

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютерні електромеханічні системи і комплекси

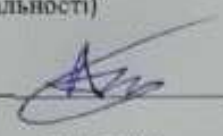
БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Підвищення енергоефективності електропривода автономного
транспортного засобу»

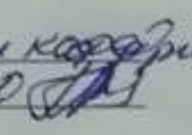
Виконав: студент 4-го курсу, групи ЕМСА-216

спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Артем ФАРЕНЮК 

 Керівник: к.т.н., доц. кафедри КЕМСК
Олексій ЖУКОВ

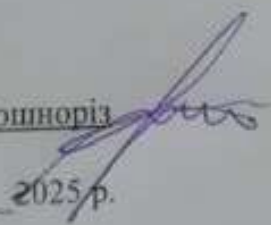
« 20 » травня 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доц., доцент кафедри
ЕСЕМ Олександр БАБЕНКО 

« 10 » червня 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц. МИКОЛА Мошноріз 

« 3 » червня 2025 р.

Вінницький національний технічний університет

Факультет Електроенергетики та електромеханіки

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації»



ЗАТВЕРДЖУЮ
зав. кафедри КЕМСК
к.т.н., доц. Мошноріз М.М.

«18» лютого 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Фаренюку Артему Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення енергоефективності електропривода автономного транспортного засобу

Керівник роботи Жуков Олексій Анатолійович к.т.н. доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від « 20 » березня 2025 року № 97

2. Строк подання студентом проекту (роботи): 03.06.2025р

3. Вихідні дані до роботи: Маса електромобіля 1,700 кг. Кількість місць для сидіння 5. Підйом, який має долати електромобіль 18%. Максимальна швидкість 95 км/год. Коефіцієнт корисної дії передачі 0,97. Загальне передаточне число 9,817.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Коротка характеристика виробничого механізму і режимів його роботи. Розрахунок статичних навантажень і тахограми руху робочого органу виробничого механізму. Попередній розрахунок потужності приводного двигуна. Техніко-економічне обґрунтування вибору системи електропривода. Вибір електродвигуна. Розрахунок динамічних навантажень та побудова навантажувальної діаграми електропривода. Перевірка вибраного двигуна за нагрівом, перевантажувальною здатністю та умовами пуску. Розрахунок статичних характеристик двигуна. Розробка системи керування електричного привода. Моделювання перехідних процесів САЕП. Економічна частина. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Зовнішній вигляд, кінематична схема та тахограми роботи. Схема електрична структурна. Моделювання перехідних процесів. Схема електрична принципова.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Жуков О.А. к.т.н., доц, каф. КЕМСК	18.02.2025	06.05.2025
Охорона праці	Кобилянський О.В., д.пед. н., зав. Каф.БЖДПБ	18.02.2025	20.05.2025

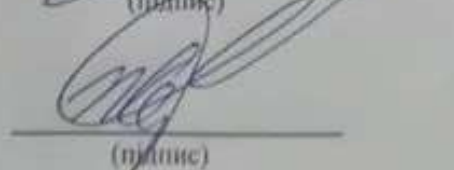
7. Дата видачі завдання « 18 » 02 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми Бакалаврської дипломної роботи (БДР)	18.02.2025	
2	Виконання спеціальної частини БДР. Перший Рубіжний контроль виконання БДР	06.05.2025	
3	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР	20.05.2025	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	20.05.2025	
5	Попередній захист БДР	03.06.2025	
6	Нормоконтроль БДР	03.06.2025	
7	Рецензування БДР	10.06.2025	
8	Захист БДР	23.06.2025	

Студент


(підпис)


(підпис)

Артем ФАРЕНЮК

Керівник роботи

Олексій ЖУКОВ

АНОТАЦІЯ

УДК: 621.311.24

Фаренюк А.М. Підвищення енергоефективності електропривода автономного транспортного засобу. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма – електромеханічні системи автоматизації. Вінниця: ВНТУ, 2025. 120 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 145 назв; рис.: 26; табл. 14.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі модернізовано електропривод електромобіля, що забезпечує плавний пуск, точне регулювання швидкості руху, електричне та рекуперативне гальмування. Проведено розрахунок і вибір приводного двигуна, розроблено систему керування. Виконано розрахунки статичних і динамічних характеристик. Результати розрахунків показали, що розроблена система керування повністю відповідає поставленим задачам. Запропоноване рішення є більш економічним та надійним у роботі. Розроблено електричні структурну і функціональну схеми, а також виконано розрахунки і вибір елементів їх силових частин.

