

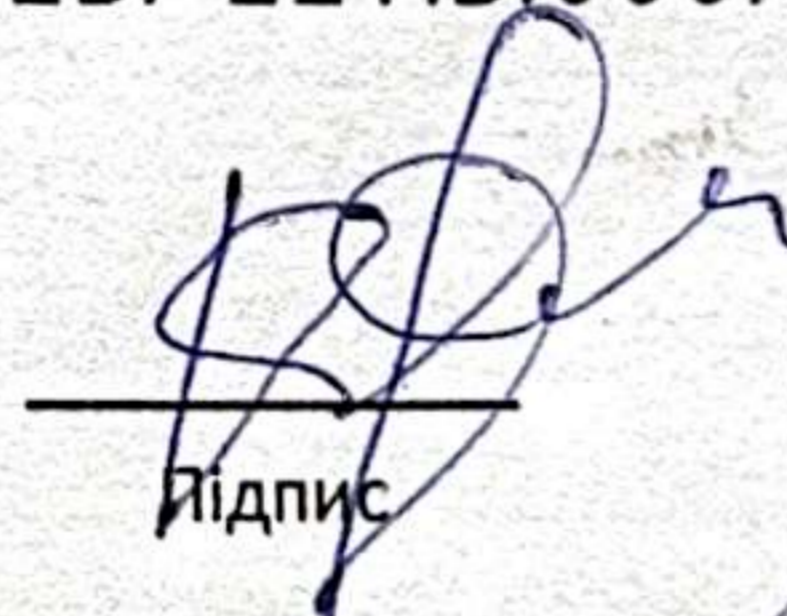
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Проектування автоматизованого електропривода промислової установки з розробкою системи автоматичного керування

Рівень вищої освіти	бакалавр
Галузь знань	27 «Транспорт»
Спеціальність	274 «Автомобільний транспорт»
Освітня програма	Автомобільний транспорт

Шифр: КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ

Виконав студент 3-го курсу
група АТс 22-2
Шифр



Підпис

Микола БРАСЛАВЕЦЬ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник к.т.н., доц..
Науковий ступінь, звання



Підпис

Олег МАКОВКІН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

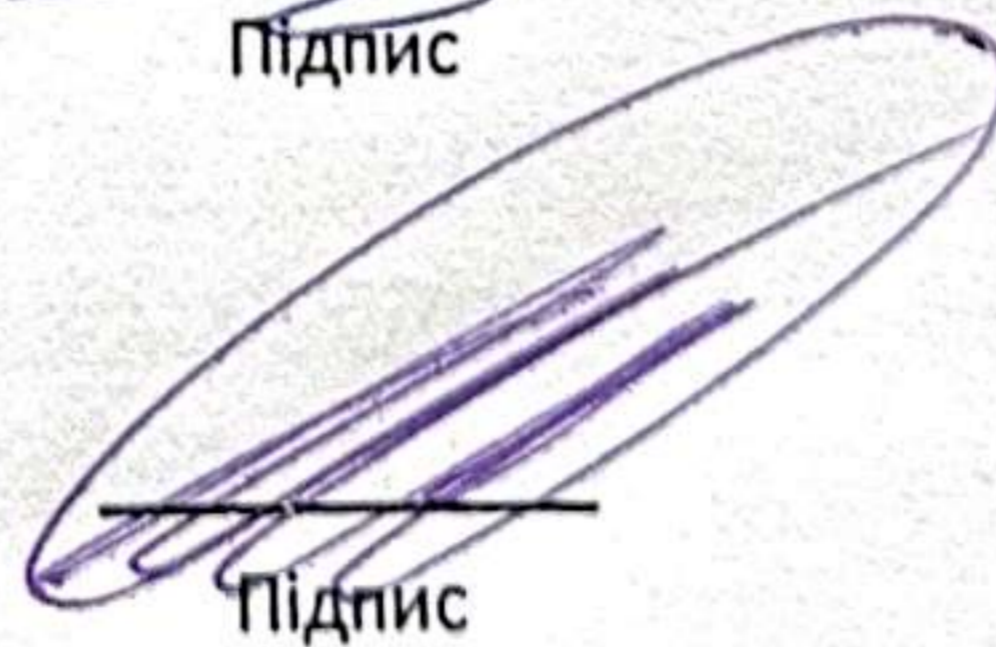
Нормоконтролер



Підпис

Олег БАБАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ
Назва



Підпис

Олександр ДИХА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 12.06.25

Хмельницький, 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Галузь знань 27 – Транспорт

Спеціальність – 274 Автомобільний транспорт

Рівень вищої освіти – Перший бакалаврський

Освітньо-професійна програма – Автомобільний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Диха О.В.

20 02 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Браславцю Миколі Костянтиновичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема проекту (роботи)

«Проектування автоматизованого електропривода промислової установки з розробкою системи автоматичного керування»

керівник проекту (роботи)

Маковкін Олег Миколайович к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 лютого 2025р. № 23 (Д26)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10 червня 2025 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, дефектації, складанню і регулюванню вузлів паливної систми; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи підприємства.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз стану питання; 2 Розробка конструкції гальмівного стенда для дослідження працездатності вузлів паливної систми автомобіля; 3 Технологічний процес; 4 Розрахунок ефективності спроектованої конструкції

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 02.02.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	<i>Літературний огляд</i>	<i>15.05.2025</i>	
2	<i>Технологічний розділ</i>	<i>25.05. 2025</i>	
3	<i>Конструкторський розділ</i>	<i>30.05. 2025</i>	
4	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>2.06. 2025</i>	
5	<i>Оформлення презентації бакалаврської роботи</i>	<i>5.06. 2025</i>	
6	<i>Нормоконтроль магістерської роботи</i>	<i>9.06. 2025</i>	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>10.06. 2025</i>	

Студент

Керівник проекту (роботи)


Підпис

Микола БРАСЛАВЕЦЬ
Ініціали, прізвище

Олег МАКОВКІН
Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

У випускній кваліфікаційній роботі бакалавра розглядається питання проектування та дослідження системи автоматизованого електроприводу для промислової установки. Мета дослідження полягає у створенні ефективної математичної та імітаційної моделі електроприводу, виборі відповідного електродвигуна та частотного перетворювача, а також розробці функціональної та математичної моделі системи керування.

У першому розділі здійснено опис технологічного процесу підприємства, проведено аналіз кінематичної схеми установки та сформовано розрахункову модель її механічної частини.

У другому розділі викладено результати аналізу технічної літератури, сформульовано вимоги до системи електроприводу, запропоновано та обгрунтовано вибір раціональної структури автоматизованої системи.

У третьому розділі проведено детальний вибір електродвигуна: виконано розрахунки навантажень, побудовано діаграми роботи механізму, обрано тип двигуна та перевірено його працездатність за критеріями перегріву й перевантаження.

У четвертому розділі представлено вибір повного електричного перетворювача. Обгрунтовано доцільність застосування частотного перетворювача та визначено його технічні переваги.

У п'ятому розділі розроблено математичну модель автоматизованого електроприводу, що враховує особливості керування та впливи зовнішніх навантажень на систему.





Результати роботи можуть бути використані при створенні ефективних електроприводів у галузях промисловості, де важливі точність, адаптивність і економічність автоматизованих систем.

Випускна кваліфікаційна робота містить 89 сторінки, 15 ілюстрацій, 3 таблиці, 14 використаних джерел та 1 додаток.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОПРИВОД, АВТОМАТИЗАЦІЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ЕЛЕКТРОДВИГУН, КЕРУВАННЯ.

ЗМІСТ

	ВСТУП	6
1.	ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	7
1.1	Опис промислового підприємства та аналіз технологічного процесу	7
1.2	Аналіз взаємодії оператора та промислового підприємства	11
1.3	Аналіз кінематичної схеми. Визначення параметрів та складання розрахункової схеми механічної частини	13
2	ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДУ І СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ УСТАНОВКИ	16
2.1	Огляд літератури на тему дипломного проекту	16
2.2	Формування вимог до автоматизованої системи електроприводу та автоматики	25
2.3	Визначення можливих варіантів та вибір раціональної системи електроприводу	27
2.4	Розробка функціональної схеми автоматизованого електроприводу	28
3	ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА	32
3.1	Розрахунок навантажень та побудова механічних характеристик та діаграм навантаження механізму	32
3.2	Визначення загального попиту на літєві батареї	33
3.3	Попередній вибір потужності двигуна	48
3.4	Вибір номінальної швидкості та розміру двигуна	53
3.5	Побудова навантажувальної діаграми електроприводу	57
3.6	Перевірка вибраного електродвигуна на нагрівання та перевантажувальну здатність	60
4	ВИБІР ПОВНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА	65
4.1	Визначення можливих варіантів та обґрунтування вибору типу комплектного перетворювача	65
4.2	Переваги перетворювача частоти	68
5	ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ	70
5.1	Розробка математичної моделі автоматизованого електроприводу	70

КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Браславель		
Перевір.		Маковкін		
Н. Контр.		Бабак		
Затверд.		Диха		
			Проектування автоматизованого електропривода промислової установки з розробкою системи автоматичного керування	
		Літ.	Арк.	Акрушів
			4	89
ХНУ АТс-22-2				

6	РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ	78
	ВИСНОВОК	87
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	88
	ДОДАТКИ	89

ВСТУП

Погіршення екологічної ситуації у великих містах світу є однією з найгостріших проблем сучасності. Стрімке зростання кількості автомобілів, зношення транспортного парку та неефективні системи очищення вихлопних газів призводять до зростання рівня забруднення атмосферного повітря. У відповідь на це в багатьох країнах світу, зокрема в США, країнах Західної Європи та Японії, впроваджуються жорсткі екологічні норми щодо викидів шкідливих речовин автотранспортом. Ці регламенти покликані обмежити негативний вплив автомобільного транспорту на довкілля та стимулювати розвиток екологічно чистих технологій.

В Україні екологічна ситуація також демонструє негативну динаміку. За останні 5–6 років спостерігається щорічне зростання викидів шкідливих речовин автотранспортом на рівні приблизно 9%, при цьому їхній сумарний внесок у загальне забруднення довкілля перевищує 87%. Крім хімічного забруднення, автомобільний транспорт є основним джерелом шуму в містах: саме він формує до 80% зон акустичного дискомфорту. У населених пунктах із високою інтенсивністю дорожнього руху споживання кисню автомобільними двигунами настільки значне, що концентрація кисню в повітрі знижується нижче нормативного рівня — 20,94%. Відомо, що для повного згоряння 1 кг бензину необхідно близько 14,7 кг повітря, що відповідає 2,9 кг кисню. Зниження кисню в атмосфері призводить до неповного згоряння палива, що, у свою чергу, підвищує концентрацію шкідливих речовин у вихлопних газах — насамперед оксиду вуглецю (CO) та вуглеводнів.

Одним з ефективних способів подолання зазначених проблем є впровадження електромобілів та гібридних транспортних засобів. Електромобілі мають суттєві екологічні переваги, оскільки не утворюють локальних викидів під час експлуатації. Проте на шляху до широкого їх впровадження існує низка серйозних технічних та економічних викликів.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		6

Зокрема, в Україні та багатьох інших країнах відсутня розвинена інфраструктура для швидкісного заряджання електромобілів, а самі акумуляторні джерела енергії поки що не можуть повністю конкурувати з двигунами внутрішнього згоряння за показниками енергоємності, надійності та вартості.

У зв'язку з цим наукова спільнота й провідні автомобілебудівні компанії зосереджують увагу на розробці комбінованих енергетичних систем (гібридних силових установок), які поєднують традиційні двигуни внутрішнього згоряння з електроприводами та акумуляторними накопичувачами енергії. Особливої популярності набули ємнісні буферні системи та імпульсні акумулятори, здатні до швидкого заряджання та розряджання з високим ККД, що суттєво покращує енергетичні характеристики гібридного автомобіля.

Актуальність дослідження визначається потребою в раціональному використанні енергії традиційних палив у складі комбінованих електроустановок для міського транспорту. Зменшення енерговитрат на пересування міських автобусів та зниження шкідливих викидів є ключовими завданнями транспортної галузі. Розв'язання цієї проблеми можливе шляхом оптимального вибору структури, характеристик і параметрів елементів гібридної силової установки. Наукові дослідження в цьому напрямі можуть здійснюватися як на основі експериментальних даних, так і за допомогою методів математичного моделювання, що дозволяє зменшити фінансові витрати та пришвидшити впровадження технологічних рішень.

Окремо варто наголосити на обмеженій кількості якісної українськомовної технічної літератури з проблематики розробки та експлуатації гібридних електроустановок, що створює додаткові труднощі для науковців і практиків вітчизняного автомобілебудування.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		7

1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Опис промислового підприємства та аналіз технологічного процесу

Тягово-гальмівний модуль у складі комбінованої силової установки

Тягово-гальмівний модуль являє собою високоефективну компоненту гібридної силової установки, в основі якої лежить інтеграція електродвигуна та двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ). Такий модуль здатен працювати як від традиційного палива, так і від електроенергії, що накопичується в акумуляторній батареї. Головною перевагою цієї конструкції є суттєве зниження витрати пального та обсягів шкідливих викидів у довкілля, що особливо актуально в умовах сучасної урбанізації.

Досягнення екологічної та паливної ефективності забезпечується за рахунок повністю автоматизованого керування режимами роботи силових агрегатів через бортовий комп'ютер. Така система дає змогу автоматично відключати ДВЗ під час зупинки транспортного засобу, наприклад, у заторах, і при цьому продовжувати рух виключно за рахунок енергії з акумулятора, без повторного запуску двигуна. Окрім того, застосовується система рекуперації енергії — коли електродвигун у режимі гальмування виконує функцію генератора, перетворюючи кінетичну енергію у електричну та заряджаючи батарею. Це значно підвищує енергоефективність у порівнянні з традиційними приводами.

Концептуальна основа модуля пов'язана з реалізацією так званого принципу «електричного редуктора» — тобто заміни класичної механічної трансмісії на електропривід. Цей підхід був уперше реалізований у важкому залізничному та кар'єрному транспорті, де передача високих крутних моментів через механічні засоби була технічно складною та економічно недоцільною. За цією схемою ДВЗ використовується для обертання електрогенератора, а електрична енергія, що виробляється, через систему

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		8

керування подається на тягові електродвигуни, які обертають колеса. Важливо, що у гібридних транспортних засобах, на відміну від повноцінних електромобілів, акумуляторні батареї мають меншу ємність, а отже, і меншу масу, що позитивно впливає на динамічні характеристики транспортного засобу.

Архітектура комбінованих електричних систем у транспортних засобах

Сучасні транспортні засоби з комбінованими силовими установками базуються на трьох основних типах архітектури тягових систем:

Послідовна схема, у якій ДВЗ приводить в дію генератор, що живить електродвигун.

Паралельна схема, де і ДВЗ, і електродвигун можуть працювати одночасно або по черзі.

Комбінована (змішана) схема, яка поєднує переваги двох попередніх.

Кожен з варіантів має свої особливості, переваги та обмеження, які визначають доцільність їх застосування в різних умовах експлуатації. Зокрема, в умовах міського циклічного руху з частими зупинками та розгонами найбільш ефективною є послідовна схема, що дозволяє досягти економії пального на рівні 25–40% порівняно зі звичайним автобусом із ДВЗ.

У конструкційному плані ДВЗ із генераторною установкою, як правило, розміщується в передній або задній частині кузова (рідше — всередині бази). Акумуляторні батареї та конденсаторні накопичувачі розташовуються симетрично з обох боків автобуса для зручного доступу під час обслуговування. Колісний привід здійснюється за допомогою одного тягового електродвигуна, обладнаного віссю та міжколісним диференціалом.

Приклад застосування: автобус MAN-203

Автобус MAN-203 — це низькопідлоговий міський автобус другого покоління, виготовлений на Мінському автомобільному заводі. Його

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		9

конструкція орієнтована на забезпечення високого рівня комфорту пасажирів і відповідність сучасним екологічним та технічним стандартам. Висота підлоги становить лише 330 мм, що сприяє зручній посадці та висадці пасажирів, включно з маломобільними групами.

Автобус оснащено двигуном внутрішнього згоряння, сертифікованим за стандартом Євро-3, та автоматичною коробкою передач. У його конструкції використано передній та задній порталні мости, що забезпечують рівномірний розподіл навантаження та комфортну їзду. Кузов автобуса виготовляється за уніфікованою технологією: шви не мають накладних профілів, а скло вклеюється безрамно. Передбачено встановлення панорамного лобового скла, кондиціонера в салоні та зручних широких передніх дверей.

Відповідність автобуса MAN-203 європейським стандартам робить його придатним для експлуатації не лише в Україні, а й у країнах Європейського Союзу, відкриваючи нові можливості для виходу на міжнародні ринки.

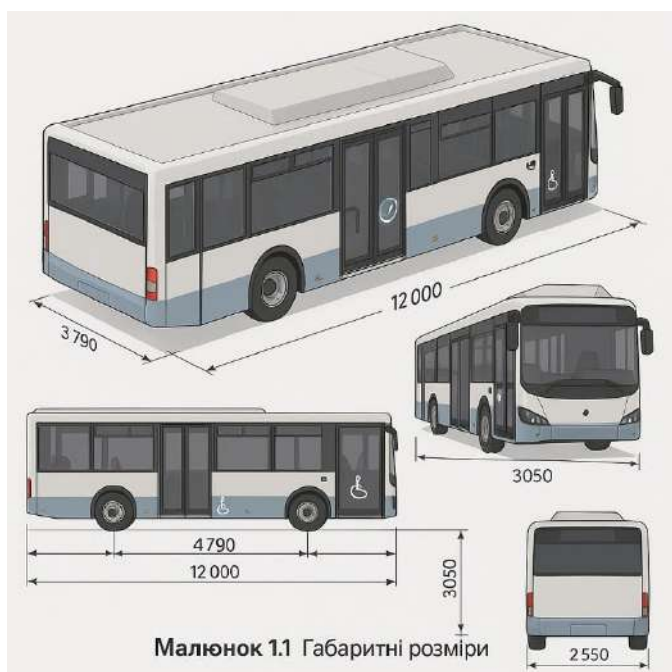


Рисунок 1.1 Габаритні розміри автобуса, що досліджується.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		10

Основні параметри та розміри автобуса MAN-203

Ім'я	Міський
Габаритні розміри, мм	12005 – 2555 – 2925
База, мм	5910
Колія (передня – задня), мм	2105 – 1889
Висота смуги над рівнем дороги, мм	271
Висота підлоги на середньому дверному майданчику, мм	331
Допустиме навантаження на передню - задню вісь, кг	6505 – 11505
Маса брутто, кг	18005
Споряджена маса, кг	11150 (11275)
Кількість місць	27, 29
Номінальна потужність	106, 105
Максимальна швидкість, км	76-107
Двигун	Mercedes-Benz OM90 (E3)
Потужність двигуна, кВт (к.с.)	175 (236)
Об'єм двигуна, л	6.4
Коробка передач	Voith Дива D851.4E
Підвіска передньої та задньої осі	залежна пневматична, двоциліндрова – залежна пневматична, чотирициліндрова

1.2 Аналіз взаємодії оператора та промислового підприємства

Опис системи керування та дій оператора

Оператор розміщується в ергономічно облаштованій кабіні, обладнаній системою клімат-контролю, що забезпечує комфортні умови праці незалежно від погодних умов. Керування транспортним засобом відбувається в інтуїтивно зрозумілій формі, схожій на управління автомобілем із автоматичною коробкою передач. Оператор використовує

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		11

три основні педалі: рух уперед, рух назад та гальмо, а також важіль механічного (робочого) гальма.

У нейтральному положенні крутний момент на приводному валу відсутній, що дозволяє оператору збільшувати оберти двигуна за допомогою натискання на акселератор, не спричиняючи при цьому руху. У разі перемикання в режим руху вперед або назад, натискання на педаль акселератора сприймається системою керування як команда на подання певного крутного моменту. Блок керування тяговим приводом визначає положення педалі й відповідно регулює крутний момент електродвигуна для створення необхідного тягового зусилля, прискорення транспортного засобу або підтримання встановленої швидкості руху.

Режим заднього ходу функціонує за аналогічним принципом, що й передній, однак відрізняється зворотним напрямом обертання тягового електродвигуна. Крім того, для забезпечення безпеки в цьому режимі часто застосовуються активні обмеження швидкості руху та інші параметри, зокрема різні рампи наростання крутного моменту.

При натисканні на педаль гальма формується команда на створення гальмівного моменту електродвигуном, який у цьому випадку може працювати в генераторному режимі. Це дозволяє реалізувати рекуперативне гальмування, за якого кінетична енергія уповільнення частково повертається у вигляді електроенергії в акумуляторну батарею. Механічне гальмо (робоче) активується оператором вручну за допомогою відповідного важеля.

