

Міністерство освіти і науки України
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації,
робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова

**Кафедра автоматизації технологічних, електромеханічних і
робототехнічних систем**



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

**на тему «УДОСКОНАЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
БАГАТОМОТОРНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА МІСЬКОГО ТРАМВАЯ
З КООРДИНАЦІЄЮ РЕЖИМІВ ТЯГИ ТА РЕКУПЕРАЦІЇ»**

Здобувач СВО «Бакалавр»: Ткачук Сергій Миколайович
Студент групи АЕМзт-31

Керівник: Москалюк Андрій Юрійович,
к.т.н., доцент

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 16.06.2026 р., протокол № 8.

в.о. завідувача кафедри АТЕіРС
(назва кафедри) _____ (підпис)

Олексій Жигайло
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут: *Комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім.*

П.М.Платонова

Кафедра: *Електромеханіки та мехатроніки*

Рівень ВО: *перший*

Ступень ВО: *бакалавр*

Галузь знань: *14 – Електрична інженерія*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

Освітня програма: *Екоенергетика та інтелектуальна електромеханіка*

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри ЕтаМ

Осадчук П.І.

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

здобувача СВО «Бакалавр» АЕМзт – 31 Ткачук Сергій Миколайович

1. Тема роботи: «Удосконалення енергетичної ефективності багатомоторного електропривода міського трамвая з координацією режимів тяги та рекуперації»

Керівник роботи: Москалюк Андрій Юрійович, к.т.н., доцент.

Затверджено наказом ОНТУ № 641-03 від 21.11.2025 р.

2. Строк подання студентом роботи: 15.06.2026 р.

3. Вхідні дані до проекту: міський трамвай з багатомоторним асинхронним електроприводом: кількість тягових двигунів — 4; номінальна потужність одного двигуна — 132 кВт; напруга живлення — 380 В; частота струму — 50 Гц; номінальна швидкість обертання — 1465 об/хв; максимальна швидкість руху трамвая — 70 км/год; маса завантаженого вагона — 58 460 кг.

4. Зміст розрахунково-конструкторської частини пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз багатомоторного електропривода міського трамвая; розгляд режимів тяги, електричного та рекуперативного гальмування; визначення потужності та вибір тягових асинхронних двигунів; розрахунок основних параметрів електропривода і Т-подібної схеми заміщення двигуна; розробка математичної моделі тягового електропривода; моделювання режимів розгону, усталеного руху та гальмування в середовищі MATLAB/Simulink; порівняння енергетичних показників; обґрунтування координації режимів тяги та рекуперації; техніко-економічне обґрунтування проекту; охорона праці.

5. Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації: 1.Титульний слайд, 2.Актуальність теми, об'єкт дослідження, мета і завдання роботи, 3.Загальна характеристика міського трамвая як об'єкта електропривода, 4.Структура багатомоторного електропривода трамвая, 5.Режими тяги, електричного та рекуперативного гальмування, 6.Визначення потужності та вибір тягового асинхронного двигуна, 7.Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна, 8.Математична модель тягового асинхронного двигуна, 9.Моделювання режимів розгону, усталеного руху та гальмування в MATLAB/Simulink, 10.Порівняння енергетичних показників електричного та рекуперативного гальмування, 11.Техніко-економічне обґрунтування. 12.Охорона праці. 13. Висновки.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Москалюк А.Ю., доц.		
Економічна частина	Москалюк А.Ю., доц.		

7. Дата видачі завдання: 21.12.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ
ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим
1	1. Загальна характеристика роботи. Вибір об'єкта дослідження. Аналіз міського трамвая як об'єкта електропривода. Розгляд структури та його особливостей. Формулювання мети і завдання.	05.03.2026	
2	2. Розгляд основних елементів тягового електропривода та аналіз режимів роботи. Розгляд процесів пуску, розгону та усталеного руху. Дослідження електричного і рекуперативного гальмування.	10.04.2026	
3	3. Розрахунок параметрів багатомоторного електропривода. Визначення необхідної потужності та вибір тягового асинхронного двигуна. Оцінювання параметрів електричного гальмування.	10.05.2026	
4	4. Моделювання режимів роботи електропривода. Розробка математичної моделі та побудова механічних та електричних характеристик в середовищі MATLAB/Simulink.	25.05.2026	
5	5. Порівняння енергетичних показників та координація режимів роботи. Аналіз результатів моделювання. Розробка рекомендацій щодо координації режимів тяги, рекуперації та резервного реостатного гальмування.	05.06.2026	
6	6. Частина з охорони праці. Загальна характеристика робочого місця інженера-електрика трамвайного депо. Аналіз умов праці, небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Розгляд заходів електробезпеки та пожежної безпеки.	13.06.2026	
7	7. Економічна частина. Обґрунтування економічної доцільності запропонованих рішень. Розрахунок вартості розробки. Оцінка економічного ефекту від використання рекуперативного гальмування.	15.06.2026	
7	Перевірка роботи на доброчинність. Рецензування роботи	19.06.2026	
8	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра.	23.06.2026	

Здобувач: Ткачук С.М. _____

Керівник: Москалюк А.Ю. _____

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ. Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник _____ Ткачук С.М.

АНОТАЦІЯ

Ткачук С.М. «Удосконалення енергетичної ефективності багатомоторного електропривода міського трамвая з координацією режимів тяги та рекуперації». Кваліфікаційна робота бакалавра. – Одеса: ОНТУ, 2026. – 106 с. Бібліогр.: 21 найм. Слайдів презентаційної частини – 16.

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання підвищення енергетичної ефективності багатомоторного електропривода міського трамвая. Основна увага приділена координації режимів тяги та рекуперативного гальмування тягових асинхронних двигунів. Такий підхід дозволяє узгоджувати роботу двигунів і силових перетворювачів залежно від швидкості руху, навантаження та можливості контактної мережі приймати повернену електричну енергію.

Результати роботи можуть бути використані під час удосконалення систем керування електроприводами міського електротранспорту, зменшення втрат електроенергії та теплового навантаження на гальмівні резистори.

Ключові слова: міський трамвай, багатомоторний електропривод, тяговий асинхронний двигун, частотне керування, рекуперативне гальмування, MATLAB/Simulink.

ABSTRACT

Tkachuk S. M. “Improvement of the Energy Efficiency of a Multi-Motor Electric Drive of an Urban Tram with Coordination of Traction and Regenerative Braking Modes”. Bachelor’s Qualification Work. – Odesa: ONTU, 2026. – 106 p. Bibliography: 21 items. Presentation slides – 14.

The qualification work considers the problem of improving the energy efficiency of a multi-motor electric drive of an urban tram. The main focus is on the coordination of traction and regenerative braking modes of traction induction motors. This approach makes it possible to coordinate the operation of electric motors and power converters depending on the tram speed, load, and the ability of the contact network to receive returned electrical energy.

The results of the work can be used to improve control systems for electric drives of urban electric transport, reduce electrical energy losses, and decrease the thermal load on braking resistors.

Keywords: urban tram, multi-motor electric drive, traction induction motor, frequency control, regenerative braking, MATLAB/Simulink.

3MICT

	стр.
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА В МІСЬКИХ ТРАМВАЯХ	9
1.1 Загальна характеристика міського трамвая як об'єкта електропривода	9
1.2 Структура та особливості багатомоторного електропривода трамвая	12
1.3 Частотне керування тяговими асинхронними двигунами	14
1.4 Режими тяги та рекуперативного гальмування	17
1.5 Постановка задачі дипломної роботи	34
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАГАТОМОТОРНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАМВАЯ	21
2.1 Основні елементи тягового електропривода	21
2.2 Пуск, розгін та усталений рух трамвая	27
2.3 Електричне та рекуперативне гальмування	32
2.4 Координація режимів тяги та рекуперації	38
2.5 Висновки до розділу	44
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ БАГАТОМОТОРНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАМВАЯ	45
3.1 Визначення потужності та вибір тягового асинхронного двигуна	45
3.2 Розрахункові дані для моделювання електромеханічних процесів	50
3.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна	53
3.4 Оцінювання параметрів електричного гальмування	57
	68

					КРБ.АТЕіРС.141.641-03.6.3						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення енергетичної ефективності багатомоторного електропривода міського трамвая з координацією режимів тяги			Літ	Аркуш	Аркушів	
Розробив		Ткачук В.В.									
Керівни		Москалюк А.Ю							5	99	
								ОНТУ, АЕМзт - 31			
Консульт.											
Зав.кафедри		Жигайло О.М.									

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ	63
БАГАТОМОТОРНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАМВАЯ	
4.1 Розробка математичної моделі тягового асинхронного двигуна	63
4.2 Моделювання механічних характеристик двигуна при зміні частоти живлення	
4.3 Моделювання розгону та усталеного руху трамвая.	71
4.4 Моделювання електричного гальмування без рекуперації	73
4.4 Висновки до розділу	77
РОЗДІЛ 5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА “ОХОРОНА ПРАЦІ”	79
5.1 Загальна характеристика робочого місця	79
5.2 Загальний стан охорони праці	81
5.3 Аналіз умов праці на робочому місці інженера-електрика трамвайного депо	82
5.4 Індивідуальне завдання. Розрахунок інтегральної бальної оцінки важкості праці	83
5.5 Заходи з охорони праці.	85
РОЗДІЛ 6. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	89
6.1 Обґрунтування економічної доцільності	89
6.2 Розрахунок вартості розробки	90
6.3 Оцінка економічного ефекту	91
6.4 Супутній прибуток.	92
6.5 Висновки до розділу 6	84
ВИСНОВКИ	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	98

ВСТУП

Міський трамвай є важливим видом електричного транспорту, робота якого супроводжується частими пусками, розгонами, зупинками та змінами навантаження. У таких умовах підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода має істотне практичне значення.

Одним із перспективних напрямів удосконалення є використання багатомоторного частотно-керованого електропривода з тяговими асинхронними двигунами. Така система дозволяє плавно регулювати швидкість руху, обмежувати пускові струми, рівномірно розподіляти навантаження між двигунами та реалізовувати електричне гальмування.

Особливу увагу необхідно приділяти рекуперативному гальмуванню. У цьому режимі тягові двигуни переходять у генераторний режим, а частина кінетичної енергії трамвая повертається до контактної мережі. Якщо мережа не може прийняти всю енергію, надлишкова потужність спрямовується до гальмівних резисторів.

Метою дипломної роботи є підвищення енергетичної ефективності багатомоторного електропривода міського трамвая шляхом координації режимів тяги та рекуперації.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати структуру та режими роботи багатомоторного електропривода, визначити параметри тягових асинхронних двигунів, виконати розрахунок схеми заміщення, розробити математичну модель і провести моделювання процесів розгону, усталеного руху та гальмування в середовищі MATLAB/Simulink.

Об'єктом дослідження є багатомоторний електропривод міського трамвая.

Предметом дослідження є електромеханічні та енергетичні процеси в режимах тяги й рекуперативного гальмування.

Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні координованого керування, за якого рекуперативне гальмування використовується як основний режим, а реостатне — як резервний. Це дозволяє зменшити втрати електроенергії та теплове навантаження на гальмівні резистори.

						Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА В МІСЬКИХ ТРАМВАЯХ

1.1 Загальна характеристика міського трамвая як об'єкта електропривода

Міський трамвай є рейковим транспортним засобом, призначеним для перевезення пасажирів у межах міської транспортної мережі. На відміну від індивідуального автомобільного транспорту, трамвай рухається за заданим маршрутом, має визначені зупинки та живиться від зовнішньої контактної мережі. Це зумовлює специфічні вимоги до тягового електропривода, який повинен працювати в умовах частих пусків, змін швидкості, короткочасних перевантажень і повторних гальмувань.

Рух трамвайного вагона має циклічний характер. Після відправлення від зупинки електропривод забезпечує розгін до заданої швидкості. Далі можливий рух із приблизно сталою швидкістю або вибіг, під час якого тяговий момент зменшується. Перед наступною зупинкою виконується гальмування. Аналогічні цикли багаторазово повторюються протягом усього маршруту. У реальних умовах до них додаються зниження швидкості перед перехрестями, проходження криволінійних ділянок колії, рух на підйомах і спусках, а також зміни пасажирського навантаження.

Таким чином, тяговий електропривод трамвая працює переважно в повторно-короткочасному режимі. Тривалість окремих інтервалів роботи залежить від довжини перегонів між зупинками, дорожньої ситуації, профілю маршруту та графіка руху. На відміну від промислових механізмів зі стабільним навантаженням, трамвайний електропривод повинен швидко змінювати електромагнітний момент і забезпечувати стійку роботу в широкому діапазоні швидкостей.

Основною функцією тягового електропривода є створення сили тяги, необхідної для подолання сил опору руху та забезпечення заданого прискорення вагона. До основних складових опору належать опір коченню

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коліс по рейках, механічні втрати у передавальних елементах, аеродинамічний опір, додатковий опір під час руху на підйомі та опір під час проходження кривих ділянок колії. Величина необхідного тягового зусилля також залежить від маси вагона, кількості пасажирів і заданого прискорення.

Для міського трамвая важливим є забезпечення плавності зміни швидкості. Надмірно різкий розгін або гальмування погіршують комфорт пасажирів і створюють додаткові механічні навантаження на елементи привода, редуктори, колісні пари та ходову частину. Тому система керування повинна не лише забезпечувати потрібну швидкість руху, а й обмежувати темп зміни тягового та гальмівного моментів.

Живлення трамвая здійснюється від контактної мережі постійного струму. Проте сучасні тягові асинхронні двигуни не підключаються до неї безпосередньо. Між контактною мережею і двигунами встановлюються силові перетворювачі, які формують трифазну напругу змінної частоти та регульованої амплітуди. Завдяки цьому забезпечується керування швидкістю обертання і моментом асинхронних двигунів відповідно до заданого режиму руху.

У сучасних трамвайних вагонах зазвичай використовується багатомоторна структура електропривода. Декілька тягових двигунів розташовуються на ведучих осях або візках вагона. Механічне навантаження між ними розподіляється відповідно до конструкції ходової частини та алгоритмів керування перетворювачами. Застосування декількох двигунів дає змогу зменшити навантаження на окрему машину, підвищити надійність електропривода та гнучкіше формувати сумарний тяговий момент.

Важливою особливістю трамвайного електропривода є можливість використання електричного гальмування. У цьому режимі тяговий двигун створює момент, спрямований проти руху вагона. Якщо асинхронний двигун переходить у генераторний режим, частина кінетичної енергії вагона може перетворюватися на електричну. Отримана енергія або повертається до

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контактної мережі, або розсіюється у гальмівних резисторах, якщо передавання енергії до мережі неможливе.

Рекуперативне гальмування має особливе значення для міського транспорту, оскільки трамвай багаторазово гальмує на маршруті. За відсутності рекуперації кінетична енергія вагона переважно перетворюється на теплоту й втрачається. Повернення хоча б частини цієї енергії дає змогу зменшити загальне споживання електроенергії. Водночас ефективність рекуперації залежить від режиму роботи контактної мережі, рівня напруги в ланці постійного струму, можливості приймання енергії іншими споживачами та узгодженої роботи тягових перетворювачів. Основні особливості міського трамвая як об'єкта електропривода наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Особливості міського трамвая як об'єкта електропривода

Особливість	Вплив на роботу електропривода
Часті зупинки на маршруті	Необхідність багаторазових пусків і гальмувань
Змінне пасажирське навантаження	Зміна необхідного тягового моменту та струму двигунів
Наявність підйомів, спусків і кривих ділянок колії	Зміна сил опору руху
Живлення від контактної мережі	Використання тягових інверторів для живлення асинхронних двигунів
Багатомоторна структура привода	Необхідність узгодженого керування тяговими двигунами
Підвищені вимоги до комфорту пасажирів	Обмеження прискорення та темпу зміни моменту
Можливість електричного гальмування	Використання генераторного режиму двигунів
Повторюваність циклів руху	Доцільність застосування рекуперації енергії

Отже, міський трамвай є складним електромеханічним об'єктом із циклічним режимом роботи, змінним навантаженням і підвищеними вимогами до плавності руху. Застосування частотно-регульованого багатомоторного електропривода дає змогу забезпечити керований розгін, стабілізацію швидкості, електричне гальмування та часткове повернення енергії до контактної мережі. Подальший аналіз доцільно спрямувати на розгляд

структури такого електропривода та особливостей взаємодії його основних елементів.

1.2 Структура та особливості багатомоторного електропривода трамвая

Тяговий електропривод міського трамвая призначений для перетворення електричної енергії контактної мережі на механічну енергію руху вагона. У сучасних трамваях для цього застосовують декілька тягових електродвигунів, які працюють спільно та передають крутний момент до ведучих колісних пар. Багатомоторна структура дає змогу розподілити необхідне тягове зусилля між декількома двигунами. Завдяки цьому зменшується навантаження на окремий двигун, підвищується надійність електропривода та забезпечується більш плавний рух вагона. Такий підхід особливо важливий для міського трамвая, який працює в умовах частих пусків, розгонів і гальмувань.

У межах дипломної роботи розглядається електропривод із чотирма тяговими асинхронними двигунами. Двигуни встановлюються на ведучих осях трамвая та працюють узгоджено. Передавання крутного моменту від кожного двигуна до колісної пари здійснюється через механічну передачу і редуктор.

Живлення трамвая здійснюється від контактної мережі постійного струму. Для роботи асинхронних двигунів необхідна трифазна напруга змінного струму. Її формують тягові інвертори, які входять до складу частотних перетворювачів. Зміна частоти та амплітуди вихідної напруги дає змогу керувати швидкістю обертання і моментом двигунів відповідно до режиму руху трамвая.

До складу електропривода також входить ланка постійного струму. Вона забезпечує зв'язок між контактною мережею та тяговими інверторами, згладжує пульсації напруги та бере участь у передаванні енергії під час гальмування. Узагальнену структуру багатомоторного електропривода наведено на рисунку 1.1.

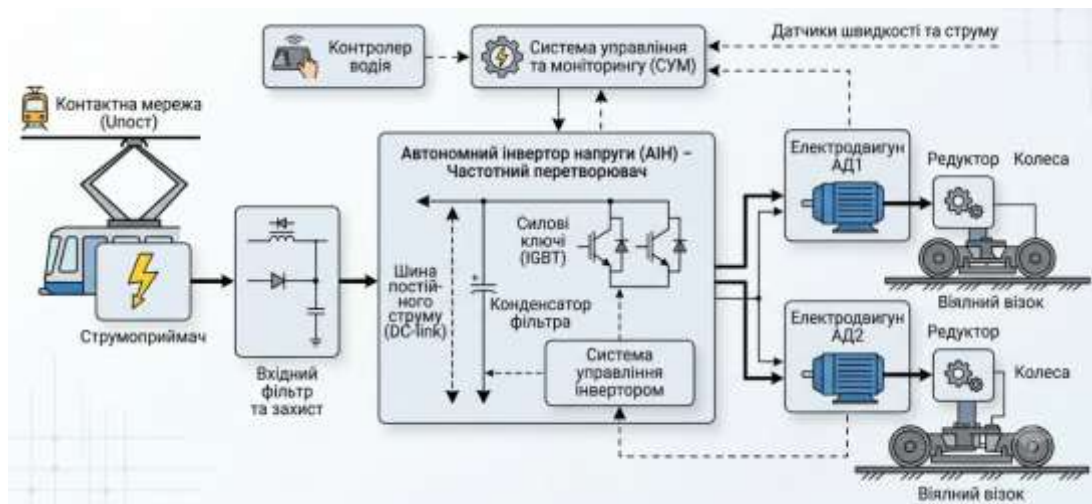


Рис. 1.1 – Узагальнена структура багатомоторного частотно-регульованого електропривода трамвая

У режимі тяги енергія надходить від контактної мережі через ланку постійного струму до інверторів, а потім — до тягових асинхронних двигунів. Двигуни створюють крутний момент, необхідний для розгону або підтримання заданої швидкості руху.

Під час електричного гальмування тягові двигуни можуть переходити в генераторний режим. У цьому випадку частина кінетичної енергії вагона перетворюється на електричну та повертається до ланки постійного струму. Якщо контактна мережа здатна прийняти цю енергію, реалізується рекупераційне гальмування. Якщо повернення енергії обмежене, її надлишок розсіюється за допомогою гальмівного резистора.

Особливістю багатомоторного електропривода є необхідність узгодженої роботи всіх тягових двигунів. Під час розгону навантаження має розподілятися між двигунами без перевантаження окремих приводних каналів. Під час гальмування необхідно забезпечити одночасний перехід двигунів у генераторний режим і контролювати напругу в ланці постійного струму.

Отже, багатомоторний частотно-регульований електропривод дає змогу забезпечити необхідні тягові характеристики трамвая, плавне регулювання швидкості та можливість використання енергії рекупераційного гальмування.

Подальший розгляд доцільно спрямувати на принципи частотного керування тяговими асинхронними двигунами.

1.3 Частотне керування тяговими асинхронними двигунами

Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором є одним із найбільш придатних типів електричних машин для сучасного тягового електропривода. Він має відносно просту конструкцію, високу механічну міцність, достатню переважувальну здатність і не потребує обслуговування колекторно-щіткового вузла. Це особливо важливо для міського трамвая, який працює в умовах частих пусків, змін швидкості та повторних гальмувань.

Швидкість обертання асинхронного двигуна залежить від частоти напруги живлення. Тому для керування тяговим двигуном застосовують перетворювач частоти, який формує трифазну напругу з регульованими частотою та амплітудою. За рахунок цього забезпечується плавна зміна швидкості обертання двигуна та формування необхідного тягового моменту.

У трамвайному електроприводі перетворювач частоти працює від ланки постійного струму. Напруга контактної мережі надходить до проміжної ланки, після чого тяговий інвертор перетворює її на трифазну змінну напругу. Параметри цієї напруги змінюються відповідно до заданого режиму руху вагона.

У режимі пуску частота напруги живлення збільшується поступово. Завдяки цьому тяговий двигун розганяється плавно, без різких кидків струму та моменту. Такий режим позитивно впливає на механічні елементи привода, редуктори, колісні пари та комфорт пасажирів.

Під час розгону трамвая система керування підвищує частоту напруги, підтримуючи необхідний момент двигуна. Після досягнення заданої швидкості електропривод переходить до режиму усталеного руху. У цьому випадку момент двигуна зменшується до рівня, необхідного для подолання сил опору руху.

За необхідності зниження швидкості система керування змінює режим роботи інвертора. Тяговий асинхронний двигун може перейти до генераторного режиму, у якому механічна енергія руху вагона перетворюється на електричну. Отримана енергія надходить до ланки постійного струму та за сприятливих умов може бути повернута до контактної мережі.

Таким чином, частотний перетворювач забезпечує не лише регулювання швидкості, а й керування напрямом енергетичного потоку. У режимі тяги енергія передається від контактної мережі до двигуна. У режимі рекуперативного гальмування напрям передавання енергії змінюється.

Основні функції перетворювача частоти в тяговому електроприводі трамвая наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Основні функції перетворювача частоти в тяговому електроприводі трамвая

Функція	Практичне значення
Плавний пуск двигуна	Зменшення струмових і механічних перевантажень
Регулювання швидкості	Забезпечення необхідного режиму руху трамвая
Керування тяговим моментом	Плавний розгін і підтримання заданої швидкості
Обмеження струму	Захист двигуна та силових елементів інвертора
Електричне гальмування	Зменшення швидкості без надмірного використання механічних гальм
Перехід до генераторного режиму	Створення умов для рекуперації енергії
Узгоджене керування двигунами	Рівномірний розподіл навантаження у багатомоторному приводі

Існують різні способи частотного керування асинхронними двигунами. Найпростішим є скалярне керування, при якому напруга і частота змінюються за заданим законом. Такий підхід має відносно просту реалізацію та може використовуватися для аналізу усталених режимів роботи двигуна.

