – Vol. 3. – №114. – P. 395-399.

15. Ackermann J. Abtast Regelung. – Berlin: Springer, 1972, pp. 391.

16. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.

17. Bozhko S., Dymko S., Kovbasa S. and Peresada S. "MTA control for traction IM drives: Theory and experimental results," 2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), Aachen, 2015, pp. 1-6.

18. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием/ Учебник для ВУЗов. М.: – ACADEMIA, 2006. – 272 с.

19. Taylor D. G. Nonlinear control of electric machines: An overview // IEEE Control Systems Magazine. –Dec. 1994. –P. 41–51.

20. Пересада С. М. Векторное управление в асинхронном электроприводе: аналитический обзор // Сб. науч. тр. Донецкого государственного технического университета. –1999. –№ 4. –С. 1–23.

21. Krstic M., Kanellakopoulos I. and Kokotovic P. Nonlinear and Adaptive Control Design. –New York: Wiley, 1995. –576p.

22. Khalil H. K. Nonlinear Systems (2nd edition). –New Jersey, Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. –735p.
23. Routh, W.J. Rugh. Linear system theory // Prentice Hall, 1993, pp. 356.
24. А. Э. Кравчик. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э.Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504с
25. Luenberger D.C. An Introductions to Observers // Proc. IEEE Transformation on Automatic Control. – 1971. – December – P. 596-602.
26. Толочко О.І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Донецьк.: Норд-Прес, 2004. – 298 с.
27. Rosenbrock H.H. Distinctive problems of process control // Chem. Eng. Progress. – 1962. – №58. –P. 43-50.
28. Galvan E., Carrasco J. M., Ortega R., Escobar G. and Stankovic A. M. A family of switching control strategies based on error prediction of torque ripple on the direct torque and flux control for induction motors // IEEE Trans. on Control Systems Technology. –2003. –Vol.11, No.6. –P. 933–939.
29. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями /Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.
30. Utkin V. and Yan Z. Sliding Mode Observers for :Electric Machines - An Overview // IEEE. 2002. –P. 1843–1849.
31. Chekireb H., Tadjine M. and Djema M. On a Class of Manifolds for Sliding Mode Control and Observation of Induction Motor // IEEE Nonlinear Dynamics and Systems Theory, 2008 –P 21–34.
32. Bouchaib A., Rachid A., Audrezet E.and Tadjine M. Real-Time Sliding-Mode Observer and Control of an Induction Motor, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 46, NO. 1, FEBRUARY 1999.
33. Mezouar A., Fellah M.K., Hadjeri S. - Adaptive SMO for IM using two-time-scale approach // Electric Power Systems Research. 2007. -P 604–618

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

35. Benchaib A., Edwards C. Nonlinear sliding mode control of an induction motor // INTERNATIONAL JOURNAL OF ADAPTIVE CONTROL AND SIGNAL PROCESSING Int. J. Adapt. Control Signal Process. 2000; -P 201-221

36. Lin S.K., Fang C.H., SLIDING-MODE LINEARIZATION TORQUE CONTROL OF AN INDUCTION MOTOR // Asian Journal of Control, Vol. 6, No. 3, pp. 376-387, September 2004

37. Пересада С. М., Ковбаса С. Н. Обобщенный алгоритм прямого векторного управления асинхронным двигателем // Техн. електродинаміка. – 2002. –№ 4. –С. 17–22.

38. Пересада С. М., Ковбаса С. Н. Прямое векторное управление асинхронным двигателем со свойством глобальной экспоненциальной устойчивости // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". –2002. –Ч. 2. –С. 36–42.

39. Bozhko S., Dymko S., Kovbasa S. and Peresada S. M. "Maximum Torque-per-Amp Control for Traction IM Drives: Theory and Experimental Results," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 1, pp. 181-193, Jan.-Feb. 2017.