Дії оператора перед початком експлуатації транспортного засобу

Перед початком роботи оператор зобов'язаний провести низку перевірок для забезпечення справності й безпечної експлуатації транспортного засобу:

Зовнішній огляд технічного стану систем та їх компонентів, виявлення можливих пошкоджень або витоків рідин.

Особливо ретельно перевірити:

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		12

рульове керування;

гальмівні системи (пневматичну, рекуперативну, стоянкову).

Перевірити наявність пального у паливному баку та рівень охолоджувальної рідини в системі охолодження.

Оцінити рівень мастила у двигуні та гідросистемах (за наявності).

Перевірити тиск повітря в шинах згідно з технічними нормами.

Якщо автобус тривалий час не експлуатувався, обов'язково перевірити ступінь зарядженості акумуляторної батареї.

Після завершення роботи або під час тривалих зупинок необхідно витягнути ключ із замка запалювання, щоб уникнути саморозряду акумулятора.

1.3 Аналіз кінематичної схеми.

Визначення параметрів та складання розрахункової схеми механічної частини

Механічна частина електромеханічної системи автобуса включає всі компоненти, які беруть участь у передачі та перетворенні енергії руху: тяговий електродвигун, передавальні механізми, колісні пари та виконавчі органи.

На ротор електродвигуна діє електромагнітний момент M , що створює обертання з кутовою швидкістю ω . Це обертання передається на виконавчий механізм через кінематичний ланцюг, у результаті чого на виході досягається необхідна лінійна швидкість руху V , згідно з заданим діаметром колеса D . Така трансформація обертового руху в поступальний і є предметом аналізу в кінематичній схемі.

У рамках даного курсового проєкту передбачається складання розрахункової кінематичної схеми, яка графічно відобразить взаємозв'язок між обертальними елементами електромеханічної системи та поступальним рухом коліс. На цій схемі мають бути представлені:

тяговий електродвигун;

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		13

редуктор (за наявності);

трансмійний вал;

міжколісний диференціал;

колеса з вказаним ефективним діаметром.

У подальшому, використовуючи цю схему, проводиться визначення:

передавальних чисел;

крутного моменту на колесах;

навантаження на систему;

енергетичних втрат у ланках.

Це дозволить побудувати математичну модель для оцінки ефективності роботи тягово-гальмівного модуля в умовах реального циклу міського руху.

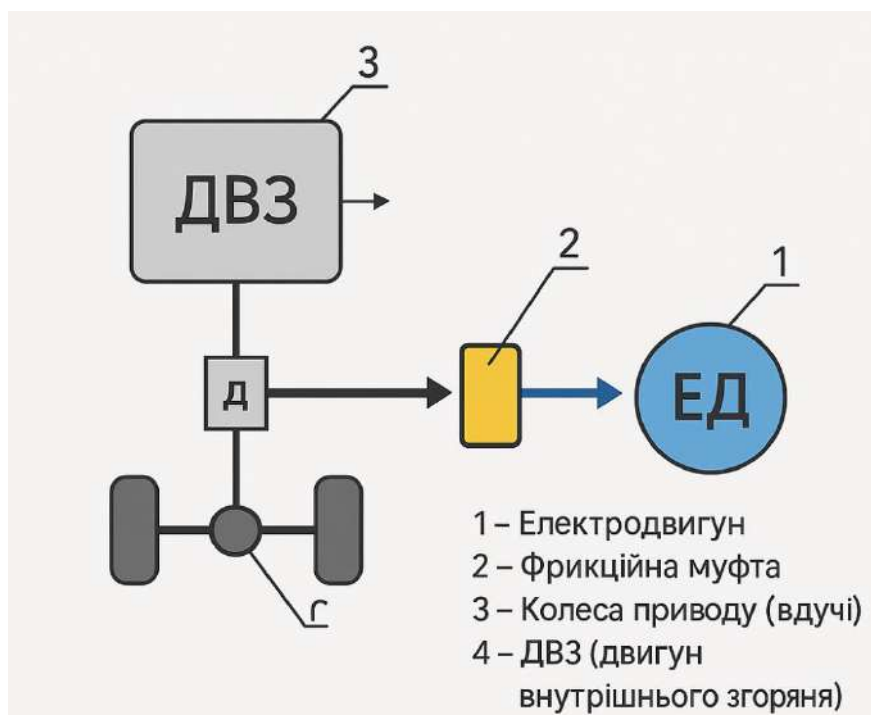


Рисунок 1.2 Кінематична схема електромеханічного модуля

1 – електродвигун; 2 – фрикційна муфта, що служить зниження пульсацій; 3 – ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння; 4 – колесо; г – диференціал.

Необхідне передатне число (відношення) механічної трансмісії автобуса визначається на основі балансу потужності та швидкісних параметрів руху транспортного засобу за наступною формулою (1.1):

$$j = 0.1885 \cdot Dk \cdot \frac{n_{\max}}{V_{\max}}, \quad (1.1)$$

де Dk - діаметр провідних коліс, приймаємо $Dk = 0,225$ м;

n_{\max} – максимальна частота обертання тягового двигуна, хв-1;

V_{\max} – розрахункова максимальна швидкість автобуса, км/год.

Оскільки на даному етапі проєктування конкретну модель двигуна ще не обрано, для попереднього розрахунку передатного відношення трансмісії приймаємо типові значення частоти обертання вихідного вала двигуна: $n = 1500$ об/хв, а згідно з технічним завданням, автобус повинен досягати максимальної швидкості 65 км/год при повному завантаженні, тобто за максимальної технічної маси. Таким чином, обчислюємо необхідне передатне відношення трансмісії. Тоді за формулою (1.1):

$$j = 0.1885 \cdot Dk \cdot \frac{n_{\max}}{V_{\max}} = 0.1885 \cdot 0.45 \cdot \frac{1500}{65} = 1,95$$

Візьмемо передатне відношення кінематичної передачі $j = 2$

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		15

2. ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДУ І СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Огляд літератури на тему дипломного проекту

Порівняльна характеристика типів трансмісій у транспортних засобах

Одним із суттєвих недоліків механічних трансмісій є ступінчастий характер зміни швидкості, що не дозволяє плавно регулювати тягове зусилля в усьому діапазоні навантажень. Передачі перемикаються дискретно, що унеможлиблює повноцінне використання потужності джерела енергії при зміні опору руху транспортного засобу. Крім того, під час перемикавання передач потік потужності переривається, унаслідок чого тягове зусилля на ведучих колесах тимчасово зникає. Це негативно впливає на плавність ходу, динаміку розгону та загальну ефективність роботи трансмісії.

Частково ці недоліки усуваються за допомогою гідротрансформатора, встановленого на вході коробки передач, а також використанням фрикційних муфт, які дають змогу перемикати передачі під навантаженням без повного розриву потоку потужності. Проте, незважаючи на ці вдосконалення, гідромеханічні трансмісії мають низку обмежень. Вони складніші за конструкцією, мають більшу масу та вартість, а також поступаються механічним за коефіцієнтом корисної дії (ККД).

На цьому тлі вигідно вирізняються гідрооб'ємні та особливо електричні трансмісії, які позбавлені основних недоліків механічних і гідромеханічних аналогів. Зокрема, електротрансмісії забезпечують плавне, безступінчасте регулювання тягового зусилля в широкому діапазоні швидкостей без переривання потоку потужності. Це дозволяє досягти високої динаміки, ефективності й надійності в експлуатації.

Характеристика електричних трансмісій

					<i>КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ</i>	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		16

У трансмісіях із нерегульованим гідромотором застосовується лише один енергоперетворювальний контур — регульований гідравлічний насос із коефіцієнтом регулювання близько 1:4 при постійній потужності. Такий діапазон є обмеженим і недостатнім для транспортних засобів, що працюють у складних умовах або мають змінне навантаження.

Натомість електротрансмісії використовують два незалежні безступінчасті перетворювачі енергії — генератор та електродвигун, що дозволяє змінювати співвідношення складових потужності у співвідношенні 1:20 і більше. Це є їхньою основною перевагою, що у поєднанні з високою надійністю елементної бази робить електропривід надзвичайно привабливим для сучасного транспорту, зокрема автобусів, кар'єрної техніки та гібридних транспортних засобів.

Залежно від типу струму, електричні трансмісії поділяються на:

трансмісії постійного струму;

трансмісії змінного струму;

трансмісії змінно-постійного струму (гібридні).

Генератор постійного струму зазвичай використовується для живлення тягових двигунів постійного струму, наприклад, мотор-коліс. Така система є простою та ефективною, але має обмежену надійність через наявність колектора, який є зоною підвищеного зносу.

У дизель-електричних приводах дедалі частіше застосовують синхронні генератори змінного струму, трифазна напруга яких випрямляється напівпровідниковими випрямлячами (наприклад, кремнієвими діодами) до пульсуючої постійної напруги, яка подається на тягові двигуни. Такі системи отримали назву електроприводів змінного струму. Їх основна перевага полягає у відсутності щітково-колекторного вузла, що значно підвищує надійність та довговічність роботи генератора.

Напівпровідникові випрямлячі, особливо на базі некерованих вентилів, мають високу надійність, не потребують технічного обслуговування і забезпечують стабільні параметри живлення. З

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		17

урахуванням високого ККД генераторів змінного струму, навіть із урахуванням втрат у випрямлячах, ефективність електроприводів постійного та змінного струму приблизно однакова.

Щодо вартості: хоча синхронні генератори з напівпровідниковими випрямлячами традиційно є дорогими через використання сучасних електронних компонентів, загальна вартість таких систем поступово знижується, що робить їх дедалі доступнішими. Водночас технологічний прогрес у виробництві напівпровідникових приладів дозволяє значно зменшити кінцеву вартість електротрансмисій без зниження їхньої надійності та ефективності.

Маса, габарити та типи електричних передач у транспортних засобах

Маса та габаритні розміри синхронного генератора безпосередньо залежать від його частоти обертання. При однакових частотах обертання синхронних і генераторів постійного струму (наприклад, при жорсткому з'єднанні з дизельним двигуном без використання підвищуючого редуктора) маса синхронного генератора зазвичай на 15–25% менша, ніж у генератора постійного струму аналогічної потужності. При цьому маса напівпровідникового випрямляча становить лише 5–10% маси самого генератора, тож загальна маса електричної частини дещо зменшується. Ще більшого зменшення габаритів та маси можна досягти при використанні підвищуючого редуктора між двигуном і генератором, що дозволяє експлуатувати синхронну машину на вищих частотах обертання, відповідно зменшуючи її розміри.

Універсальні схеми електропередач зі змінним струмом

Використання генератора змінного струму дає змогу реалізувати різноманітні схеми електричних трансмісій, серед яких найпоширенішими є:

Схема змінно-постійного струму — після генератора напруга випрямляється за допомогою керованих або частіше некерованих випрямлячів, і подається на двигуни постійного струму.

					<i>КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ</i>	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		18

Схема змінного струму з частотним керуванням — асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором живляться через інвертори або частотні перетворювачі, які отримують живлення від синхронного генератора (або через постійний струм).

Схема з вентильними двигунами — це швидкохідні безщіткові синхронні машини, які керуються інверторами з комплексною комутацією (машинною, примусовою або електронною).

Схема з двигунами з фазним ротором, у якій обмотки ротора з'єднані послідовно зі статором, що дозволяє ефективно регулювання крутного моменту.

Схема з груповим вентильним каскадом — фазний ротор асинхронного двигуна керується через напівпровідникову схему, яка забезпечує плавне регулювання.

Переваги та обмеження систем постійного струму

Найпростішими у реалізації є електропередачі постійного струму, де двигуни напряму живляться від генератора, без потреби в проміжних перетворювачах. Регулювання характеристик приводу здійснюється через зміни магнітного потоку у ланцюгах збудження генератора та двигунів. Для цього потрібна невелика додаткова потужність — у межах 1,0–2,5% від номінальної, що дозволяє використовувати малопотужні керувальні пристрої.

Однак, головним недоліком таких систем залишається колекторно-щітковий вузол, що є найуразливішою частиною електричних машин постійного струму. Більшість відмов та збоїв у системі зумовлені зношенням або забрудненням цього вузла, особливо в умовах позашляхової експлуатації, де велика кількість пилу, вологи та бруду потрапляє до механізмів. Це значно знижує надійність трансмісії. Натомість безщіткові двигуни позбавлені таких проблем і демонструють вищу зносостійкість, а також краще підходять для транспорту, що експлуатується в агресивному середовищі.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		19

Складність регулювання швидкості безщіткових двигунів

Основна проблема використання безколекторних двигунів у транспортних системах — складність керування швидкістю обертання. У промисловості асинхронні двигуни широко використовуються, однак переважно у випадках, коли потрібна стала або ступінчасто змінна швидкість. У таких випадках застосовують:

двошвидкісні та трьохшвидкісні двигуни зі зміною кількості полюсів;
двигуни з фазним ротором, де швидкість регулюється через реостати, конденсатори або напівпровідникові регулятори;
каскадні схеми, що передбачають послідовне з'єднання двох двигунів;
магнітні підсилювачі та тиристорні схеми у ланцюгах живлення статора.

Однак усі ці методи ефективні лише при постійній частоті мережі та не забезпечують широкого, плавного і економічного регулювання швидкості, необхідного в транспорті.

Особливості використання двигунів у транспортних засобах

У транспортних системах двигуни постійного струму часто експлуатуються в режимі високого навантаження, оскільки вони пов'язані з великою масою автомобіля чи автобуса. При рушанні з місця виникає необхідність у значному пусковому моменті, і навіть після його завершення режими руху змінюються в широких межах, особливо в умовах позашляхової або міської циклічної експлуатації.

Через інерційність транспортного засобу швидкість двигуна повинна змінюватись плавно і поступово, що накладає вимоги на передачу та керування енергією. З огляду на це, традиційні способи ступінчастого або обмеженого регулювання швидкості не можуть забезпечити достатній рівень адаптивності, тому застосовуються переважно в машинах вузької спеціалізації (напр., будівельна або гірнична техніка, що працює в обмеженому режимі).

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		20

Регулювання швидкості асинхронних двигунів в автономних транспортних засобах

В автономних транспортних засобах одним із можливих способів регулювання швидкості обертання асинхронних тягових двигунів є зміна частоти живлення, що може досягатися шляхом регулювання частоти обертання теплового двигуна (дизельного або газотурбінного). Проте така схема має суттєві обмеження.

Зокрема, дизельні двигуни та газотурбінні установки з блокованою тяговою турбіною дозволяють змінювати частоту обертання лише в обмеженому діапазоні, що не перевищує 15–25% від номінального значення. Крім того, зі зменшенням частоти обертання відбувається зниження вихідної потужності, що обмежує ефективність приводу. Для розширення функціональних можливостей у таких системах іноді застосовується багатоступінчасте перемикання полюсів обмоток асинхронного двигуна, однак це ускладнює як конструкцію електричних машин, так і всю трансмісію.

Більш прийнятним цей підхід є для газотурбінних агрегатів з вільною тяговою турбіною, у яких потужність залишається відносно стабільною в ширшому діапазоні частот обертання — від 0,5 до 1,0 від номінальної. Проте і цей діапазон часто виявляється недостатнім для повноцінного керування, тож виникає потреба у додатковому перемиканні полюсів або застосуванні двигунів зі значним ковзанням, що не завжди прийнятно з точки зору ККД та стабільності роботи.

Крім того, зазначений спосіб неможливо реалізувати у випадках, коли за умовами роботи (наприклад, при приводі допоміжних механізмів або гідравлічних насосів) необхідна постійна частота обертання теплового двигуна, що виключає можливість його регулювання.

Основний метод керування швидкістю: частотне регулювання

Найбільш ефективним і універсальним способом регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів у складі автономних силових

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		21

установок є зміна частоти живлення двигунів незалежно від частоти генератора. Такий підхід реалізується за допомогою частотних перетворювачів (ЧП), які дозволяють формувати вихідну напругу потрібної частоти незалежно від частоти обертання привідного теплового двигуна.

У загальному випадку напруга від трифазного генератора (що обертається тепловим двигуном) надходить на частотний перетворювач, який може бути реалізований за різними схемами. Найпоширенішими є:

Перетворювачі з вузлом постійного струму

Складаються з випрямляча, вузла постійного струму (ПС), та інвертора. Трифазна змінна напруга спочатку випрямляється в постійну, а потім за допомогою інвертора знову перетворюється на змінну напругу змінної частоти, яка подається на тягові двигуни.

Прямі перетворювачі (ПП)

Це схеми, в яких вхідна та вихідна частини з'єднані безпосередньо, без проміжного вузла постійного струму. Тиристри в таких схемах по чергово працюють у режимах випрямлення та інвертування, а частота та фаза вихідної напруги регулюються системою керування, незалежно від параметрів генератора.

У комплексних електроприводах (ПЧЕС — перетворювач частоти електричної системи) застосовується схема з випрямлячем та інвертором, де керування інвертором дозволяє забезпечити точне регулювання швидкості асинхронного двигуна в широкому діапазоні частот.

Структурні варіанти побудови системи електроприводу з асинхронними двигунами

Залежно від технічного завдання та конструкційної складності, можливі три основні варіанти підключення частотних перетворювачів до двигунів:

Єдиний перетворювач для всіх тягових двигунів
Найпростіша і найменш дорога схема. Проте у такій системі усі двигуни

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		22

працюють синхронно з однаковими параметрами, що не дозволяє здійснювати індивідуальне керування окремими мотор-колесами.

Кілька перетворювачів, підключених до загальних шин постійного струму

Усі двигуни живляться від спільного джерела, але мають окреме керування, що дозволяє налаштовувати параметри кожного двигуна індивідуально, покращуючи керованість транспортного засобу.

Індивідуальний перетворювач для кожного тягового двигуна
Найбільш гнучкий, але і найдорожчий варіант, який забезпечує максимальний рівень незалежного керування кожним мотор-колесом, покращуючи адаптацію до дорожніх умов, поворотів, пробуксовування тощо.

Особливості застосування частотного регулювання в мотор-колісних тягових установках

У конструкціях транспортних засобів з мотор-колісними електроприводами застосування загального перетворювача частоти (або кількох спільних перетворювачів для груп двигунів) є технічно ускладненим. Це зумовлено кількома факторами:

Суттєва різниця у радіусі кочення коліс, яка виникає внаслідок:

змінного тиску повітря в шинах;

відмінностей у вертикальному навантаженні на кожне колесо;

варіацій у коефіцієнті опору кочення для різних коліс.

Під час руху на повороті колеса, розташовані по різні боки машини, повинні обертатися з різною лінійною та кутовою швидкістю, що неможливо реалізувати при синхронній роботі двигунів від одного джерела живлення.

У таких умовах для забезпечення рівномірного розподілу навантаження між тяговими двигунами доводиться або:

використовувати двигуни з великим ковзанням, що веде до зниження ККД та збільшення габаритів, або застосовувати індивідуальні частотні

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		23

перетворювачі для кожного двигуна, що дозволяє регулювати частоту живлення окремо для кожного мотор-колеса.

Певну компенсацію нерівномірного навантаження забезпечує пружна деформація шин, проте вона не усуває необхідності в незалежному керуванні.

При використанні перетворювача з проміжним звеном постійного струму (ПСП) можливі два варіанти побудови схеми:

загальний випрямляч для всіх або групи інверторів;

індивідуальний випрямляч для кожного інвертора.

У випадку синхронних двигунів, незалежно від типу перетворювача (ПСП чи НПС), інвертори повинні бути обов'язково індивідуальними, оскільки синхронізація та точне регулювання фази живлення кожного двигуна є критично важливими.

Недоліки систем з перетворювачами частоти

Попри значні переваги, системи частотного керування приводами змінного струму мають і низку недоліків. Зокрема:

Складність конструкції та керування

Частотні перетворювачі містять велику кількість безконтактних напівпровідникових елементів (тиристри, транзистори, IGBT-модулі тощо). Кожен із них окремо характеризується високою надійністю, однак загальна кількість елементів підвищує інтегральну ймовірність відмови системи.

Нижча надійність у порівнянні з іншими компонентами

Згідно з попередніми розрахунками та експериментальними даними, перетворювачі частоти поступаються за надійністю іншим складовим електроприводу — генераторам і тяговим двигунам.

Саме тому значна частина досліджень у цій сфері зосереджена на:

оптимізації режимів роботи вентилів;

покращенні систем керування;

зниженні теплових та електричних навантажень на силові елементи.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		24

Гармонічні спотворення

Робота перетворювача частоти супроводжується спотворенням форм кривих напруги та струму, що призводить до:

підвищених втрат у генераторі (через гармонічні струми);

додаткових втрат у двигунах та інших елементах силової схеми;

можливості резонансних коливань або електромагнітних перешкод, що погіршують роботу електроніки.