Для тягових електроприводів також застосовують векторне керування. У цьому випадку система керування роздільно впливає на складові струму, пов'язані з формуванням магнітного потоку та електромагнітного моменту. Це дає змогу точніше керувати двигуном під час розгону, зміни навантаження та

гальмування. Порівняння основних способів частотного керування наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняння способів частотного керування тяговим асинхронним двигуном

Спосіб керування	Основні переваги	Особливості застосування
Скалярне керування	Простота реалізації, наочність характеристик	Доцільне для аналізу впливу частоти на швидкість і момент
Векторне керування	Вища точність регулювання, швидка реакція на зміну навантаження	Застосовується у сучасних тягових приводах
Керування з обмеженням струму	Захист двигуна та інвертора від перевантажень	Використовується під час пуску, розгону та гальмування

У межах цієї дипломної роботи основна увага приділяється дослідженню впливу частоти напруги живлення на характеристики тягового асинхронного двигуна. Для цього у подальших розділах буде використано розрахункову схему заміщення двигуна та виконано моделювання його роботи при різних значеннях частоти.

Для багатомоторного електропривода важливим є узгоджене керування всіма тяговими двигунами. У нормальному режимі двигуни повинні працювати з близькими значеннями моменту та струму. Це дає змогу рівномірно розподілити навантаження між ведучими осями та уникнути перевантаження окремих приводних каналів.

Під час рекуперативного гальмування частотні перетворювачі повинні забезпечувати одночасний перехід тягових двигунів у генераторний режим. При цьому система керування контролює рівень напруги в ланці постійного струму та визначає можливість повернення енергії до контактної мережі. Отже, частотне керування є основою сучасного тягового електропривода трамвая. Воно забезпечує плавний пуск, регулювання швидкості, обмеження струмових перевантажень та реалізацію рекуперативного гальмування. Подальший розгляд доцільно спрямувати на аналіз режимів тяги, вибігу та повернення енергії під час гальмування.

1.4 Режими тяги та рекуперативного гальмування

Робота тягового електропривода міського трамвая характеризується частою зміною режимів. Під час руху між зупинками послідовно чергуються пуск, розгін, усталений рух, вибіг і гальмування. Такий характер навантаження визначає вимоги до тягових двигунів і системи частотного керування.

У режимі тяги електрична енергія надходить від контактної мережі до ланки постійного струму, а далі через тягові інвертори — до асинхронних двигунів. Двигуни створюють крутний момент, який через редуктори передається до колісних пар. Під час пуску та розгону система керування поступово змінює частоту й амплітуду напруги живлення, забезпечуючи плавне збільшення швидкості та обмеження струмових навантажень.

Після досягнення заданої швидкості електропривод переходить до режиму усталеного руху. У цьому випадку тяговий момент зменшується до значення, необхідного для подолання сил опору руху. Навантаження двигунів залежить від маси вагона, профілю маршруту, швидкості та умов руху.

На окремих ділянках маршруту може використовуватися вибіг. У цьому режимі тяговий момент практично не створюється, а трамвай продовжує рухатися за рахунок накопиченої кінетичної енергії. Використання вибігу дає змогу зменшити споживання електроенергії та уникнути зайвого гальмування. Перед зупинкою або під час зниження швидкості тягові двигуни можуть переходити в режим електричного гальмування. У цьому випадку вони створюють момент, спрямований проти руху вагона. Частина кінетичної енергії трамвая перетворюється на електричну енергію.

Якщо контактна мережа здатна прийняти отриману енергію, реалізується рекуперативне гальмування. Енергія повертається через тягові інвертори та ланку постійного струму до контактної мережі й може бути використана іншими споживачами. Для міського трамвая цей режим має важливе значення, оскільки рух супроводжується великою кількістю повторних гальмувань.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Можливість рекуперації залежить від стану контактної мережі. Якщо в момент гальмування відсутні споживачі, які можуть прийняти повернену енергію, напруга в ланці постійного струму може підвищуватися. У такому випадку надлишкова енергія повинна розсіюватися у гальмівному резисторі. Це дає змогу зберегти керованість електропривода та уникнути перевищення допустимої напруги. Основні режими роботи тягового електропривода наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Основні режими роботи тягового електропривода трамвая

Режим роботи	Характеристика режиму	Напрямок передавання енергії
Пуск і розгін	Поступове збільшення швидкості та тягового моменту	Від контактної мережі до двигунів
Усталений рух	Підтримання заданої швидкості	Від контактної мережі до двигунів
Вибіг	Рух без активного тягового моменту	Передавання енергії практично відсутнє
Рекуперативне гальмування	Перехід двигунів у генераторний режим	Від двигунів до контактної мережі
Реостатне гальмування	Розсіювання надлишкової енергії у резисторі	Від двигунів до гальмівного резистора
Механічне гальмування	Зупинка вагона або резервне гальмування	Перетворення енергії на теплоту у гальмівних механізмах

У багатомоторному електроприводі важливо забезпечити узгоджену роботу всіх тягових двигунів. Під час розгону навантаження повинно розподілятися між двигунами рівномірно. Під час рекуперативного гальмування необхідно забезпечити одночасний перехід двигунів у генераторний режим і контролювати напругу в ланці постійного струму.

Координація режимів тяги та рекуперації полягає у виборі найбільш доцільного режиму роботи електропривода залежно від поточної швидкості, необхідного моменту, струмів двигунів і стану контактної мережі. У спрощеному вигляді система керування повинна забезпечувати три основні умови:

- під час розгону — рівномірний розподіл тягового навантаження між двигунами;

- під час гальмування — максимально можливе використання рекуперації;
- за неможливості повернення енергії до мережі — автоматичне підключення гальмівного резистора.

Таким чином, поєднання режимів тяги, вибігу та рекуперативного гальмування дає змогу підвищити енергетичну ефективність трамвайного електропривода. Частотно-регульована система керування забезпечує плавну зміну режимів і створює умови для раціонального використання енергії під час руху міського трамвая.

1.5 Постановка задачі дипломної роботи

Проведений аналіз показав, що застосування частотно-регульованого багатомоторного електропривода є перспективним напрямом підвищення енергетичної ефективності міського трамвая. Використання тягових асинхронних двигунів і напівпровідникових перетворювачів дає змогу плавно регулювати швидкість руху, обмежувати струмові та механічні навантаження, а також реалізовувати електричне гальмування.

Для міського трамвая особливе значення має повторюваність циклів розгону та гальмування на маршруті. Під час зниження швидкості частина кінетичної енергії вагона може бути перетворена на електричну енергію та повернена до контактної мережі. Тому підвищення ефективності електропривода доцільно пов'язувати не лише з використанням частотного керування, а й із раціональним застосуванням режиму рекуперативного гальмування.

Метою дипломної роботи є удосконалення енергетичної ефективності багатомоторного електропривода міського трамвая шляхом використання частотного керування тяговими асинхронними двигунами та координації режимів тяги й рекуперації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. розглянути структуру багатомоторного електропривода міського трамвая та визначити особливості його роботи;
2. проаналізувати принципи частотного керування тяговими асинхронними двигунами;
3. визначити тягове зусилля та необхідну потужність електропривода трамвая;
4. виконати вибір тягового асинхронного двигуна та визначити його основні параметри;
5. розрахувати параметри Т-подібної схеми заміщення двигуна для подальшого моделювання;
6. дослідити механічні характеристики асинхронного двигуна при зміні частоти напруги живлення;
7. виконати моделювання режимів розгону, усталеного руху та електричного гальмування;
8. порівняти енергетичні показники електропривода при роботі без рекуперації та з використанням рекуперативного гальмування;
9. запропонувати принцип координації режимів тяги та рекуперації у багатомоторному електроприводі трамвая.

Для спрощення розрахунків і моделювання один тяговий двигун розглядається як базовий приводний канал. Отримані результати враховуються для всього багатомоторного електропривода з урахуванням кількості однакових тягових двигунів.

Таким чином, подальші розділи дипломної роботи спрямовані на розрахунок параметрів тягового електропривода, побудову його математичної моделі та оцінювання можливостей підвищення енергетичної ефективності за рахунок узгодженого використання режимів тяги й рекуперативного гальмування.

2 АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАГАТОМОТОРНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАМВАЯ

2.1 Основні елементи тягового електропривода

Тяговий електропривод міського трамвая є складною електромеханічною системою, призначеною для перетворення електричної енергії контактної мережі в механічну енергію руху вагона. Його робота повинна забезпечувати пуск трамвая, регулювання швидкості, підтримання заданого режиму руху, подолання опору коченню та ухилів колії, а також ефективне гальмування під час наближення до зупинок і на ділянках маршруту з обмеженням швидкості.

На відміну від електроприводів промислових механізмів, тяговий електропривод працює в умовах постійної зміни навантаження. У межах одного рейсу багаторазово чергуються режими пуску, інтенсивного розгону, руху зі сталою або змінною швидкістю, вибігу та гальмування. Характер навантаження залежить від кількості пасажирів, профілю колії, дорожньої ситуації, частоти зупинок, обмежень швидкості та дій водія або автоматизованої системи керування.

Особливістю сучасного трамвая є застосування багатомоторного тягового електропривода. У такій системі тягове зусилля створюється декількома електродвигунами, які механічно пов'язані з окремими колісними парами або візками. Розподіл потужності між кількома двигунами дозволяє зменшити навантаження на кожну окрему машину, забезпечити рівномірніше передавання крутного моменту на колеса та покращити зчеплення коліс із рейками.

Багатомоторна структура є особливо важливою під час пуску та розгону трамвая. У цей період електропривод повинен створювати значний тяговий момент, не допускаючи надмірного буксування окремих колісних пар і перевантаження двигунів. Під час гальмування багатомоторний електропривод виконує зворотну функцію: тягові двигуни переходять у

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

генераторний режим і перетворюють частину кінетичної енергії трамвая в електричну.

Основні елементи тягового електропривода можна умовно поділити на кілька груп:

- джерело електричної енергії та пристрої її підведення;
- силові перетворювальні пристрої;
- тягові електродвигуни;
- механічні передачі та колісні пари;
- засоби керування, контролю і захисту;
- елементи системи електричного та рекуперативного гальмування.

Електрична енергія надходить до трамвая від контактної мережі через струмоприймач. Як правило, міський електричний транспорт живиться від мережі постійного струму. Конкретний рівень напруги залежить від прийнятих параметрів міської транспортної системи. Струмоприймач забезпечує електричний контакт із проводом мережі та передає енергію до вхідного силового кола вагона.

До складу вхідного кола входять комутаційні та захисні апарати. Їх призначення полягає в підключенні тягового обладнання до контактної мережі, відключенні системи в аварійних ситуаціях, обмеженні небезпечних перенапруг і захисті силових елементів від перевантажень та коротких замикань. Надійність цих апаратів має важливе значення, оскільки тяговий електропривод працює в умовах значних струмових навантажень і частих змін режиму.

Після вхідного кола електрична енергія надходить до проміжного кола постійного струму. У його складі можуть використовуватися фільтрувальні реактори, конденсатори та інші елементи, які згладжують пульсації напруги, зменшують вплив завад і формують стабільніші умови для роботи силового

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

перетворювача. Проміжне коло виконує функцію сполучної ланки між контактною мережею та інвертором.

Ключовим елементом сучасного тягового електропривода є силовий перетворювач. Для керування асинхронними тяговими двигунами застосовують автономний інвертор напруги, який перетворює постійну напругу контактної мережі на змінну напругу регульованої частоти та амплітуди. За рахунок цього можна змінювати швидкість обертання двигунів, їхній електромагнітний момент і споживану потужність відповідно до поточного режиму руху трамвая.

У системах частотного керування силовий перетворювач формує напругу живлення двигунів на основі сигналів системи керування. Під час пуску і розгону частота та амплітуда напруги поступово збільшуються. Це дає змогу забезпечити плавне наростання тягового моменту та обмежити струмові перевантаження. Під час зниження швидкості або гальмування алгоритм керування змінюється, а двигуни можуть переходити в генераторний режим. Кількість силових перетворювачів і способів підключення двигунів залежать від конструкції конкретного трамвая. Один інвертор може живити групу двигунів або окремий двигун. Групове живлення має простішу структуру, проте індивідуальне керування створює кращі можливості для точного розподілу навантаження між колісними парами. Це особливо важливо в умовах нерівномірного зчеплення коліс із рейками.

Тягові асинхронні двигуни перетворюють електричну енергію на механічну. Їх використання в міському електротранспорті пов'язане з відносно простою конструкцією, відсутністю колекторно-щіткового вузла, придатністю до частотного регулювання та можливістю роботи в генераторному режимі. Для тягового застосування важливими є також здатність двигуна витримувати повторно-короткочасні перевантаження, часті пуски і гальмування, вібраційні впливи та зміну температурних умов.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Механічна енергія від валів тягових двигунів через редуктори передається до колісних пар. Редуктор узгоджує частоту обертання двигуна зі швидкістю обертання коліс і забезпечує потрібний рівень крутного моменту на рушійних осях. Якість передавання моменту впливає на плавність руху, втрати енергії та зношування механічних вузлів.

Колісні пари створюють тягове зусилля за рахунок взаємодії коліс із рейками. Для ефективної роботи багатомоторного привода необхідно підтримувати раціональний розподіл моментів між двигунами. Якщо одна з колісних пар має гірші умови зчеплення, надмірне збільшення її тягового моменту може спричинити буксування. У такому разі частина підведеної енергії використовується неефективно, а динамічні навантаження на механічну частину зростають.

Для контролю режимів роботи в тяговому електроприводі застосовується система давачів. Вона отримує інформацію про струми двигунів, напругу в проміжному колі, швидкість обертання валів або колісних пар, температурний стан силових елементів і тягових двигунів. За необхідності додатково враховуються сигнали, пов'язані з буксуванням або ковзанням коліс.

На основі інформації від давачів система керування формує керувальні імпульси для силових ключів інверторів. Її завданням є підтримання заданого тягового або гальмівного моменту, обмеження струмів, захист обладнання від перевантажень, координація роботи декількох двигунів і забезпечення плавного переходу між режимами руху.

З погляду енергетичної ефективності важливо, щоб система керування не лише забезпечувала потрібну швидкість трамвая, а й вибирала раціональний режим роботи силового обладнання. Під час розгону необхідно уникати невиправдано високих струмів і різкого наростання моменту. Під час усталеного руху слід мінімізувати втрати в двигунах і перетворювачах. Під час

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гальмування доцільно максимально використовувати можливість повернення енергії до контактної мережі.

У режимі рекуперативного гальмування тягові двигуни працюють як генератори. Механічна енергія рухомого вагона перетворюється на електричну, після чого через інвертор і проміжне коло постійного струму може передаватися назад до контактної мережі. Відповідно, напрям потоку енергії змінюється на протилежний порівняно з режимом тяги.

Ефективність рекуперації залежить не лише від характеристик двигунів і перетворювачів, а й від стану контактної мережі. Повернення енергії можливе за умови, що в мережі є споживач, здатний прийняти її в цей момент, або передбачено інші засоби використання чи накопичення енергії. Якщо передавання енергії до мережі неможливе, застосовується електричне гальмування з розсіюванням енергії на гальмівних резисторах.

Отже, система електричного гальмування повинна забезпечувати керований перехід між рекуперативним і реостатним режимами. Пріоритетним є режим рекуперації, оскільки він дозволяє зменшити загальне споживання електроенергії. Реостатне гальмування виконує резервну функцію та забезпечує необхідну інтенсивність уповільнення, коли контактна мережа не може прийняти вироблену енергію. Загальну структуру тягового електропривода міського трамвая наведено на рисунку 2.1.

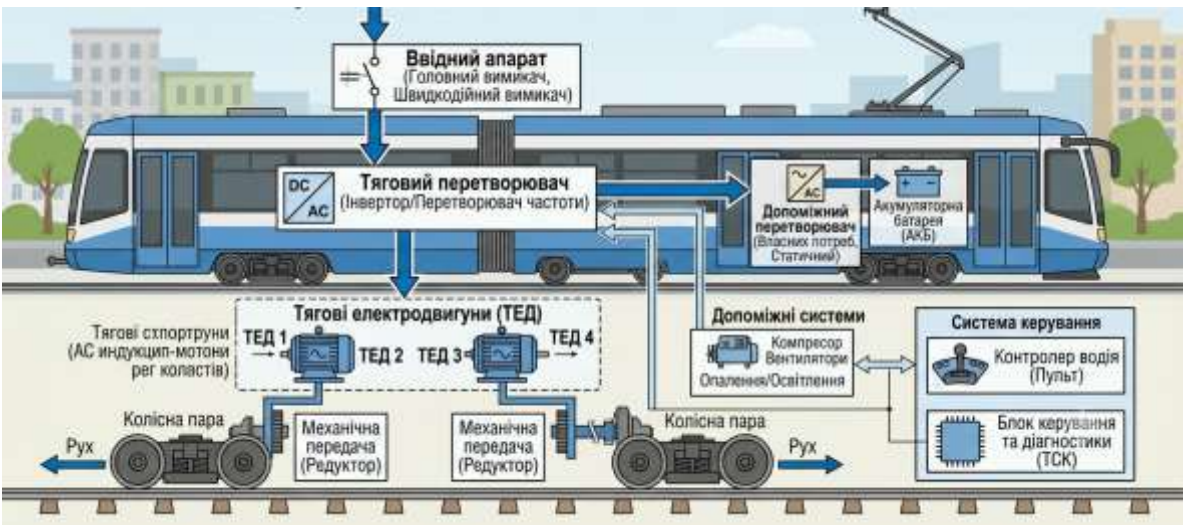


Рис. 2.1 Структура електропривода міського трамва

У режимі тяги потік енергії спрямований від контактної мережі до колісних пар. Після перетворення в інверторі електрична енергія надходить до тягових двигунів, де перетворюється на механічну. У режимі рекуперативного гальмування процес відбувається у зворотному напрямку: колісні пари обертають двигуни, які працюють у генераторному режимі, а отримана електрична енергія повертається до мережі. Основні елементи тягового електропривода та їх функціональне призначення наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні елементи тягового електропривода міського трамвая

Елемент системи	Основне призначення	Значення для енергетичної ефективності
Контактна мережа	Подача електричної енергії до трамвая та приймання енергії в режимі рекуперації	Визначає можливість повернення енергії під час гальмування
Струмоприймач	Передавання електричної енергії між контактним проводом і силовим колом вагона	Якість контакту впливає на стабільність живлення та втрати
Апарати комутації і захисту	Підключення обладнання, аварійне відключення, захист від перевантажень	Запобігають пошкодженню обладнання та втратам у нештатних режимах
Проміжне коло постійного струму	Стабілізація параметрів живлення, фільтрація та передавання енергії	Забезпечує узгоджену роботу мережі та тягового перетворювача
Автономний інвертор напруги	Формування змінної напруги регульованої частоти та амплітуди	Дає змогу керувати швидкістю, моментом і гальмівним режимом двигунів

Елемент системи	Основне призначення	Значення для енергетичної ефективності
Тягові асинхронні двигуни	Перетворення електричної енергії на механічну в режимі тяги та механічної енергії на електричну під час гальмування	Безпосередньо визначають тягові та енергетичні характеристики привода
Редуктори	Передавання і перетворення крутного моменту від двигунів до колісних пар	Впливають на механічні втрати та ефективність використання потужності
Колісні пари	Створення тягового або гальмівного зусилля у взаємодії з рейками	Визначають умови реалізації моменту без буксування і ковзання
Давачі	Вимірювання струмів, напруг, швидкостей, температур та інших параметрів	Забезпечують інформацію для точного та економічного керування
Система керування	Координація режимів двигунів та формування сигналів для перетворювачів	Мінімізує втрати, обмежує перевантаження та підвищує ефективність рекуперації
Гальмівний резистор	Розсіювання енергії, яку неможливо повернути до контактної мережі	Забезпечує надійне гальмування, але не дозволяє корисно використати енергію
Механічна гальмівна система	Додаткове уповільнення та повна зупинка трамвая	Забезпечує безпеку руху та доповнює електричне гальмування

Багатомоторний тяговий електропривод має низку переваг порівняно з системою, у якій використовується один потужний двигун. Розподіл моменту між окремими двигунами дозволяє гнучкіше керувати тяговими зусиллями, зменшити локальні перевантаження, покращити динамічні характеристики та забезпечити стійкішу роботу під час зміни умов зчеплення.

Водночас багатомоторна система вимагає координації. Якщо двигуни створюють неоднакові тягові моменти без урахування фактичного навантаження на колісні пари, можуть виникати нерівномірний знос коліс, додаткові втрати енергії та погіршення плавності руху. У режимі гальмування неузгоджена робота окремих двигунів може також зменшити кількість енергії, доступної для рекуперації.

Таким чином, тяговий електропривод міського трамвая слід розглядати не як сукупність окремих електродвигунів, а як єдину керовану систему. Її ефективність залежить від узгодженої роботи контактної мережі, силових перетворювачів, асинхронних двигунів, механічних передач, колісних пар і системи керування. Для подальшого аналізу необхідно розглянути, як змінюються навантаження і параметри електропривода під час пуску, розгону та усталеного руху трамвая.

2.2 Пуск, розгін та усталений рух трамвая

Робота міського трамвая характеризується частими змінами швидкості та повторенням коротких циклів руху між зупинками. На відміну від транспортних засобів, які протягом тривалого часу рухаються з майже сталою швидкістю, трамвай значну частину рейсу працює в перехідних режимах. До них належать пуск після зупинки, розгін, рух із заданою швидкістю, вибіг і подальше гальмування.

Найбільше навантаження на тяговий електропривод виникає під час пуску та розгону. У цей період двигуни повинні створити достатній крутний момент для подолання сил опору руху та надання трамваю необхідного прискорення. Одночасно система керування повинна обмежувати струми

двигунів, запобігати буксуванню колісних пар і забезпечувати плавне наростання тягового зусилля.

У багатомоторному електроприводі ці процеси мають додаткову особливість: тяговий момент формується не одним двигуном, а сукупністю декількох електричних машин. Тому важливо забезпечити узгоджене навантаження всіх двигунів і рівномірне передавання моменту до колісних пар. Нерівномірність моментів може погіршити плавність розгону, збільшити втрати енергії та спричинити передчасне зношування механічної частини. Загальну послідовність режимів руху трамвая між двома зупинками наведено на рисунку 2.2.