Визначено основні положення щодо охорони праці та безпечної експлуатації електроприводу.

Ключові слова: електропривод електромобіля, плавний пуск, регулювання швидкості, приводний двигун, система керування

ABSTRACT

Farenjuk A.M. Increasing the energy efficiency of the electric drive of an autonomous vehicle. Bachelor's qualification work in the specialty 141 - Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, educational program - electromechanical automation systems. Vinnytsia: VNTU, 2025. 120 p.

In Ukrainian. Bibliography: 145 titles; fig.: 26; tab. 14.

In the bachelor's qualification work, the electric drive of an electric vehicle was modernized, which provides a smooth start, precise speed control, electric and regenerative braking. The calculation and selection of the drive motor were carried out, the control system was developed. Calculations of static and dynamic characteristics were performed. The results of the calculations showed that the developed control system fully meets the tasks. The proposed solution is more economical and reliable in operation. Electrical structural and functional diagrams were developed, and calculations and selection of elements of their power parts were also performed.

The main provisions on labor protection and safe operation of the electric drive were determined.

Keywords: electric drive of an electric vehicle, smooth start, speed control, drive motor, control system

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ І ОСОБЛИВОСТІ ЙОГО КОНСТРУКЦІЇ.....	9
1.1 Тенденції розвитку автомобільного транспорту з електричним приводом.....	9
1.2 Конструкція та складові частини електроприводу електромобіля	17
1.3 Кінематична схема тягового механізму електромобіля	26
1.4 Аналіз типів електродвигунів електромобілів	28
1.5 Основні вимоги та задачі проектування	34
2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТАХОГРАМИ ТА ПОТУЖНОСТІ ПРИВІДНОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ	37
2.1 Розрахунок кінематичних параметрів тахограми циклу руху електромобіля	37
2.2 Розрахунок приведених інерційних мас та моментів інерції	42
2.3 Попередній розрахунок потужності тягового двигуна.....	48
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	50
3.1 Розрахунок системи ПЧ-АД.....	35
4 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА ЙОГО ПЕРЕВІРКА	55
4.1 Перевірка вибраного двигуна за нагрівом, перевантажувальною здатністю та умовами пуску.....	56
5 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТРУКТУРНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	58
6 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ КОЛА УПРАВЛІННЯ	65
6.1 Розробка функціональної схеми електроприводу електромобіля	65
6.2 Вибір і опис елементів тягового перетворювача	68
6.3 Функціональна схема векторного керування тяговим асинхронним двигуном	71
6.4 Розрахунок силового модуля для керування електродвигуном.....	85
6.5 Вибір мікроконтролера	88

7 РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САЕП	92
8 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САЕП	94
9 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА СТІЙКІСТЬ ТА ЯКІСТЬ	97
9.1 Оцінка стійкості	97
9.2 Оцінка якості	98
10 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	100
10.1 Розрахунок індуктивності згладжувального дроселя	100
10.2 Вибір сенсорів	101
10.3 Вибір задатчика інтенсивності	102
10.4 Розробка принципової схеми системи електроприводу	105
11 ОХОРОНА ПРАЦІ	108
11.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації електромобіля	109
11.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	113
11.2 Пожежна безпека	117
ВИСНОВКИ	121
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	122
Додаток А Технічне завдання.....	125
Додаток Б Графічна частина.....	128
Додаток В Протокол перевірки дипломної роботи на наявність текстових запозичень	146

ВСТУП

Актуальність. У сучасних умовах розвитку транспорту ключовим завданням є перехід до екологічно чистих та енергоефективних технологій. Традиційні автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння залишаються одним із головних джерел забруднення довкілля через викиди парникових газів, монооксиду вуглецю та інших шкідливих речовин. У зв'язку з цим електромобілі виступають перспективною альтернативою, що дозволяє зменшити негативний вплив транспорту на довкілля та покращити якість життя в урбанізованих районах.

Зростання популярності електромобілів зумовлене не лише їх екологічною перевагою, а й значним потенціалом у підвищенні енергоефективності. Одним із ключових чинників, що визначають ефективність роботи електромобіля, є система електропривода, зокрема її керування. Вдосконалення алгоритмів управління дозволяє знизити втрати енергії, підвищити динамічні характеристики транспортного засобу та забезпечити оптимальне використання акумуляторної енергії.