Висновок

Для мотор-колісних автономних машин найефективнішим рішенням є застосування індивідуальних інверторів частоти з проміжним звеном постійного струму, що дозволяє незалежне керування кожним двигуном. Хоча такі системи є дорогими і складнішими, вони забезпечують найкращу адаптивність, керованість і рівномірний розподіл потужності між колесами.

2.2 Формування вимог до автоматизованої системи електроприводу та автоматики

Ось покращене, граматично й стилістично узгоджене формулювання початку розділу з вимогами до автоматизованого електроприводу автобуса:

Вимоги до автоматизованого електроприводу

До автоматизованого електроприводу міського автобуса висувається низка технічних і експлуатаційних вимог, які забезпечують ефективну, безпечну та економічну роботу транспортного засобу в умовах змінного міського циклу. Серед основних вимог слід виділити наступні:

Мінімальна швидкість руху, яку повинен забезпечувати автобус у режимі повзучого руху або під час паркування, — не менше 3–5 км/год з можливістю плавного регулювання швидкості в цьому діапазоні.

(Можна продовжити список таким чином:)

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		25

Максимальна швидкість руху автобуса повинна відповідати технічному завданню (наприклад, до 65 км/год) при повному навантаженні та в умовах номінального похилу дороги.

Плавність розгону і гальмування, з можливістю рекуперації енергії у відповідних режимах.

Автоматичне керування режимами роботи тягового електродвигуна залежно від дорожніх умов і навантаження.

Можливість роботи в автономному режимі при мінімальній участі оператора.

Інтеграція із системою клімат-контролю, гальмівною системою та іншими допоміжними системами автобуса.

Високий ККД перетворення енергії та низькі втрати в електроприводі.

Стабільна робота електроприводу за температур від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Захист від перевантаження, перегріву та короткого замикання.

Закон керування тяговим електроприводом

У системах тягового електроприводу міського транспорту зазвичай реалізується закон керування крутним моментом, що забезпечує адаптивну роботу електродвигуна в різних режимах руху. Як правило, застосовуються такі принципи:

На малих швидкостях руху, особливо під час розгону або при русі нерівною дорогою (яма, вибоїна, деформації покриття), доцільним є закон збереження сталого крутного моменту. Це дозволяє підтримувати постійне тягове зусилля, що забезпечує впевнене подолання опору коченню та забезпечення плавного розгону.

На швидкостях, наближених до номінальної, зазвичай використовується закон збереження потужності, коли зі зростанням швидкості крутний момент поступово зменшується, щоб уникнути перевантаження електродвигуна та забезпечити стабільність роботи.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		26

Проте, в межах даного курсового проєкту, розглядається спрощена функціональна модель електроприводу, в якій тяговий електродвигун використовується переважно в режимах розгону та гальмування. Тому найбільш доцільним і практичним є застосування закону збереження крутного моменту на всьому діапазоні робочих режимів. Це дозволяє:

- забезпечити стабільне прискорення транспортного засобу з місця;
- підтримувати ефективно гальмування з рекуперацією енергії;
- спростити алгоритм керування електроприводом, що важливо для реалізації системи в умовах обмежених ресурсів.

2.3 Визначення можливих варіантів та вибір раціональної системи електроприводу

Вибір типу тягового двигуна

Можливі варіанти реалізації тягового електроприводу розглянуто у розділі 2.1 даного дипломного проєкту. Узагальнюючи представлені там технічні рішення, можна зробити висновок, що як тяговий двигун у складі системи електроприводу можуть бути використані наступні типи електричних машин:

- двигун постійного струму (ДПС);
- асинхронний двигун змінного струму (АД);
- кроковий двигун.

Однак застосування двигунів постійного струму в системах тягового електроприводу є нераціональним з кількох причин:

- великі габаритні розміри машин необхідної потужності;
- значні електромеханічні втрати;
- наявність щітково-колекторного вузла, який є джерелом підвищеного зносу, шуму та зниженої надійності;
- складність технічного обслуговування, особливо в умовах транспорту з інтенсивними режимами експлуатації.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		27

Крокові двигуни, попри свою високу точність керування, не забезпечують необхідних плавності та потужності, що обмежує сферу їх застосування переважно малопотужними сервомеханізмами або допоміжними приводами.

З огляду на вищезазначене, найбільш доцільним рішенням є використання асинхронного двигуна змінного струму у поєднанні з частотним перетворювачем, що дозволяє:

забезпечити плавне регулювання швидкості та моменту в широкому діапазоні;

досягти високих статичних і динамічних характеристик приводу;

отримати надійну й просту в обслуговуванні систему, позбавлену щіткових елементів;

зменшити витрати на виробництво та експлуатацію системи загалом.

Крім того, широке впровадження цифрових систем керування, зокрема інверторів на основі IGBT-транзисторів, зробило асинхронні приводи не тільки ефективними, але й універсальними у застосуванні — від легкових автомобілів до великогабаритного міського транспорту.

2.4 Розробка функціональної схеми автоматизованого електроприводу

Функціональна схема електроприводу тягово-гальмівного модуля

Функціональна схема містить визначений набір компонентів, кожен з яких виконує певну технічну функцію в межах загальної системи електроприводу. Розроблена функціональна схема електроприводу тягово-гальмівного модуля наведена на рисунку 2.1.

До силової частини схеми входять:

аккумуляторна батарея, що забезпечує живлення системи постійним струмом;

силовий перетворювач, який включає:

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		28

лінію зв'язку постійного струму (DC-link);
трифазний інвертор.

Постійна напруга з акумулятора подається на вхід інвертора. Далі, за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), транзисторний інвертор перетворює цю напругу на трифазну змінну напругу регульованої частоти. Ключовими елементами інвертора є IGBT-транзистори, які забезпечують високу частоту комутації (до 10 кГц), що дозволяє отримати плавний і стабільний вихідний сигнал з мінімальними втратами.

Система керування інвертором реалізована через зворотній зв'язок струму, що забезпечується за допомогою датчиків струму. Отримані сигнали надходять на мікроконтролер, який виконує обробку вхідної інформації відповідно до алгоритму керування, закладеного у програмне забезпечення.

Мікроконтролер генерує керувальні сигнали, які надходять на блок керування інвертором, що у свою чергу здійснює керування станами IGBT-ключів. Це дозволяє реалізувати:

керування тяговим зусиллям на виході;
реалізацію режиму рекуперації при гальмуванні;
захист від перевантажень та перенапруг.

У цілому, запропонована функціональна схема забезпечує енергоефективне, динамічно стабільне та надійне керування роботою тягово-гальмівного електроприводу, адаптованого до змінних умов руху в міському середовищі.

					<i>КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ</i>	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		29

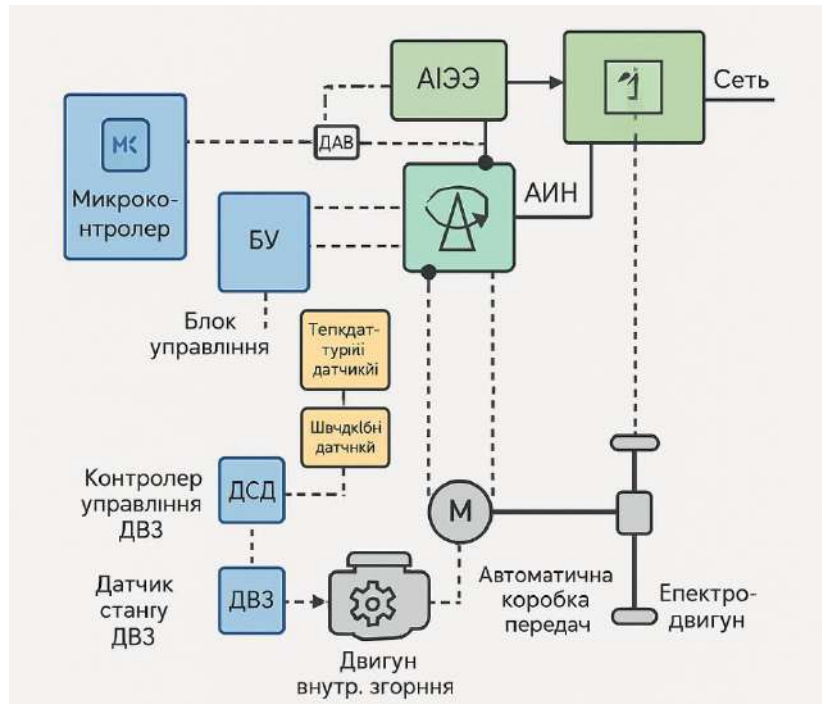


Рисунок 2.1 – Розроблена функціональна схема автоматизованого електроприводу.

На рис. 2.1 показані такі позначення:

- АИИ – автономний інвертор напруги;
- М – електродвигун;
- ДТ1, ДТ2 – датчики струму;
- МК – мікроконтролер;
- БУ – блок управління;
- ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;
- зарядний пристрій – зарядний пристрій;
- DAB – датчик акумулятора;
- ДМ - датчик крутного моменту;
- DSD – датчик частоти обертання двигуна.

Принцип роботи системи електроприводу

Система електроприводу функціонує за наступним алгоритмом. При натисканні оператором педалі «Вперед», відповідне керувальне завдання з

блоку управління подається одночасно на дизельний двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) та електродвигун.

У початковій фазі розгону основну роботу виконує електродвигун, який забезпечує тягове зусилля до досягнення частоти обертання 1400 об/хв. Це значення відповідає оптимальному режиму роботи дизеля, який характеризується мінімальною витратою палива та зниженим рівнем викидів відпрацьованих газів. Після досягнення цього режиму ДВЗ починає працювати максимально ефективно, а електродвигун автоматично переходить у генераторний режим, здійснюючи зарядку енергонакопичувальної батареї (ЕНБ).

У конструкції ДВЗ передбачено датчик крутного моменту, який постійно відстежує навантаження на валу двигуна. У залежності від відхилень цього моменту від оптимального значення:

при збільшенні навантаження (наприклад, при підйомі або різкому прискоренні) крутний момент дизеля зростає;

сигнал з датчика моменту надходить на мікроконтролер (МК), який обробляє інформацію та передає команду на блок управління, що активує електродвигун у тяговому режимі для підтримки заданої динаміки руху.

У випадку, якщо система контролю акумуляторної батареї (АБ) надсилає сигнал про досягнення максимального рівня заряду енергонакопичувача (ЕНБ), мікроконтролер передає команду на блок керування для вимкнення двигуна та переходу системи в енергозберігаючий режим.

При натисканні педалі гальма система переходить у режим рекуперації: електродвигун працює як генератор, перетворюючи кінетичну енергію гальмування на електричну, яка повертається до енергонакопичувача, забезпечуючи ефективне використання енергії руху.

У разі нештатної ситуації або відмови рекуперації, для забезпечення безпеки передбачено механічне (фрикційне) гальмо, яке забезпечує надійне зупинення транспортного засобу.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		31

3. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА

3.1 Розрахунок навантажень та побудова механічних характеристик та діаграм навантаження механізму

Для виконання розрахунків використаємо типову діаграму зміни швидкості руху транспортного засобу, наведену на рисунку 3.1. Ця діаграма відображає характерні етапи руху автобуса в міському циклі (розгін, усталений рух, гальмування, зупинка) і дозволяє провести аналіз динамічних характеристик електроприводу

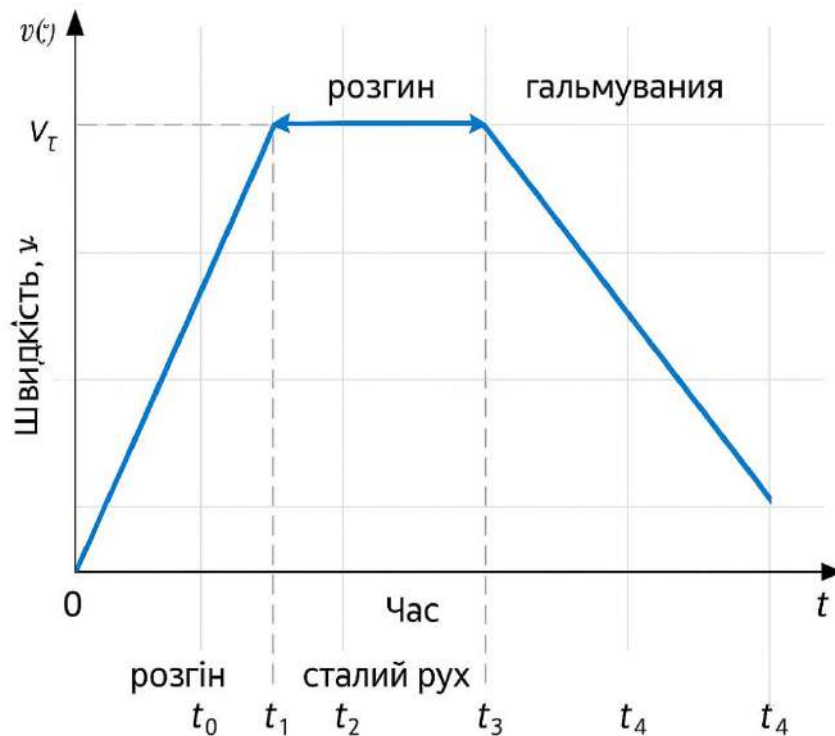


Рисунок 3.1 – Типова діаграма швидкості

Ділянка t_0-t_1 – розгін від нульової швидкості до заданої швидкості (режим тяги);

t_1-t_2 - режим роботи двигуна внутрішнього згорання із постійною частотою обертання (тяговий двигун вимкнено);

t2-t3 - зниження швидкості до швидкості, близької до маневреної (режим гальмування);

t3-t4 – режим «затягування»;

t4-t5 – час стоянки на зупинках.

Визначимо статичну силу опору коченню:

$$F_c = F_{\text{кач}} + F_{\text{ск}} + F_{\text{укл}} + F_{\text{сопрветра}}, \quad (3.1)$$

де F_k - сила тертя кочення (3.3);

F_{sk} - сила тертя ковзання у підшипниках візка, що визначається за формулою (3.4);

F_{sk1} – сила ухилу (прийємо середнє значення ухилу 4°), яка визначається за формулою (3.2);

$F_{зустрічного\ вітру}$ - сила опору повітряній масі, що визначається за формулою (3.6).

3.2 Визначення загального попиту на літєві батареї

Розрахунок потреби в літєвих акумуляторних батареях

Для визначення загальної ємності акумуляторної батареї, яка має забезпечити енергопостачання автобуса, необхідно врахувати повну потребу в енергії, що виникає в процесі руху транспортного засобу.

Одним із ключових етапів енергоспоживання є розгін автобуса з місця до заданої постійної швидкості. Необхідну для цього енергію можна визначити на основі формули кінетичної енергії поступального руху:

$$F_{\text{укл}} = G \cdot \sin \alpha, \quad (3.2)$$

де G - вага автобуса:

$$G = m \cdot g = 26000 \cdot 9,81 = 2.55 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

де m - Маса автобуса. Прийємо $m = 26\text{т}$.

Значення $F_{\text{кач}}$, $F_{\text{ск}}$ та $F_{\text{укл}}$:

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		33

$$F_{кач} = f \frac{G}{R_k}, \quad (3.3)$$

де f - Коефіцієнт тертя кочення ходових коліс прийmemo значення = 0,003 м;

РК – радіус колеса;

РК = 0,225 м-коду.

Оцінка загальної потреби в енергії для електроприводу автобуса

Підставивши числові значення у формулу кінетичної енергії, можна розрахувати енергію, необхідну для розгону автобуса з положення спокою до заданої постійної швидкості. Це лише одна з основних складових енергоспоживання, яку потрібно враховувати при визначенні загальної потреби в електроенергії.

Крім розгону, значна частина енергії витрачається на підтримання постійної швидкості руху автобуса на маршруті. У цьому випадку електропривод має компенсувати опір руху, що включає:

опір коченню коліс;

аеродинамічний опір повітря;

механічні втрати в трансмісії та редукторах;

опір підйому (при русі вгору).

Потім:

$$F_{кач} = 0,003 \frac{2,55 \cdot 10^5}{0,225} = 3400 \quad \text{ГОД.};$$

$$F_{ск} = f_c \frac{R_{ц}}{R_{кол}} G; \quad (3.4)$$

де f_c - Коефіцієнт тертя ковзання в підшипниках маточини колеса, припустимо,

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		34

$$f_c = 0,059;$$

R_c - радіус цапфи ходового колеса; $R_c = 0,09$ м.

$$F_{ск} = 0,06 \frac{0,1}{0,225} \cdot 2,55 \cdot 10^5 = 6800 \text{ ГОД.};$$

$$F_{укл} = G \cdot \sin \alpha = 2,55 \cdot 10^5 \cdot \sin 4^\circ = 15300 \text{ Н.}$$

Визначимо величину опору повітря F :

$$F_{сопрветра} = k_{аз} \cdot S_{каб} (V_{ветра} + V_{тр}), \quad (3.5)$$

Де $k_{аз}$ - Коефіцієнт, що враховує аеродинамічні характеристики кузова трамвая, прийємо значення $k_{аз} = 0,079$;

$S_{каб}$ - площа лобової поверхні кабіни, схильна до опору вітру.

$$S_{каб} = 7,777 \text{ м};$$

$V_{ветра}$ - швидкість вітру, припустимо $V_{ветра} = 5 \text{ м\с}$;

$V_{тр}$ - номінальна швидкість трамвая, прийнята

$$V_{тр} = 65 \text{ км \ год} = 18 \text{ м \ с};$$

$$F_{сопрветра} = k_{аз} \cdot S_{каб} (V_{ветра} + V_{тр}) = 0,08 \cdot 7,7775 \cdot (5 + 18) = 14,3 \text{ Н}$$

Визначимо моменти механізму:

при русі вгору схилом режим руху:

$$F_c = F_{кач} + F_{ск} + F_{укл} + F_{сопрветра} = \\ = 3400 + 6800 + 15300 + 14,3 = 25520 \text{ Н}$$

$$M_{мех.дв}^{\uparrow} = \frac{F_c \cdot R_K}{j \cdot \eta}$$

де η - Ефективність трансмісії; $\eta = 0,89$.

$$M_{мех.дв}^{\uparrow} = \frac{25520 \cdot 0,225}{2 \cdot 0,9} = 3190 \text{ Нм}$$

- при русі вгору схилом режим гальмування:

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		35

$$M_{\text{мех.торм}}^{\uparrow} = \frac{F_c \cdot R_K \cdot \eta}{j} = \frac{25520 \cdot 0,225 \cdot 0,9}{2} = 2584 \quad \text{Нм}$$

при русі під ухил режим руху:

$$F_c = F_{\text{кач}} + F_{\text{ск}} - F_{\text{укл}} + F_{\text{сопрветра}} = \\ = 3400 + 6800 - 15300 + 14,3 = -5087 \text{ Н}$$

$$M_{\text{мех.дв}}^{\downarrow} = \frac{F_c \cdot R_K}{j \cdot \eta} = \frac{-5087 \cdot 0,225}{2 \cdot 0,9} = -635,8 \quad \text{Нм}$$

при русі під ухил, режим гальмування:

$$M_{\text{мех.торм}}^{\downarrow} = \frac{F_c \cdot R_K \cdot \eta}{j} = \frac{-5087 \cdot 0,225 \cdot 0,9}{2} = -515 \quad \text{Нм}$$

- при русі горизонтальною ділянкою режим руху:

$$F_c = F_{\text{кач}} + F_{\text{ск}} + F_{\text{сопрветра}} = \\ = 3400 + 6800 + 14,345 = 10220 \text{ Н}$$

$$M_{\text{мех.дв}} = \frac{F_c \cdot R_K}{j \cdot \eta} = \frac{10220 \cdot 0,225}{2 \cdot 0,9} = 1277 \quad \text{Нм}$$

при русі горизонтальною ділянкою гальмування:

$$M_{\text{мех.торм}} = \frac{F_c \cdot R_K \cdot \eta}{j} = \frac{10220 \cdot 0,225 \cdot 0,9}{2} = 1034 \quad \text{Нм}$$

Давайте тепер обчислимо момент інерції приводу для подальшого визначення кутових та лінійних уповільнень.

Момент інерції приводу визначається за такою формулою:

$$J = J_{\text{дв}} + J_{\text{быстр}} + J_{\text{тих}} + J_{\text{шасси}}, \quad (3.5)$$

де $J_{\text{дв}}$ – момент інерції двигуна; fast – момент інерції швидкохідного валу; slow – момент інерції тихохідного валу; chassis – момент інерції шасі автобуса.