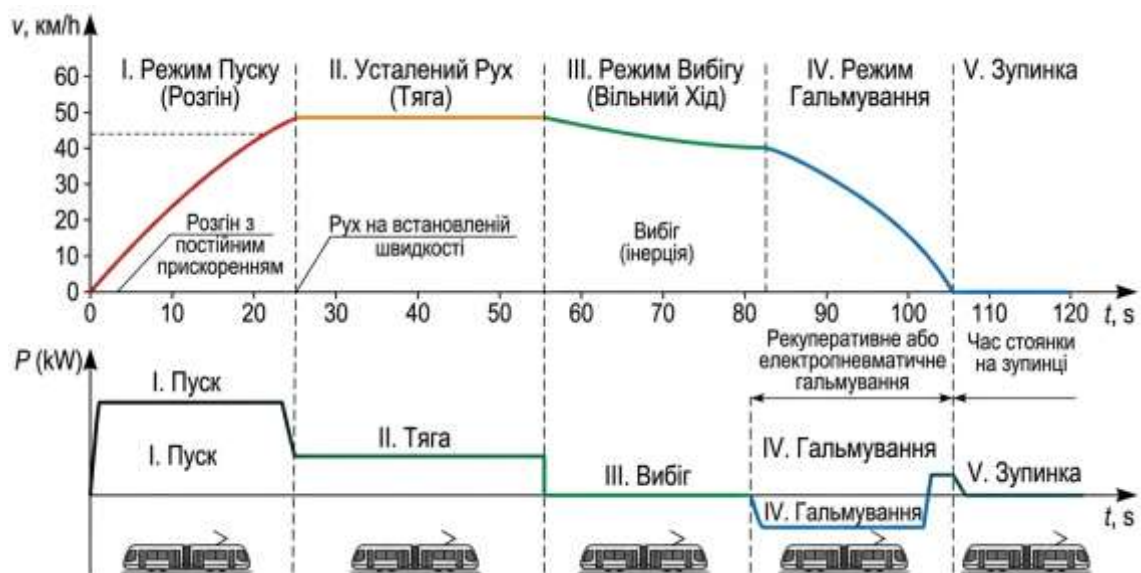


Рис. 2.2 Послідовність режимів руху трамвая

Пуск трамвая. Пуск є початковим і одним із найбільш відповідальних режимів роботи тягового електропривода. У момент початку руху швидкість вагона дорівнює нулю, а тягові двигуни повинні створити момент, достатній для подолання початкового опору руху. До цього опору належать сили тертя в механічних передачах, опір коченню коліс по рейках, вплив ухилу колії та інерційні сили, пов'язані з розгоном маси вагона.

У разі різкого подавання напруги на тягові двигуни можуть виникати значні струмові перевантаження. Такі перевантаження призводять до додаткового нагрівання обмоток, збільшення електричних втрат і підвищення

навантаження на силові елементи інверторів. Для міського трамвая, який протягом рейсу виконує велику кількість повторних пусків, це має суттєве значення з погляду енергетичної ефективності та надійності обладнання.

Застосування частотного керування дозволяє уникнути різкого наростання струму. Під час пуску система керування поступово збільшує частоту та амплітуду напруги живлення асинхронних двигунів. У результаті тяговий момент зростає плавно, без ударних механічних навантажень. Це позитивно впливає на редуктори, колісні пари, підшипникові вузли та інші елементи механічної передачі.

Під час пуску особливо важливим є контроль зчеплення коліс із рейками. Якщо тяговий момент окремої колісної пари перевищує допустиме значення, виникає буксування. У цьому випадку частина енергії витрачається не на розгін трамвая, а на проковзування коліс. Одночасно погіршується керованість і збільшується знос поверхні кочення коліс.

Для запобігання буксуванню система керування повинна аналізувати швидкості окремих двигунів або колісних пар. У разі виявлення надмірної різниці швидкостей тяговий момент відповідного двигуна тимчасово зменшується. Такий підхід дозволяє зберегти зчеплення з рейками та забезпечити раціональний розподіл тягового зусилля.

Розгін супроводжується значним споживанням електричної енергії. Частина цієї енергії перетворюється на кінетичну енергію руху вагона, а частина втрачається в обмотках двигунів, силових напівпровідникових елементах, механічних передачах і контактній мережі. Тому характер розгону безпосередньо впливає на загальні енергетичні показники трамвая.

Надто інтенсивний розгін потребує високого тягового моменту та збільшує струми двигунів. Це призводить до зростання електричних втрат і нагрівання обладнання. Водночас занадто повільний розгін може збільшити тривалість роботи двигунів під навантаженням і погіршити дотримання графіка руху. Оптимальний режим повинен забезпечувати компроміс між

					КРБ. АТЕІРС.141.641-03.6.3	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

динамічними характеристиками, комфортом пасажирів і витратами електроенергії.

Важливим чинником є плавність зміни прискорення. Різкі зміни тягового моменту можуть спричинити ривки, які негативно впливають на комфорт пасажирів і збільшують динамічні навантаження на механічні елементи. Тому система керування повинна формувати керувальні сигнали таким чином, щоб момент тягових двигунів змінювався поступово.

У багатомоторному електроприводі розгін може здійснюватися за групового або індивідуального керування двигунами. За групового керування декілька двигунів отримують однакові керувальні сигнали. Такий підхід має простішу структуру, однак обмежує можливість врахування різниці між окремими колісними парами.

Індивідуальне керування дозволяє коригувати моменти окремих двигунів залежно від їхнього фактичного навантаження, швидкості обертання та умов зчеплення. Це дає можливість точніше розподіляти тягове зусилля, зменшувати ймовірність буксування та покращувати енергетичну ефективність привода.

Для міського трамвая раціональним є розгін із поступовим наростанням тягового моменту на початковій ділянці та його подальшим обмеженням відповідно до швидкості руху. Такий режим забезпечує достатню динаміку без надмірного навантаження на двигуни та силові перетворювачі.

До основних складових опору належать опір коченню коліс, механічні втрати в редукторах, опір у підшипникових вузлах, а також додаткові сили, пов'язані з ухилами та кривими ділянками колії. Під час руху на підйомі потрібний тяговий момент збільшується. На спуску навантаження зменшується, а за певних умов може виникнути потреба в гальмуванні.

У режимі усталеного руху система керування підтримує швидкість на заданому рівні шляхом регулювання частоти та напруги живлення двигунів.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки необхідний тяговий момент у цьому режимі зазвичай менший, ніж під час розгону, зменшуються струми та електричні втрати.

Для підвищення енергетичної ефективності важливо не підтримувати надлишковий момент. Якщо двигуни створюють більше тягове зусилля, ніж необхідно для подолання опору, швидкість буде зростати, після чого система змушена буде переходити до підгальмування. Часте чергування тяги і гальмування призводить до зайвих перетворень енергії та збільшення втрат.

На ділянках, де це допускається графіком руху, доцільно використовувати режим вибігу. У цьому режимі тягові двигуни не створюють активного тягового моменту, а трамвай продовжує рухатися за рахунок накопиченої кінетичної енергії. Використання вибігу дозволяє зменшити споживання електроенергії перед початком гальмування.

Ефективність усталеного руху також залежить від завантаження трамвая. Зі збільшенням кількості пасажирів зростає маса вагона, а отже, підвищуються витрати енергії на розгін і рух на підйомах. Система керування повинна враховувати зміну навантаження та коригувати задані моменти двигунів. Основні особливості пуску, розгону та усталеного руху наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Характеристика основних режимів руху трамвая

Режим руху	Основні процеси	Особливості роботи двигунів	Основні вимоги до системи керування
Пуск	Подолання початкового опору та початок руху вагона	Високий тяговий момент за малої швидкості, можливі значні струмові навантаження	Плавне наростання моменту, обмеження струму, запобігання буксуванню

Режим руху	Основні процеси	Особливості роботи двигунів	Основні вимоги до системи керування
Розгін	Збільшення швидкості трамвая до заданого значення	Робота двигунів у руховому режимі зі змінною частотою живлення	Узгоджене навантаження двигунів, обмеження ривків, раціональне використання енергії
Усталений рух	Підтримання швидкості та подолання сил опору	Зменшення тягового моменту порівняно з розгоном	Підтримання заданої швидкості без надлишкового моменту
Вибіг	Рух за рахунок накопиченої кінетичної енергії	Активний тяговий момент практично відсутній	Вибір доцільного моменту переходу від тяги до вибігу

З аналізу режимів видно, що найбільше споживання електроенергії припадає на пуск і розгін трамвая. Саме в ці періоди система керування повинна забезпечувати раціональний розподіл навантаження між двигунами, обмежувати струми та запобігати буксуванню колісних пар.

Під час усталеного руху основним завданням є підтримання необхідної швидкості з мінімальними втратами. Для цього потрібно уникати необґрунтованого збільшення моменту та за можливості використовувати режим вибігу перед гальмуванням.

Таким чином, пуск, розгін і усталений рух є взаємопов'язаними режимами, від характеру яких залежить загальне споживання електроенергії трамваєм. Подальше підвищення енергетичної ефективності можливе за рахунок правильного вибору моменту переходу від тяги до гальмування та максимального використання енергії, яка може бути повернена під час рекуперації.

2.3 Електричне та рекуперативне гальмування

Гальмування є одним із найбільш важливих режимів роботи тягового електропривода міського трамвая. У процесі руху вагон накопичує кінетичну енергію, величина якої залежить від його маси та швидкості. Під час наближення до зупинки, зниження допустимої швидкості або руху на ділянці зі спуском цю енергію необхідно відвести для забезпечення контрольованого уповільнення.

У традиційних транспортних системах значна частина кінетичної енергії під час гальмування перетворюється на теплову та розсіюється в навколишньому середовищі. З енергетичного погляду такий процес є не вигідним, оскільки електроенергія, попередньо витрачена на розгін трамвая, втрачається без можливості подальшого використання. Для міського електротранспорту ця проблема має особливе значення через велику кількість зупинок і повторюваність циклів «розгін — гальмування» протягом одного рейсу.

Використання тягових електродвигунів не лише в руховому, але й у генераторному режимі дозволяє частково вирішити цю проблему. Під час електричного гальмування двигуни створюють момент, спрямований проти руху трамвая. При цьому механічна енергія обертання колісних пар перетворюється на електричну.

Залежно від подальшого використання отриманої електроенергії розрізняють реостатне та рекуперативне гальмування. В обох випадках тягові

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

двигуни працюють як генератори, однак напрямок передавання енергії та кінцевий результат істотно відрізняються.

Колеса трамвая через редуктори обертають вали тягових двигунів. Унаслідок цього двигуни переходять із рухового режиму в генераторний і виробляють електричну енергію. Одночасно створюється гальмівний момент, який забезпечує зменшення швидкості вагона.

Електричне гальмування має низку переваг порівняно з використанням виключно механічних гальм. Воно дозволяє зменшити зношування гальмівних колодок і дисків, забезпечити плавніше уповільнення та підвищити точність керування швидкістю. Крім того, електричне гальмування знижує теплове навантаження на механічні гальмівні пристрої.

Однак електричне гальмування не може повністю замінити механічне. За малої швидкості ефективність генераторного режиму тягових двигунів зменшується. Тому на завершальному етапі зупинки використовуються механічні гальма. Вони також виконують функцію резервного та стоянкового гальмування.

У практичних системах застосовується комбіноване гальмування. На початковому етапі уповільнення переважно використовується електричне гальмування, а після зниження швидкості до певного рівня до процесу поступово залучаються механічні гальма. Такий підхід забезпечує плавність зупинки та зменшує зношування механічних вузлів.

Реостатне гальмування дозволяє забезпечити необхідний гальмівний момент незалежно від можливості контактної мережі приймати енергію. Це робить його надійним і стабільним режимом, який може використовуватися практично за будь-яких умов експлуатації. Водночас реостатне гальмування не сприяє підвищенню енергетичної ефективності. Енергія руху трамвая не використовується повторно, а безповоротно втрачається у вигляді тепла. Крім того, нагрівання гальмівних резисторів потребує забезпечення відповідних умов охолодження та контролю температури.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

У сучасному тяговому електроприводі реостатне гальмування доцільно розглядати як резервний або допоміжний режим. Воно використовується, якщо передавання енергії до контактної мережі неможливе або якщо величина енергії, що виробляється двигунами, перевищує здатність мережі її прийняти.

Рекуперативне гальмування. Найбільш доцільним з енергетичного погляду є рекуперативне гальмування. У цьому режимі електроенергія, вироблена тяговими двигунами, не розсіюється на резисторах, а повертається до контактної мережі. Надалі вона може бути використана іншим трамваєм, який у цей момент виконує розгін, або передана до системи накопичення енергії, якщо така система передбачена структурою електропостачання.

Під час рекуперативного гальмування змінюється напрямок потоку енергії. У режимі тяги енергія надходить від контактної мережі до колісних пар, а в режимі рекуперації — від колісних пар до контактної мережі. Тягові двигуни та інвертори фактично працюють у зворотному напрямку перетворення енергії. Загальну схему потоків енергії в режимах тяги, реостатного та рекуперативного гальмування наведено на рисунку 2.3.



Рис. 2.3. Загальна схему потоків енергії в режимах тяги, реостатного та рекуперативного гальмування

Рекуперативне гальмування дозволяє зменшити загальне споживання електроенергії трамваєм. Оскільки частина енергії, витраченої на розгін,

повертається до мережі, знижується обсяг енергії, який необхідно отримувати від тягових підстанцій. Це особливо важливо для міських маршрутів із короткими перегонами та великою кількістю зупинок.

Ефективність рекуперації залежить від режиму руху. Чим більшою є швидкість трамвая на початку гальмування та чим більшою є маса вагона з пасажирями, тим більшим є потенційний обсяг енергії, доступної для повернення. Проте фактична кількість рекуперованої енергії завжди менша за накопичену кінетичну енергію через електричні та механічні втрати.

До втрат під час рекуперації належать втрати в обмотках тягових двигунів, втрати в магнітопроводах, втрати в силових ключах інверторів, механічні втрати в редукторах та втрати в контактній мережі. Додатково частина енергії може бути втрачена через обмеження, пов'язані з допустимими струмами та напругою в силовому колі.

По-перше, тяговий перетворювач повинен забезпечувати двонапрямне передавання енергії. Інвертор має не лише формувати регульовану напругу для живлення двигунів, а й передавати енергію від двигунів до проміжного кола постійного струму та далі до мережі.

По-друге, контактна мережа повинна мати можливість прийняти вироблену енергію. Якщо в цей момент на тій самій ділянці мережі інший трамвай виконує розгін, рекуперована енергія може бути використана безпосередньо. Якщо відповідний споживач відсутній, напруга в контактній мережі може підвищуватися, що обмежує можливість подальшого передавання енергії.

По-третє, необхідно контролювати допустимі значення напруги та струму. Надмірне підвищення напруги в проміжному колі або контактній мережі може спричинити аварійний режим. У такому разі система керування повинна обмежити потужність рекуперації або переключити частину потоку енергії на гальмівні резистори.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

По-четверте, гальмівний момент повинен відповідати вимогам безпеки руху. Енергетична ефективність не може бути забезпечена за рахунок погіршення керованості або збільшення гальмівного шляху. Тому система керування повинна підтримувати задане уповільнення незалежно від того, який спосіб відведення енергії використовується в конкретний момент часу.

Особливості гальмування багатомоторного електропривода. У багатомоторному електроприводі гальмівний момент формується декількома тяговими двигунами. Це створює додаткові можливості для підвищення ефективності, але одночасно ускладнює керування.

Під час гальмування необхідно рівномірно розподіляти навантаження між двигунами. Якщо окремих двигун створює надмірний гальмівний момент, може виникнути ковзання колісної пари. У такому разі погіршується зчеплення коліс із рейками, знижується ефективність гальмування та збільшується зношування поверхонь кочення.

У разі виявлення ковзання система керування повинна зменшити гальмівний момент відповідного двигуна та перерозподілити навантаження між іншими двигунами. Такий алгоритм дозволяє зберегти стійкість руху та забезпечити максимально можливе використання електричного гальмування.

Під час рекуперації важливо також узгоджувати сумарну електричну потужність, яку виробляють усі двигуни, з можливостями контактної мережі. Якщо сумарна потужність перевищує допустиме значення, частина енергії повинна бути спрямована на гальмівні резистори. Отже, у загальному випадку доцільним є комбінований режим, у якому рекуперативне та реостатне гальмування використовуються одночасно. Основні особливості різних способів гальмування наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняння способів гальмування міського трамвая

Спосіб гальмування	Принцип дії	Використання енергії	Основні переваги	Основні недоліки
Механічне	Гальмівне зусилля створюється за рахунок тертя в механічних пристроях	Енергія розсіюється у вигляді тепла	Надійність, можливість повної зупинки та стоянкового гальмування	Зношування гальмівних елементів, нагрівання, відсутність енергозбереження
Реостатне електричне	Тягові двигуни працюють як генератори, а енергія спрямовується на резистори	Енергія розсіюється у вигляді тепла	Стабільне гальмування незалежно від стану контактної мережі	Втрата виробленої енергії, нагрівання гальмівних резисторів
Рекуперативне	Тягові двигуни працюють як генератори, а енергія повертається до мережі	Енергія використовується повторно	Зменшення споживання електроенергії, зниження теплових втрат	Залежність від можливості мережі приймати енергію
Комбіноване	Поєднання рекуперативного, реостатного та механічного гальмування	Частина енергії повертається до мережі, надлишок розсіюється	Підвищення енергоефективності зі збереженням надійності гальмування	Ускладнення алгоритмів керування

З аналізу видно, що рекуперативне гальмування є пріоритетним способом зменшення енергоспоживання міського трамвая. Його застосування дозволяє повернути частину енергії до контактної мережі та скоротити навантаження на механічну гальмівну систему.

Водночас повна відмова від інших способів гальмування є недоцільною. Реостатне гальмування необхідне в тих випадках, коли мережа не здатна

прийняти вироблену енергію, а механічне — для завершального етапу зупинки, аварійних режимів і фіксації вагона після зупинки.

Таким чином, найбільш раціональним є комбіноване керування гальмуванням. У такій системі рекуперативний режим має найвищий пріоритет, реостатний використовується для відведення надлишкової енергії, а механічний забезпечує безпечну повну зупинку трамвая. Реалізація цього підходу потребує узгодженого керування тяговими двигунами, силовими перетворювачами та елементами гальмівної системи.

2.4 Координація режимів тяги та рекуперації

Підвищення енергетичної ефективності багатомоторного електропривода міського трамвая неможливо забезпечити лише за рахунок окремого вдосконалення режиму тяги або використання рекуперативного гальмування. Найбільший ефект досягається тоді, коли всі етапи руху розглядаються як взаємопов'язані складові єдиного циклу. Пуск, розгін, усталений рух, вибіг і гальмування повинні узгоджуватися між собою з урахуванням поточного стану електропривода, умов руху та можливості контактної мережі приймати рекуперовану енергію.

Координація режимів тяги та рекуперації полягає у формуванні таких керувальних впливів на тягові двигуни, за яких забезпечуються необхідні динамічні характеристики трамвая з одночасним зменшенням непродуктивних втрат енергії. У режимі тяги система керування повинна обмежувати надмірні струми, уникати необґрунтовано високих прискорень і рівномірно розподіляти навантаження між двигунами. У режимі гальмування пріоритетним завданням є максимальне використання рекуперації за умови дотримання вимог безпеки руху.

Для міського трамвая така координація має особливе значення через часте повторення коротких циклів руху між зупинками. Якщо після інтенсивного розгону майже одразу починається гальмування, значна частина електроенергії витрачається на формування кінетичної енергії, яка потім

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повинна бути відведена. За відсутності ефективної рекуперації ця енергія розсіюється у вигляді тепла. Рациональне керування дозволяє зменшити надлишкове споживання під час розгону, завчасно використовувати вибіг і повернути до мережі максимально можливу частину енергії під час гальмування.

Кожний наступний етап залежить від параметрів попереднього. Наприклад, надто тривалий або інтенсивний розгін призводить до збільшення швидкості на початку гальмування та відповідно до зростання кількості енергії, яку необхідно відвести. Якщо контактна мережа не здатна прийняти весь обсяг виробленої енергії, частина її буде розсіюватися на гальмівних резисторах.

З іншого боку, занадто ранній перехід до вибігу або гальмування може погіршити дотримання графіка руху. Тому система керування повинна забезпечити компроміс між енергетичною ефективністю, середньою швидкістю сполучення, комфортом пасажирів і вимогами безпеки. Рациональна послідовність режимів руху наведена на рисунку 2.4.

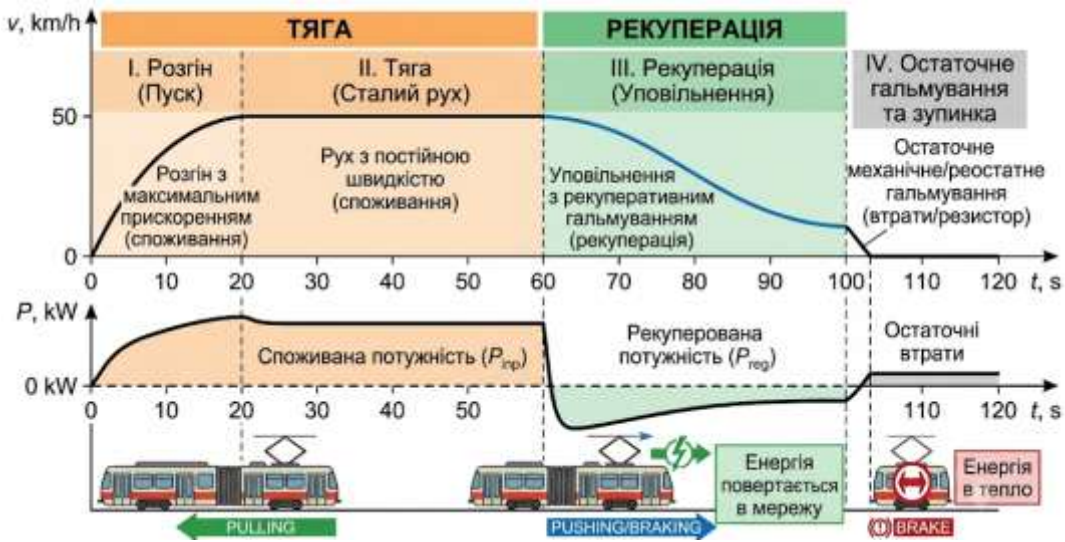


Рис. 2.4 Рациональна послідовність режимів руху

Наведена схема відображає загальний принцип енергоощадного керування. У ній рекуперативне гальмування розглядається як основний режим відведення енергії, а реостатне та механічне гальмування — як додаткові засоби, необхідні для забезпечення надійності та безпеки.

На умови зчеплення впливають вологість рейок, забруднення поверхні кочення, стан колії, нерівномірність завантаження вагона та проходження кривих ділянок маршруту. Якщо момент одного з двигунів перевищує допустиме для відповідної колісної пари значення, може виникнути буксування. У такому разі збільшення електромагнітного моменту не призводить до пропорційного збільшення тягового зусилля, а частина енергії втрачається.

Для зменшення таких втрат система керування повинна контролювати швидкості обертання окремих двигунів або колісних пар. Якщо виявляється надмірна різниця швидкостей, момент відповідного двигуна необхідно зменшити. Одночасно за наявності запасу зчеплення навантаження може бути частково перерозподілено між іншими двигунами.

Узгодження моментів має також обмежувати різкі зміни прискорення. Надмірно швидке наростання тягового моменту викликає ривки, збільшує механічні навантаження на редуктори та погіршує комфорт пасажирів. Плавна зміна керувальних сигналів дозволяє зменшити ці негативні явища.

З енергетичного погляду доцільно уникати максимального тягового режиму, якщо він не є необхідним для виконання графіка руху. Помірне прискорення зменшує струмові навантаження та електричні втрати. Водночас надто повільний розгін також є небажаним, оскільки збільшує тривалість роботи двигунів під навантаженням. Тому керування повинно забезпечувати раціональну траєкторію швидкості.

Використання вибігу перед початком гальмування дозволяє скоротити час роботи електропривода в режимі тяги та зменшити кількість енергії, яку необхідно відводити під час гальмування. Це особливо доцільно на ділянках маршруту з достатньою відстанню до зупинки або перед обмеженням швидкості.

Водночас момент переходу до вибігу повинен визначатися з урахуванням поточної швидкості, відстані до зупинки, профілю колії та

					КРБ. АТЕІРС.141.641-03.6.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

завантаження трамвая. Якщо перехід виконано занадто рано, швидкість може знизитися більше, ніж потрібно, і електропривод доведеться повторно вмикати в режим тяги. Таке чергування режимів зменшує енергетичний ефект.