Сьогодні розвиток технологій акумуляторних батарей та сучасних силових електронних пристроїв відкриває нові можливості для розробки ефективних систем тягового електропривода. Удосконалення енергоменеджменту, зменшення часу заряджання, збільшення запасу ходу та підвищення рівня рекуперації енергії – усе це стає можливим завдяки прогресу в системах керування. Таким чином, дослідження та оптимізація тягових електроприводів електромобіля є актуальною інженерною задачею, яка має вагоме значення для сталого розвитку транспортної галузі.

Мета роботи. Підвищення ефективності функціонування тягового електропривода електромобіля шляхом вибору оптимальної структури системи керування. Це дозволить покращити динамічні характеристики транспортного засобу, забезпечити стабільну та надійну роботу приводу, а також зменшити

приведені витрати під час експлуатації.

Об'єкт дослідження – процес роботи тягового електропривода електромобіля.

Предмет дослідження – Структура та принципи реалізації систем тягового електропривода електромобіля.

Методи дослідження. У роботі використовуються теоретичні положення електромеханіки та електричних машин; методи аналізу електричних кіл та електромеханічних систем; комп'ютерне імітаційне моделювання для дослідження динаміки електропривода, методи частотного аналізу та оцінки стійкості замкнених систем керування..

Постановка задачі проектування.

1) Провести аналітичний огляд існуючих систем тягового електропривода електромобіля.

2) Виконати розрахунок основних параметрів системи електропривода.

3) Розробити схему енергоефективного керування тяговим електроприводом.

4) Здійснити комп'ютерне моделювання запропонованої системи керування і провести аналіз її ефективності.

Практичне значення одержаних результатів:

Розроблено комп'ютерну модель системи керування асинхронним двигуном, та модель його системи керування. Це дозволяє виконати аналіз ефективності роботи системи електроприводу для різних умов.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які складають основний зміст бакалаврської дипломної роботи, отримані автором самостійно.

Публікації. За тематикою дослідження було опубліковано тези доповіді. До питання проектування електроприводу перонного автобуса на електротязі / О.А. Жуков, А.М. Фаренюк // Матеріали LIV науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 24-27 червня 2025 р. – Електрон. текст. дані. – 2025. – Режим доступу: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/904/1576/2888>

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ І ОСОБЛИВОСТІ ЙОГО КОНСТРУКЦІЇ

1.1 Тенденції розвитку автомобільного транспорту з електричним приводом

Електромобілем (EV, від англ. *electric vehicle*) називають транспортний засіб, трансмісія якого працює повністю або частково на електроенергії, накопиченій у акумуляторній батареї. Існує кілька основних типів електромобілів, які класифікуються за способом живлення та можливістю зарядки:

- PEV (Pure Electric Vehicle) – повністю електричні транспортні засоби, які працюють виключно на електроенергії;
- PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) – гібридні електромобілі з можливістю зарядки від електромережі;
- EREV (Extended Range Electric Vehicle) – електромобілі з подовженим запасом ходу;
- HEV (Hybrid Electric Vehicle) – гібридні транспортні засоби без зовнішньої зарядки.

Кожен із зазначених типів має свої особливості у споживанні енергії, запасі ходу, рівні викидів та вартості експлуатації. Усі вони покликані зменшити негативний екологічний вплив транспорту, зокрема – зменшити викиди парникових газів та зменшити залежність від викопного палива.

Перші електромобілі з'явилися ще наприкінці XIX століття, і вже тоді вони вирізнялися низьким рівнем шуму, відсутністю вібрацій та шкідливих викидів. Однак, починаючи з 1910-х років, розвиток нафтової промисловості, поява електростартера (1912 р.) та конвеєрне виробництво Генрі Форда (1913 р.) суттєво здешевили автомобілі з ДВЗ, що призвело до занепаду електротранспорту на десятиліття.

Транспорт із ДВЗ домінував на ринку до кінця XX століття, але після нафтових криз і загострення екологічних проблем увага до електротранспорту

знову зростає. Зокрема, Паризька кліматична угода 2015 року встановила завдання обмежити глобальне потепління до $+2^{\circ}\text{C}$, що стало поштовхом для розвитку електромобілів. Адже транспортний сектор відповідальний приблизно за 23% світових викидів парникових газів.