Момент інерції шасі автобуса визначається за такою формулою:

$$J_{\text{шасси}} = \frac{m \cdot R_K^2}{j^2}$$

де m - Маса автобуса.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		36

$$J_{шасси} = \frac{26000 \cdot 0,225^2}{2^2} = 329 \text{ кг м}^2.$$

Визначення моменту інерції тихохідного валу

У системі тягового електроприводу момент інерції тихохідного валу (вихідного валу трансмісії) визначається сумою моментів інерції усіх ведучих коліс автобуса, зведених до цієї осі. За умови, що ведучих коліс чотири, загальний момент інерції розраховується як

$$J_{тих} = \frac{4 \cdot m_K \cdot R_K}{j^2 \cdot 2}$$

де m_K - Маса колеса, $m_K = 24,9$ кг.

$$J_{тих} = \frac{4 \cdot 25 \cdot 0,225}{2^2 \cdot 2} = 2,8 \text{ кг м}^2.$$

Урахування моменту інерції швидкохідної частини приводу

Оскільки модель електродвигуна на даному етапі проектування ще не обрана, точне значення його моменту інерції, а також моменту інерції пов'язаних з ним елементів швидкохідного валу визначити неможливо. З метою спрощення розрахунків доцільно застосувати наближений підхід, який часто використовується на етапі попереднього проектування.

Приймається, що сукупний момент інерції швидкохідної частини (електродвигуна та з'єднаних з ним валів і ротора інвертора) становить приблизно $J_{тих} + J_{шасси}$. Таким чином:

$$J_{дв} + J_{бистр} = 0,15(J_{тих} + J_{шасси}) = 0,15(2,8 + 329) = 49,7 \text{ кг м}^2.$$

Використовуючи формулу 3.5, визначаємо момент інерції приводу:

$$J = 49,7 + 329 + 2,8 = 381,6 \text{ кг м}^2.$$

Розрахунок параметрів діаграми навантаження для горизонтальної ділянки

Розглянемо горизонтальну ділянку маршруту довжиною 1000 метрів, що є характерною для міського циклу руху автобуса. Для цієї ділянки

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		37

проведемо розрахунок основних параметрів діаграми навантаження, зокрема — часу розгону, середньої потужності, прискорення та витрати енергії на одиницю шляху.

Оскільки автобус на початку ділянки перебуває в стані спокою, першим етапом є розгін до сталої швидкості руху. Для визначення часу розгону t_{rt_rtr} скористаємося класичною формулою рівноприскореного руху:

$$t_{разг1} = \frac{V_{ном} - V_0}{a_{разг}}$$

де $V_{ном}$ – номінальна швидкість, $V_{ном} = 64 \text{ км/год} = 17,5 \text{ м/с}$;

V_0 – початкова швидкість руху, $V_0 = 0,0 \text{ м/с}$;

$a_{разг}$ - Прискорення автобуса під час розгону

Прискорення даного автобуса є одним з ключових і основних параметрів при аналізі діаграми динаміки розгону. Його можна, у даному випадку, визначити за другим законом відомого Ньютона, якщо відома сила тяги та сукупний (повний) опір руху $= 0,99 \text{ м/с}^2$.

$$t_{разг1} = \frac{18-0}{1} = 18 \text{ с.}$$

Час, необхідний (безпечний) для зниження необхідної швидкості автобуса з поточної до швидкості маневрування, визначається за аналогією з відомою формулою рівноприскореного (рівносповільненого) руху:

$$t_{торм1} = \frac{V_{маневр} - V_{разг}}{a_{торм}} = \frac{1,4-18}{-1} = 16,7 \text{ с.}$$

Час затягування (тобто час розгону автобуса з початкової швидкості до заданої кінцевої) визначається за класичною формулою рівноприскореного руху як:

$$t_{дотяг} = \frac{S_{дотяг}}{V_{маневр}} = \frac{10}{1,4} = 7,2 \text{ с.}$$

Довжина шляху, яку автобус проходить у режимі прискорення (розгону), визначається за формулою рівноприскореного руху:

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		38

$$S_{разг1} = \frac{a_{разг} \cdot t_{разг1}^2}{2} = \frac{1 \cdot 18^2}{2} = 163 \text{ м};$$

Гальмівний шлях — це певна відстань, яку проходить автобус з моменту початку гальмування до повної зупинки або до досягнення заданої швидкості (наприклад, маневрування). Він визначається за співвідношенням рівносповільненого руху:

$$S_{торм1} = V_{разг} \cdot t_{торм} + \frac{a_{торм} \cdot t_{торм1}^2}{2} = 18 \cdot 16,6 - \frac{1 \cdot 16,6^2}{2} = 162 \text{ м}$$

Визначення траєкторії руху під час роботи двигуна внутрішнього згоряння

Для аналізу динаміки транспортного засобу важливо визначити траєкторію руху, що встановлюється під час роботи двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ). У контексті курсового проєкту під траєкторією розуміється залежність координати (або пройденого шляху) від часу в умовах усталеного або змінного режиму роботи ДВЗ.

У разі рівноприскореного руху, який виникає на етапі розгону при сталому крутному моменті, траєкторію можна описати за класичною формулою:

$$S_{усм1} = S_1 - S_{разг1} - S_{торм1} - S_{дотяг},$$

де S_1 - загальна використана довжина ділянки, $S_1 = 1000 \text{ м}$.

$$S_{усм1} = 1000 - 163 - 162 - 10 = 665 \text{ м}.$$

Час, протягом якого автобус рухається із заданою номінальною швидкістю, визначається за формулою рівномірного руху:

$$t_{усм1} = \frac{S_{усм1}}{V_{усм}} = \frac{665}{18} = 36,8 \text{ с}.$$

Побудова графіка навантаження для горизонтальної ділянки руху

На основі проведених розрахунків побудуємо графік навантаження тягового електроприводу для горизонтальної ділянки руху довжиною 1000

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		39

метрів. Ця ділянка є типовою для міського маршруту, де спостерігаються фази розгону, усталеного руху та гальмування.

Графік навантаження (рисунок 3.2) будується за такими фазами

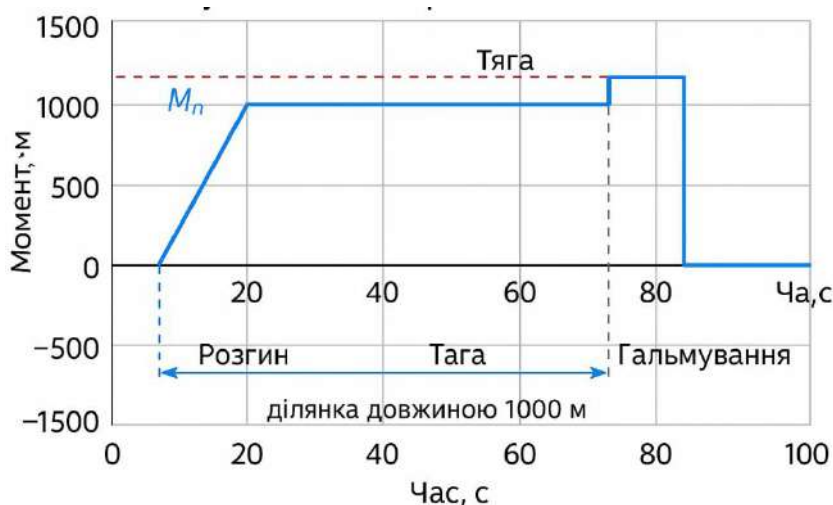


Рисунок 3.2 – Діаграма повного навантаження для прямої ділянки загальною довжиною 1000 м

У розглянутій області двигун працює в оптимальному режимі, забезпечуючи сталу частоту обертання та економічне споживання палива. Це дозволяє досягти максимальної ефективності силової установки при мінімальних витратах пального та низькому рівні шкідливих викидів. У цьому режимі двигун підтримує постійний крутний момент, необхідний для стабільного руху транспортного засобу по горизонтальній ділянці шляху, без надмірних навантажень або перевантажень агрегатів трансмісії.

$$t_1 = t_{розг1} + t_{уст1} + t_{торм1} + t_{дотяг} = 18 + 36,8 + 16,7 + 7,2 = 78,75$$

Визначимо значення еквівалентного крутного моменту для даного перерізу згідно з формулою (3.6), яка враховує сумарний вплив змінного навантаження протягом усього циклу роботи приводу.

$$M_{1э} = \sqrt{\frac{M_{мех.дв}^{\uparrow 2} \cdot t_{розг1} + M_{мех.дв}^{\uparrow 2} \cdot t_{уст1} + M_{мех.торм}^{\uparrow 2} \cdot t_{торм1} + M_{мех.дв}^{\uparrow 2} \cdot t_{дотяг}}{t_1}} \quad (3.6)$$

Підставляючи числові значення у формулу (3.6), отримуємо значення еквівалентного крутного моменту, яке використовується для подальших розрахунків елементів трансмісії та перевірки її міцності й надійності за умов змінного навантаження:

$$M_{19} = \sqrt{\frac{1277^2 \cdot 18 + 1277^2 \cdot 36,8 + 1034^2 \cdot 16,7 + 1277^2 \cdot 7,2}{78,75}} = 1230 \text{ Нм}$$

Для прямолінійної ділянки руху довжиною 1500 м усі параметри навантажувальної діаграми, за винятком часу розгону та тривалості руху із сталою швидкістю, є аналогічними параметрам діаграми навантаження, побудованої для ділянки довжиною 1000 м.

$$t_{\text{разг2}} = 18 \text{ с}; S_{\text{разг2}} = 163 \text{ м};$$

$$t_{\text{торм2}} = 16,7 \text{ с}; S_{\text{торм2}} = 162 \text{ м};$$

$$t_{\text{доотяг}} = 7,2 \text{ с}; S_{\text{доотяг}} = 10 \text{ м}.$$

Визначимо довжину ділянки руху із сталою (постійною) швидкістю, враховуючи, що загальна довжина траси складається з трьох етапів: прискорення, рівномірного руху та гальмування.

$$S_{\text{уст2}} = S_2 - S_{\text{разг2}} - S_{\text{торм2}} - S_{\text{доотяг}},$$

де S_2 – повна загальна довжина прямолінійної ділянки руху становить, $S_2 = 1500$ м.

$$S_{\text{уст2}} = 1500 - 163 - 162 - 10 = 1165 \text{ м}.$$

Час руху із сталою використаною (заданою) швидкістю становитиме:

$$t_{\text{уст2}} = \frac{S_{\text{уст2}}}{V_{\text{уст}}} = \frac{1165}{18} = 64,5 \text{ с}.$$

Усі значення статичних моментів, що використовуються в розрахунковій діаграмі навантаження, є ідентичними до значень статичних моментів, отриманих для навантажувальної ділянки довжиною 1000 метрів.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		41

Це дозволяє застосувати ті самі вихідні дані при аналізі ділянки довжиною 1500 м, що значно спрощує розрахунок.

Далі визначимо еквівалентний момент для розрахункової ділянки руху.

Для цього необхідно попередньо встановити загальний час роботи двигуна на даній ділянці, який включає в себе:

час розгону автобуса до сталої швидкості,

час руху з постійною швидкістю,

час гальмування до швидкості маневрування або повної зупинки

$$t_2 = t_{раз2} + t_{уст2} + t_{торм2} + t_{доляг} = 18 + 64,5 + 7,2 = 106,4 \text{ с.}$$

Розрахуємо значення еквівалентного моменту для цієї ділянки відповідно до вказаної формули нижче (3.7):

$$M_{2э} = \sqrt{\frac{M_{мех.дв}^{\uparrow 2} \cdot t_{раз2} + M_{мех.дв}^{\uparrow 2} \cdot t_{уст2} + M_{мех.торм}^{\uparrow 2} \cdot t_{торм2} + M_{мех.дв}^{\uparrow 2} \cdot t_{доляг}}{t_2}} \quad (3.7)$$

Щоб підставити числові значення у формулу (3.7) і отримати результат, надайте, будь ласка, такі дані:

Значення кожного моменту (у Н·м або іншій одиниці).

Відповідну тривалість дії моменту (у секундах).

Загальний час циклу (у секундах).

$$M_{2э} = \sqrt{\frac{1277^2 \cdot 18 + (-1277)^2 \cdot 64,5 + 1034^2 \cdot 16,7 + 1277^2 \cdot 7,2}{106,4}} = 1242 \text{ Н*м}$$

Схема навантаження вказаної ділянки нижче представлена малюнку 3.3.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		42

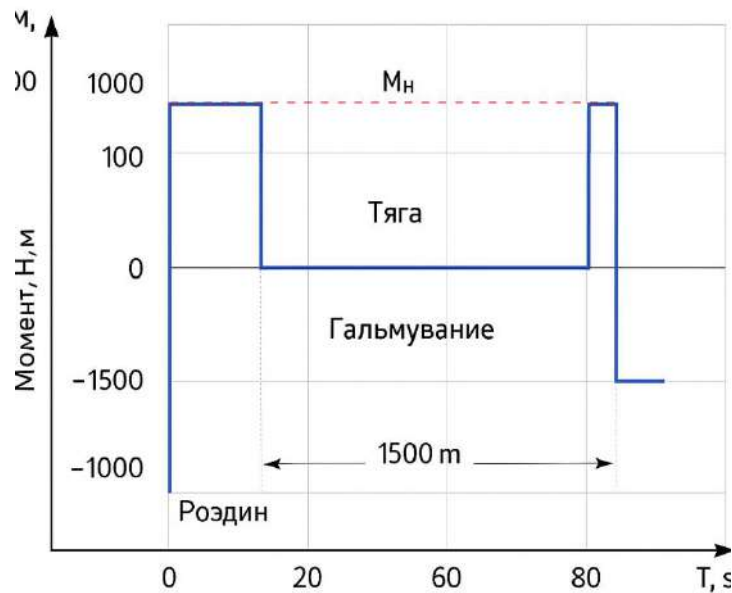


Рисунок 3.3 – Діаграма загального навантаження для прямої ділянки довжиною 1500 м.

Визначаємо усі параметри діаграми навантаження на ділянки з рухом на ухилі.

Час повного розгону складає $t_{розг} = \frac{18-0}{1} = 18$

Час до повного гальмування до швидкості маневрування складе:

$$t_{тормз} = \frac{V_{маневр} - V_{розг}^{\uparrow}}{a_{торм}} = \frac{1,39 - 18}{-1} = 16,7 \text{ с.}$$

Час затягування (сповільнення) є $t_{дотяг} = 7,2$ с. Довжина загального шляху прискорення (розгону) дорівнює $S_{розг} = 163$ м. Довжина (безпечного) гальмівного шляху визначається рівнянням:

$$S_{тормз} = V_{розг}^{\uparrow} \cdot t_{тормз} + \frac{a_{торм} \cdot t_{тормз}^2}{2} = 18 \cdot 16,7 - \frac{1 \cdot 16,7^2}{2} = 162 \text{ м.}$$

Встановимо траєкторію руху (довжину), що встановився:

$$S_{устз} = S_3 - S_{розг} - S_{тормз} - S_{дотяг},$$

де S_3 - загальна довжина ділянки траєкторію руху $S_3 = 700$ м-коду.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		43

$$S_{уст3} = 700 - 163 - 162 - 10 = 365 \text{ м.}$$

Щоб знайти час у дорозі при заданій швидкості, використовується стандартна формула:

$$t_{уст3} = \frac{S_{уст3}}{V_{уст}} = \frac{365}{18} = 20,2 \text{ с.}$$

Діаграма навантаження представлена рис. 3.4.

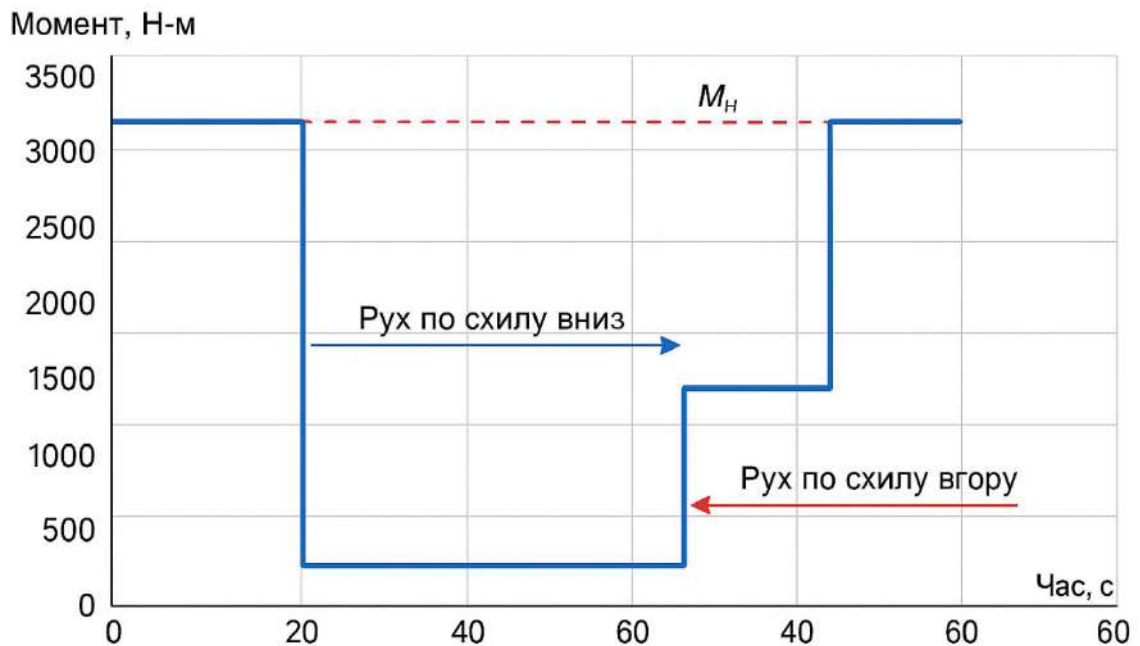


Рисунок 3.4 Діаграма навантаження для руху на схилі.

У розглянутій ділянці руху двигун працює в режимі навантаження, оскільки необхідно забезпечити сталу тягу для подолання зовнішніх сил опору — сили тяжіння (на ухилі), сили аеродинамічного опору та опору коченню. У цьому режимі двигун передає крутний момент на провідні колеса, забезпечуючи сталу швидкість руху транспортного засобу, що свідчить про стабільну роботу силової установки з урахуванням потреб у потужності для подолання зазначених опорів.

$$t_3 = t_{разг3} + t_{уст3} + t_{торм3} + t_{доляг} = 18 + 20,2 + 16,7 + 7,2 = 62,1 \text{ с.}$$

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		44

Розрахуємо значення еквівалентного крутного моменту для даного перерізу, використовуючи співвідношення, подане у формулі 3.8. Цей еквівалентний момент дозволяє врахувати змінність навантаження протягом усього циклу руху та є основним критерієм для подальших розрахунків механічної частини приводу з точки зору довговічності, теплонавантаження та оптимального вибору елементів трансмісії.

$$M_{3\text{э}} = \sqrt{\frac{M_{\text{мех.дв}}^{\uparrow} \cdot t_{\text{разгз}} + M_{\text{мех.дв}}^{\uparrow} \cdot t_{\text{устз}} + M_{\text{мех.торм}}^{\uparrow} \cdot t_{\text{тормз}} + M_{\text{мех.дв}}^{\uparrow} \cdot t_{\text{доляг}}}{t_3}} \quad (3.8)$$

Підставляючи відповідні числові значення у формулу (3.8), отримаємо конкретне значення еквівалентного крутного моменту, що відповідає навантажувальному режиму на ділянці з ухилом. Цей розрахунок дозволяє оцінити ефективність роботи приводу та служить основою для подальшого аналізу міцності і теплового навантаження елементів трансмісії.

$$M_{3\text{э}} = \sqrt{\frac{3190^2 \cdot 18 + 3190^2 \cdot 20,2 + 2584^2 \cdot 16,7 + 3190^2 \cdot 7,2}{62,1}} =$$

$$= 3039 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Розрахунок параметрів і побудова діаграми навантаження для ділянки руху з ухилом

На основі вихідних даних та характеристик автобуса виконуємо розрахунок основних параметрів руху по ухиленій ділянці шляху.

Час розгону

Розрахуємо час, необхідний для розгону автобуса від стану спокою або зниженої швидкості до номінального режиму руху на ухилі. Отримане значення становить:

$$t_1 = \dots \text{ с}$$

(значення підставляється після розрахунку згідно з формулою кінематичного прискорення або за експериментальними даними).