У системах автоматизованого керування доцільно використовувати прогнозування траєкторії руху. На основі відомої відстані до зупинки та поточних параметрів система може визначити момент завершення тяги, тривалість вибігу та початок рекуперативного гальмування.

Надмірний гальмівний момент окремого двигуна може спричинити ковзання відповідної колісної пари. Це погіршує стійкість руху та зменшує ефективність використання генераторного режиму. Тому система керування повинна контролювати швидкості колісних пар і коригувати моменти двигунів у реальному часі.

Крім того, необхідно узгоджувати сумарну потужність рекуперації з допустимими параметрами електрообладнання. Струми двигунів, струми силових ключів, напруга проміжного кола та напруга контактної мережі не повинні перевищувати допустимі значення. Якщо напруга в мережі зростає вище встановленого рівня, потужність рекуперації необхідно обмежити.

У такому випадку частина гальмівної енергії спрямовується до гальмівних резисторів. Отже, система повинна забезпечувати плавний перехід від повністю рекуперативного до комбінованого режиму без різких змін гальмівного моменту. Для пасажирів цей перехід не повинен супроводжуватися відчутними ривками.

Найсприятливішою є ситуація, коли на тій самій ділянці мережі одночасно перебуває інший трамвай, який виконує пуск або розгін. У такому разі енергія одного вагона може безпосередньо використовуватися іншим. Це зменшує навантаження на тягову підстанцію та втрати під час передавання енергії.

Якщо споживач відсутній, напруга в контактній мережі зростає. За певного рівня напруги подальше передавання енергії стає неможливим або

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

небажаним. Для запобігання перенапрузі система керування повинна зменшити рекуперативну потужність і спрямувати надлишок енергії на гальмівні резистори.

Додатково ефективність рекуперації можна підвищити за рахунок застосування накопичувачів енергії. Накопичувачі можуть розміщуватися на борту трамвая або в системі електропостачання. Вони приймають енергію під час гальмування та віддають її під час наступного розгону. Проте використання таких пристроїв потребує додаткового техніко-економічного обґрунтування.

Для забезпечення енергетично ефективної роботи багатомоторного електропривода доцільно дотримуватися таких принципів:

1. під час пуску забезпечувати плавне наростання моменту та обмеження струмів;
2. розподіляти тяговий і гальмівний моменти між двигунами з урахуванням фактичних умов зчеплення;
3. уникати надмірних прискорень, якщо вони не є необхідними для дотримання графіка руху;
4. використовувати вибіг перед гальмуванням на ділянках, де це допускається умовами руху;
5. надавати пріоритет рекуперативному гальмуванню;

Основні завдання системи керування на різних етапах руху наведено в таблиці 2.4.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 – Завдання координації режимів тяги та рекуперації

Етап руху	Основне завдання керування	Контрольовані параметри	Очікуваний енергетичний результат
Пуск	Плавне створення тягового моменту без перевантаження двигунів	Струми, моменти, швидкості колісних пар	Зменшення пускових втрат і запобігання буксуванню
Розгін	Раціональний розподіл моментів між двигунами	Струми, швидкості, прискорення, умови зчеплення	Зниження втрат без погіршення динаміки
Усталений рух	Підтримання швидкості з мінімально необхідним моментом	Швидкість, тяговий момент, навантаження двигунів	Зменшення споживання електроенергії
Вибіг	Використання накопиченої кінетичної енергії	Швидкість, відстань до зупинки, профіль колії	Скорочення тривалості активної тяги
Рекуперативне гальмування	Максимальне повернення енергії до мережі	Гальмівний момент, струм, напруга проміжного кола та мережі	Зменшення сумарного енергоспоживання
Комбіноване гальмування	Відведення надлишку енергії при обмежених можливостях мережі	Напруга мережі, струм рекуперації, температура резисторів	Підтримання необхідного уповільнення без перенапруг
Завершальна зупинка	Плавне підключення механічних гальм	Швидкість, уповільнення, гальмівне зусилля	Безпечна та комфортна повна зупинка

Координоване керування дозволяє підвищити ефективність використання енергії без суттєвої зміни конструкції основних елементів електропривода. Основний ефект досягається за рахунок раціонального формування тягового моменту, завчасного використання вибігу, максимального застосування рекуперації та зменшення частки енергії, яка розсіюється на резисторах і механічних гальмах.

Для багатомоторного електропривода важливо, щоб алгоритми керування враховували не лише сумарні параметри системи, а й роботу кожного двигуна. Індивідуальний контроль швидкості, моменту та струму

дозволяє своєчасно виявляти буксування або ковзання, перерозподіляти навантаження та підвищувати стабільність руху.

Таким чином, координація режимів тяги та рекуперації є одним із ключових напрямів удосконалення енергетичної ефективності міського трамвая. Вона забезпечує зменшення непродуктивних втрат під час розгону, раціональне використання режиму вибігу та повернення частини кінетичної енергії до контактної мережі під час гальмування. Надалі для кількісного оцінювання ефекту необхідно визначити параметри багатомоторного електропривода та виконати моделювання досліджуваних режимів.

2.5 Висновки до розділу 2. У розділі проаналізовано основні режими роботи багатомоторного тягового електропривода міського трамвая. Встановлено, що найбільші навантаження на двигуни та силові перетворювачі виникають під час пуску, розгону і гальмування.

Розглянуто особливості електричного, реостатного та рекуперативного гальмування. Найбільш ефективним з енергетичного погляду є рекуперативний режим, за якого частина кінетичної енергії трамвая повертається до контактної мережі.

Показано, що підвищення енергетичної ефективності потребує координації роботи всіх тягових двигунів, раціонального використання вибігу та пріоритетного застосування рекуперації. Для подальшого оцінювання цих режимів необхідно визначити параметри багатомоторного електропривода та виконати їх моделювання.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ БАГАТОМОТОРНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАМВАЯ

3.1 Визначення потужності та вибір тягового асинхронного двигуна

Потужність тягового електропривода повинна забезпечувати пуск і розгін завантаженого трамвая із заданим прискоренням. Для розрахунку приймаємо міський багатосекційний трамвай із чотирма тяговими двигунами. Основні вихідні дані наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для визначення потужності тягового електропривода

Параметр	Позначення	Значення
Маса порожнього трамвая	m	35 500 кг
Максимальна кількість пасажирів	n	287 осіб
Розрахункова маса одного пасажирів	m	80 кг
Кількість тягових двигунів	z	4
Розрахункове прискорення	a	1,2 м/с ²
Коефіцієнт урахування обертових частин	l+	1,12
Розрахункова швидкість виходу на основний режим	v_x	17 м/с
ККД карданної передачі	ККДкд	0,95
ККД редуктора	ККДр	0,93
ККД електричної передачі	ККДеп	0,995
Коефіцієнт перевантажувальної здатності двигуна	k	3

Розрахункову схему розподілу потужності між тяговими двигунами наведено на рисунку 3.1.

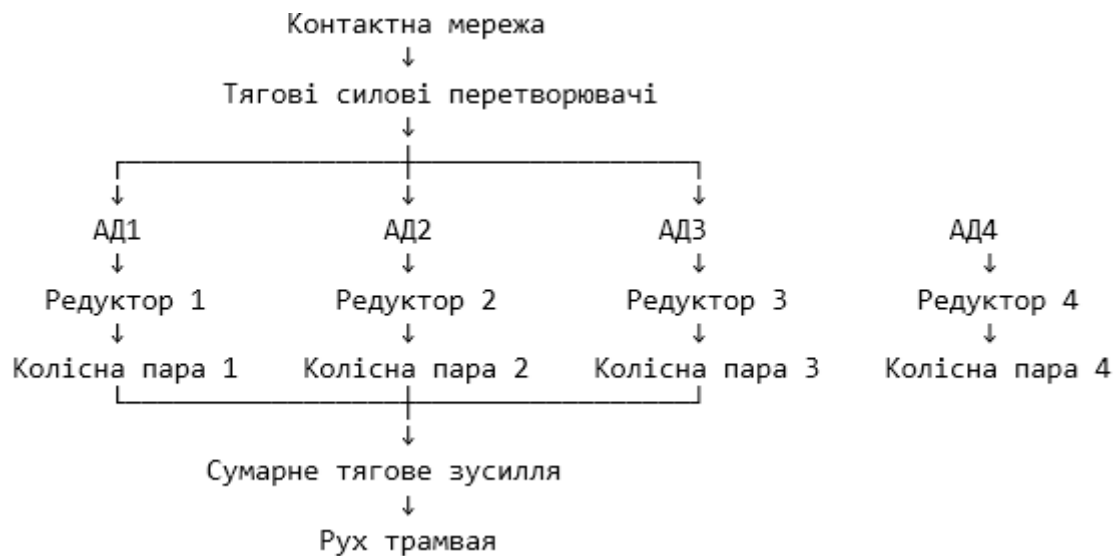


Рис. 3.1 – Розрахункова схема багатомоторного електропривода трамвая

Повна маса завантаженого трамвая визначається як сума маси порожнього вагона та маси пасажирів:

$$m_{\text{зав}} = m_{\text{тр}} + m_{\text{пас}} \cdot n_{\text{пас}} = 35500 + 80 \cdot 287 = 58460 \text{ кг}$$

Під час розгону необхідно враховувати не лише поступальний рух вагона, але й інерцію обертових частин електропривода: роторів двигунів, елементів редукторів, карданних передач і колісних пар. Для цього використовується коефіцієнт (1+ γ).

Сумарне тягове зусилля, необхідне для розгону завантаженого трамвая, визначається за формулою:

$$F_{\Sigma} = (1 + \gamma) m_{\text{зав}} a = 1,12 \cdot 58460 \cdot 1,2 = 78570,24 \text{ Н}$$

У багатомоторному електроприводі сумарне тягове зусилля розподіляється між чотирма двигунами. За умови рівномірного навантаження тягове зусилля, яке припадає на один двигун, становить:

$$F_1 = \frac{F_{\Sigma}}{z} = \frac{78570,24}{4} = 19642,56 \text{ Н}$$

Загальний коефіцієнт корисної дії передачі враховує втрати в карданному шарнірі, редукторі та електричній частині привода:

$$\eta = \eta_k \eta_p \eta_{\text{ел}} = 0,95 \cdot 0,93 \cdot 0,995 = 0,879$$

Попередню пускову потужність одного тягового двигуна визначаємо за тяговим зусиллям, розрахунковою швидкістю виходу на основний режим і загальним ККД передачі

$$P_{\text{пуск.1}} = \frac{F_1 v_x}{\eta} = \frac{19642,56 \cdot 17}{0,879} = 379854,59 \text{ Вт} = 379,85 \text{ кВт}$$

Отримане значення характеризує короткочасне навантаження під час інтенсивного розгону. Номінальна потужність тягового двигуна може бути меншою завдяки його перевантажувальній здатності. Приймаємо коефіцієнт перевантаження ($k=3$).

Розрахункова номінальна потужність одного двигуна становить:

$$P_{\text{розр.1}} = \frac{P_{\text{пуск.1}}}{k_{\text{пер}}} = \frac{379,85}{3} = 126,62 \text{ кВт}$$

За результатами розрахунку вибираємо асинхронний двигун типу 4А280М4У3 з номінальною потужністю ($P=132$) кВт. У межах дипломної роботи цей двигун приймається як розрахунковий аналог тягової асинхронної машини. Його номінальна потужність перевищує розрахункове значення:

$$P_n = 132 \text{ кВт} > P_{\text{розр.1}} = 126,62 \text{ кВт}$$

Сумарна встановлена потужність чотирьох тягових двигунів дорівнює:

$$P_{\Sigma n} = z P_n = 4 \cdot 132 = 528 \text{ кВт}$$

Основні паспортні параметри вибраного двигуна наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні параметри вибраного асинхронного двигуна

Параметр	Позначення	Значення
Тип двигуна	—	4А280М4У3
Номінальна потужність	P	132 кВт
Номінальна лінійна напруга	U	380 В
Кількість пар полюсів	p _n	2
Номінальне ковзання	s	0,023
Активний опір статора	R1	0,0188 Ом
Активний опір ротора	R2	0,0154 Ом
Індуктивність статора	L1	0,0134 Гн
Індуктивність ротора	L2	0,0135 Гн
Індуктивність взаємного зв'язку	L12	0,0131 Гн

Використання чотирьох тягових двигунів дозволяє розподілити навантаження між колісними парами та створює умови для координованого керування моментами. Під час розгону це дає змогу обмежувати струмові перевантаження і зменшувати ризик буксування. Під час гальмування багатомоторна структура забезпечує розподілене формування генераторного моменту та підвищує можливість повернення енергії до контактної мережі.

Отже, для подальших розрахунків і моделювання приймаємо чотири тягові асинхронні двигуни типу 4A280M4У3 номінальною потужністю 132 кВт кожний. Сумарна встановлена потужність багатомоторного електропривода становить 528 кВт.

3.2 Розрахункові дані для моделювання електромеханічних процесів

Для побудови математичної моделі багатомоторного електропривода необхідно визначити механічні та електричні параметри вибраного тягового асинхронного двигуна. До основних розрахункових величин належать кутова частота напруги живлення, синхронна і номінальна швидкості обертання ротора, номінальний момент двигуна, швидкість руху трамвая, приведені моменти інерції, фазні значення напруги і струму, а також момент опору під час руху на підйомі. Послідовність формування даних для моделювання наведено на рисунку 3.2.



Рис. 3.1 – Послідовність визначення параметрів для моделювання електромеханічних процесів

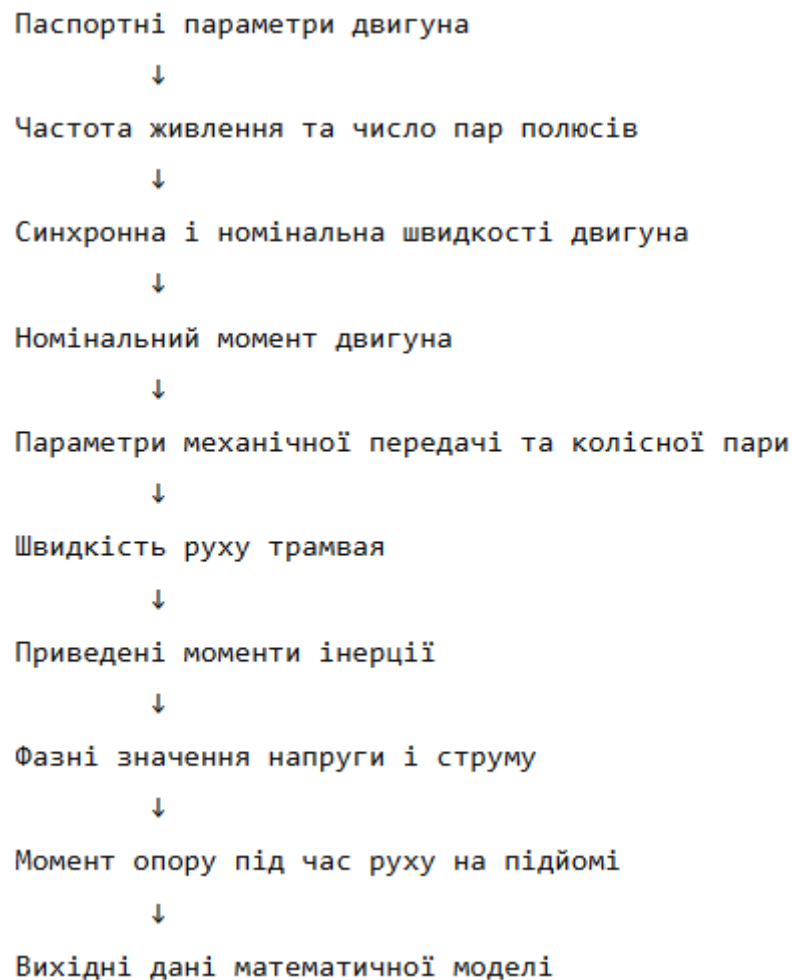


Рис. 3.2 – Алгоритм визначення параметрів для моделювання електромеханічних процесів

Кутову частоту напруги живлення визначається за формулою:

$$\omega_1 = 2\pi f = 2 \cdot 3,1416 \cdot 50 = 314,16 \text{ рад/с}$$

Синхронна кутова швидкість магнітного поля статора залежить від кутової частоти напруги та числа пар полюсів двигуна:

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{p_n} = \frac{314,16}{2} = 157,08 \text{ рад/с}$$

Номінальна кутова швидкість ротора визначається з урахуванням номінального ковзання:

$$\omega_n = \omega_0(1 - s_n) = 157,08(1 - 0,023) = 153,47 \text{ рад/с}$$

Номінальна частота обертання ротора в обертах за секунду становить:

$$n_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{153,47}{2 \cdot 3,1416} = 24,43 \text{ об/с}$$

Номинальна частота обертання ротора в обертах за хвилину визначається як:

$$n_{н.хв} = 60n_n = 60 \cdot 24,43 = 1465,8 \text{ об/хв}$$

Номинальний момент одного тягового двигуна визначається як відношення номінальної потужності до номінальної кутової швидкості:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{132000}{153,47} = 860,12 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для визначення швидкості руху трамвая розраховуємо довжину кола колеса:

$$l_k = \pi D = 3,1416 \cdot 0,70 = 2,20 \text{ м}$$

Швидкість руху трамвая за номінальної частоти обертання двигуна визначається з урахуванням передаточного числа редуктора:

$$v_n = \frac{n_n l_k}{i_p} = \frac{24,43 \cdot 2,20}{7,36} = 7,30 \text{ м/с} = 26,27 \text{ км/год}$$

Отримане значення відповідає номінальному режиму роботи двигуна. Рух трамвая з більшою швидкістю забезпечується роботою електропривода в зоні послаблення магнітного поля. Максимальну швидкість руху трамвая переводимо з кілометрів за годину в метри за секунду:

$$v_{max} = \frac{70}{3,6} = 19,44 \text{ м/с}$$

Радіус колеса становить:

$$r_k = \frac{D}{2} = \frac{0,70}{2} = 0,35 \text{ м}$$

Максимальна кутова швидкість ротора визначається за максимальною швидкістю руху трамвая:

$$\omega_{max} = \frac{v_{max} i_p}{r_k} = \frac{19,44 \cdot 7,36}{0,35} = 408,89 \text{ рад/с}$$

Для моделювання процесів розгону та гальмування поступально рухому масу трамвая необхідно привести до вала одного тягового двигуна. Приведений момент інерції порожнього трамвая визначається як:

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

$$J'_{\text{пор}} = \frac{m_{\text{пор}} v_{\text{н}}^2}{z \omega_{\text{н}}^2} = \frac{35500 \cdot 7,30^2}{4 \cdot 153,47^2} = 20,07 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

де J — *приведений момент інерції порожнього трамвая, що припадає на один двигун, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$* ; $m_{\text{пор}}$ — маса порожнього трамвая, кг; z — кількість тягових двигунів.

Приведений момент інерції завантаженого трамвая визначається аналогічно:

$$J'_{\text{зав}} = \frac{m_{\text{зав}} v_{\text{н}}^2}{z \omega_{\text{н}}^2} = \frac{58460 \cdot 7,30^2}{4 \cdot 153,47^2} = 33,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Для подальшого моделювання приймаємо приведений момент інерції завантаженого трамвая $33,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

За умови з'єднання обмоток статора за схемою «зірка» номінальна фазна напруга визначається як:

$$U_{1\phi} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,39 \text{ В} \approx 220 \text{ В}$$

Номінальний фазний струм статора визначається за номінальною потужністю двигуна:

$$I_{1\phi\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{3 U_{1\phi} \eta_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}} = \frac{132000}{3 \cdot 219,39 \cdot 0,93 \cdot 0,90} = 239,61 \text{ А}$$

Для оцінювання навантаження під час руху на підйомі визначаємо силу опору, зумовлену ухилом колії:

$$F_{\text{yx}} = m_{\text{зав}} g i_{\text{yx}} = 58460 \cdot 9,81 \cdot 0,09 = 51614,33 \text{ Н}$$

Момент опору під час руху на підйомі, приведений до вала одного тягового двигуна, визначається як:

$$M_{\text{yx}} = \frac{F_{\text{yx}} D}{2 z i_{\text{р}}} = \frac{51614,33 \cdot 0,70}{2 \cdot 4 \cdot 7,36} = 613,62 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Отриманий момент опору менший за номінальний момент вибраного тягового двигуна:

$$M_{\text{yx}} = 613,62 \text{ Н} \cdot \text{м} < M_{\text{н}} = 860,12 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Отже, вибраний асинхронний двигун забезпечує рух завантаженого трамвая на розрахунковому підйомі без перевищення номінального моменту. Основні параметри, які надалі використовуються під час побудови математичної моделі, наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахункові параметри електромеханічної моделі

Параметр	Значення
Кутова частота напруги статора	314,16 рад/с
Синхронна кутова швидкість	157,08 рад/с
Номінальна кутова швидкість ротора	153,47 рад/с
Номінальна частота обертання ротора	1465,8 об/хв
Максимальна кутова швидкість ротора	408,89 рад/с
Номінальний момент одного двигуна	860,12 Н·м
Швидкість руху за номінального режиму	26,27 км/год
Максимальна швидкість руху	70 км/год
Приведений момент інерції порожнього трамвая	20,07 кг·м ²
Приведений момент інерції завантаженого трамвая	33,05 кг·м ²
Номінальна фазна напруга статора	219,39 В
Номінальний фазний струм статора	239,61 А
Момент опору під час руху на підйомі	613,62 Н·м

Таким чином, визначено основні електричні та механічні параметри, необхідні для моделювання режимів роботи багатомоторного електропривода міського трамвая. Отримані значення використовуються під час розрахунку параметрів Т-подібної схеми заміщення тягового асинхронного двигуна.

3.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна

Для побудови математичної моделі тягового асинхронного двигуна необхідно визначити параметри його Т-подібної схеми заміщення. Ця схема враховує активні опори обмоток статора і ротора, індуктивні опори розсіювання, а також параметри контуру намагнічування.

На відміну від спрощеної Г-подібної схеми, Т-подібна схема дозволяє окремо врахувати індуктивні опори розсіювання статора і ротора. Це має

істотне значення під час моделювання перехідних процесів, оскільки режими пуску, зміни навантаження та електричного гальмування супроводжуються швидкими змінами струмів, моменту і потокозчеплення.

У розрахунках використовуються параметри однієї фази асинхронного двигуна, приведені до обмотки статора.

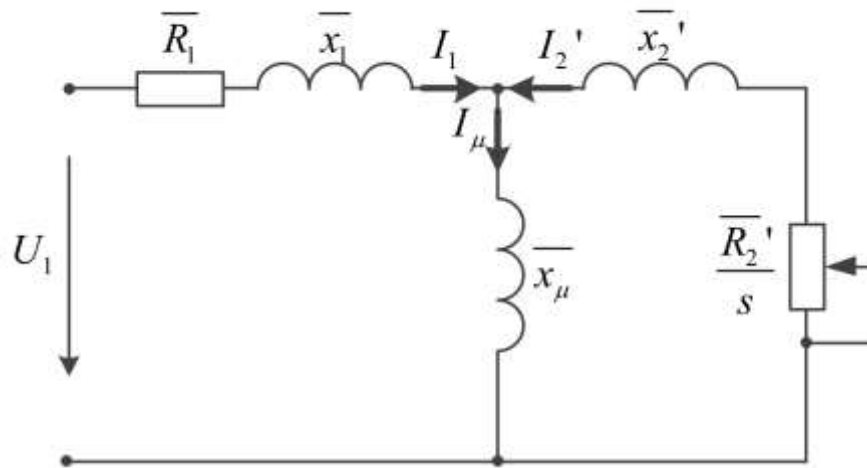


Рис. 3.3 – Т-подібна схема заміщення тягового асинхронного двигуна

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}_1'\bar{x}_\mu}}{2\bar{x}_\mu} = \frac{4,5 + \sqrt{4,5^2 + 4 \cdot 0,115 \cdot 4,5}}{2 \cdot 4,5} = 1,0249$$

Відносне значення активного опору обмотки статора визначається за формулою:

$$\bar{R}_1 = \frac{\bar{R}_1'}{c_1} = \frac{0,021}{1,0249} = 0,0205$$

Відносне значення індуктивного опору розсіювання ротора, приведенного до обмотки статора, визначається як:

$$\bar{x}_2' = \frac{\bar{x}_2''}{c_1^2} = \frac{0,150}{1,0249^2} = 0,1428$$

Відносне значення активного опору ротора, приведенного до обмотки статора, становить:

$$\bar{R}_2' = \frac{\bar{R}_2''}{c_1^2} = \frac{0,018}{1,0249^2} = 0,0171$$

Для переходу від відносних одиниць до абсолютних значень визначаємо базовий опір. У розрахунку використовуємо номінальну фазну напругу статора и номінальний фазний струм

$$(U_{1\phi} = 219,39; \text{В})$$

$$(I_{1\phi\text{н}} = 239,61; \text{А}),$$

$$Z_6 = \frac{U_{1\phi}}{I_{1\phi\text{н}}} = \frac{219,39}{239,61} = 0,9156 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір розсіювання статора в абсолютних одиницях визначається як:

$$x_1 = \bar{x}_1 Z_6 = 0,1122 \cdot 0,9156 = 0,1027 \text{ Ом}$$

Активний опір обмотки статора визначається за формулою:

$$R_1 = \bar{R}_1 Z_6 = 0,0205 \cdot 0,9156 = 0,0188 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір розсіювання ротора, приведений до обмотки статора, становить:

$$x'_2 = \bar{x}'_2 Z_6 = 0,1428 \cdot 0,9156 = 0,1307 \text{ Ом}$$

Активний опір ротора, приведений до обмотки статора, визначається як:

$$R'_2 = \bar{R}'_2 Z_6 = 0,0171 \cdot 0,9156 = 0,0157 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір контуру намагнічування визначається за формулою:

$$x_\mu = \bar{x}_\mu Z_6 = 4,5 \cdot 0,9156 = 4,1203 \text{ Ом}$$

Отримані значення активних та індуктивних опорів використовуються для визначення індуктивностей Т-подібної схеми заміщення.

Індуктивність розсіювання обмотки статора визначається як:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_1} = \frac{0,1027}{314,16} = 0,000327 \text{ Гн}$$

Індуктивність контуру намагнічування визначається за формулою:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_1} = \frac{4,1203}{314,16} = 0,0131 \text{ Гн}$$

Повна індуктивність обмотки статора визначається як сума індуктивності контуру намагнічування та індуктивності розсіювання статора:

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0,0131 + 0,000327 = 0,0134 \text{ Гн}$$

Повна індуктивність ротора, приведена до обмотки статора, визначається як:

$$L'_2 = L_m + L'_{2\sigma} = 0,0131 + 0,000416 = 0,0135 \text{ Гн}$$

Для побудови математичної моделі тягового асинхронного двигуна необхідно також визначити коефіцієнти, які характеризують електромагнітні процеси в машині.

Коефіцієнт електромагнітного загасання роторного контуру визначається як:

$$\alpha = \frac{R'_2}{L'_2} = \frac{0,0157}{0,0135} = 1,163 \text{ с}^{-1}$$

Коефіцієнт електромагнітного загасання статорного контуру визначається за формулою:

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0,0188}{0,0134} = 1,403 \text{ с}^{-1}$$

Еквівалентна індуктивність розсіювання статора визначається як:

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L'_2}\right) L_1 = \left(1 - \frac{0,0131^2}{0,0134 \cdot 0,0135}\right) \cdot 0,0134 = 0,000688 \text{ Гн}$$

Коефіцієнт взаємного електромагнітного зв'язку визначається за формулою:

$$\beta = \frac{L_m}{L'_2 \sigma} = \frac{0,0131}{0,0135 \cdot 0,000688} = 1410,12 \text{ Гн}^{-1}$$

Коефіцієнт загасання електромагнітної підсистеми визначається як:

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta = \frac{0,0188}{0,000688} + 1,163 \cdot 0,0131 \cdot 1410,12 = 48,80 \text{ с}^{-1}$$

Коефіцієнт формування електромагнітного моменту визначається за формулою:

$$\mu_1 = \frac{3 L_m}{2 L'_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,0131}{0,0135} = 1,456$$

Основні параметри Т-подібної схеми заміщення та коефіцієнти математичної моделі тягового асинхронного двигуна зведено в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри Т-подібної схеми заміщення тягового асинхронного двигуна

Параметр	Значення
Активний опір обмотки статора	0,0188 Ом
Активний опір ротора, приведений до статора	0,0157 Ом
Індуктивний опір розсіювання статора	0,1027 Ом
Індуктивний опір розсіювання ротора, приведений до статора	0,1307 Ом
Індуктивний опір контуру намагнічування	4,1203 Ом
Індуктивність розсіювання статора	0,000327 Гн
Індуктивність розсіювання ротора, приведена до статора	0,000416 Гн
Індуктивність контуру намагнічування	0,0131 Гн
Повна індуктивність статора	0,0134 Гн
Повна індуктивність ротора, приведена до статора	0,0135 Гн
Коефіцієнт роторного контуру	1,163 с ⁻¹
Коефіцієнт статорного контуру	1,403 с ⁻¹
Еквівалентна індуктивність розсіювання	0,000688 Гн
Коефіцієнт взаємного електромагнітного зв'язку	1410,12 Гн ⁻¹
Коефіцієнт загасання електромагнітної підсистеми	48,80 с ⁻¹
Коефіцієнт формування електромагнітного моменту	1,456

Отримані параметри використовуються під час розробки математичної моделі тягового асинхронного двигуна в розділі 4. Вони дозволяють описати взаємозв'язок між струмами статора, потокозчепленням ротора, електромагнітним моментом і кутовою швидкістю двигуна в режимах тяги, електричного та рекуперативного гальмування.

3.4 Оцінювання параметрів електричного гальмування

Під час гальмування міського трамвая тягові асинхронні двигуни переходять із двигунного режиму в генераторний. Електромагнітний момент двигунів змінює напрям відносно напрямку обертання колісних пар і забезпечує зменшення швидкості руху вагона.

У режимі електричного гальмування без використання рекуперації механічна енергія рухомого трамвая перетворюється на електричну та розсіюється у гальмівному резисторі у вигляді тепла. У режимі рекуперативного гальмування частина цієї енергії через силовий перетворювач повертається до контактної мережі або передається до накопичувача енергії.

Для оцінювання параметрів гальмування розглядаємо найбільш навантажений режим: зниження швидкості повністю завантаженого трамвая від максимальної швидкості до повної зупинки. Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Вихідні дані для оцінювання параметрів електричного гальмування

Параметр	Значення
Маса завантаженого трамвая	58 460 кг
Коефіцієнт урахування обертових частин	1,12
Максимальна швидкість руху	70 км/год
Розрахункове сповільнення	1,2 м/с ²
Кількість тягових двигунів	4
Діаметр колеса	0,7 м

Параметр	Значення
Передатне число редуктора	7,36
Загальний ККД тягової передачі	0,879
Номінальний момент одного двигуна	860,12 Н·м

Максимальну швидкість руху трамвая переводимо з кілометрів за годину в метри за секунду:

$$v_{max} = \frac{70}{3,6} = 19,44 \text{ м/с}$$

де V_{max} — максимальна швидкість руху трамвая, м/с.

Необхідне сумарне гальмівне зусилля визначається з урахуванням поступального руху вагона та інерції обертових частин електропривода:

$$F_{\Gamma} = (1 + \gamma_{об}) m_{тр} a_{\Gamma} = 1,12 \cdot 58460 \cdot 1,2 = 78570,24 \text{ Н}$$

У багатомоторному електроприводі сумарне гальмівне зусилля розподіляється між чотирма тяговими двигунами. Гальмівне зусилля, яке припадає на один двигун, становить:

$$F_{\Gamma 1} = \frac{F_{\Gamma}}{z} = \frac{78570,24}{4} = 19642,56 \text{ Н}$$

де F_{Γ} — гальмівне зусилля, яке припадає на один тяговий двигун, Н; (z) — кількість тягових двигунів.

Гальмівний момент одного двигуна, приведений до його вала, визначається з урахуванням діаметра колеса та передатного числа редуктора:

$$M_{\Gamma} = \frac{F_{\Gamma} D}{2zK_p} = \frac{78570,24 \cdot 0,7}{2 \cdot 4 \cdot 7,36} = 934,09 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для оцінювання навантаження тягового двигуна визначаємо відношення розрахункового гальмівного моменту до номінального моменту:

$$k_{\Gamma} = \frac{M_{\Gamma}}{M_{н}} = \frac{934,09}{860,12} = 1,086$$

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримане значення показує, що для забезпечення сповільнення тягові двигуни повинні короткочасно створювати гальмівний момент, який перевищує номінальний момент приблизно на 8,6%. Такий режим допустимо розглядати як короткочасне навантаження під час гальмування.

Для визначення сповільнення, яке забезпечується за номінального моменту двигунів, спочатку розраховуємо відповідне гальмівне зусилля:

$$F_{\text{гн}} = \frac{2zK_p M_n}{D} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 7,36 \cdot 860,12}{0,7} = 72348,38 \text{ Н}$$

Сповільнення трамвая за номінального моменту двигунів становить:

$$a_{\text{гн}} = \frac{F_{\text{гн}}}{(1 + \gamma_{\text{об}})m_{\text{тр}}} = \frac{72348,38}{1,12 \cdot 58460} = 1,105 \text{ м/с}^2$$

Таким чином, навіть без використання короткочасного перевантаження електричне гальмування забезпечує сповільнення, близьке до прийнятого розрахункового значення.

Тривалість гальмування від максимальної швидкості до повної зупинки за умови сталого сповільнення визначається як:

$$t_{\text{г}} = \frac{v_{\text{max}}}{a_{\text{г}}} = \frac{19,44}{1,2} = 16,20 \text{ с}$$

Гальмівний шлях за умови рівномірного сповільнення становить:

$$S_{\text{г}} = \frac{v_{\text{max}}^2}{2a_{\text{г}}} = \frac{19,44^2}{2 \cdot 1,2} = 157,54 \text{ м}$$

Енергія, яку необхідно відвести під час повної зупинки трамвая, визначається його кінетичною енергією з урахуванням обертових частин електропривода:

$$E_{\text{к}} = \frac{(1 + \gamma_{\text{об}})m_{\text{тр}}v_{\text{max}}^2}{2} = \frac{1,12 \cdot 58460 \cdot 19,44^2}{2} = 12,38 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Для подальшого порівняння енергетичних показників переведемо отримане значення в кіловат-години:

$$E_{\text{к}} = \frac{12,38 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 10^6} = 3,44 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Максимальна механічна потужність гальмування спостерігається на початку процесу, коли швидкість руху є найбільшою:

$$P_{г.мах} = F_{г} v_{мах} = 78570,24 \cdot 19,44 = 1,528 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

Середня механічна потужність за час повної зупинки визначається як:

$$P_{г.сер} = \frac{E_{к}}{t_{г}} = \frac{12,38 \cdot 10^6}{16,20} = 763,88 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

У режимі електричного гальмування без рекуперації частина кінетичної енергії після перетворення в електричну енергію надходить до гальмівного резистора. З урахуванням загального ККД тягової передачі енергія, яку необхідно розсіяти у вигляді тепла, становить:

$$E_{рез} = \eta E_{к} = 0,879 \cdot 12,38 \cdot 10^6 = 10,88 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Середня теплова потужність, яку повинен сприймати гальмівний резистор протягом одного циклу гальмування, дорівнює:

$$P_{рез.сер} = \frac{E_{рез}}{t_{г}} = \frac{10,88 \cdot 10^6}{16,20} = 671,45 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Максимальна потужність, яка надходить до гальмівного резистора на початку процесу, визначається як:

$$P_{рез.мах} = \eta P_{г.мах} = 0,879 \cdot 1,528 \cdot 10^6 = 1,343 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

Отримані значення характеризують енергетичне навантаження гальмівного резистора протягом одного процесу зупинки. Його тривала допустима потужність повинна уточнюватися з урахуванням реальної періодичності гальмувань, тривалості зупинок, умов охолодження та допустимого короткочасного теплового перевантаження.

У режимі рекуперативного гальмування аналогічна кількість електричної енергії не розсіюється у вигляді тепла, а повертається до контактної мережі або накопичувача. Оціночне значення енергії, доступної для рекуперації протягом одного гальмування, становить:

$$E_{рек} = \eta E_{к} = 0,879 \cdot 12,38 \cdot 10^6 = 10,88 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Середня потужність повернення енергії до контактної мережі протягом одного циклу гальмування становить:

$$P_{\text{рек.сер}} = \frac{E_{\text{рек}}}{t_{\text{г}}} = \frac{10,88 \cdot 10^6}{16,20} = 671,45 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Максимальна потужність рекуперації на початку процесу гальмування дорівнює:

$$P_{\text{рек.мах}} = \eta P_{\text{г.мах}} = 0,879 \cdot 1,528 \cdot 10^6 = 1,343 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

Енергетичні втрати в механічній передачі та електричній частині привода визначаються як різниця між початковою кінетичною енергією та енергією, доступною для рекуперації:

$$E_{\text{вт}} = (1 - \eta) E_{\text{к}} = (1 - 0,879) \cdot 12,38 \cdot 10^6 = 1,50 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Результати оцінювання параметрів електричного гальмування наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Розрахункові параметри електричного та рекуперативного гальмування

Параметр	Значення
Сумарне гальмівне зусилля	78,57 кН
Гальмівне зусилля одного двигуна	19,64 кН
Гальмівний момент одного двигуна	934,09 Н·м
Кратність гальмівного моменту	1,086
Тривалість гальмування	16,20 с
Гальмівний шлях	157,54 м
Кінетична енергія трамвая	12,38 МДж
Кінетична енергія трамвая	3,44 кВт·год
Максимальна механічна потужність гальмування	1,528 МВт
Середня механічна потужність гальмування	763,88 кВт
Енергія, яка розсіюється в резисторі без рекуперації	10,88 МДж
Середня потужність гальмівного резистора протягом циклу	671,45 кВт

Параметр	Значення
Максимальна потужність гальмівного резистора	1,343 МВт
Енергія, доступна для рекуперації	3,02 кВт·год
Середня потужність рекуперації	671,45 кВт
Максимальна потужність рекуперації	1,343 МВт
Втрати енергії в тяговій передачі	1,50 МДж

Проведений розрахунок показує, що під час гальмування завантаженого трамвая від швидкості 70 км/год до повної зупинки в електроприводі вивільняється кінетична енергія 3,44 кВт. З урахуванням втрат тягової передачі до контактної мережі або накопичувача може бути повернуто близько 3,02 кВт.

За відсутності можливості приймання енергії контактною мережею ця сама енергія повинна бути відведена через гальмівний резистор. Тому під час подальшого моделювання доцільно розглядати координовану систему керування, яка надає пріоритет рекуперативному гальмуванню, а реостатний режим використовує як резервний. За низької швидкості руху, коли ефективність електричного гальмування зменшується, остаточна зупинка трамвая забезпечується механічною гальмівною системою.

3.5 Висновки до розділу 3

У розділі виконано розрахунок основних параметрів багатомоторного електропривода міського трамвая, необхідних для подальшого моделювання режимів тяги та гальмування. У розрахунках прийнято структуру електропривода з чотирма тяговими асинхронними двигунами, навантаження між якими розподіляється рівномірно.

Визначено повну масу завантаженого трамвая, яка становить 58 460 кг. За заданого прискорення $1,2 \text{ м/с}^2$ розраховано тягове зусилля, необхідне для розгону вагона, та визначено потрібну потужність одного тягового двигуна. За результатами розрахунку як розрахунковий аналог тягової машини вибрано

асинхронний двигун типу 4A280M4У3 номінальною потужністю 132 кВт. Сумарна встановлена потужність чотирьох двигунів становить 528 кВт.

Визначено, що кінетична енергія трамвая на початку гальмування становить 3,44 кВт·год. З урахуванням втрат у тяговій передачі до контактної мережі або накопичувача енергії може бути повернуто близько 3,02 кВт·год за один цикл гальмування. За відсутності можливості приймання енергії контактною мережею ця енергія повинна розсіюватися у гальмівному резисторі.

Отримані результати є вихідною базою для моделювання режимів роботи багатомоторного електропривода в розділі 4. Під час подальших досліджень доцільно розглядати координовану систему керування, у якій рекуперативне гальмування використовується як пріоритетний режим, а реостатне гальмування — як резервний режим у разі обмеженої здатності контактної мережі приймати повернену енергію.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

4 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАГАТОМОТОРНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАМВАЯ

4.1 Розробка математичної моделі тягового асинхронного двигуна

Для дослідження режимів роботи багатомоторного електропривода міського трамвая необхідно розробити математичну модель тягового асинхронного двигуна. Модель повинна відображати взаємозв'язок між напругою живлення, струмами статора, потокозчепленням ротора, електромагнітним моментом і кутовою швидкістю обертання ротора.

У складі електропривода трамвая використовуються чотири тягові асинхронні двигуни. За умови координованого керування навантаження між ними розподіляється рівномірно. Тому математичну модель формуємо для одного двигуна, а сумарні механічні та енергетичні показники електропривода визначаємо з урахуванням кількості двигунів.

Під час моделювання приймаємо такі припущення:

- магнітне коло двигуна не насичується;
- параметри обмоток статора і ротора є симетричними;
- активні опори та індуктивності обмоток не змінюються протягом одного циклу моделювання;
- втрати в сталі враховуються опосередковано через ККД електропривода;
- навантаження між чотирма тяговими двигунами розподіляється рівномірно;
- електромагнітні процеси описуються у двофазній системі координат ($d-q$), яка обертається синхронно з вектором потокозчеплення ротора.

Використання системи координат ($d-q$) дозволяє розділити процеси формування потокозчеплення і моменту. Складова струму статора i_{ld} визначає магнітний стан двигуна, а складова i_{lq} формує електромагнітний момент.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні параметри одного тягового асинхронного двигуна, отримані в розділі 3, наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри тягового асинхронного двигуна для моделювання

Параметр	Значення
Активний опір обмотки статора	0,0188 Ом
Активний опір ротора, приведений до статора	0,0157 Ом
Повна індуктивність статора	0,0134 Гн
Повна індуктивність ротора, приведена до статора	0,0135 Гн
Індуктивність взаємного зв'язку	0,0131 Гн
Еквівалентна індуктивність розсіювання	0,000688 Гн
Кількість пар полюсів	2
Номінальна потужність двигуна	132 кВт
Номінальний момент двигуна	860,12 Н·м
Номінальна кутова швидкість ротора	153,47 рад/с
Приведений момент інерції завантаженого трамвая на один двигун	33,05 кг·м ²

Еквівалентна індуктивність розсіювання статора визначається виразом:

$$L_{\sigma} = L_1 - \frac{L_m^2}{L'_2} \quad (4.1)$$

Для компактного запису рівнянь математичної моделі використовуємо коефіцієнт електромагнітного загасання роторного контуру:

$$\alpha = \frac{R'_2}{L'_2} \quad (4.2)$$

Коефіцієнт взаємного електромагнітного зв'язку визначається як:

$$\beta = \frac{L_m}{L'_2 L_{\sigma}} \quad (4.3)$$

Коефіцієнт загасання електромагнітної підсистеми двигуна становить:

$$\gamma = \frac{R_1}{L_{\sigma}} + \alpha L_m \quad (4.4)$$

Для параметрів вибраного двигуна значення коефіцієнтів математичної моделі наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Коефіцієнти математичної моделі тягового двигуна

Параметр	Значення
Коефіцієнт загасання роторного контуру	1,163 с ⁻¹
Коефіцієнт взаємного електромагнітного зв'язку	1410,12 Гн ⁻¹
Коефіцієнт загасання електромагнітної підсистеми	48,80 с ⁻¹

У синхронній системі координат (d-q) електромагнітна підсистема асинхронного двигуна описується рівняннями струмів статора та потокозчеплення ротора.

Швидкість зміни струму статора за віссю (d) визначається як:

$$\frac{di_{1d}}{dt} = -\gamma i_{1d} + \omega_e i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \omega \psi_{2q} + \frac{u_{1d}}{L_\sigma} \quad (4.5)$$

де i_{1d} — складова струму статора за віссю (d), А; i_{1q} — складова струму статора за віссю (q), А; ω_e — кутова швидкість обертання синхронної системи координат, рад/с; ω — механічна кутова швидкість ротора, рад/с; ψ_{2d} — складові потокозчеплення ротора, Вб; u_{1d} — складова напруги статора за віссю (d), В.

За усталеного потокозчеплення похідна дорівнює нулю, тому задане значення струму за віссю (d) визначається спрощеним виразом:

$$i_{1d}^* = \frac{\psi_2^*}{L_m} \quad (4.6)$$

Кутова частота ковзання в системі непрямого векторного керування визначається як:

$$\omega_{\text{ковз}} = \frac{\alpha L_m i_{1q}^*}{\psi_2^*} \quad (4.7)$$

Кутова швидкість обертання синхронної системи координат становить:

$$\omega_e = p_n \omega + \omega_{\text{ковз}} \quad (4.8)$$

Таким чином, непряме векторне керування забезпечує окреме формування потокозчеплення та електромагнітного моменту двигуна. Це

дозволяє реалізувати плавне керування тягою, обмеження струму під час розгону та керований перехід до генераторного режиму під час гальмування.

Для переходу від моделі одного двигуна до моделі багатомоторного електропривода враховуємо кількість тягових двигунів. Сумарний електромагнітний момент чотирьох двигунів визначається як:

$$M_{\Sigma} = zM \quad (4.9)$$

$$F_T = \frac{2zK_p\eta M}{D} \quad (4.10)$$

Лінійна швидкість руху трамвая пов'язана з кутовою швидкістю ротора тягового двигуна співвідношенням:

$$v = \frac{\omega D}{2K_p} \quad (4.11)$$

Під час рекуперативного гальмування електромагнітний момент двигуна набуває від'ємного значення відносно напрямку обертання ротора: $M < 0$.

У цьому режимі тяговий асинхронний двигун працює як генератор. Механічна енергія рухомого трамвая перетворюється на електричну енергію. Залежно від стану контактної мережі отримана енергія повертається до мережі або спрямовується до гальмівного резистора. На рисунку 4.1 доцільно навести структурну схему математичної моделі тягового асинхронного двигуна та системи непрямого векторного керування.