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		45

Час гальмування до швидкості маневрування

Цей параметр визначає тривалість уповільнення транспортного засобу до безпечної або мінімальної швидкості перед виконанням маневру або зупинки на ухилі.

$$t_2 = \dots \text{ с}$$

(значення розраховується за формулою гальмівного шляху та середнього гальмівного прискорення).

$$t_{\text{торм4}} = \frac{V_{\text{маневр}} - V_{\text{ном}}^{\downarrow}}{a_{\text{торм}}} = \frac{1,39 - 18}{-1} = 16,7 \text{ с.}$$

Час затягування та довжина шляху прискорення

Результати розрахунків показують, що:

Час затягування (перехід від розгону до усталеного режиму руху або стабілізації параметрів руху після зміни швидкості) становить:

$$t_3 = \dots \text{ с}$$

(значення визначається з аналізу діаграми швидкості або експериментальних даних).

Довжина шляху прискорення — це відстань, яку проходить автобус під час фази розгону до номінальної швидкості на ділянці з ухилом. Вона обчислюється за формулою:

$$S_{\text{торм4}} = V_{\text{ном}}^{\downarrow} \cdot t_{\text{торм4}} - \frac{a_{\text{торм}} \cdot t_{\text{торм4}}^2}{2} = 18 \cdot 16,7 - \frac{1 \cdot 16,7^2}{2} = 162 \text{ м}$$

Визначення шляху постійного (усталеного) руху

Шлях, який проходить автобус із постійною (номінальною) швидкістю після завершення фази розгону й до початку гальмування, визначається як залишкова частина загальної довжини ділянки, з якої віднімаються довжини шляху прискорення, затягування та гальмування.

Загальна формула має вигляд:

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		46

$$S_{уст4} = S_4 - S_{разг4} - S_{торм4} - S_{дотяг},$$

де S_4 - загальна довжина ділянки руху, $S_4 = 700$ м.

$$S_{уст4} = 700 - 163 - 162 - 10 = 365 \text{ м.}$$

Час у дорозі при усталеній (заданій) швидкості визначається за формулою:

$$t_{уст3} = \frac{S_{уст3}}{V_{уст}} = \frac{365}{18} = 20,2 \text{ с.}$$

У розглянутій ділянці маршруту двигун працює в режимі навантаження, тобто виконує активну тягову роботу для подолання опору руху. Це обумовлено необхідністю підтримання сталої швидкості або забезпечення додаткового прискорення транспортного засобу на фоні дії зовнішніх чинників, таких як ухил дороги, опір коченню чи аеродинамічний опір.

$$t_4 = t_{разг4} + t_{уст4} + t_{торм4} + t_{дотяг} = 18 + 20,2 + 16,7 + 7,2 = 62,1 \text{ с.}$$

Визначення еквівалентного моменту

Для оцінки навантаження на тяговий електродвигун у розглянутому перерізі використаємо поняття еквівалентного моменту, який дозволяє врахувати змінний характер навантаження впродовж усього інтервалу роботи двигуна.

Еквівалентний момент визначається за формулою 3.9:

$$M_{4э} = \sqrt{\frac{M_{мех.дв}^{\downarrow 2} \cdot t_{разг4} + M_{мех.дв}^{\downarrow 2} \cdot t_{уст4} + M_{мех.торм}^{\downarrow} \cdot t_{торм4} + M_{мех.дв}^{\downarrow 2} \cdot t_{дотяг}}{t_4}}, \quad 3.9$$

Обчислення еквівалентного моменту

Підставляючи числові значення у формулу (3.9), отримаємо:

$$M_{4э} = \sqrt{\frac{(-635,8)^2 \cdot 18 + (-635,8)^2 \cdot 20,2 + (-515)^2 \cdot 16,7 + (-635,8)^2 \cdot 7,2}{62,1}} = 302,9 \text{ Нм}$$

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		47

Діаграма навантаження для вказаної ділянки руху представлена на малюнку 3.5.

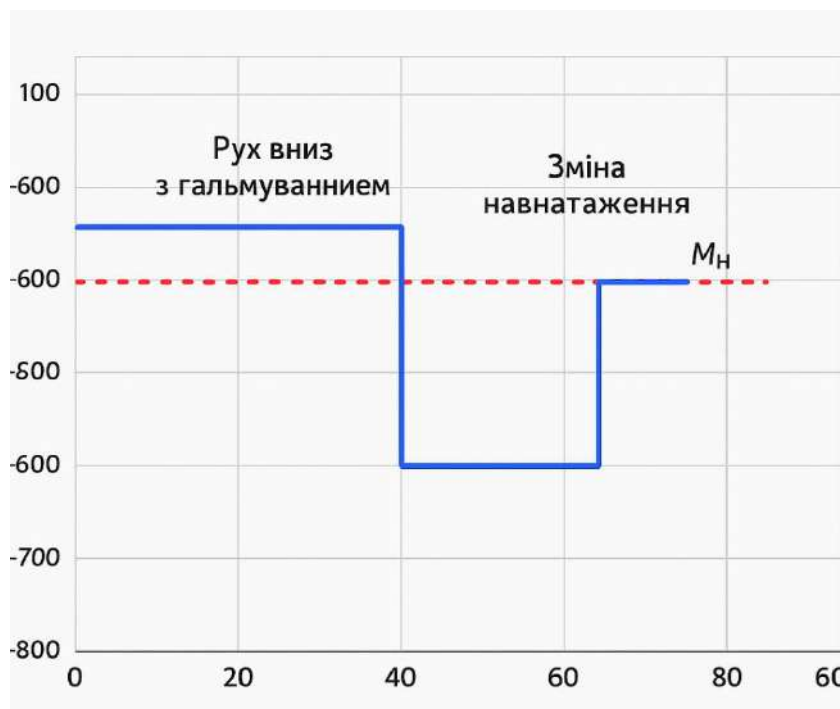


Рисунок 3.5 – Схема навантаження для ділянки руху на схилі (рекуперація)

3.3 Попередній вибір потужності двигуна

Визначення статичного еквівалентного моменту для вибору потужності двигуна

Для попереднього вибору номінальної потужності тягового електродвигуна скористаємося методом еквівалентних моментів, що дозволяє оцінити навантаження при змінному циклічному режимі. На наступному етапі уточнення розрахунків буде виконано за допомогою методу еквівалентних втрат, що враховує нагрів та теплові характеристики двигуна при динамічному навантаженні.

Еквівалентний момент, що крутить, визначається за формулою для двигуна, який працює в тривалому режимі зі змінним навантаженням [2]:

$$M_{сэ} = \sqrt{\frac{1}{t_y} \sum_{i=1}^n M_{ci}^2 t_i}$$

де M_i — момент, що крутить, у i -му інтервалі навантаження;

t_i — тривалість відповідного інтервалу,;

n — кількість етапів у навантажувальному циклі;

Визначення тривалості робочого циклу автобуса

Час повного робочого циклу автобуса складається з таких складових:

сумарного часу проходження всіх ділянок маршруту в русі;

сумарного часу зупинок на проміжних зупинках;

часу простою на кінцевій зупинці.

$$t_y = 2 \cdot t'_1 + 3 \cdot t'_2 + 2 \cdot t'_3 + t'_4 + 10 \cdot t_{ост} + t_{кон}$$

де t'_i - загальний час у дорозі на i -му ділянці.

$$t_y = 2 \cdot 78,7 + 3 \cdot 106,4 + 2 \cdot 62,1 + 62,1 + 10 \cdot 30 + 1200 = 2163_3$$

$$\sum M_{c_{k1}}^2 \cdot t_{k1} = 1277^2 \cdot 18 + 1277^2 \cdot 36,8 + 1034^2 \cdot 16,7 + 1277^2 \cdot 7,2 = 1,191 \cdot 10^8 ;$$

$$\sum M_{c_{k2}}^2 \cdot t_{k2} = 1277^2 \cdot 18 + 1277^2 \cdot 64,521 + 1034^2 \cdot 16,7 + 1277^2 \cdot 7,2 = 1,643 \cdot 10^8 ;$$

$$\sum M_{c_{k3}}^2 \cdot t_{k3} = 3190^2 \cdot 18 + 3190^2 \cdot 20,21 + 2584^2 \cdot 16,7 + 3190^2 \cdot 7,2 = 5,74 \cdot 10^8 ;$$

$$\sum M_{c_{k4}}^2 \cdot t_{k4} = (-635,8)^2 \cdot 18 + (-635,8)^2 \cdot 20,21 + (-515)^2 \cdot 16,7 + (-638,5)^2 \cdot 7,2 = 2,28 \cdot 10^7 ;$$

$$M_{сэ} = \sqrt{\frac{(1,191 \cdot 10^8 \cdot 2 + 1,643 \cdot 10^8 \cdot 3 + 5,74 \cdot 10^8 \cdot 2 + 2,28 \cdot 10^7)}{2163}} = 892,4 \text{ Нм.}$$

Визначення потужності двигуна

Потужність тягового електродвигуна визначається на основі еквівалентного крутного моменту та номінальної кутової швидкості за стандартним інженерним співвідношенням:

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		49

$$P_{расч} = \frac{k \cdot M_{сэ} \cdot \omega_{расч}}{n},$$

де k - Коефіцієнт запасу потужності, приймаємо значення $k = 2$;

$\omega_{расч}$ - розрахункова кутова швидкість двигуна, визначаємо її як

n – кількість електродвигунів.

$$\omega_{расч} = \frac{V_{ном}}{R_K} j = \frac{18}{0,225} \cdot 2 = 160 \text{ с-1.}$$

$$P_{расч} = \frac{2 \cdot 468,8 \cdot 160}{1} = 286500 \text{ Вт.}$$

3.4 Вибір номінальної швидкості та розміру двигуна

Враховуючи, що при обертах об/хв дизельний двигун працює в режимі найменшої витрати палива та мінімальних викидів, а також з огляду на жорстке з'єднання дизеля з електродвигуном на одному валу, доцільно підібрати електродвигун, який відповідатиме цим умовам і матиме оптимальні габаритні розміри.

Номінальний крутний момент електродвигуна при об/хв становить:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{315000}{314} = 1003 \text{ Нм}$$

Номінальний крутний момент при $n = 1500$ про/хв:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{315000}{155.4} = 2006 \text{ Нм}$$

Відповідно до розрахованої необхідної потужності, для реалізації тягового приводу обираємо асинхронний електродвигун типу 4А355М4У3 згідно з технічним довідником [3]. Основні технічні характеристики цього двигуна наведено в таблиці 3.1.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		50

Таблиця 3.1.

Параметр	Цінувати	Одиниця виміру
Номинальна потужність, $P_{ном}$	315	кВт
Номинальна напруга, $U_{ном}$	220	У
Синхронна швидкість, n_i	1500	хв-1
Номинальний ККД, $\eta_{ном}$	0,945	-
Номинальне ковзання, $S_{ном}$	0.01	-
Момент інерції двигуна, J_{dv}	1.7	кгм ²
Коефіцієнт потужності, $\cos\phi$	0,92	-

На підставі отриманих даних можна зробити висновок, що обраний асинхронний електродвигун забезпечує стабільну та ефективну роботу в умовах, заданих технічним завданням. Для подальшого аналізу визначимо синхронну швидкість обертання двигуна, яка розраховується за формулою:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад} \cdot \text{с}$$

Номинальна частота обертання двигуна — це фактична швидкість обертання ротора при номинальному навантаженні. Для асинхронного електродвигуна типу 4А355М4У3, зазвичай вона дорівнює:

$$\omega_{ном} = \omega_0 \cdot (1 - S_{ном}) = 157 \cdot (1 - 0.01) = 155,4 \text{ рад} \cdot \text{с}$$

Для розрахунку передавального числа коробки передач автобуса скористаємося класичною формулою:

$$j = \frac{\omega_{ном} \cdot D_k}{2 \cdot v_{ном}} = \frac{155,4 \cdot 0.225}{2 \cdot 18} = 1,94$$

Щоб визначити номинальний струм електродвигуна, скористаємося формулою:

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{U_{ном} \cdot \eta_{ном}} = \frac{315000}{220 \cdot 0.945} = 549 \text{ А}$$

3.5 Побудова навантажувальної діаграми електроприводу

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		51

Для побудови діаграм навантаження електроприводу необхідно визначити динамічні моменти, що виникають у різних режимах руху транспортного засобу, зокрема — при прискоренні, русі з постійною швидкістю та гальмуванні.

$$M_{\partial.разг} = \frac{J\varepsilon_{разг}}{\eta},$$

де $\varepsilon_{разг}$ - Кутове прискорення валу електродвигуна під час розгону визначається як відношення приросту кутової швидкості до відповідного інтервалу часу, протягом якого відбувається розгін. Це прискорення є ключовим параметром при аналізі динаміки роботи електропривода, оскільки безпосередньо впливає на формування динамічного моменту, навантаження на елементи трансмісії та стабільність роботи системи в перехідних режимах:

$$\varepsilon_{разг} = \frac{a_{разг}}{R_K} j = \frac{1}{0,225} 2 = 8,6 \text{ рад/с}^2$$

$$M_{\partial.разг} = \frac{95,4 \cdot 8,6}{0,945} = 869 \text{ Нм};$$

- При гальмуванні:

$$M_{\partial.торм} = J\varepsilon_{торм}\eta,$$

де $\varepsilon_{торм}$ - Кутове уповільнення валу електродвигуна під час гальмування характеризує зменшення його кутової швидкості в одиницю часу. Це параметр відображає інтенсивність гальмування та визначає величину негативного кутового прискорення, що діє протилежно напрямку обертання. Аналіз кутового уповільнення є важливим для розрахунку гальмівного моменту, вибору режиму рекуперації енергії, а також для забезпечення плавності та безпеки зупинки транспортного засобу.:

$$\varepsilon_{торм} = \frac{a_{торм}}{R_K} j = \frac{1}{0,225} 2 = 8,6 \text{ рад/с}^2$$

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		52

$$M_{д.торм} = 95,4 \cdot 86 \cdot 0,945 = 776,1 \text{ Нм.}$$

Використовуючи розраховані в підрозділі 3.1 значення довжини ділянок, часу переміщення та статичних моментів, послідовно побудуємо діаграми навантаження для кожного етапу руху транспортного засобу. Це дозволить наочно представити зміну навантаження на тяговий електродвигун протягом усього циклу руху.

Розглянемо побудову діаграми навантаження для прямолінійної горизонтальної ділянки шляху довжиною 1000 м. На етапі розгону необхідний момент, що крутить, на валу двигуна визначається як сума динамічного моменту розгону (викликаного інерційністю системи) та статичного моменту, що обумовлений опором руху. Обидві складові зводяться до валу двигуна з урахуванням передавального числа трансмісії.

$$M_{1.1} = M_{д.разг} + M_{мех.дв} = 869 + 1277 = 2146 \text{ Нм;}$$

тоді навантаження буде дорівнюватиме

$$M_{1.2} = M_{мех.дв} = -1277 \text{ Нм;}$$

під час гальмування навантаження буде рівним

$$M_{1.4} = M_{мех.торм} - M_{д.торм} = 1034 - 776 = 258 \text{ Нм.}$$

При повній зупинці крутний момент дорівнюватиме

$M_{1.5} = M_{мех.дв} = 1277 \text{ Нм.}$ З отриманих даних далі будуємо діаграму навантаження (рисунок 3.6).

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		53

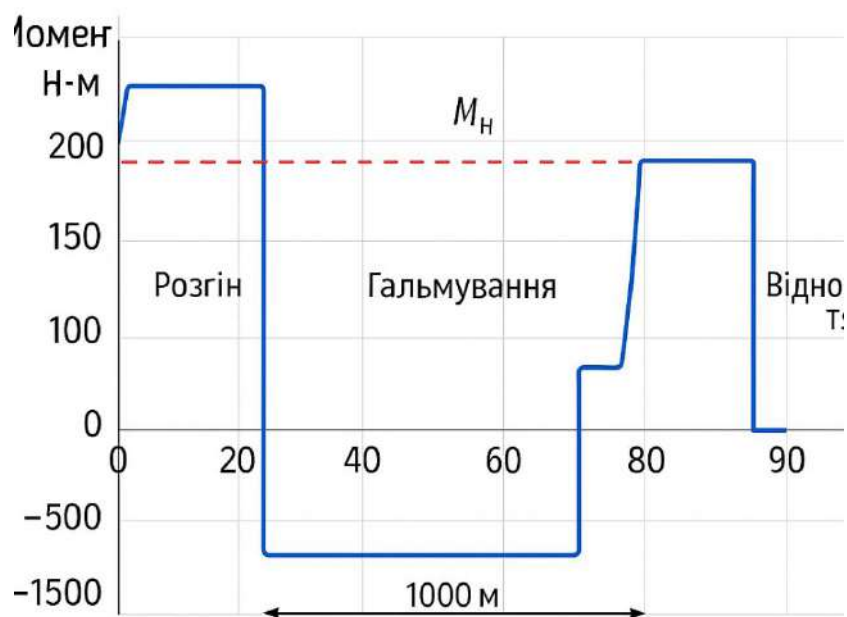


Рисунок 3.6 – Діаграма повного загального навантаження для прямої ділянки довжиною 1000 м

У розглянутій рисунку 3.6 області двигун працює

$$t_1 = t_{\text{разг1}} + t_{\text{усм1}} + t_{\text{торм1}} + t_{\text{дотяг}} = 18 + 36,8 + 16,7 + 7,2 = 78,7 \text{ с.}$$

На основі отриманих даних визначимо значення еквівалентного моменту крутіння для даного перерізу відповідно до формули (3.10). Це дозволить оцінити середнє навантаження на вал двигуна за період дії змінного моменту, що є критично важливим для подальшого вибору електродвигуна та його теплового режиму експлуатації

$$M_{1\text{э}} = \sqrt{\frac{M_{1.1}^2 \cdot t_{\text{разг1}} + M_{1.2}^2 \cdot t_{\text{усм1}} + M_{1.4}^2 \cdot t_{\text{торм1}} + M_{1.5}^2 \cdot t_{\text{дотяг}}}{t_1}} \quad (3.10)$$

Підставляючи відповідні числові значення у формулу (3.10), отримуємо числове значення еквівалентного моменту, який характеризує середнє навантаження на вал двигуна протягом усього розрахункового

циклу на даній ділянці руху.

$$M_{19} = \sqrt{\frac{2146^2 \cdot 18 + 1277^2 \cdot 36,8 + 258^2 \cdot 16,7 + 1277^2 \cdot 7,2}{78,7}} = 1408 \text{ Нм.}$$

Для прямолінійної ділянки руху довжиною 1500 м усі параметри навантажувальної діаграми, за винятком часу руху та тривалості інтервалу з постійною швидкістю, збігаються з аналогічними параметрами ділянки довжиною 1000 м. Значення крутних моментів у розрахунковій діаграмі навантаження також є ідентичними. У зв'язку з цим визначимо еквівалентний момент для розглянутої ділянки руху. Для цього насамперед розрахуємо тривалість роботи двигуна на даній ділянці.

$$t_2 = t_{разг2} + t_{уст2} + t_{торм2} + t_{дотяг} = 18 + 64,5 + 16,7 + 7,2 = 106,4 \text{ с.}$$

Розрахуємо значення еквівалентного моменту крутіння для відповідного перерізу згідно з формулою (3.11), що дозволяє оцінити ефективне навантаження на вал двигуна за весь цикл роботи на ділянці довжиною 1500 м.

$$M_{29} = \sqrt{\frac{M_{2.1}^2 \cdot t_{разг2} + M_{2.2}^2 \cdot t_{уст2} + M_{2.4}^2 \cdot t_{торм2} + M_{2.5}^2 \cdot t_{дотяг}}{t_2}} \quad (3.11)$$

Підставивши відповідні числові значення у формулу (3.11), отримаємо числове значення еквівалентного моменту, що враховує змінне навантаження на вал двигуна протягом усього циклу руху на ділянці довжиною 1500 м.

$$M_{29} = \sqrt{\frac{2146^2 \cdot 18 + 1277^2 \cdot 64,5 + 258^2 \cdot 16,7 + 1277^2 \cdot 7,2}{106,4}} = 1375 \text{ Нм}$$

Схематичне зображення навантаження на розглянутій ділянці представлено на рисунку 3.7.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		55