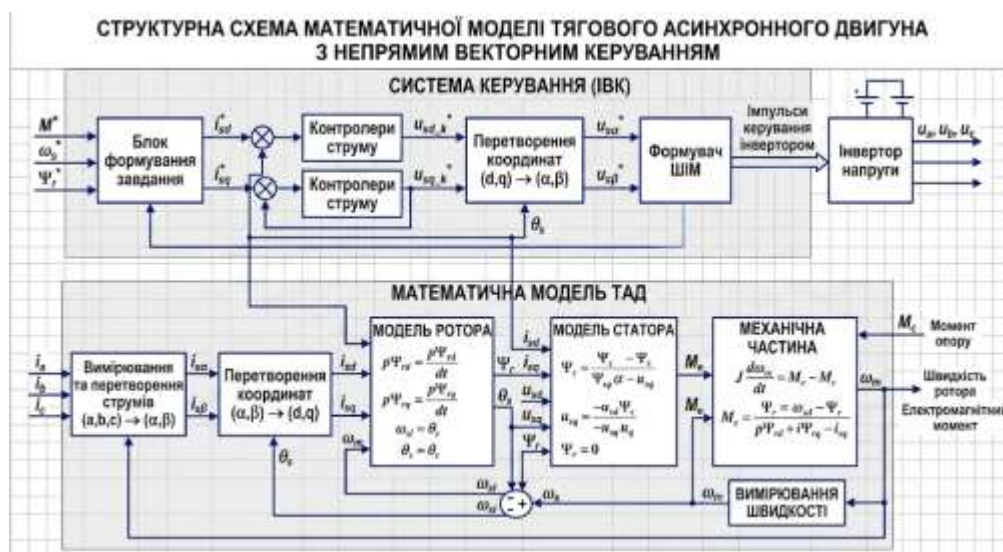


Рис. 4.1 – Структурна схема математичної моделі тягового асинхронного двигуна з непрямым векторним керуванням

Розроблена математична модель використовується для подальшого дослідження механічних характеристик двигуна при зміні частоти живлення, моделювання розгону та усталеного руху трамвая, а також порівняння режимів електричного і рекуперативного гальмування.

4.2 Моделювання механічних характеристик двигуна при зміні частоти живлення

Для моделювання механічних характеристик двигуна доцільно використати спрощену модель у Simulink / Simscape Electrical, призначену саме для побудови статичних механічних характеристик. Блок Induction Machine Squirrel Cage дозволяє задати параметри короткозамкненого асинхронного двигуна в системі SI, а блок Induction Machine Scalar Control реалізує структуру керування. Для швидкого отримання графіків можна використати кероване трифазне джерело напруги та змінювати частоту і амплітуду живлення для кожного запуску моделі.

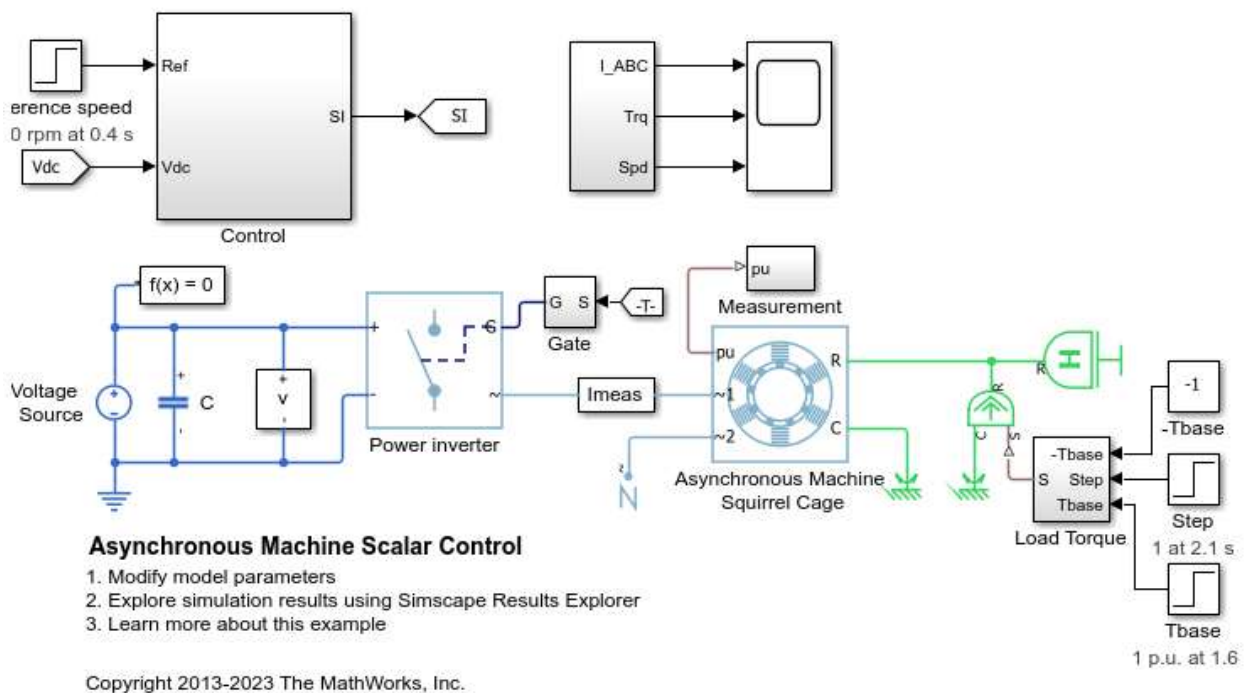


Рис. 4.2 Модель тягового асинхронного двигуна в Simulink для дослідження механічних характеристик

На схемі присутні необхідні для нашого тексту елементи: джерело постійної напруги; силовий інвертор; блок керування; короткозамкнений

асинхронний двигун; блок моменту навантаження; вимірювання струму, моменту та швидкості; блок виведення результатів.

На рисунку наведено модель асинхронного двигуна зі скалярним керуванням у середовищі Simulink. Джерело постійної напруги формує живлення силового інвертора. Блок керування перетворює задане значення швидкості на відповідну частоту живлення та формує сигнали керування інвертором із підтриманням сталого співвідношення (U/f). На виході моделі реєструються струм статора, електромагнітний момент і кутова швидкість ротора. Блок формування моменту навантаження дозволяє дослідити поведінку тягового асинхронного двигуна при зміні механічного навантаження.

Для оцінювання можливостей частотного керування тяговим асинхронним двигуном необхідно дослідити зміну його механічних характеристик залежно від частоти напруги живлення.

У тяговому електроприводі міського трамвая зміна частоти живлення дозволяє регулювати швидкість руху вагона без значних додаткових втрат енергії. Для збереження магнітного потоку двигуна в робочому діапазоні частот напругу живлення змінюємо пропорційно частоті відповідно до закону скалярного керування ($U/f = \text{const}$).

Коефіцієнт пропорційності між лінійною напругою та частотою живлення визначається як:

$$k_{U/f} = \frac{U_n}{f_n} = \frac{380}{50} = 7,6 \text{ В/Гц}$$

Лінійна напруга живлення для заданої частоти визначається за формулою:

$$U_f = k_{U/f} f \quad (4.12)$$

Синхронна кутова швидкість магнітного поля статора визначається як:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p_n} \quad (4.13)$$

					КРБ. АТЕІРС.141.641-03.6.3	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час моделювання розглядаємо чотири значення частоти живлення: 20, 30, 40 та 50 Гц. Для кожного режиму напругу живлення змінюємо відповідно до закону ($U/f = \text{const}$). Розрахункові параметри наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Параметри живлення двигуна для моделювання механічних характеристик

Частота живлення (f), Гц	Лінійна напруга (U_f), В	Синхронна кутова швидкість (ω_0), рад/с	Синхронна частота обертання (n_0), об/хв
20	152	62,83	600
30	228	94,25	900
40	304	125,66	1200
50	380	157,08	1500

Для перевірки одного з режимів визначимо синхронну кутову швидкість при частоті живлення 30 Гц:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p_n} = \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 30}{2} = 94,25 \text{ рад/с}$$

Для побудови механічних характеристик використовується модель тягового асинхронного двигуна в середовищі Simulink із бібліотекою Simscape Electrical. Модель містить кероване трифазне джерело напруги, блок короткозамкненого асинхронного двигуна, підсистему формування навантажувального моменту, вимірювальні блоки та осцилографи Scope. Параметри двигуна задаються відповідно до результатів розрахунку, отриманих у розділі 3.

Для кожного значення частоти виконується окремий запуск моделі. Момент навантаження змінюється плавно від нуля до значення, яке перевищує номінальний момент двигуна. У процесі моделювання реєструються електромагнітний момент (M) і кутова швидкість ротора. Отримані дані виводяться у блок Scope або передаються до робочого простору MATLAB за допомогою блока To Workspace.

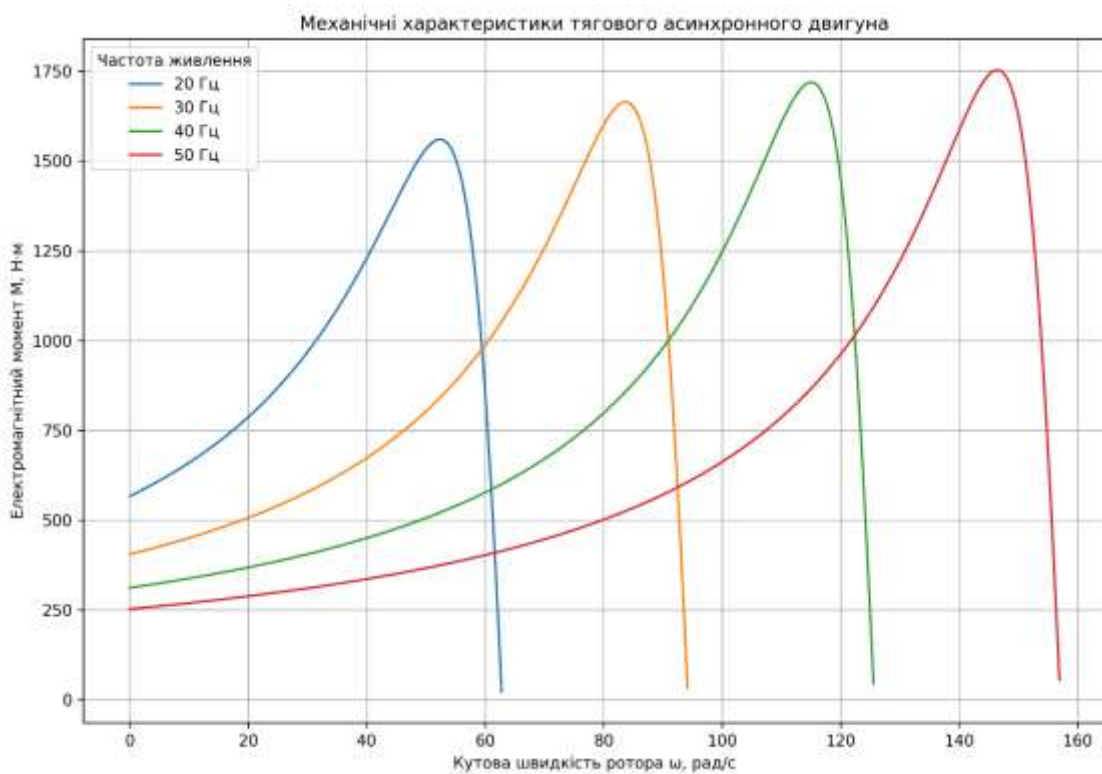


Рис. 4.3 – Механічні характеристики тягового асинхронного двигуна при зміні частоти живлення

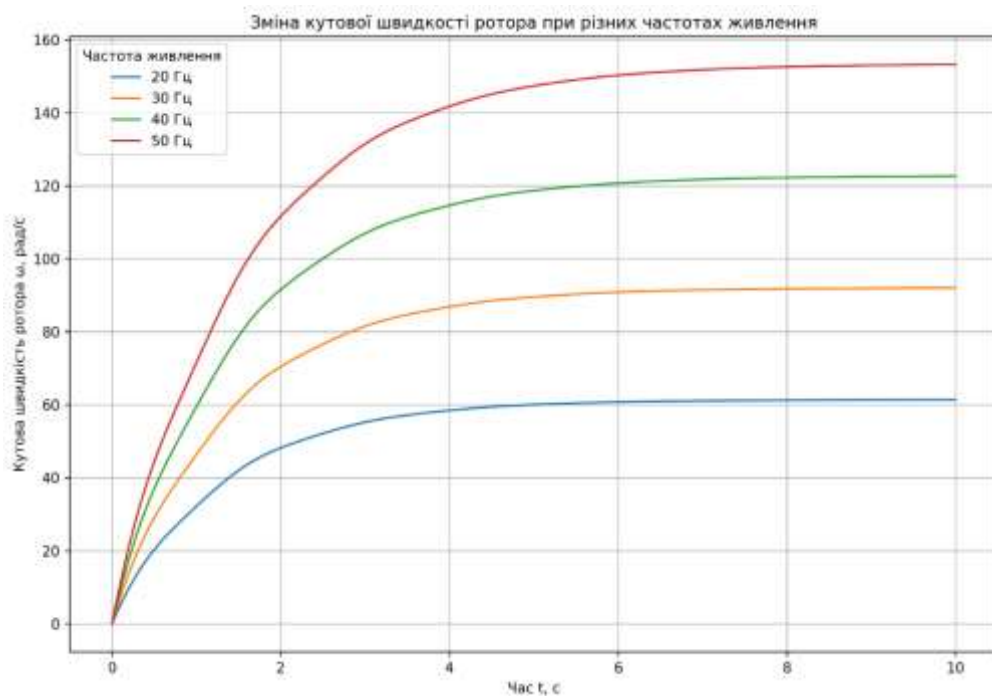


Рис. 4.4 – Зміна кутової швидкості ротора тягового двигуна при різних частотах живлення

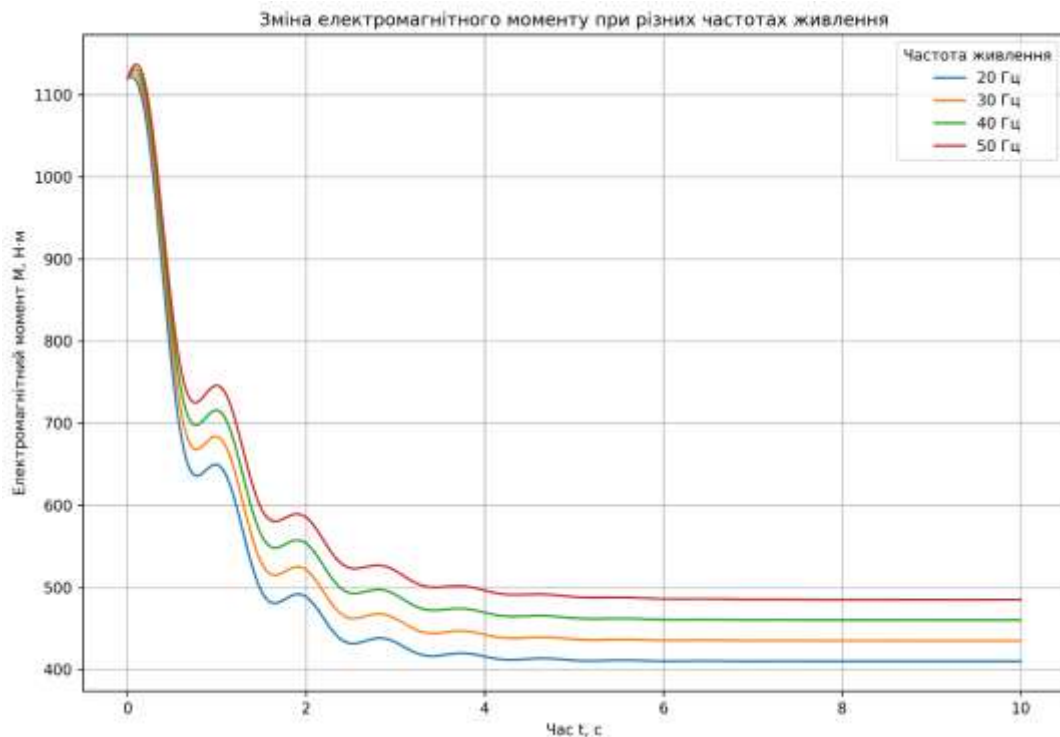


Рис. 4.5 – Зміна електромагнітного моменту тягового двигуна при різних частотах живлення

4.3 Моделювання розгону та усталеного руху трамвая.

Для дослідження розгону та усталеного руху трамвая в моделі Simulink задається ступінчаста зміна електромагнітного моменту тягового двигуна. На початковому інтервалі часу виконується формування магнітного потоку двигуна. Після цього момент збільшується до значення, необхідного для розгону трамвая, а після досягнення заданої швидкості зменшується до рівня, достатнього для подолання опору руху.

Під час розгону струми статора збільшуються, оскільки тягові двигуни створюють підвищений момент. Після переходу до усталеного руху значення моменту і струмів зменшуються. Це відповідає характеру навантаження міського трамвая: найбільша потужність потрібна під час пуску та розгону, а під час руху з постійною швидкістю двигуни працюють із меншим навантаженням.

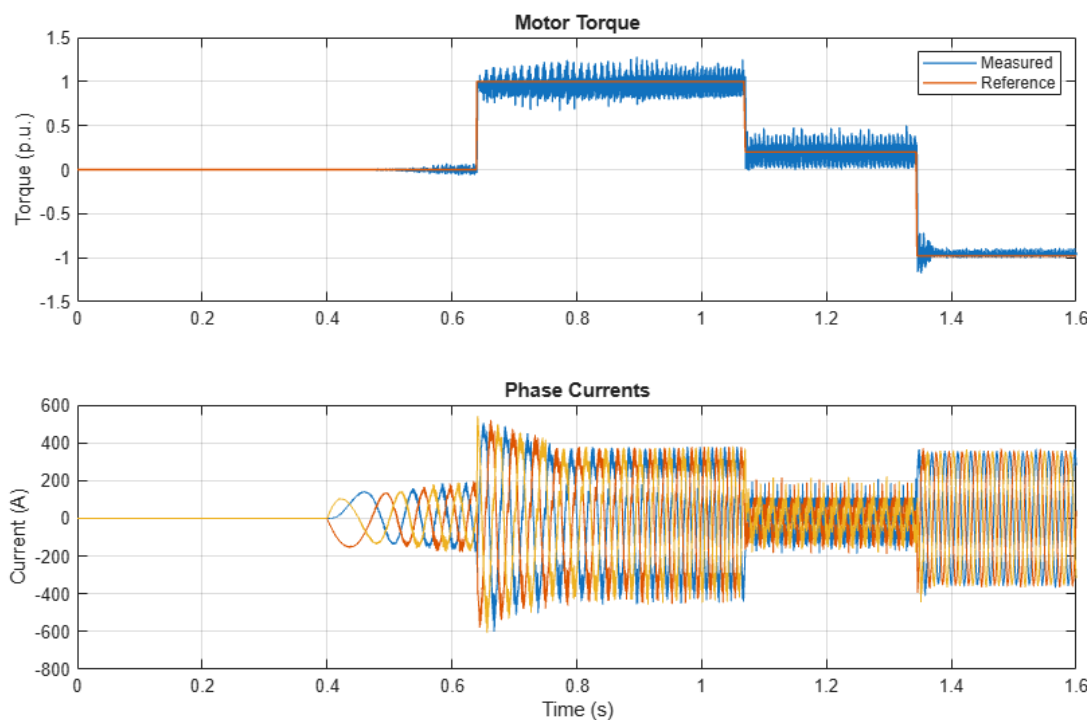


Рис. 4.6 – Зміна електромагнітного моменту та фазних струмів тягового асинхронного двигуна під час розгону, усталеного руху та переходу до гальмування

На верхньому графіку рисунка 4.6 наведено задане та вимірне значення електромагнітного моменту двигуна. Після початкового інтервалу момент збільшується приблизно до номінального значення, що відповідає розгону трамвая. Далі момент зменшується, оскільки після досягнення заданої швидкості електропривод переходить до усталеного режиму роботи.

На нижньому графіку показано фазні струми статора. Під час розгону їх амплітуда зростає, а в усталеному режимі зменшується. Отримані результати підтверджують, що частотне керування забезпечує плавний перехід між режимами роботи без різких струмових перевантажень.

Для оцінювання динамічних властивостей багатомоторного електропривода виконано моделювання процесу розгону трамвая від нерухомого стану до заданої швидкості з подальшим переходом до усталеного режиму руху. Під час розгону тягові асинхронні двигуни формують підвищений електромагнітний момент, необхідний для подолання інерції

вагона та опорів руху. Після досягнення заданої швидкості система керування зменшує момент до значення, достатнього для підтримання сталого режиму.

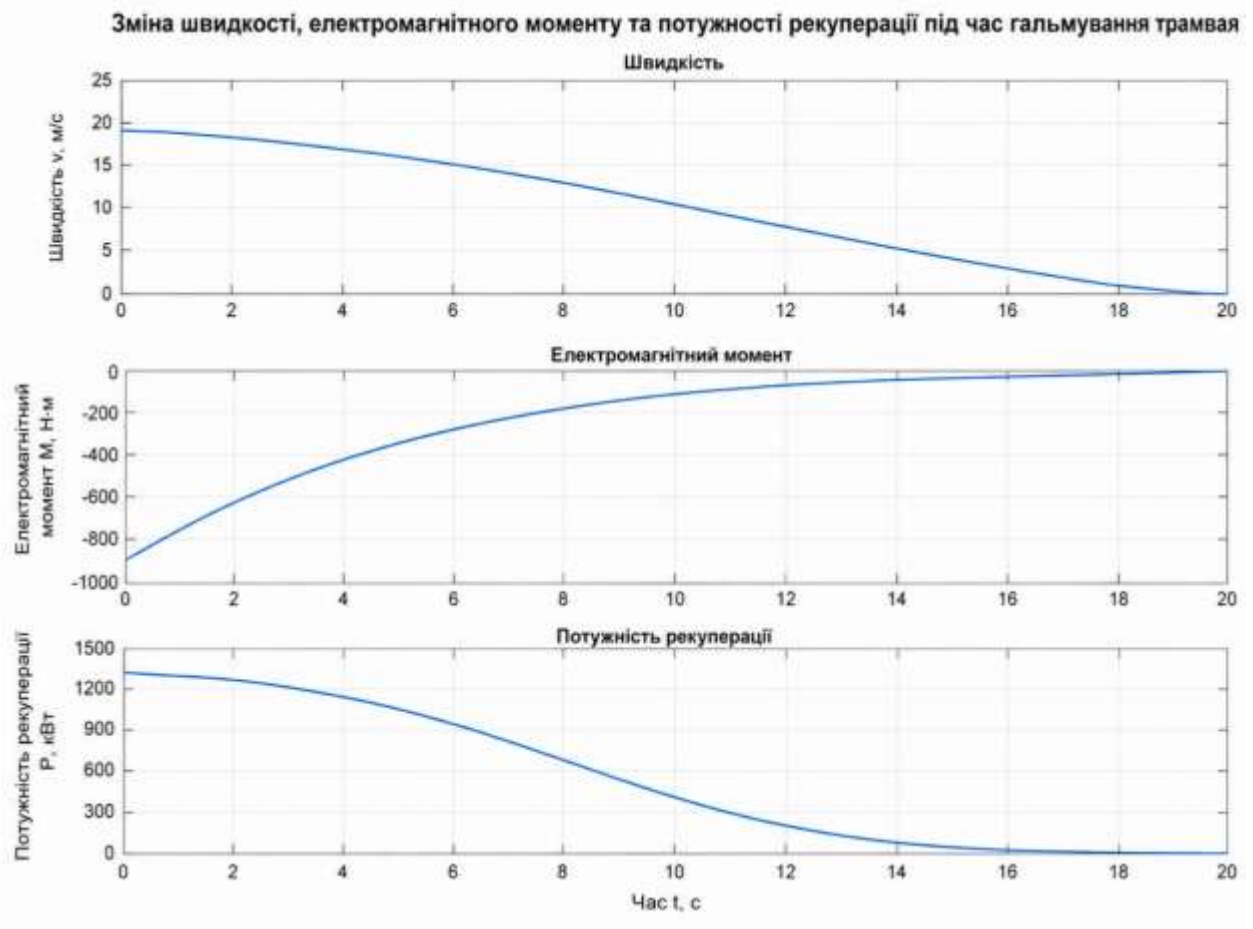


Рис. 4.7– Зміна швидкості руху трамвая під час розгону та усталеного руху

Як видно з рисунка, швидкість руху трамвая плавно зростає від нульового значення та після завершення розгону стабілізується на заданому рівні. Відсутність різких коливань і значного перерегулювання свідчить про коректну роботу системи частотного керування. Отриманий характер перехідного процесу відповідає вимогам до тягового електропривода міського трамвая, оскільки забезпечує плавний розгін вагона та комфортні умови перевезення пасажирів.

4.4 Моделювання електричного гальмування без рекуперації

Під час електричного гальмування тягові асинхронні двигуни переходять із двигунного режиму в генераторний. Електромагнітний момент змінює знак відносно напрямку обертання ротора, унаслідок чого швидкість трамвая зменшується.

Якщо контактна мережа не може прийняти електричну енергію, яка утворюється під час гальмування, вона спрямовується до гальмівного резистора. У цьому випадку кінетична енергія рухомого трамвая перетворюється на теплову енергію та розсіюється в навколишнє середовище.

Потужність, яка надходить до гальмівного резистора, визначається за формулою:

$$P_{\text{рез}}(t) = \frac{U_{dc}^2(t)}{R_r} \quad (4.14)$$

Під час гальмування найбільша потужність виділяється на початку процесу, коли швидкість трамвая є найбільшою. У міру зниження швидкості потужність гальмування поступово зменшується. Такий режим забезпечує зупинку вагона, але не дозволяє повторно використати енергію руху.

4.5 Моделювання режиму рекуперативного гальмування

У режимі рекуперативного гальмування тягові асинхронні двигуни також переходять до генераторного режиму. На відміну від електричного гальмування з використанням резистора, отримана електрична енергія повертається до контактної мережі або передається до накопичувача енергії. Миттєва потужність рекуперації визначається за напругою та струмом у колі постійного струму:

$$P_{\text{рек}}(t) = U_{dc}(t)I_{dc}(t)$$

Енергія, яка повертається до контактної мережі протягом одного циклу гальмування, визначається як:

$$E_{\text{рек}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{рек}}(t)dt$$

Для дослідження ефективності рекуперативного гальмування виконано моделювання процесу зниження швидкості трамвая після завершення усталеного руху. У момент початку гальмування тягові асинхронні двигуни переходять із двигунного режиму в генераторний. Електромагнітний момент змінює знак відносно напрямку обертання ротора, а частина кінетичної енергії

рухомого вагона перетворюється на електричну енергію та повертається до контактної мережі.

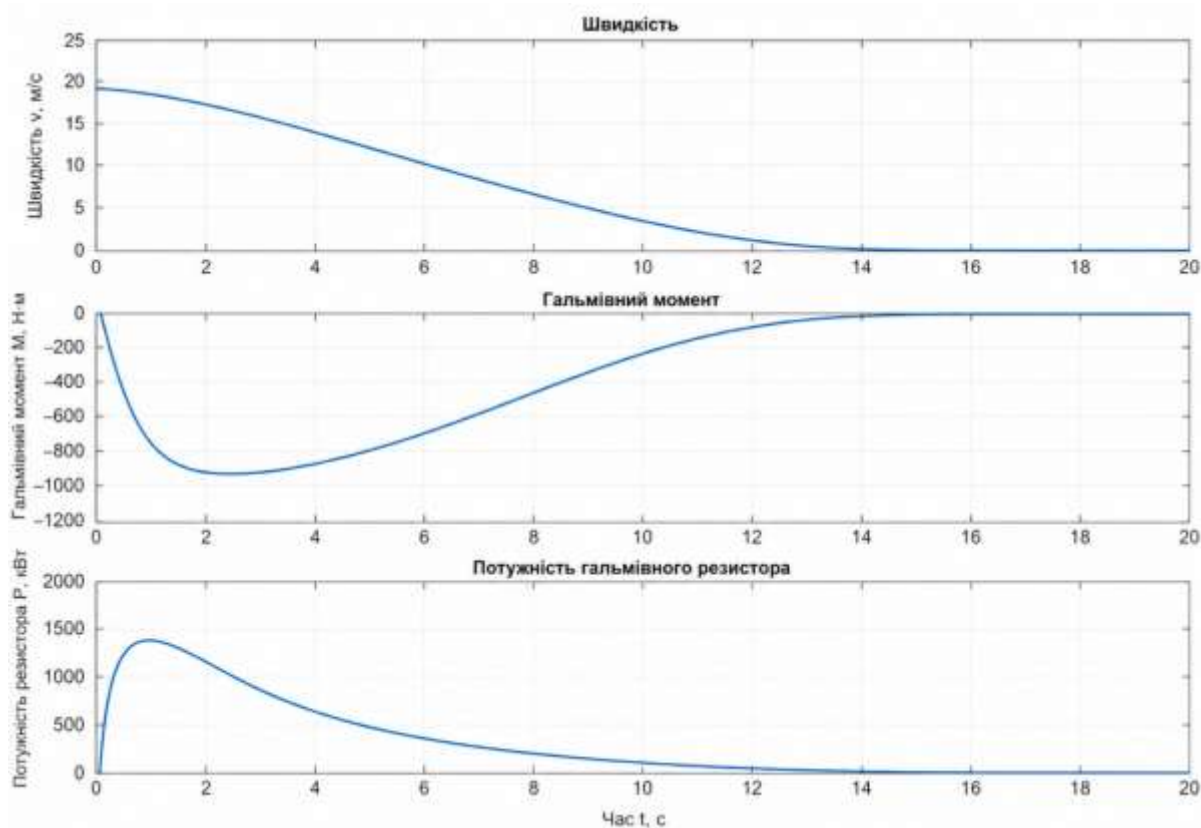


Рис. 4.8 – Зміна швидкості, електромагнітного моменту та потужності рекуперації під час гальмування трамвая

Як видно з рисунка 4.8, під час рекуперативного гальмування швидкість руху трамвая плавно зменшується до нульового значення. Від’ємне значення електромагнітного моменту підтверджує перехід тягового двигуна до генераторного режиму. Найбільша потужність рекуперації спостерігається на початковому етапі гальмування, коли швидкість руху вагона є найбільшою. У міру зменшення швидкості потужність поступово знижується. Отримані результати підтверджують можливість повернення частини енергії гальмування до контактної мережі та зменшення загальних енергетичних втрат електропривода.

Для підвищення енергетичної ефективності багатомоторного електропривода доцільно застосовувати координоване керування режимами гальмування. Основним режимом повинно бути рекуперативне гальмування.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Якщо контактна мережа не може прийняти всю вироблену енергію, надлишкова потужність спрямовується до гальмівного резистора.

Потужність, яка повинна бути розсіяна в резисторі за комбінованого режиму, визначається як:

$$P_{\text{рез}}(t) = P_r(t) - P_{\text{рек}}(t)$$

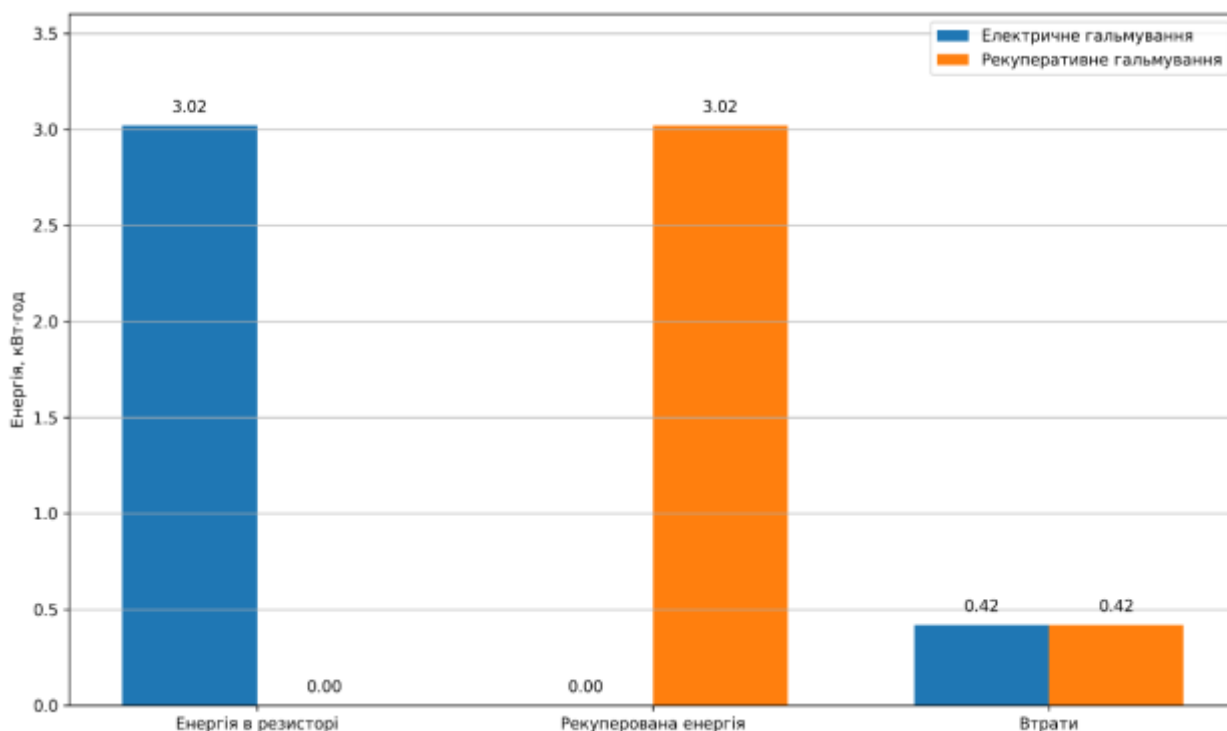


Рис. 4.11 – Порівняння енергетичних показників режимів електричного та рекуперативного гальмування

На рисунку доцільно показати енергію, яка розсіюється в резисторі без використання рекуперації, енергію, повернену до контактної мережі, та втрати в елементах тягового електропривода.

За результатами розрахунків розділу 3 під час гальмування завантаженого трамвая від швидкості 70 км/год до повної зупинки вивільняється кінетична енергія 3,44 кВт·год. З урахуванням втрат у тяговій передачі до контактної мережі або накопичувача може бути повернуто близько 3,02 кВт·год.

Таким чином, використання рекуперації дозволяє зменшити втрати енергії та теплове навантаження на гальмівний резистор. Координоване

керування режимами тяги, рекуперації та реостатного гальмування підвищує енергетичну ефективність багатомоторного електропривода міського трамвая.

4.4 Висновки до розділу 4

У розділі розроблено математичну модель багатомоторного електропривода міського трамвая та виконано моделювання основних режимів його роботи в середовищі Simulink. Для дослідження використано модель одного тягового асинхронного двигуна з урахуванням рівномірного розподілу навантаження між чотирма двигунами трамвая.

Під час моделювання механічних характеристик встановлено, що зміна частоти напруги живлення дозволяє регулювати швидкість обертання тягового двигуна в широкому діапазоні. За умови підтримання співвідношення ($U/f=\text{const}$) зберігається необхідний магнітний потік двигуна, а механічні характеристики зміщуються відповідно до заданої частоти живлення. Це забезпечує плавне керування швидкістю руху трамвая під час пуску та розгону.

Моделювання розгону та усталеного руху показало, що на початковому етапі тягові двигуни створюють підвищений електромагнітний момент. Після досягнення заданої швидкості момент і фазні струми зменшуються до значень, необхідних для подолання опору руху. Отримані графіки підтверджують плавний перехід електропривода від розгону до усталеного режиму без значних струмових перевантажень.

Під час електричного гальмування без використання рекуперації тягові двигуни переходять у генераторний режим, а електромагнітний момент змінює знак відносно напрямку обертання ротора. Електрична енергія, отримана під час зменшення швидкості трамвая, спрямовується до гальмівного резистора та розсіюється у вигляді тепла. Такий режим забезпечує ефективне зниження швидкості, але не дозволяє повторно використати енергію руху.

У режимі рекуперативного гальмування електрична енергія повертається до контактної мережі або передається до накопичувача. За результатами розрахунків, виконаних у розділі 3, під час гальмування завантаженого трамвая від швидкості 70 км/год до повної зупинки вивільняється кінетична енергія 3,44 кВт·год. З урахуванням втрат у тяговій передачі до контактної мережі або накопичувача може бути повернуто близько 3,02 кВт·год.

Порівняння досліджуваних режимів показало, що використання рекуперативного гальмування дозволяє зменшити втрати енергії та теплове навантаження на гальмівний резистор. Для підвищення енергетичної ефективності електропривода доцільно застосовувати координоване керування, за якого рекуперативне гальмування використовується як основний режим, а реостатне гальмування — як резервний у разі обмеженої здатності контактної мережі приймати повернену енергію.

Отримані результати підтверджують доцільність використання частотно-керованого багатомоторного електропривода з координацією режимів тяги та рекуперації для міського трамвая. Запропонований підхід дозволяє забезпечити плавний розгін, стабільний усталений рух, ефективне гальмування та зниження витрат електричної енергії.

5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА “ОХОРОНА ПРАЦІ”

Основними завданнями у сфері охорони праці є створення безпечних умов праці, забезпечення справного стану виробничого обладнання, попередження аварійних ситуацій, організація навчання працівників, контроль дотримання вимог електробезпеки та зниження рівня професійних ризиків.

У попередніх розділах дипломної роботи розглянуто багатомоторний електропривод міського трамвая, визначено параметри тягових асинхронних двигунів та досліджено режими тяги, електричного і рекуперативного гальмування. Експлуатація такого обладнання потребує регулярного технічного обслуговування, діагностування та ремонту електричних машин, силових перетворювачів, кабельних ліній, комутаційної апаратури і систем керування.

У трамвайному депо організацію та контроль цих робіт здійснює інженер-електрик. Тому в спеціальній частині розглядаються умови праці, небезпечні виробничі фактори та основні заходи безпеки на його робочому місці.

5.1 Загальна характеристика робочого місця

Робоче місце інженера-електрика трамвайного депо має комбінований характер. Частина робочого часу припадає на виконання організаційно-технічних завдань у службовому приміщенні, інша частина — на контроль технічного стану електрообладнання безпосередньо у виробничих зонах депо. У службовому приміщенні інженер-електрик працює з електричними схемами, технічною документацією, журналами обліку несправностей, графіками технічного обслуговування та результатами діагностування. Робоче місце обладнується письмовим столом, робочим кріслом, комп'ютером, засобами зв'язку та шафами для зберігання документації.

Робочий стіл необхідно розміщувати так, щоб працівник мав вільний доступ до документації та засобів зв'язку. Документи, які використовуються постійно, слід розташовувати в зоні легкої досяжності. Поверхня столу не

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

повинна створювати відблисків, а робоче крісло повинно забезпечувати зручне положення тіла під час роботи з технічною документацією та комп'ютером.

Основна частина виробничої діяльності інженера-електрика пов'язана з оглядом і контролем електричного обладнання трамвайних вагонів. Такі роботи виконуються на постах технічного обслуговування, у ремонтних зонах, електротехнічних майстернях та поблизу оглядових каналів.

До основних об'єктів контролю належать:

- тягові асинхронні двигуни;
- силові перетворювачі;
- тягові кабелі та контактні з'єднання;
- комутаційна апаратура;
- системи керування електроприводом;
- захисні пристрої;
- допоміжне електрообладнання;
- заземлювальні пристрої.

Під час виконання виробничих завдань інженер-електрик повинен мати доступ до справних вимірювальних приладів, ізольованого інструменту, засобів індивідуального захисту та технічної документації на обладнання.

5.2 Загальний стан охорони праці

Організація охорони праці в трамвайному депо повинна забезпечувати безпечне виконання робіт під час експлуатації, діагностування, технічного обслуговування та ремонту електрообладнання рухомого складу.

До самостійного виконання робіт допускаються працівники, які пройшли навчання, інструктаж з охорони праці, перевірку знань та медичний огляд. Інженер-електрик повинен мати групу з електробезпеки, яка відповідає його посадовим обов'язкам і характеру виконуваних робіт.

Перед початком технічного обслуговування електрообладнання необхідно:

- відключити обладнання від джерел живлення;

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

- виключити можливість помилкового або самовільного ввімкнення;

- перевірити відсутність напруги;
- за необхідності встановити заземлення;
- огородити небезпечну зону;
- встановити попереджувальні плакати;
- перевірити справність інструменту та засобів захисту.

Особливу увагу необхідно приділяти силовим перетворювачам тягового електропривода. Після відключення живлення на конденсаторах кола постійного струму може зберігатися залишкова напруга. Перед початком робіт необхідно витримати встановлений час розряду та перевірити відсутність небезпечного потенціалу вимірювальним приладом.

Під час роботи використовуються діелектричні рукавички, ізольований інструмент, покажчики напруги, захисні окуляри або щиток, спецодяг, захисне взуття та каска. Засоби захисту повинні бути справними та проходити періодичні випробування.

Робочі проходи, підходи до електричних щитів, комутаційних апаратів, евакуаційних виходів і засобів пожежогасіння необхідно утримувати вільними. Оглядові канали повинні мати справне освітлення та огороження. Переміщення трамвайних вагонів на території депо необхідно здійснювати лише після узгодження з відповідальними працівниками.

Для зниження ризику виникнення пожежі необхідно контролювати стан ізоляції кабелів, надійність контактних з'єднань, справність захисних пристроїв та відсутність перегрівання електрообладнання. У виробничих приміщеннях повинні бути доступні первинні засоби пожежогасіння.

5.3 Аналіз умов праці на робочому місці інженера-електрика трамвайного депо

Під час виконання посадових обов'язків інженер-електрик може зазнавати впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Їхній склад

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залежить від характеру робіт, стану обладнання та місця виконання технічного огляду.

Найбільш небезпечним фактором є можливість ураження електричним струмом. Причиною може бути випадковий дотик до струмовідних частин, пошкодження ізоляції, помилкове ввімкнення обладнання або наявність залишкової напруги в силових колах перетворювача.

Під час огляду рухомого складу також існує небезпека механічного травмування внаслідок переміщення трамвайних вагонів, роботи обертових частин електродвигунів і механічних передач, а також падіння поблизу оглядових канав.

До шкідливих виробничих факторів належать підвищений рівень шуму, недостатня освітленість окремих зон, несприятливий мікроклімат у виробничих приміщеннях, фізичне навантаження та нервово-емоційне напруження під час пошуку несправностей. Основні небезпечні та шкідливі фактори наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Небезпечні та шкідливі виробничі фактори на робочому місці інженера-електрика

Виробничий фактор	Можливі наслідки	Основні заходи захисту
Електрична напруга на струмовідних частинах	Ураження електричним струмом, електричні опіки	Відключення живлення, перевірка відсутності напруги, заземлення, застосування електрозахисних засобів
Залишкова напруга в силових колах перетворювача	Ураження струмом після відключення обладнання	Контроль розряду конденсаторів, витримка часу розряду, перевірка напруги приладом
Електрична дуга	Термічні опіки, пошкодження органів зору	Захисний щиток, окуляри, спецодяг, справність комутаційної апаратури
Рух трамвайних вагонів	Механічне травмування працівника	Узгодження переміщень, сигналізація, огороження робочої зони

Виробничий фактор	Можливі наслідки	Основні заходи захисту
Обертіві частини двигунів і передач	Травмування кінцівок	Захисні кожухи, відключення обладнання перед оглядом
Оглядові канами та перепади висоти	Падіння, травмування	Справне освітлення, огороження, утримання проходів у належному стані
Підвищений рівень шуму	Втома, зниження концентрації уваги	Контроль рівня шуму, застосування засобів захисту органів слуху
Недостатня освітленість	Помилки під час огляду, підвищення ризику травмування	Загальне та місцеве освітлення, переносні світильники
Несприятливий мікроклімат	Зниження працездатності, перевтома	Вентиляція, опалення, регламентовані перерви
Пожежна безпека	Загоряння електрообладнання	Захист від коротких замикань, контроль нагрівання, наявність засобів пожежогасіння

Проведений аналіз показує, що найбільш суттєвими ризиками для інженера-електрика трамвайного депо є ураження електричним струмом, вплив електричної дуги, механічне травмування під час перебування у виробничих зонах та небезпека виникнення пожежі.

Зниження рівня професійного ризику забезпечується дотриманням організаційних і технічних заходів безпеки, використанням справних засобів індивідуального захисту, регулярним контролем стану електрообладнання та підтриманням належного порядку на робочому місці.

5.4 Індивідуальне завдання. Розрахунок інтегральної бальної оцінки важкості праці (I_n) на робочому місці

Категорія важкості характеризує стан організму людини, який формується під впливом умов праці. Категорію важкості праці можна визначити через інтегральну оцінку факторів робочого середовища.

Розрізняють чотири рівні впливу факторів робочого середовища на людину, необхідні для їх обліку та нормування :

- Комфортна середа забезпечує оптимальну динаміку працездатності, добре самопочуття і збереження його здоров'я;

- Відносно дискомфортна робоча середа забезпечує при впливі протягом певного інтервалу часу задану працездатність і збереження здоров'я, але викликає у людини суб'єктивні відчуття та функціональні зміни, що не виходять за межі норми;

- Екстремальна робоча середа призводить до зниження працездатності і викликає функціональні зміни, що виходять за межі норми, але не ведуть до патологічних змін або неможливості виконання роботи;

- Понад екстремальна середа призводить до виникнення в організмі людини патологічних змін або неможливості виконання роботи.

Комплексну оцінку факторів робочого середовища проводять на основі методики фізіологічної класифікації важкості робіт.

Під *вагою робіт* розуміють сукупність впливу всіх факторів робочого середовища на здоров'я людини та її працездатність.

Інтегральну бальну оцінку важкості праці I_n на робочому місці можна визначити за от такою методикою:

1. Сформуванати таблицю виробничих факторів;
2. Визначити чисельні значення параметрів;
3. Провести оцінювання важкості кожного фактора по балам;
4. Вирахувати інтегральну бальну оцінку.

Інтегральну бальну оцінку важкості праці I_n на робочому місці можна визначити за такою формулою:

$$I_n = 10 \cdot \left(X_{on} + \sum x_i \cdot \frac{(6 - X_{on})}{6(n-1)} \right), \quad (5.1)$$

де X_{on} – елемент умов праці, який одержав найбільшу оцінку; n - кількість врахованих елементів умов праці; $\sum x_i$ - сума всіх елементів крім визначаючого X_{on} .