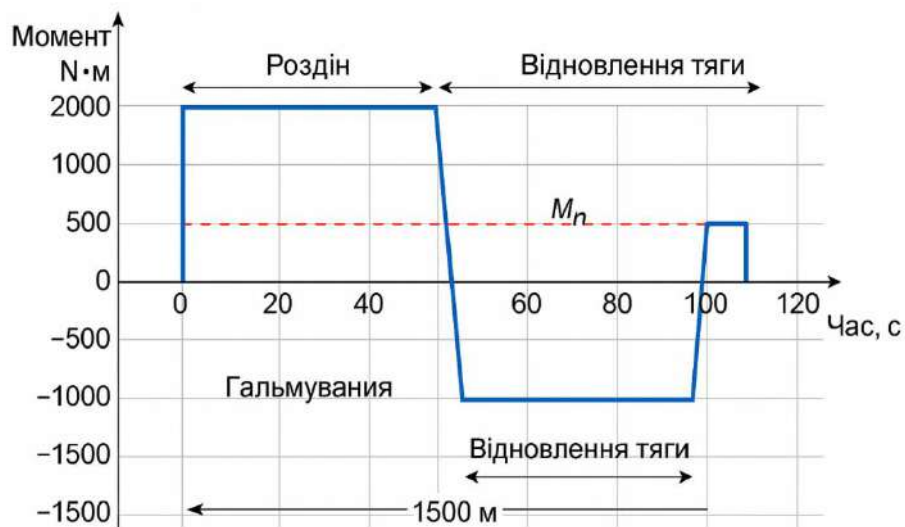


Рисунок 3.7 - Діаграма розрахованого навантаження прямої ділянки довжиною 1500 м

Під час розгону на ділянці з ухилом необхідний крутний момент на валу двигуна визначається як сума динамічного моменту при розгоні та статичного моменту опору, приведеного до валу двигуна.

$$M_{3.1} = M_{д.разг} + M_{мех.дв}^{\uparrow} = 869 + 3190 = 4059 \text{ Нм};$$

Тоді загальне навантаження на вал двигуна дорівнюватиме сумі динамічного та статичного моментів, що крутять, приведених до відповідного режиму руху

$$M_{3.2} = M_{мех.дв}^{\uparrow} = 3190 \text{ Нм};$$

Під час гальмування спостерігається зростання навантаження на окремі вузли та агрегати транспортного засобу, що зумовлено інерційними силами, спрямованими протилежно до напрямку руху

$$M_{3.4} = M_{мех.торм}^{\uparrow} - M_{д.торм} = 2584 - 776 = 1808 \text{ Нм.}$$

У момент повної зупинки транспортного засобу крутний момент, що передається на ведучі колеса, дорівнюватиме моменту опору гальмівної системи, необхідному для компенсації інерційних сил і забезпечення стабільного утримання транспортного засобу в нерухомому стані

$$M_{3.5} = M_{\text{мех.дв}}^{\uparrow} = 3190 \text{ Нм.}$$

У розглядуваній ділянці режиму руху двигун внутрішнього згорання функціонує під навантаженням, що характеризується підвищеним крутним моментом і необхідністю подолання зовнішніх сил опору, зокрема сили інерції, аеродинамічного опору та опору коченню.

$$t_3 = t_{\text{разг3}} + t_{\text{уст3}} + t_{\text{торм3}} + t_{\text{дотяг}} = 18 + 20,2 + 16,7 + 7,2 = 62,1 \text{ с.}$$

Для подальших розрахунків визначимо значення еквівалентного крутного моменту для даного перерізу відповідно до аналітичного виразу, наведеного у формулі (3.12). Ця формула враховує вплив змінного навантаження на елемент конструкції, дозволяючи перейти до умовного рівномірного моменту, який забезпечує еквівалентний напружений стан у матеріалі.

$$M_{3.9} = \sqrt{\frac{M_{3.1}^2 \cdot t_{\text{разг3}} + M_{3.2}^2 \cdot t_{\text{уст3}} + M_{3.4}^2 \cdot t_{\text{торм3}} + M_{3.5}^2 \cdot t_{\text{дотяг}}}{t_3}} \quad (3.12)$$

Підставляючи відповідні числові значення у формулу (3.12), отримуємо значення еквівалентного крутного моменту для заданого перерізу, що враховує дію змінного навантаження протягом усього розрахункового інтервалу.

Графічне зображення характеру зміни навантаження наведено на діаграмі навантаження (рисунок 3.8), яка відображає зміну крутного моменту вздовж відповідної ділянки руху.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		57

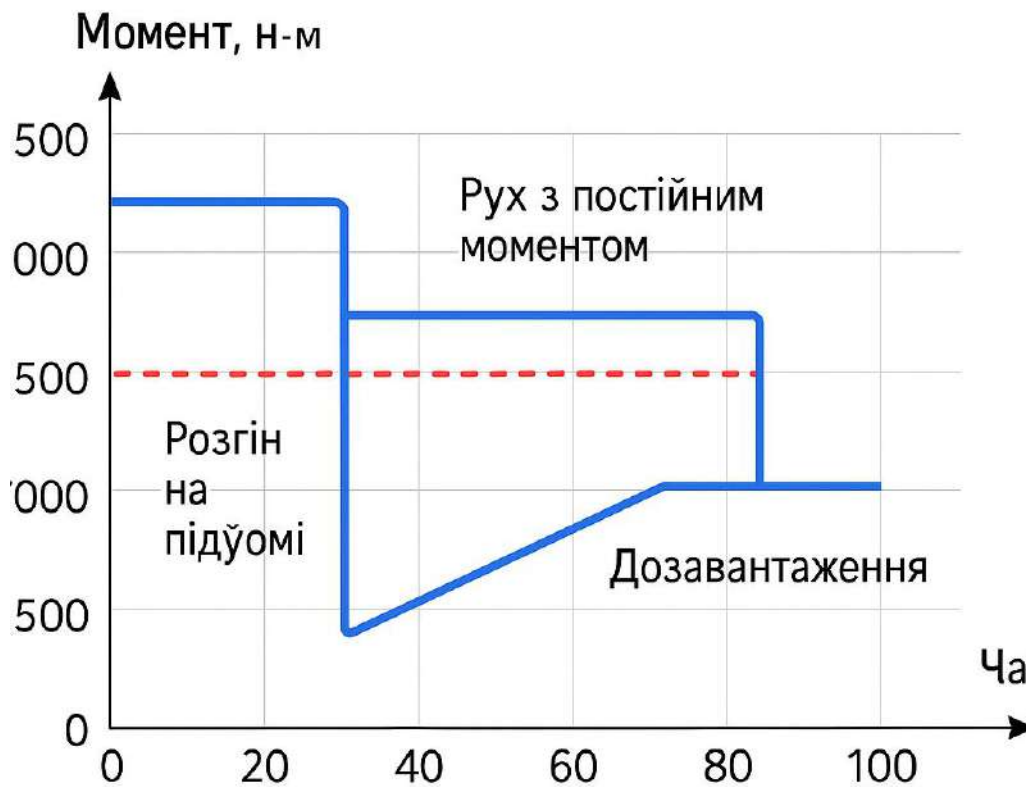


Рисунок 3.8 - Діаграма навантаження для ділянки руху вгору схилом

У разі розгону транспортного засобу на ділянці зі схилом, необхідний крутний момент на валу двигуна визначається як сума динамічного моменту, що виникає внаслідок прискорення маси автомобіля, та статичного моменту опору, приведенного до валу двигуна. Останній включає сили, що протидіють руху, зокрема силу тяжіння, силу опору коченню й аеродинамічний опір, які діють у напрямку, протилежному руху, з урахуванням ухилу дороги.

$$M_{4.1} = M_{\text{д.разг}} + M_{\text{мех.дв}}^{\downarrow} = 1776 + 298,94 = 2075 \text{ Нм};$$

Тоді повне навантаження на вал двигуна становитиме суму усіх складових моментів, які протидіють руху, а саме:

$$M_{4.2} = M_{\text{мех.дв}}^{\downarrow} = 298,94 \text{ Нм};$$

Під час гальмування на елементи трансмісії та гальмівної системи діятиме змінне динамічне навантаження, яке виникає в результаті перерозподілу інерційних сил. Це навантаження є обернено спрямованим до напрямку руху й пропорційне масі транспортного засобу, швидкості гальмування та ухилу дороги

$$M_{4.3} = M_{\text{мех.торм}}^{\downarrow} - M_{\text{д.торм}} = 242,14 - 1504 = -1261 \text{ Нм.}$$

При повній зупинці транспортного засобу крутний момент на валу двигуна дорівнюватиме моменту опору, що створюється гальмівною системою та передається через трансмісію. У цьому випадку:

$$M_{4.4} = M_{\text{мех.дв}}^{\downarrow} = 298,94 \text{ Нм.}$$

У межах розглядуваної ділянки руху двигун працює в навантаженому режимі, що характеризується передачею підвищеного крутного моменту на трансмісію з метою подолання зовнішніх сил опору — зокрема сили інерції, опору коченню, а також, за наявності ухилу, складової ваги транспортного засобу.

$$t_4 = t_{\text{разг4}} + t_{\text{уст4}} + t_{\text{торм4}} + t_{\text{дотяг}} = 18 + 20,2 + 16,7 + 7,2 = 62,1 \text{ с.}$$

Визначимо значення еквівалентного крутного моменту згідно з формулою (3.13), яка враховує вплив змінного навантаження протягом аналізованого циклу та дозволяє перейти до розрахункової величини, еквівалентної за впливом на напружено-деформований стан конструктивного елемента.

$$M_{4э} = \sqrt{\frac{M_{4.1}^2 \cdot t_{\text{разг4}} + M_{4.2}^2 \cdot t_{\text{уст4}} + M_{4.3}^2 \cdot t_{\text{торм4}} + M_{4.4}^2 \cdot t_{\text{дотяг}}}{t_4}} \quad (3.13)$$

Підставляючи відповідні числові значення у формулу (3.13), обчислюємо еквівалентний крутний момент для розглядуваного перерізу. Отриманий результат відображає умовно-постійне навантаження,

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		59

еквівалентне за впливом на матеріал змінному моменту, що діє протягом робочого циклу.

$$M_{49} = \sqrt{\frac{1448^2 \cdot 18 + (-317,9)^2 \cdot 20,2 + (-1785)^2 \cdot 16,7 + (-317,9)^2 \cdot 7,2}{62,1}} = 1228 \text{ Нм.}$$

Діаграма навантаження наведена на рисунку 3.9.

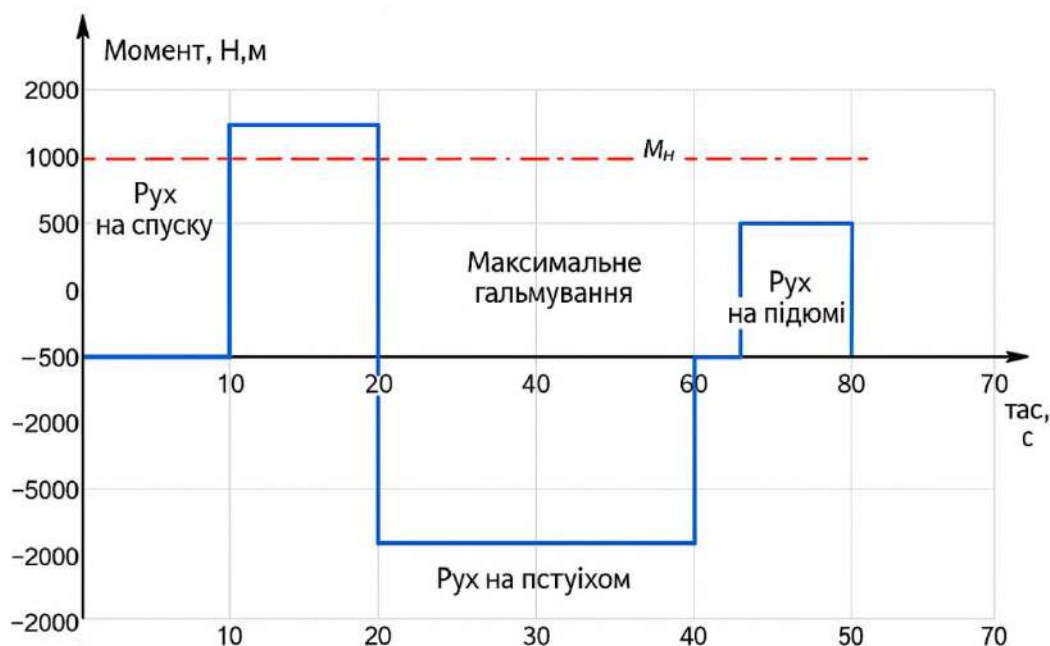


Рисунок 3.9 - Схема навантаження для ділянки руху схилом

3.6 Перевірка вибраного електродвигуна на нагрівання та перевантажувальну здатність

Оскільки обраний електродвигун у складі системи електроприводу функціонує в режимі з приблизно постійним магнітним потоком, середньоквадратичне (еквівалентне) значення крутного моменту адекватно відображає середню температуру його нагріву протягом робочого циклу.

$$M_9 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_{ox,i} \cdot t_i}},$$

де:

- M_i - Значення електромагнітного моменту двигуна на i -ій ділянці спрощеної навантажувальної діаграми електроприводу визначає рівень механічного навантаження, яке забезпечує реалізацію заданого режиму роботи на відповідному етапі циклу.;

- t_i - Тимчасовий інтервал i -ї ділянки — це тривалість відповідного етапу роботи електроприводу, протягом якого електромагнітний момент двигуна залишається сталим або змінюється за заданим законом.

- $\beta_{ox,i}$ - Для кожної i -ї секції навантажувального циклу коефіцієнт охолодження самовентильованого двигуна визначається з урахуванням теплового стану обмоток, швидкості обертання вентилятора та умов навколишнього середовища. Формула для розрахунку враховує основні параметри теплообміну та служить для прогнозування температурного режиму двигуна в умовах тривалого циклічного навантаження:

$$\beta_{ox,i} = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \sqrt{\frac{\omega_i}{\omega_{ном}}},$$

де:

- ω_i - Середня кутова швидкість на i -й ділянці визначає середній темп обертання вала електродвигуна або виконавчого механізму в межах відповідного інтервалу часу робочого циклу;

- β_0 - Коефіцієнт погіршення охолодження при нерухомому роторі електродвигуна характеризує зниження ефективності тепловідведення в умовах відсутності власної вентиляції та дорівнює $\beta_0 = 0,45-0,55$ для закритих самовентильованих двигунів.

$$\beta_{ox,раз} = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \sqrt{\frac{\omega_{срразг}}{\omega_{ном}}} = 0,55 + (1 - 0,55) \cdot \sqrt{\frac{77,7}{155,4}} = 0,868,$$

$$\beta_{ox,уст} = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \sqrt{\frac{\omega_{уст}}{\omega_{ном}}} = 0,55 + (1 - 0,55) \cdot \sqrt{\frac{155,4}{155,4}} = 1,$$

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		61

$$\beta_{\text{ох,торм}} = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{срторм}}}{\omega_{\text{ном}}}} = 0.55 + (1 - 0.55) \cdot \sqrt{\frac{38,85}{155,4}} = 0.775,$$

$$\beta_{\text{ох,дом}} = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{дом}}}{\omega_{\text{ном}}}} = 0.55 + (1 - 0.55) \cdot \sqrt{\frac{17}{155,4}} = 0.699,$$

На рівній горизонтальній ділянці завдовжки 1000 м:

$$\sum M_{1,i}^2 \cdot t_i = M_{1.1}^2 \cdot t_{\text{раз1}} + M_{1.2}^2 \cdot t_{\text{уст1}} + M_{1.4}^2 \cdot t_{\text{торм1}} + M_{1.5}^2 \cdot t_{\text{доляг}} ;$$

$$\sum M_{1,i}^2 \cdot t_i = 2146^2 \cdot 18 + (-1277)^2 \cdot 36,83 + 258^2 \cdot 16,7 + 1277^2 \cdot 7,2 = 1,561 \cdot 10^8 \text{ H}^2 \text{ м}^2 \text{ с}$$

;

$$\sum \beta_{1,i} \cdot t_i = \beta_{\text{ох,раз}} \cdot t_{\text{раз1}} + \beta_{\text{ох,уст}} \cdot t_{\text{уст1}} + \beta_{\text{ох,торм}} \cdot t_{\text{торм1}} + \beta_{\text{ох,дом}} \cdot t_{\text{доляг}} ;$$

$$\sum \beta_{1,i} \cdot t_i = 0.868 \cdot 18 + 1 \cdot 36,83 + 0.775 \cdot 16,7 + 0.699 \cdot 7,2 = 70,453 \text{ с}$$

На рівній горизонтальній ділянці завдовжки 1500 м:

$$\sum M_{2,i}^2 \cdot t_i = M_{2.1}^2 \cdot t_{\text{раз2}} + M_{2.2}^2 \cdot t_{\text{уст2}} + M_{2.4}^2 \cdot t_{\text{торм2}} + M_{2.5}^2 \cdot t_{\text{доляг}} ;$$

$$\sum M_{2,i}^2 \cdot t_i = 2146^2 \cdot 18 + (-1277)^2 \cdot 64,5 + 258^2 \cdot 16,7 + 1277^2 \cdot 7,2 = 2,012 \cdot 10^8 \text{ H}^2 \text{ м}^2 \text{ с}$$

$$\sum \beta_{2,i} \cdot t_i = \beta_{\text{ох,раз}} \cdot t_{\text{раз2}} + \beta_{\text{ох,уст}} \cdot t_{\text{уст2}} + \beta_{\text{ох,торм}} \cdot t_{\text{торм2}} + \beta_{\text{ох,дом}} \cdot t_{\text{доляг}} ;$$

$$\sum \beta_{2,i} \cdot t_i = 0.868 \cdot 25 + 1 \cdot 43,125 + 0.775 \cdot 15,28 + 0.699 \cdot 7,2 = 97,145 \text{ с}$$

Під час транспорту руху в гору:

$$\sum M_{3,i}^2 \cdot t_i = M_{3.1}^2 \cdot t_{\text{раз3}} + M_{3.2}^2 \cdot t_{\text{уст3}} + M_{3.4}^2 \cdot t_{\text{торм3}} + M_{3.5}^2 \cdot t_{\text{доляг}} ;$$

$$\sum M_{3,i}^2 \cdot t_i = 4059^2 \cdot 18 + 3190^2 \cdot 20,21 + 1808^2 \cdot 16,7 + 3190^2 \cdot 7,6 = 6,309 \cdot 10^8 \text{ H}^2 \text{ м}^2 \text{ с}$$

$$\sum \beta_{3,i} \cdot t_i = \beta_{\text{ох,раз}} \cdot t_{\text{раз3}} + \beta_{\text{ох,уст}} \cdot t_{\text{уст3}} + \beta_{\text{ох,торм}} \cdot t_{\text{торм3}} + \beta_{\text{ох,дом}} \cdot t_{\text{доляг}} ;$$

$$\sum \beta_{3,i} \cdot t_i = 0.868 \cdot 18 + 1 \cdot 20,21 + 0.775 \cdot 16,7 + 0.699 \cdot 7,2 = 53,83 \text{ с}$$

При русі автобуса під ухил:

$$\sum M_{4,i}^2 \cdot t_i = M_{4.1}^2 \cdot t_{\text{раз4}} + M_{4.2}^2 \cdot t_{\text{уст4}} + M_{4.4}^2 \cdot t_{\text{торм4}} + M_{4.5}^2 \cdot t_{\text{доляг}} ;$$

$$\sum M_{4,i}^2 \cdot t_i = 233,1^2 \cdot 18 + (-635,8)^2 \cdot 20,21 + (-1291)^2 \cdot 16,7 + (-638,5)^2 \cdot 7,2 = 3,985 \cdot 10^7 \text{ H}^2 \text{ м}^2 \text{ с}$$

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		62

$$\sum \beta_{4,i} \cdot t_i = \beta_{\text{ox,разг}} \cdot t_{\text{разг4}} + \beta_{\text{ox,уст}} \cdot t_{\text{уст4}} + \beta_{\text{ox,торм}} \cdot t_{\text{торм4}} + \beta_{\text{ox,дом}} \cdot t_{\text{домг}} ;$$

$$\sum \beta_{4,i} \cdot t_i = 0.868 \cdot 18 + 1 \cdot 20,21 + 0.775 \cdot 16,7 + 0.699 \cdot 7,2 = 53,83с$$

Для подальшої оцінки теплового навантаження на електродвигун знайдемо еквівалентне значення крутного моменту, що враховує зміну навантаження протягом усього робочого циклу:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum M_{1,i}^2 \cdot t_i + \sum M_{2,i}^2 \cdot t_i + \sum M_{3,i}^2 \cdot t_i + \sum M_{4,i}^2 \cdot t_i}{\sum \beta_{1,i} \cdot t_i + \sum \beta_{2,i} \cdot t_i + \sum \beta_{2,i} \cdot t_i + \sum \beta_{2,i} \cdot t_i}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1,561 \cdot 10^8 + 2,012 \cdot 10^8 + 6,309 \cdot 10^8 + 3,985 \cdot 10^7}{70,453 + 97,145 + 53,83 + 53,83}} = 1929 \text{ Нм},$$

Попередньо вибраний електродвигун задовольняє умови теплового навантаження, якщо виконується нерівність:

$$M_{\text{э}} \leq M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{315000}{155,4} = 2006 \text{ Нм}$$

де $1929 \leq 2006$ – Допустимий крутний момент електродвигуна в межах розглядуваних умов експлуатації визначається як максимально допустиме значення моменту, за якого забезпечується термічна стійкість та надійна тривала робота двигуна без перевищення граничної температури обмоток

Для забезпечення надійної та безпечної роботи електродвигуна необхідно перевірити відповідність умов експлуатації допустимому рівню перевантаження. Електродвигун вважається таким, що відповідає вимогам перевантажувальної здатності, якщо максимальне значення крутного моменту, зафіксоване на навантажувальній діаграмі електроприводу, не перевищує максимально допустимого крутного моменту, передбаченого для даної моделі двигуна. Тобто виконується умова:

$$M_{\text{max}} \leq M_{\text{max,дон}}$$

Найбільше навантаження на валу електродвигуна спостерігається в момент розгону автобуса на ділянці дороги з ухилом. У цьому режимі двигун повинен одночасно забезпечувати прискорення транспортного

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		63

засобу та долати додаткову силу тяжіння, яка діє вздовж схилу, що призводить до зростання крутного моменту до максимального значення в межах усього навантажувального циклу.

$$M_{\max} = 3190 \text{ Нм}$$

Відповідно до технічних характеристик, наведених у каталозі електродвигунів, для обраної моделі встановлено такі граничні значення:

$$\frac{M_{\max, \text{доп}}}{M_{\text{ном}}} = 1,9$$

потім:

$$M_{\max, \text{доп}} = 1,9 \cdot M_{\text{ном}} = 1,9 \cdot 2003 = 3811 \text{ Нм}$$

Отже, перевірка на відповідність умовам навантаження підтвердила, що обраний двигун забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики і може працювати без перевантажень у заданому режимі.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		64

4. ВИБІР ПОВНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

4.1 Визначення можливих варіантів та обґрунтування вибору типу комплектного перетворювача

Вибір частотного перетворювача для системи електроприводу

Для реалізації обраного закону частотного регулювання електроприводу доцільно застосувати частотний перетворювач на основі інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Такий тип перетворювача дозволяє забезпечити оптимальні динамічні й енергетичні характеристики роботи електродвигуна.

Використання частотного перетворювача забезпечує плавний пуск електродвигуна без пускових струмів і механічних ударів, що знижує навантаження на силову частину системи та підвищує загальний ресурс електроприводу і механізму в цілому.

Застосування перетворювачів частоти із зворотним зв'язком (наприклад, за швидкістю або моментом) забезпечує точне регулювання обертів при змінному навантаженні, що є особливо важливим для динамічних технологічних процесів та підвищує їх якість і стабільність.

З боку електромережі перетворювач є активним навантаженням, яке споживає лише ту кількість енергії, що необхідна для виконання механічної роботи з урахуванням ККД двигуна та перетворювача.

Перетворювач забезпечує регулювання вихідної частоти в діапазоні 0...400 Гц, що дає змогу точно контролювати швидкість обертання. Розгін і гальмування двигуна здійснюються за заданим законом (лінійним або іншим), причому час розгону та гальмування може змінюватися в межах 0,1...30 хв. Додатково реалізується плавний реверс, а під час розгону система автоматично підвищує момент, що крутить, для компенсації

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		65

інерційного навантаження. Пусковий момент може досягати 150% від номінального значення.

Сучасні частотні перетворювачі оснащені комплексною системою електронного захисту від перевантаження по струму, перегріву, короткого замикання та витоків струму на землю. Вони мають цифрову консоль, яка дозволяє відображати основні робочі параметри системи, зокрема:

- задану швидкість обертання;
- вихідну частоту;
- струм і напругу двигуна;
- активну потужність і момент;
- загальний час роботи;
- стан цифрових входів/виходів тощо.

Також залежно від типу навантаження можна використовувати заданий закон "вольт-частота" або налаштувати індивідуальну залежність.

Сьогодні на ринку представлено широкий вибір високоякісних частотних перетворювачів від провідних виробників, таких як Siemens, Mitsubishi Electric, ABB, Schneider Electric, Delta Electronics та інші. Усі сучасні інвертори базуються на мікропроцесорному керуванні та використовують вдосконалені алгоритми ШІМ, що забезпечують ефективне та практично безшумне керування двигуном.

Критерії вибору частотного перетворювача:

Вибір частотного перетворювача для частотно-регульованого приводу здійснюється з урахуванням таких параметрів:

- Номінальна напруга і струм на вході та виході;
- Максимально допустимий струм та момент у перехідних режимах;
- Тип двигуна і навантаження (моментна характеристика);
- Необхідність зворотного зв'язку та тип датчиків (енкодер, тахогенератор тощо);
- Потреба в гальмуванні (резистор, рекуперація);
- Інтерфейси керування (Modbus, Profibus, CANopen та ін.).

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		66

$$I_{\max, пр.} \geq I_{\max, д.}$$

Для обраного частотного перетворювача необхідно перевірити виконання умови його працездатності при дії короткочасного струму, який виникає в режимі максимального крутного моменту електроприводу. Цей режим є критичним у динаміці роботи системи (наприклад, при пуску, реверсі або імпульсному навантаженні) та визначає граничні вимоги до струмового ресурсу перетворювача.

$$I_{\max} = \frac{M_{\max} \cdot \omega_{зад}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \cos\varphi_{ном} \cdot \eta_{ном}} = \frac{3190 \cdot 155,4}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,92 \cdot 0,945} = 775,4$$

Відповідно до [4], для реалізації частотно-регульованого електроприводу обираємо перетворювач частоти MITSUBISHI ELECTRIC FR-A540-375K. Технічні характеристики обраного пристрою наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Технічні параметри перетворювача частоти

Тип перетворювача	FR-A540-375k
Місткість	375 кВт
Номінальний вихідний струм	722 А
Максимальний струм (до 30 с)	1083 А

При використанні обраного частотного перетворювача MITSUBISHI ELECTRIC FR-A540-375K виконується умова забезпечення роботи електроприводу при максимальному крутному моменті. Це означає, що перехідний струм двигуна, який відповідає максимально можливому моменту навантаження, не перевищує допустимого значення короткочасного струму перетворювача, тобто:

$$I_{\max, пр.} \geq I_{\max, д.}$$

4.2 Переваги перетворювача частоти

Переваги використання частотного перетворювача в системі електроприводу

Застосування частотних перетворювачів у системах електроприводу має низку суттєвих переваг, які позитивно впливають на надійність, енергоефективність та динамічні характеристики системи. До основних переваг належать:

Плавний пуск і зупинка двигуна, що зменшує механічні навантаження на елементи приводу та суттєво подовжує їхній ресурс.

Підвищена ефективність і точність регулювання швидкості обертання, що особливо важливо для технологічних процесів із змінним навантаженням.

Можливість реалізації реверсивного режиму та плавного регулювання крутного моменту в широкому діапазоні частот.

Зниження споживання електроенергії завдяки адаптації режиму роботи двигуна до реальних вимог навантаження, що веде до підвищення енергоефективності.

Повний електронний захист електродвигуна та перетворювача від перевантаження, перегріву, короткого замикання та інших аварійних ситуацій.

Окрім цього, частотний перетворювач забезпечує безперервний моніторинг основних робочих параметрів системи, зокрема:

швидкості обертання;

вихідної частоти;

струму та напруги на клеммах двигуна;

вихідної потужності;

крутного моменту;

часу роботи й стану цифрових входів/виходів.

					<i>КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ</i>	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		68

Це дозволяє не лише підтримувати стабільність у роботі електроприводу, а й оптимізувати керування ним відповідно до умов експлуатації, покращуючи адаптивність системи до змінних режимів навантаження.

Висновок

Таким чином, обраний частотний перетворювач MITSUBISHI ELECTRIC FR-A540-375K повністю відповідає технічним вимогам, що висуваються до системи частотно-регульованого електроприводу. Він забезпечує надійну, гнучку та енергоефективну роботу електромеханічної системи з високим рівнем керованості й захисту.

					<i>КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ</i>	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		69

5. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

5.1 Розробка математичної моделі автоматизованого електроприводу

Математичне моделювання трифазного асинхронного двигуна

Для побудови математичної моделі трифазного асинхронного двигуна доцільно прийняти низку припущень, що дозволяють спростити рівняння і зробити аналіз системи більш доступним. Основні припущення такі:

електрорушійні сили обмоток розподілені синусоїдально по колу повітряного зазору;

магнітна проникність сталі значно перевищує магнітну проникність повітря;

втрати на гістерезис та вихрові струми у сталі відсутні;

відсутні активні втрати в обмотках ротора і статора (в рамках спрощеної моделі);

обмотки ротора і статора є симетричними, а їхні осі зміщені на 120° ;

ефект магнітного насичення не враховується (лінійна характеристика магнітного кола).

На основі цих припущень будується математична модель асинхронного двигуна у вигляді системи диференціальних рівнянь, які описують електромагнітні та механічні процеси в двигуні.

Одним із найефективніших сучасних підходів до моделювання асинхронного електроприводу є використання теорії узагальненої електричної машини. Цей підхід дозволяє описати динамічні процеси у двигуні в системі координат, що обертається, за допомогою векторного (орієнтованого) управління.

Векторне керування асинхронним двигуном

В основі векторного керування лежить ідея перетворення змінних електроприводу, заданих у нерухомій системі координат (abc), у систему

					<i>КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ</i>	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		70

координат, що обертається (dq0). У новій системі координат струми, напруги, потоки і моменти розглядаються як векторні величини, а завдяки перетворенню Кларка-Парка вдається виділити:

пропорційні або постійні компоненти струмів та напруг (у системі dq), які зручно використовувати для керування моментом і потоком двигуна незалежно одна від одної (подібно до двигуна постійного струму).

Це дозволяє будувати високоефективні системи регулювання швидкості, моменту та потужності приводу за допомогою інверторів з ШІМ-керуванням, з високою точністю навіть за наявності змінного навантаження.

$$\begin{cases} u_{1X} = R_1 i_{1X} + \frac{L_{12}}{L_2} \frac{d\Psi_2}{dt} + \left(L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2} \right) \left(\frac{di_{1X}}{dt} - i_{1Y} \omega_0 \right), \\ u_{1Y} = R_1 i_{1Y} + \frac{L_{12}}{L_2} \Psi_2 \omega_0 + \left(L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2} \right) \left(\frac{di_{1Y}}{dt} - i_{1X} \omega_0 \right), \\ 0 = \frac{R_2}{L_2} \Psi_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} - R_2' \frac{L_{12}}{L_2} i_{1X}, \\ 0 = R_2 \frac{L_{12}}{L_2} i_{1Y} - \Psi_2 \omega_2, \\ M = \frac{3}{2} p_{\Pi} \frac{L_{12}}{L_2} \Psi_2 i_{1Y}, \end{cases}$$

де $u_{1X}, u_{1Y}, i_{1X}, i_{1Y}$ - У системі координат, що обертається (векторного керування), вектор напруги статора розкладається на дві взаємно перпендикулярні проекції:

проекція на вісь ddd визначає компоненту, що відповідає намагнічуванню (поток збудження);

проекція на вісь qqq визначає компоненту, відповідальну за створення електромагнітного моменту.

$x i^y$;

Ψ_2 - модуль результуючого вектора потокозчеплення ротора;

$\omega_2 = \dot{\omega} - \omega$ - Частота кругового ковзання ротора щодо поля ротора.

Синтез і аналіз системи керування доцільніше виконувати в системі координат (x,y)(x, y)(x,y), що відповідає еквівалентній двофазній моделі

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		71

асинхронного двигуна. Для переходу до цієї системи фазні величини трифазної машини (напруги, струми, потоки) трансформуються за допомогою перетворення Кларка, яке дає змогу представити трифазну систему у вигляді двох ортогональних складових у нерухомій системі координат. (α, β) , а потім, для подальшого спрощення моделі та забезпечення незалежного керування моментом і магнітним потоком, здійснюється перехід до системи координат, що обертається зі швидкістю, яка дорівнює кутовій швидкості вектору потокозчеплення ротора $\omega_0 - (x, y)$.

$$u_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} u_a,$$

$$u_\beta = \frac{u_b - u_c}{\sqrt{2}},$$

$$u_x = u \cos \omega_0 t + u \sin \omega_0 t,$$

$$u_y = -u \sin \omega_0 t + u \cos \omega_0 t.$$

У системі координат, що обертається зі швидкістю потокозчеплення ротора, електромагнітні процеси в асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором описуються системою диференціальних рівнянь, яка враховує взаємозв'язок між струмами, напругами, потоками та електромагнітним моментом:

$$x = i_1 x R_1 + i_1 x - \omega_0 y, y = i_1 y R_1 + i_1 y - \omega_0 x,$$

$$0 = i_2 x R_2 + i_2 x,$$

$$0 = i_2 y R_2 + i_2 y - \omega_0 x.$$

Тут: R_1, R_2 - опору фазних обмоток статора та ротора;

$i_1 x, i_2 y$ - складові потокозчеплення статора;

$\psi_2 x = \psi_2$ - потокозчеплення ротора;

ω_0 - частота напруги статора;

$\omega_2 = \omega_{rp}$ - кутова швидкість ротора;

g_p - число пар полюсів.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		72

Вирази зв'язку потоків мають вигляд:

$$\psi_{1x} = L_{11}i_{1x} + L_{12}i_{2x},$$

$$\psi_{2x} = L_{12}i_{1x} + L_{22}i_{2x},$$

$$\psi_{1y} = L_{11}i_{1y} + L_{12}i_{2y},$$

$$\psi_{2y} = L_{12}i_{1y} + L_{22}i_{2y}.$$

Тут: L_{12} - взаємна індуктивність фазних обмоток статора та ротора.

Виразимо складові струмів ротора та статора:

$$i_{1x} = K_2 \cdot \psi_{1x} - K_{12} \cdot \psi_{2x},$$

$$i_{2x} = K_1 \cdot \psi_{2x} - K_{12} \cdot \psi_{1x},$$

$$i_{1y} = K_2 \cdot \psi_{1y} - K_{12} \cdot \psi_{2y},$$

$$i_{2y} = K_1 \cdot \psi_{2y} - K_{12} \cdot \psi_{1y}.$$

Тут:

$$K_1 = \frac{L_1}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2},$$

$$K_2 = \frac{L_2}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2},$$

$$K_{12} = \frac{L_{12}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2}.$$

Електромагнітний момент двигуна у векторній системі координат обчислюється за відомою формулою моменту взаємодії струму та потокозчеплення:

$$M = 2 \cdot p_r \cdot L_{12} \cdot (i_{1y} \cdot i_{2x} - i_{1x} \cdot i_{2y}).$$

Електрична кутова швидкість обертання магнітного поля статора

визначається як: $\frac{d\omega}{dt} M - M_c$.

					КРБАТ 25.22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		73

Отримана структура математичної моделі асинхронного двигуна подана на рисунку 5.1. Вона являє собою складну систему взаємопов'язаних ланок управління, кожна з яких відповідає за окремі етапи перетворення електричної енергії в механічну.

Попри складність, дана модель дозволяє ефективно досліджувати динамічні властивості електроприводу під впливом як заданих (керувальних), так і збурювальних впливів (зміна навантаження, коливання напруги тощо). Вона також дає змогу визначати параметри електродвигуна методами комп'ютерного моделювання, що значно полегшує аналіз та оптимізацію системи керування.

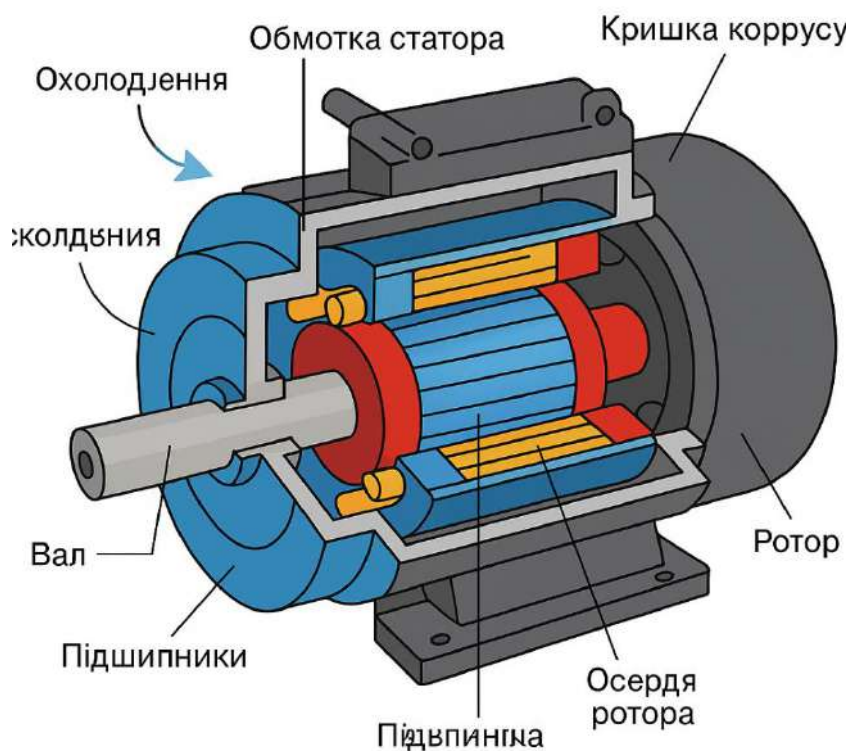


Рисунок 5.1 – Структура будова асинхронного двигуна

На основі еквівалентної електричної схеми асинхронного двигуна будується система диференціальних рівнянь, яка описує зміну струмів, напруг та потокозчеплень у часі. Формування рівнянь здійснюється відповідно до першого та другого законів Кірхгофа, що дозволяє точно

описати електромагнітні процеси в обмотках статора та ротора. Такий підхід є обов'язковим для побудови коректної математичної моделі електроприводу, яка може бути реалізована в середовищах моделювання, таких як MATLAB/Simulink або іншими інструментами динамічного аналізу:

$$U_d = R_f \cdot i_d + L_f \cdot \frac{di_d}{dt} + V,$$

$$V = \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt,$$

$$i_d - i_c - i - i_T = 0,$$

де U_d - Напряга на виході некерованого випрямляча залежить від типу випрямної схеми (однофазна/трифазна, напівхвильова/повнохвильова, мостова) та параметрів вхідної напруги. У загальному випадку для трифазного мостового випрямляча напруга на виході в усталеному режимі,

R_f - Опір ланцюга випрямляча — це сумарний активний опір, що враховує опори елементів випрямної схеми, зокрема,

I_d - Струм на виході випрямляча — це постійний (або пульсуючий) струм, який протікає через навантаження, підключене до випрямної схеми. Його величина залежить від параметрів вхідної напруги, типу випрямляча, навантаження та внутрішнього опору ланцюга.

Випрямлену ЕРС (електрорушійну силу) випрямляча можна подати у вигляді наступного виразу, який визначає середнє значення напруги на виході за ідеальних умов (без урахування падінь напруги на діодах та опорах кола):

$$e_d = U_{1m} \sin\left(\omega_1 t + \varphi_0 - n \frac{2\pi}{m'}\right),$$

де U_{1m} - Максимальне значення напруги живлення випрямляча — це пікове значення змінної напруги на вході випрямляча, при якому забезпечується його стабільна робота без перевищення допустимих електричних параметрів силових елементів (діодів, тиристорів тощо),

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		75

ω_1 - Кутова частота напруги живлення випрямляча — це величина, яка характеризує швидкість зміни фази синусоїдальної напруги у часі,

$\varphi_0 = \pi \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{m'} \right)$ - Кут, що відповідає моменту природного відкриття випрямляча, — це електричний кут, за якого напруга на одному з діодів (або тиристорів) випрямляча стає позитивною відносно анода наступного елемента, що призводить до його автоматичного (природного) увімкнення без керувального сигналу m' - пульсація випрямного ланцюга,

$$n - \text{ціла частина числа, } \left(\frac{\omega_1 t}{2\pi / m'} \right), n = \left[\frac{\omega_1 t}{2\pi / m'} \right]$$

Для побудови математичної моделі напруги на виході випрямляча доцільно розділити період роботи випрямляча на два характерні інтервали, у межах яких напруга має різну природу формування:

інтервал, що відповідає відкритому стану діода VD, коли ;

інтервал, що відповідає закритому стану діода VD, коли .