Таблиця 5.3

Діапазон інтегральної бальної оцінки	Категорія важкості праці	Розмір доплати до тарифної ставки, %
1	2	3
До 18	I	4
19...33	II	8
34...45	III	12
45,7...53,9	IV	16
54...59	V	20

Визначимо інтегральну бальну оцінку важкості праці (I_n) робочого місця за фактичними даними наведеними у Kartі умов праці, див. табл. 3.4 Карта умов праці.

$$I_n = 10 * \left(5 + (3 + 3 + 3 + 1 + 3 + 2 + 2 + 1 + 4 + 2 + 2) * \frac{(6 - 5)}{6(12 - 1)} \right) =$$

$$= 10 * \left(5 + \frac{26 * 1}{6 * 11} \right) = 54$$

По таблиці 5.2 визначаємо категорію важкості праці: це категорія V

По таблиці 5.3 визначаємо розмір доплати до тарифної ставки, %: 20

Таблиця 5.4. Карта умов праці на робочому місці

№ п/п	Назва фактору одиниця вимірювання	Рівень фактору		Бальна оцінка
		Норматив	Факт.	
1.	Температура повітря на робочому місці у приміщенні, °C: теплий період року	20-22	25	3
2.	Швидкість руху повітря, м/сек - теплий період року	До 0,3	0,6	3
3.	Відносна вологість повітря, %	40-60	75	3
4.	Інтенсивність теплового випромінювання, Вт/м ²	100	25	1
5.	Шум, дБ	75	70	3
6.	Освітлення робочого місця, лк	150	275	2
7.	Мінімальний розмір об'єкта (точність зорових робіт), мм	0,25-2	0,8	2
8.	Тривалість повторювальних операцій, с	Більше 100	15	1
9.	Тривалість зосередженого спостереження, %	90	95	5

10.	Нервово-емоційна навантаження	Відповідальність за безпеку людей та особистий ризик	4
11.	Робоче місце поза і переміщення у просторі	РМ стаціонарне, поза вільна, маса вантажу до 5 кг	2
12.	Режим праці і відпочинку	Обґрунтований, без додавання музики та гімнастики	2

Інтегральна бальна оцінка важкості праці I_n дозволяє визначити вплив умов праці на працездатність людини.

Для цього спочатку визначається ступінь стомлення в умовних одиницях:

$$Y = \frac{I_n - 15,6}{0,64}, \quad (5.2)$$

де 15,6 и 0,64 - коефіцієнти регресії.

$$Y = \frac{54 - 15,6}{0,64} = 60$$

Працездатність людини визначається як величина, протилежна стомленню (в умовних одиницях):

$$R = 100 - Y \quad (5.3)$$

$$R = 100 - 60 = 40 \text{ умовних одиниць працездатності}$$

Результати розрахунку заносимо до таблиці 5.4.

Змінна		Значення
Категорія важкості праці		V
Інтегральна бальна оцінка важкості праці	I_n	54
Ступінь стомлення	Y	60
Працездатність робітників	R	40

5.5 Заходи з охорони праці. Рекомендації. Найбільшу бальну оцінку умов праці одержав параметр 9, це тривалість зосередженого спостереження – 5 балів.

Також наступні параметри умов праці оцінені досить високо: нервово-емоційна навантаження – 4 бала та режим праці і відпочинку – 4 бала.

Таким чином кошти виділені на охорону праці необхідно витратити на вдосконалення умов праці зазначені вище. Для оцінки привабливості проекту сформуємо нову карту умов праці – після майбутньої модернізації, див. табл.

Таблиця 5.6 Карта умов праці на робочому місці після модернізації

№ п/п	Назва фактору одиниця вимірювання	Рівень фактору		Бальна оцінка
		Норматив	Факт.	
1.	Температура повітря на робочому місці у приміщенні, °С теплий період року	20-22	25	3
2.	Швидкість руху повітря, м/сек - теплий період року	До 0,3	0,6	3
3.	Відносна вологість повітря, %	40-60	75	3
4.	Інтенсивність теплового випромінювання, Вт/м ²	100	25	1
5.	Шум, дБ	75	70	3
6.	Освітлення робочого місця, лк	150	275	2
7.	Мінімальний розмір об'єкта (точність зорових робіт), мм	0,25-2	0,8	2
8.	Тривалість повторювальних операцій, с	Більше 100	15	1
9.	Тривалість зосередженого спостереження, %	90	55	3
10.	Нервово-емоційна навантаження	Складні дії по заданому плану з можливістю корекції		3
11.	Робоче місце поза і переміщення у просторі	РМ стаціонарне, поза вільна, маса вантажу до 5 кг		2
12.	Режим праці і відпочинку	Не обґрунтований, без додавання музики та гімнастики		3

$$I_n = 10 * \left(3 + (3 + 3 + 3 + 1 + 3 + 2 + 2 + 1 + 3 + 2 + 2) * \frac{(6 - 3)}{6 * (12 - 1)} \right) = 10 * \left(3 + \frac{23 * 1}{6 * 11} \right) = 33,5$$

По таблиці 5.2 визначаємо категорію важкості праці: це категорія III і розмір доплати до тарифної ставки, %: 12

$$\text{Ступінь стомлення в умовних одиницях: } Y = \frac{33,5 - 15,6}{0,64} = 28$$

$$\text{Працездатність людини: } R = 100 - 28 = 72$$

5.6 Обґрунтування запропонованих заходів з охорони праці. Для обґрунтування необхідно провести оцінку ефективності заходів. Для оцінки ефективності заходів з охорони праці проведено розрахунок зниження стомлення, зростання працездатності та продуктивності при зменшенні категорії важкості.

$$Y' = Y_n - Y = 28 - 60 = -32 \text{ – зменшення втоми}$$

$$R' = R_n - R = 72 - 40 = 30 \text{ – збільшення працездатності}$$

Для визначення того, яким чином зміна важкості праці впливає на працездатність людини та її продуктивність необхідно провести розрахунок за формулою 5.8.

$$\Delta W = 100 \left(\frac{R_n}{R} - 1 \right) * 0,2, \quad (5.8)$$

де ΔW – зростання продуктивності праці, %; 0,2 – емпіричний коефіцієнт, який показує вплив зростання рівня працездатності на продуктивність праці;

R_n, R – працездатність в умовних одиницях до і після впровадження заходів щодо охорони праці, які знизили важкість праці.

$$\Delta W = 100 * \left(\frac{R_n}{R} - 1 \right) * 0,2 \quad (5.9)$$

$$\Delta W = 100 * \left(\frac{72}{40} - 1 \right) * 0,2 = 16\%$$

Тобто після впровадження нововведень, збільшення працездатності, зниження стомлення, продуктивність праці зросте на 16%.

Отже, розглянуто особливості організації робочого місця інженера-електрика трамвайного депо. Проаналізовано умови праці під час контролю технічного стану, діагностування та організації ремонту електрообладнання міського трамвая і розраховано інтегральну бальну оцінку важкості праці на робочому місці інженера-електрика трамвайного депо.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

6.1 Обґрунтування економічної доцільності

Підвищення енергетичної ефективності міського електричного транспорту є актуальним завданням, оскільки тяговий електропривод споживає значну кількість електричної енергії під час розгону трамвайного вагона. Частина цієї енергії може бути повернена до контактної мережі під час гальмування.

У традиційному режимі електричного гальмування кінетична енергія рухомого трамвая перетворюється на електричну енергію та розсіюється в гальмівному резисторі у вигляді тепла. Такий режим забезпечує необхідне зниження швидкості, але не дозволяє повторно використати отриману енергію.

Застосування рекуперативного гальмування дає змогу повернути частину енергії до контактної мережі або передати її до накопичувача. Для цього необхідно реалізувати координоване керування режимами тяги та гальмування, за якого рекуперація використовується як основний режим, а реостатне гальмування — як резервний.

У розділах 3 та 4 визначено, що під час гальмування завантаженого трамвая від швидкості 70 км/год до повної зупинки кінетична енергія становить 3,44 кВт·год. З урахуванням втрат у тяговій передачі до контактної мережі або накопичувача може бути повернуто близько 3,02 кВт·год за один цикл гальмування.

Економічний ефект від упровадження координованого керування формується за рахунок:

- зменшення споживання електричної енергії з контактної мережі;
- зниження теплового навантаження на гальмівні резистори;
- зменшення витрат на технічне обслуговування;
- скорочення простоїв рухомого складу;
- підвищення строку служби елементів тягового електропривода.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для оцінювання доцільності впровадження виконаємо укрупнений розрахунок вартості розробки та очікуваного економічного ефекту для одного трамвайного вагона.

6.2 Розрахунок вартості розробки

До складу робіт входять аналіз вихідних даних, уточнення математичної моделі, розроблення алгоритму координації режимів тяги та рекуперації, адаптація програмного забезпечення системи керування, проведення випробувань, оформлення технічної документації та підготовка персоналу. Розрахунок витрат на оплату праці наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Розрахунок витрат на оплату праці

Вид робіт	Трудовісткість, год	Вартість однієї години, грн	Вартість робіт, грн
Аналіз вихідних даних електропривода	24	350	8 400
Уточнення математичної моделі	60	400	24 000
Розроблення алгоритму координації режимів	80	450	36 000
Адаптація програмного забезпечення контролера	80	500	40 000
Проведення випробувань і налагодження	48	450	21 600
Розроблення документації та підготовка персоналу	24	350	8 400
Разом	316	—	138 400

Загальні витрати на оплату праці становлять:

$$C_{\text{оп}} = 8400 + 24000 + 36000 + 40000 + 21600 + 8400 = 138400 \text{ грн}$$

Відрахування на соціальні заходи для укрупненого розрахунку приймаємо на рівні 22 % від витрат на оплату праці:

$$C_{\text{соц}} = 0,22C_{\text{оп}} = 0,22 \cdot 138400 = 30448 \text{ грн}$$

Накладні витрати приймаємо в розмірі 20 % від витрат на оплату праці:

$$C_{\text{накл}} = 0,20C_{\text{оп}} = 0,20 \cdot 138400 = 27680 \text{ грн}$$

Витрати на матеріали, використання вимірювального обладнання, програмних засобів і проведення випробувань приймаємо в розмірі:

$$C_{\text{мат}} = 25000 \text{ грн}$$

Загальна вартість розробки та впровадження алгоритму координованого керування становить: $138400+30448+27680+25000$ грн.

Структуру витрат наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Загальна вартість розробки

Стаття витрат	Значення, грн
Оплата праці	138 400
Відрахування на соціальні заходи	30 448
Накладні витрати	27 680
Матеріали, програмні засоби та випробування	25 000
Загальна вартість розробки	221 528

6.3 Оцінка економічного ефекту.

Для визначення економічного ефекту приймаємо розрахункові умови експлуатації одного трамвайного вагона, наведені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Вихідні дані для оцінювання економічного ефекту

Параметр	Значення
Енергія, доступна для рекуперації за один цикл гальмування	3,02 кВт·год
Кількість ефективних циклів гальмування за добу	100
Кількість днів експлуатації за рік	330

Параметр	Значення
Коефіцієнт використання рекуперованої енергії	0,75
Розрахункова вартість електроенергії	6,50 грн/кВт·год

Коефіцієнт використання рекуперованої енергії враховує, що контактна мережа не завжди може прийняти всю енергію гальмування. Частина енергії може бути використана іншими вагонами, які одночасно працюють у режимі тяги, або передана до накопичувача. За відсутності споживача надлишок енергії спрямовується до гальмівного резистора.

Річний обсяг електричної енергії, яку можливо повторно використати, визначається як:

$$E_{\text{рек.р}} = E_{\text{рек1}} n_{\text{г}} D k_{\text{вик}} = 3,02 \cdot 100 \cdot 330 \cdot 0,75 = 74745 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Річний економічний ефект від зменшення споживання електроенергії становить:

$$\Delta C_e = E_{\text{рек.р}} c_e = 74745 \cdot 6,50 = 485842,50 \text{ грн/рік}$$

Отже, завдяки використанню рекуперативного гальмування один трамвайний вагон може забезпечити повторне використання близько 74,75 МВт·год електричної енергії на рік.

6.4 Супутній прибуток.

Окрім прямого економічного ефекту від зменшення споживання електроенергії, використання рекуперативного гальмування забезпечує додатковий економічний результат. Він формується за рахунок зменшення теплового навантаження на гальмівні резистори, зниження інтенсивності зношування силового обладнання та скорочення простоїв рухомого складу.

Для укрупненого розрахунку приймаємо, що витрати на обслуговування гальмівних резисторів і пов'язаного обладнання становлять 60 000 грн на рік. Завдяки зменшенню теплового навантаження очікується скорочення цих витрат на 20 %.

Економія витрат на технічне обслуговування визначається як:

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta C_{\text{обсл}} = 0,20 C_{\text{обсл}} = 0,20 \cdot 60000 = 12000 \text{ грн/рік}$$

Також приймаємо, що впровадження координованого керування дозволяє скоротити простої трамвайного вагона на 10 годин на рік.

Розрахункова вартість однієї години простою становить 2 500 грн.

Економічний ефект від скорочення простоїв дорівнює:

$$\Delta C_{\text{пр}} = t_{\text{пр}} c_{\text{пр}} = 10 \cdot 2500 = 25000 \text{ грн/рік}$$

Супутній прибуток визначається як сума економії витрат на технічне обслуговування та економічного ефекту від скорочення простоїв: 12000+25000 грн.

$$\Delta C_{\text{суп}} = \Delta C_{\text{обсл}} + \Delta C_{\text{пр}} = 12000 + 25000 = 37000 \text{ грн/рік}$$

$$\Delta C_{\Sigma} = \Delta C_{\text{е}} + \Delta C_{\text{суп}} = 485842,50 + 37000 = 522842,50 \text{ грн/рік}$$

Строк окупності витрат на розробку та впровадження визначається як:

$$T_{\text{ок}} = \frac{C_{\text{розр}}}{\Delta C_{\Sigma}} = \frac{221528}{522842,50} = 0,42 \text{ року}$$

У місяцях строк окупності становить:

$$T_{\text{ок.міс}} = 12 T_{\text{ок}} = 12 \cdot 0,42 = 5,04 \text{ місяця}$$

Очікуваний накопичений економічний ефект за п'ять років експлуатації визначається як:

$$\Delta C_5 = 5 \Delta C_{\Sigma} - C_{\text{розр}} = 5 \cdot 522842,50 - 221528 = 2392684,50 \text{ грн}$$

Основні результати економічного розрахунку наведено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Результати оцінювання економічної ефективності

Показник	Значення
Загальна вартість розробки та впровадження	221 528 грн
Річний обсяг повторно використаної електроенергії	74 745 кВт·год
Річне зменшення витрат на електроенергію	485 842,50 грн
Супутній прибуток	37 000 грн
Загальний річний економічний ефект	522 842,50 грн
Строк окупності	0,42 року
Строк окупності	5,04 місяця
Накопичений ефект за п'ять років	2 392 684,50 грн

6.5 Висновки до розділу 6

У розділі обґрунтовано економічну доцільність удосконалення енергетичної ефективності багатомоторного електропривода міського трамвая шляхом координації режимів тяги та рекуперативного гальмування.

Розраховано орієнтовну вартість розробки та впровадження алгоритму координованого керування. Вона становить 221 528 грн для одного трамвайного вагона.

Визначено, що за прийнятих умов експлуатації використання рекуперативного гальмування дозволяє повторно використовувати близько 74,75 МВт·год електричної енергії на рік. Річне зменшення витрат на електроенергію становить 485 842,50 грн.

Додатковий економічний ефект формується за рахунок зменшення теплового навантаження на гальмівні резистори, скорочення витрат на технічне обслуговування та зменшення простоїв рухомого складу. Супутній прибуток оцінено в 37 000 грн на рік.

Загальний річний економічний ефект становить 522 842,50 грн, а строк окупності витрат на розробку та впровадження — близько 5 місяців.

Окрім економічного ефекту, використання рекуперативного гальмування має екологічне значення. Повернення частини енергії до контактної мережі зменшує загальне споживання електроенергії, скорочує теплове навантаження на гальмівні резистори та опосередковано знижує негативний вплив міського електричного транспорту на довкілля.

Отримані результати підтверджують доцільність упровадження координованого керування режимами тяги та рекуперації в багатомоторному електроприводі міського трамвая.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено актуальне завдання підвищення енергетичної ефективності багатомоторного електропривода міського трамвая шляхом координації режимів тяги та рекуперативного гальмування.

У розрахунковій частині визначено повну масу завантаженого трамвая, яка становить 58 460 кг, необхідне тягове зусилля та потужність електропривода. Як розрахунковий аналог тягової машини вибрано асинхронний двигун типу 4А280М4У3 номінальною потужністю 132 кВт. Сумарна встановлена потужність чотирьох тягових двигунів становить 528 кВт.

Моделювання розгону та усталеного руху трамвая показало, що на початковому етапі тягові двигуни формують підвищений електромагнітний момент, необхідний для подолання інерції вагона. Після досягнення заданої швидкості момент і струми зменшуються до рівня, достатнього для підтримання усталеного режиму. Отримані графіки підтверджують плавний характер перехідних процесів і відсутність значних струмових перевантажень.

Окремо досліджено електричне гальмування без використання рекуперації та рекуперативне гальмування. У режимі електричного гальмування без рекуперації тягові двигуни переходять у генераторний режим, а отримана електрична енергія розсіюється в гальмівному резисторі у вигляді тепла. У режимі рекуперативного гальмування частина енергії повертається до контактної мережі або може бути передана до накопичувача.

Визначено, що під час гальмування завантаженого трамвая від швидкості 70 км/год до повної зупинки вивільняється кінетична енергія 3,44 кВт·год. З урахуванням втрат у тяговій передачі до контактної мережі або накопичувача може бути повернуто близько 3,02 кВт·год за один цикл гальмування. Отже, використання рекуперації дозволяє скоротити непродуктивні втрати енергії та зменшити теплове навантаження на гальмівні резистори. Запропоновано координоване керування режимами роботи електропривода, за якого рекуперативне гальмування використовується як основний режим. Якщо контактна мережа не може прийняти всю повернену енергію, надлишкова потужність спрямовується до гальмівного резистора. За низької швидкості руху остаточна зупинка трамвая забезпечується механічною гальмівною системою.

Запропоноване вдосконалення має не лише економічне, а й екологічне значення. Зменшення споживання електроенергії з контактної мережі, скорочення теплових втрат у гальмівних резисторах і повторне використання енергії гальмування сприяють зниженню негативного впливу міського електричного транспорту на довкілля.

Таким чином, результати дипломної роботи підтверджують доцільність використання частотно-керованого багатомоторного електропривода з координованим керуванням режимами тяги та рекуперації. Запропонований підхід забезпечує плавний розгін, стабільний усталений рух, ефективне гальмування та підвищення енергетичної ефективності міського трамвая.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра [Електронний ресурс] : для здобувачів СВО «Бакалавр» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / П. І. Осадчук, В. Ф. Бабіч, А. А. Галіулін, Є. П. Штепа ; кафедра електромеханіки, мехатроніки та інженерної графіки. — Одеса : ОНТУ, 2021. — 47 с. — URL: [електронний каталог НТБ ОНТУ](#).

2. Галіулін А. А. Монтаж, технічна експлуатація і ремонт електротехнічних пристроїв [Електронний ресурс] : навчальний посібник / А. А. Галіулін, П. І. Осадчук, К. А. Шейда Голбад ; Одеський національний технологічний університет. — Одеса : ОНТУ, 2022. — 124 с. — URL: [електронний каталог НТБ ОНТУ](#).

3. Штепа Є. П. Електричні машини. Асинхронний двигун : методичні вказівки до виконання курсової роботи [Електронний ресурс] / Є. П. Штепа, О. Ю. Розіна ; кафедра електромеханіки та мехатроніки. — Одеса : ОНТУ, 2024. — 38 с. — URL: [електронний каталог НТБ ОНТУ](#).

4. Штепа Є. П. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Теорія електроприводу» [Електронний ресурс] / Є. П. Штепа, К. А. Шейда Голбад ; кафедра електромеханіки та мехатроніки. — Одеса : ОНТУ, 2023. — 43 с. — URL: [електронний каталог НТБ ОНТУ](#).

5. Шейда Голбад К. А. Конспект лекцій з курсу «Теорія електроприводу» [Електронний ресурс] : для здобувачів СВО «Бакалавр» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / К. А. Шейда Голбад ; кафедра електромеханіки та мехатроніки. — Одеса : ОНТУ, 2024. — 142 с. — URL: [електронний каталог НТБ ОНТУ](#).

6. Шейда Голбад К. А. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Теорія електроприводу» [Електронний ресурс] : для здобувачів СВО «Бакалавр» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / К. А. Шейда Голбад ; кафедра електромеханіки та

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мехатроніки. — Одеса : ОНТУ, 2024. — 24 с. — URL: [електронний каталог НТБ ОНТУ](#).

7. Карпович О. Я. Моделювання електроприводів устаткування харчової промисловості [Електронний ресурс] : методичні вказівки до практичних занять / О. Я. Карпович, П. І. Осадчук, Т. А. Ревенюк ; кафедра електромеханіки та мехатроніки. — Одеса : ОНАХТ, 2021. — 63 с. — URL: [електронний каталог НТБ ОНТУ](#).

8. Штепа Є. П. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Основи електропостачання підприємств» [Електронний ресурс] / Є. П. Штепа ; кафедра електромеханіки та мехатроніки. — Одеса : ОНАХТ, 2019. — 36 с. — URL: [електронний каталог НТБ ОНТУ](#).

9. Штепа Є. П. Основи електропостачання підприємств [Електронний ресурс] : методичні вказівки до практичних занять / Є. П. Штепа ; відп. за вип. П. М. Монтік ; кафедра електромеханіки та мехатроніки. — Одеса : ОНАХТ, 2019. — 40 с. — URL: [електронний каталог НТБ ОНТУ](#).

10. Штепа Є. П. Спеціальні електричні машини : лабораторні роботи : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт [Електронний ресурс] / Є. П. Штепа ; кафедра електромеханіки та мехатроніки. — Одеса : ОНАХТ, 2019. — 62 с. — URL: [електронний каталог НТБ ОНТУ](#).

11. Закладний О. М. Електропривод : навчальний посібник / О. М. Закладний, В. В. Прокопенко, О. О. Закладний. — Київ : НТУУ «КПІ», 2008. — 316 с. — URL: [репозитарій КПІ ім. Ігоря Сікорського](#).

12. Голодний І. М. Регульований електропривод : підручник / І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Л. С. Червінський, Д. А. Абдураманов, А. В. Торопов, О. В. Санченко ; за ред. І. М. Голодного. — Київ : ТОВ «ЦП «Компринт», 2015. — 509 с. — URL: [репозитарій Білоцерківського НАУ](#).

13. Загірняк М. В. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода : навчальний посібник / М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

П. Калінов, А. І. Гладир, В. Г. Ковальчук. — 2-ге вид., переробл. і доповн. — Харків : Точка, 2017. — 206 с. — URL: [електронна бібліотека Кременчуцького національного університету](#).

14. Далека В. Х. Електропостачання електричного транспорту : навчальний посібник / В. Х. Далека, В. К. Нем, В. І. Скуріхін. — Харків : ХНАМГ, 2012. — 168 с. — URL: [електронний репозитарій ХНУМГ ім. О. М. Бекетова](#).

15. Практикум з технічної експлуатації міського електричного транспорту : навчальний посібник / В. Х. Далека, В. Б. Будніченко, В. І. Коваленко, М. В. Хворост, А. Д. Храмцов. — Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. — 194 с. — URL: [електронний репозитарій ХНУМГ ім. О. М. Бекетова](#).

16. Про міський електричний транспорт : Закон України від 29.06.2004 № 1914-IV // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. — URL: [офіційний текст](#).

17. Про затвердження Правил експлуатації трамвая і тролейбуса : наказ Міністерства інфраструктури України від 03.02.2020 № 36 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. — URL: [офіційний текст](#).

18. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Держнаглядохоронпраці України від 09.01.1998 № 4 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. — URL: [офіційний текст](#).

19. Про затвердження Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Міністерства палива та енергетики України від 25.07.2006 № 258 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. — URL: [офіційний текст](#).

20. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. — URL: [офіційний текст](#).

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.6.3	Арк.
						101
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		