Отже, напруга на виході випрямляча дорівнюватиме:

$$U_d = \begin{cases} e_d, & \text{если } e_d \geq V, \\ V, & \text{если } e_d < V. \end{cases}$$

При гальмуванні двигуном, у режимі рекуперації енергії, вимикач S7S7S7 у гальмівному ланцюзі керується сигналами з датчика напруги, встановленого на конденсаторі фільтра C1C1C1. Коли напруга на конденсаторі перевищує допустиме граничне значення $U_{допU}$, вимикач автоматично замикається, підключаючи гальмівний резистор до кола, що дозволяє розсіяти надлишкову енергію у вигляді тепла. У інший час (коли $U_C < U_{допU}$) — вимикач перебуває у розімкненому стані.

$$i_T = \begin{cases} 0, & \text{если } e_d \geq U_{дон}, \\ \frac{V}{R_t}, & \text{если } e_d < U_{дон}. \end{cases}$$

де R — опір гальмівної ланки, який визначає величину струму, що розсіює надлишкову енергію у вигляді тепла під час гальмування.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		76

Наведені вище рівняння формують математичну модель електромеханічної системи типу «мережа — некерований випрямляч — фільтр — гальмівний блок», яка дозволяє проводити аналіз перехідних процесів, оцінювати умови перенапруги, а також здійснювати оптимальний вибір параметрів елементів гальмівного контуру.

					<i>КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ</i>	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>77</i>

6. РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

Техніко-економічне порівняння альтернативних систем електропривода

Розрахунок техніко-економічних показників здійснюється на основі аналізу порівняльних технічних та експлуатаційних характеристик двох альтернативних систем електропривода. Економічна ефективність кожного варіанта оцінюється відповідно до принципу мінімізації сумарних витрат, які включають:

початкові капітальні витрати на придбання, монтаж і пусконаладження обладнання;

експлуатаційні витрати, пов'язані з обслуговуванням, ремонтом та заміною компонентів;

витрати на електроенергію відповідно до рівня енергоефективності приводу;

втрати через можливі простої електрообладнання, що впливають на продуктивність виробництва.

З огляду на технічні вимоги до системи приводу та доступні варіанти обладнання, з технічних міркувань було обрано комплектний електропривод змінного струму фірми *MITSUBISHI ELECTRIC*, типу *FR-A540-375K*, що забезпечує високий рівень автоматизації, надійності та енергоефективності.

Для обґрунтування доцільності такого вибору виконано порівняння з альтернативною системою електропривода постійного струму, що традиційно застосовується в аналогічних умовах експлуатації.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		78

Технічні дані електроустаткування порівнюваних систем

Параметри	Варіант із ДІБДР	Прогнозований варіант
Тип двигуна	зроблений на замовлення	4A355M4У3.
Потужність, кВт	315	315
Ефективність, %	88,5	94,5
Швидкість обертання, об/хв	1450	1470
Тип перетворювача	-	FR-A540-375k
Потужність перетворювача, кВт	-	375
ККД перетворювача, %	-	0,98
Механізм трансмісії	Коробка передач	Редуктор

Найбільш вартісними компонентами електроприводу є електродвигун, перетворювач (інвертор або тиристорний регулятор) та механічна передача (редуктор, муфта, зубчаста передача тощо). Саме ці вузли формують основну частину початкових капітальних витрат при виборі та впровадженні електропривідної системи.

Таким чином, загальна вартість електропривода для варіанта з двигуном постійного струму (ДПС) визначається сумою вартостей його основних складових:

$$K_{\text{ЭП}} = K_{\text{дв}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{кп}}$$

Де $K_{\text{дв}}$ - Вартість електродвигуна, виготовленого за індивідуальним технічним завданням, суттєво перевищує серійну продукцію через необхідність розробки нестандартної конструкції, погодження специфікацій, а також використання нестандартних матеріалів або технологій виготовлення.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		79

Залежно від складності конструкції та умов експлуатації, вартість такого двигуна може бути на 30–70 % вищою, ніж типового серійного аналога. До остаточної суми також включаються витрати на,

$$K_{дв1} = 4906730 \text{ грн,}$$

$K_{пра}$ - вартість пусконаладжувальних робіт обладнання, $K_{пра1} = 77500$ грн,

$K_{кс}$ - вартість коробки, $K_{кс} = 153500$ грн.

Для розробленого варіанта:

$$K_{эл2} = K_{дв2} + K_{пра2} + K_{пр} + K_{р},$$

де $K_{дв2}$ - вартість електродвигуна 4A355M4У3,

$$K_{дв2} = 1816060 \text{ грн,}$$

$K_{пр}$ - вартість перетворювача MITSUBISHI ELECTRIC,

$$K_{пр} = 423\,530 \text{ грн,}$$

$K_{р}$ - вартість коробки передач, $K_{р} = 57\,000$ грн.

$K_{пра}$ - вартість пусконаладжувальних робіт обладнання, $K_{пра1} = 37400$ грн,

$$K_{ЭП2} = 18162 + 423538 + 5700 + 37400 = 233400 \text{ грн}$$

Монтажні витрати розраховуються окремо для електропривода та робочого механізму.

Для електропривода вони становлять 6 % від його вартості, а для робочого механізму — 5 % від вартості електропривода.

Отже, загальна вартість монтажних робіт для варіанту з двигуном постійного струму (ДПС) становить:

$$K_{мп1} = (0,06 + 0,05) \cdot K_{ЭП1} = 0,11 \cdot 51377310 = 5651500 \text{ руб}$$

$$K_{мп1} = (0,06 + 0,05) K_{ЭП1} = 0,11 \cdot 513773 = 56515 \text{ грн}$$

для проектного варіанта:

$$K_{мп2} = (0,06 + 0,05) \cdot K_{ЭП2} = 0,11 \cdot 23340000 = 2567400$$

$$K_{мп2} = (0,06 + 0,05) K_{ЭП2} = 0,11 \cdot 233400 = 25674 \text{ грн}$$

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		80

Витрати на транспортно-заготівельні роботи приймаються на рівні 2 % від сукупної вартості електропривода та монтажних робіт.

Таким чином, для варіанта з двигуном постійного струму (ДПС) ці витрати визначаються за формулою:

$$K_{\text{мзр1}} = 0,02(K_{\text{ЕП1}} + K_{\text{мп1}}) = 0,02(513771 + 56510) = 11405 \text{ грн}$$

для проектного варіанта:

$$K_{\text{мзр2}} = 0,02(K_{\text{ЕП2}} + K_{\text{мп2}}) = 0,02(23340 + 25674) = 5181 \text{ грн}$$

Запланований прибуток (накопичення) монтажної організації становить 10 % від загальної вартості монтажних робіт.

Для варіанта з двигуном постійного струму (ДПС) цей показник обчислюється за формулою:

$$K_{\text{пм1}} = 0,1K_{\text{мп1}} = 0,1 \cdot 1140 = 1140 \text{ грн}$$

для проектного варіанта:

$$K_{\text{пм2}} = 0,1K_{\text{мп2}} = 0,1 \cdot 5181 = 518 \text{ грн}$$

З метою кращої візуалізації та порівняння варіантів, розрахунок капітальних витрат для обох систем електропривода подано у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2

Капітальні вкладення для обох варіантів

Джерело витрат	для варіанта з ДПС	Прогнозований варіант
Електродвигун, грн.	49067	18160
Конвертер, грн.	-	4235
Контрольно-вимірювальне обладнання, грн.	775	374
МКВП, грн.	1535	570
Монтажні роботи, грн.	5651	2567
Транспортно-заготівельні роботи, грн.	1140	518
Запланована економія монтажної організації, грн.	114	51
Загальний обсяг капітальних вкладень, грн.	58283	26477

При визначенні експлуатаційних витрат ключове значення має тривалість розрахункового періоду. Для об'єктивного порівняння

альтернативних варіантів електроприводів доцільно прийняти розрахунковий період у 20 років.

Вартість електроенергії, споживаної системою, залежить від:
річного споживання енергії;
номінальної потужності двигуна;
тарифу на електроенергію.

Для обчислення річного енергоспоживання необхідно врахувати сумарну тривалість роботи електропривода за рік, яку визначають за допомогою коефіцієнта використання потужності:

$$K_{исп} = \frac{ПВ \cdot t_{раб.см}}{t_{см}},$$

де ПВ – час, тривалість включення установки, од.;

труд.см – час, тривалість монтажу за зміну, труд.см = 8 годин;

t_{см} - кількість робочих годин на зміну, t_{см} = 8 годин.

$$K_{исп} = \frac{1 \cdot 8}{8} = 1$$

Визначимо кількість годин роботи установки на рік:

$$T_y = T_{раб.дн.} \cdot n_{см} \cdot t_{см} \cdot K_{исп},$$

де Треб - кількість робочих днів у році, Треб = 365;

n_{см} – кількість змін на день, n_{см} = 2;

$$T_y = 365 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 1 = 4048 \text{ ч}$$

Визначимо енергію, що споживається за рік:

для варіанта з ДПС:

$$\mathcal{E}_{21} = \frac{P_{ном1} \cdot T_y}{\eta_{н1}}$$

Де знаходиться Р_{ндвх}, х- номінальні параметри двигуна див. таблицю 6.1;

$$\mathcal{E}_{21} = \frac{315000 \cdot 4048}{0,885} = 1440 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

для проектованого варіанта:

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		82

$$\mathcal{E}_{e2} = \frac{P_{\text{дв}2} \cdot T_y}{\eta_{\text{н}2}} = \frac{315000 \cdot 4048}{0,945} = 1350 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

Отже, загальні витрати на електроенергію за 20 років експлуатації для варіанта з ДПС:

$$C_{\text{e1}} = \mathcal{E}_{e1} \cdot C_{\text{мс}} \cdot 20;$$

де $C_{\text{мс}}$ - тарифна ставка, $C_{\text{мс}} = 8$ грн / кВт · год;

$$C_{\text{e1}} = 1440000 \cdot 8 \cdot 20 = 231,1 \text{ млн грн}$$

для представленою проектованого варіанта:

$$C_{\text{e2}} = 1350000 \cdot 87,34 \cdot 20 = 2358180000$$

$$C_{\text{e2}} = 135000 \cdot 8 \cdot 20 = 215,1 \text{ млн грн}$$

Амортизація обладнання складає 9,5% від загальної вартості електроприводу. Тоді для обох варіантів буде:

$$C_a = 0,095 \cdot 20 \cdot K_{\text{ЕП}}$$

$$C_{a1} = 0,095 \cdot 20 \cdot K_{\text{ЕП}} = 0,095 \cdot 20 \cdot 582845 = 1107384,1 \text{ грн}$$

$$C_{a2} = 0,095 \cdot 20 \cdot K_{\text{ЕП}} = 0,095 \cdot 20 \cdot 267747 = 503071,1 \text{ грн}$$

Плановий термін між капітальними та плановими ремонтами тягового асинхронного двигуна:

$$T_{\text{пл.ад}} = T_{\text{табл.дв}} \cdot \beta_p \cdot \beta_o,$$

де $T_{\text{табл.}}$ - Тривалість розрахованого ремонтного циклу вказаного електродвигуна, $T_{\text{табл.}} = 9$ років;

Коефіцієнт, що враховує мінливість використаного під час роботи обладнання, 2;

Коефіцієнт, що враховує зменшення міжремонтного періоду для машин, які входять до складу основного технологічного обладнання, застосовується з метою коректного обліку прискореного зносу та зростання частоти технічного обслуговування в процесі експлуатації, 0,85.

$$T_{\text{пл.ад}} = 9 \cdot 2 \cdot 0,85 = 14,99 \text{ роки.}$$

Для перетворювача частоти:

$$T_{\text{пл.пч}} = T_{\text{табл.пч}} \cdot \beta_o,$$

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		83

де $T_{\text{табл.ч.}}$ – тривалість розрахованого ремонтного циклу перетворювача частоти, $T_{\text{табл.ч.}}$.

$$T_{\text{пл.пч}} = 6 \cdot 0,85 = 5,1 \text{ роки.}$$

Для обраної коробки передач:

$$T_{\text{пл.р}} = T_{\text{табл.р}} \cdot \beta_0$$

$$T_{\text{пл.р}} = 5 \cdot 0,85 = 4,01 \text{ роки.}$$

Розрахунок міжремонтного періоду асинхронного двигуна

Плановий термін між капітальними ремонтами асинхронного двигуна визначається на основі нормативного ресурсу двигуна та інтенсивності його експлуатації.

Розрахунок здійснюється за формулою:

$$t_{\text{пл.дв}} = t_{\text{табл.дв}} \cdot \beta_p \cdot \beta_0 = 9 \cdot 2 \cdot 0,7 = 12,1 \text{ місяців}$$

Для вказаного перетворювача частоти:

$$t_{\text{пл.пч}} = t_{\text{табл.пч}} \cdot \beta_0 = 18 \cdot 0,7 = 12,1 \text{ місяців}$$

Для вказаної коробки передач:

$$t_{\text{пл.р}} = t_{\text{табл.р}} \cdot \beta_0 = 6 \cdot 0,7 = 4,02 \text{ місяців}$$

Виходячи з розрахованої тривалості між капітальними ремонтами, можна визначити їхню середньорічну кількість. Вона визначається як обернена величина до міжремонтного періоду:

$$M_{\text{к.р.ад}} = \frac{1}{T_{\text{плад}}} = \frac{1}{15,3} = 0,065 ;$$

$$M_{\text{к.р.пч}} = \frac{1}{T_{\text{плпч}}} = \frac{1}{5,1} = 0,196 ;$$

$$M_{\text{к.р.р}} = \frac{1}{T_{\text{плад}}} = \frac{1}{4,25} = 0,235 ;$$

$$M_{\text{к.р.кв}} = \frac{1}{T_{\text{плкв}}} = \frac{1}{4,25} = 0,235 .$$

Аналогічним чином визначається й кількість поточних ремонтів на рік, що здійснюються відповідно до графіка технічного обслуговування.

Розрахунок виконується за формулою:

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		84

$$M_{m.p.ad} = 0,079, M_{m.p.nch} = 0,079, M_{m.p.p} = 0,238, M_{m.p.kc} = 0,238.$$

Річна трудомісткість ремонтів електричних машин визначається на основі кількості ремонтів протягом року та нормативної трудомісткості одного ремонту, встановленої згідно з галузевими нормами.

Розрахунок здійснюється за формулою:

$$T_{k.p.ad} = M_{k.p.ad} \cdot H_{k.p.dv} \cdot K_{\omega}$$

де $H_{кр.р.д}$ - Норматив трудомісткості капітального ремонту асинхронного електродвигуна залежить від його потужності, конструкції та умов експлуатації. У нормативно-довідковій літературі (наприклад, «Норми часу на ремонт електричних машин», збірники Мінпрому, стандартні методики підприємств) наводяться такі орієнтовні значення

$$H_{кр.р.д} = 32 \text{ чол.-години};$$

K - При розрахунку трудомісткості капітального або поточного ремонту електродвигуна додатково враховується поправочний коефіцієнт, який відображає вплив частоти обертання ротора на складність ремонту, $K = 1,1$.

$$T_{к.р.ад} = 0,065 \cdot 32 \cdot 1,1 = 2,1 \text{ людино – години}$$

Для обраного перетворювача частоти:

$$T_{к.р.пч} = M_{к.р.пч} \cdot H_{к.р.пч} = 0,196 \cdot 43 = 8,1 \text{ людино – години}$$

Для обраної коробки передач:

$$T_{к.р.р} = M_{к.р.р} \cdot H_{к.р.р} = 0,235 \cdot 53 = 12,1 \text{ людино – години}$$

Для обраної коробки передач:

$$T_{к.р.кш} = M_{к.р.кш} \cdot H_{к.р.кш} \cdot K_m = 0,235 \cdot 65 \cdot 1,1 = 16,1 \text{ людино – години}$$

години

Річна трудомісткість поточних ремонтів відповідного обладнання визначається за тією ж методикою, що й для капітальних ремонтів — з урахуванням кількості ремонтів протягом року та нормативів трудомісткості на один ремонт.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		85

Аналогічно розраховується й річна трудомісткість капітального ремонту, яка визначається за формулою:

$$T_{\text{т.р.ад}} = M_{\text{т.р.ад}} \cdot N_{\text{т.р.дв}} \cdot K_{\omega} = 0,079 \cdot 44 \cdot 1,1 = 3,1 \text{ людино} - \text{ години}$$

$$T_{\text{т.р.пч}} = M_{\text{т.р.пч}} \cdot N_{\text{т.р.пч}} = 0,079 \cdot 27 = 2,1 \text{ людино} - \text{ години.}$$

$$T_{\text{т.р.р}} = M_{\text{т.р.р}} \cdot N_{\text{т.р.р}} = 0,238 \cdot 51 = 12,1 \text{ людино} - \text{ години.}$$

$$T_{\text{т.р.кш}} = M_{\text{т.р.кш}} \cdot N_{\text{т.р.кш}} \cdot K_{\text{м}} = 0,238 \cdot 59 \cdot 1,1 = 15,1 \text{ людино} - \text{ години.}$$

З метою зручності порівняльного аналізу результати розрахунків трудомісткості ремонтів та технічного обслуговування для обох варіантів електроприводу зведено в таблицю 6.3.

Таблиця 6.3

Трудомісткість ремонтів та технічного обслуговування для обох варіантів електроприводу

Тип обладнання	Базовий варіант	Проектний варіант
Річна трудомісткість капітального ремонту, чол.-годин		
Електродвигун	2	2
Трансформатор	-	8
Контрольно-вимірювальне обладнання	0	0
Механічна трансмісія	16	12
Річна трудомісткість поточних ремонтів, чол.-год.		
Електродвигун	3.8	3.8
Трансформатор	-	2.1
Контрольно-вимірювальне обладнання	0,9	0,9
Механічна трансмісія	15	12
Щорічні витрати на технічне обслуговування, людино-год.		
Електродвигун	22	22
Трансформатор	-	28
Контрольно-вимірювальне обладнання	6	5
Механічна трансмісія	98	55
Загальна складність експлуатації обладнання:	168	155

ВИСНОВОК

У результаті проведеного дослідження сформульовано такі основні висновки:

1. Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку електричного транспорту засвідчив стабільне зростання зацікавленості у впровадженні комбінованих енергетичних установок, зокрема гібридних систем, що поєднують електричний і традиційний двигуни. Це зумовлено як екологічними викликами, так і економічною доцільністю впровадження таких технологій у міському пасажирському транспорті.

2. Результати математичного моделювання підтвердили ефективність запропонованого тягово-гальмівного електромеханічного модуля. Отримані характеристики свідчать про можливість його надійної роботи в умовах міського циклу руху автобусів, включаючи розгін, гальмування та рециркуляцію енергії.

3. Використання розробленого модуля дозволяє суттєво знизити витрату палива, особливо в умовах частих зупинок і стартів, характерних для міських маршрутів. Це сприяє загальному підвищенню паливної ефективності транспорту.

4. Зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище є важливою перевагою автоматизованого модуля. Завдяки реалізації рекуперативного гальмування знижується інтенсивність використання механічної гальмівної системи, що, в свою чергу, зменшує знос гальмівних колодок і подовжує їхній ресурс експлуатації.

5. Проведений техніко-економічний аналіз засвідчив, що використання системи на основі перетворювача частоти та асинхронного двигуна (ПЧ-АТ) є у 2 рази економічно вигіднішим порівняно з варіантом, що використовує двигуни постійного струму (ПТ). Це обумовлено нижчими експлуатаційними витратами, вищою надійністю та меншою потребою в обслуговуванні.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	<i>Ковч</i>
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		87

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Болтенко В.К. Основи теорії електроприводів. / Навчальний посібник. - Київ: Вища школа, 2010. - 432 с.
2. Дмитрієв Ю. М. Електропривод: Теорія та практика. / Підручник. - Харків: Прапор, 2005. - 512 с.
3. Лісцін М.О. Електромеханічні системи автоматичного керування. / Підручник. - Одеса: ОНПУ, 2012. - 368 с.
4. Суханов В.І. Сучасні методи керування електроприводом. / Монографія. - Донецьк: ДонНТУ, 2011. - 294 с.
5. Федоренко С.В. Теорія автоматичного керування електроприводами. / Навчальний посібник. - Львів: Львівська політехніка, 2009. - 451 с.
6. Кучер П.О. Системи автоматичного керування електроприводами. / Навчальний посібник. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. - 387 с.
7. Морозов М.М. Електропривод: Підручник. – Суми: СумДУ, 2013. – 425 с.
8. Черненко В.І. Основи електромеханіки та електроприводу. / Підручник. - Чернігів: ЧНТУ, 2007. - 399 с.
9. Петренко О.В. Інтелектуальні системи управління електроприводом.
10. Бондар Г.С. Електропривод та автоматизація промислових установок. / Навчальний посібник. – Дніпро: ДНУ, 2015. – 472 с.

					КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ	Ковч
Змін	Ковч	Номер	Підпис	Дата		88

ДОДАТКИ

					<i>КРБАТ 25. 22115.000. ПЗ</i>	<i>Ковч</i>
<i>Змін</i>	<i>Ковч</i>	<i>Номер</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		89