Щоб досягти скорочення викидів, багато країн розробили нормативи на рівні національних автопарків. Наприклад, у Європейському Союзі до 2021 року було встановлено норму 95 г $\text{CO}_2/\text{км}$. На рисунку 1.1 представлено динаміку зменшення викидів CO_2 у різних країнах з 2000 року та плани на майбутнє. Як видно з графіку, більшість розвинених країн поступово знижують допустимі обсяги викидів, що прямо стимулює перехід на електричний транспорт [1].

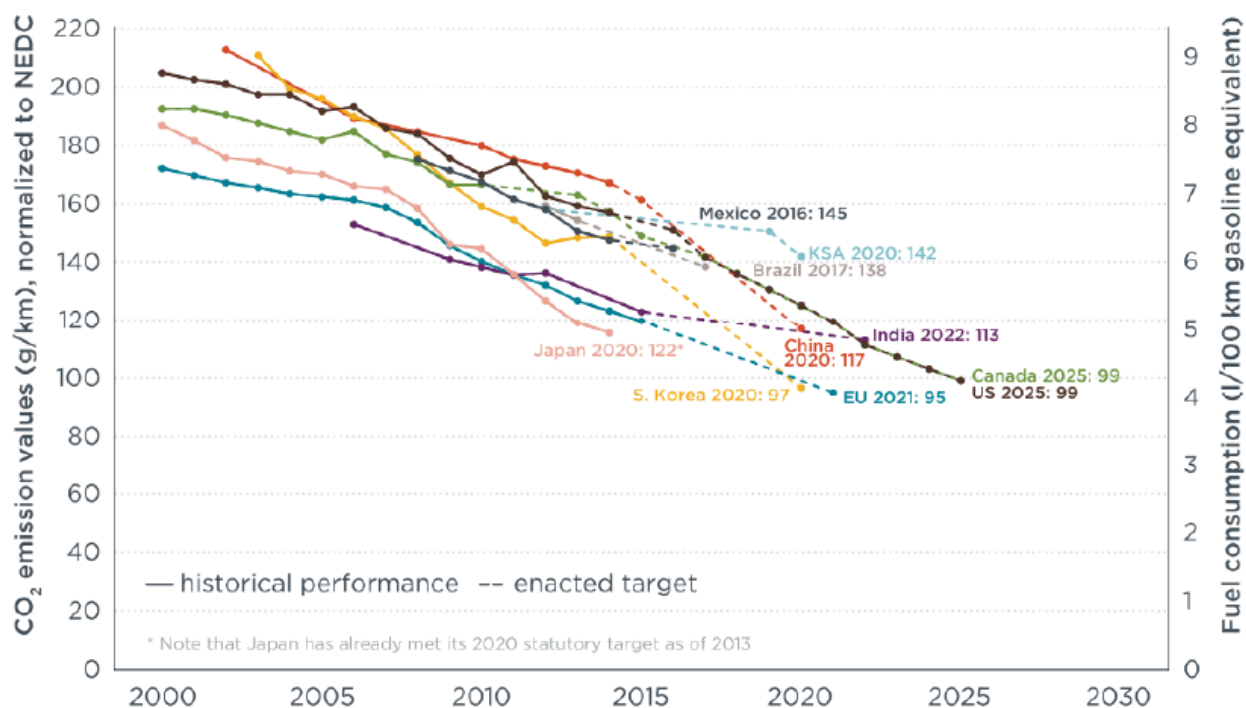


Рисунок 1.1 – Історичні показники викидів CO_2 автопарком та цільові значення до 2030 року ($\text{gCO}_2/\text{км}$, нормовані до NEDC)

Одночасно з нормативними обмеженнями, зростає й обсяг електромобільного парку у світі. На рисунку 1.2 показано динаміку зростання кількості електромобілів з 2010 по 2016 рік. Чітко видно стрімке зростання, особливо в Китаї, США, Японії та країнах Європи, що є результатом поєднання

державної підтримки, розвитку інфраструктури зарядки та зниження вартості акумуляторів.

Окрім того, ініціатива EV30 має на меті забезпечити до 2030 року щонайменше 30% частки електромобілів у загальному обсязі продажів нових авто. Така амбітна ціль є важливою складовою глобальної стратегії сталого розвитку та зменшення залежності від викопного палива.

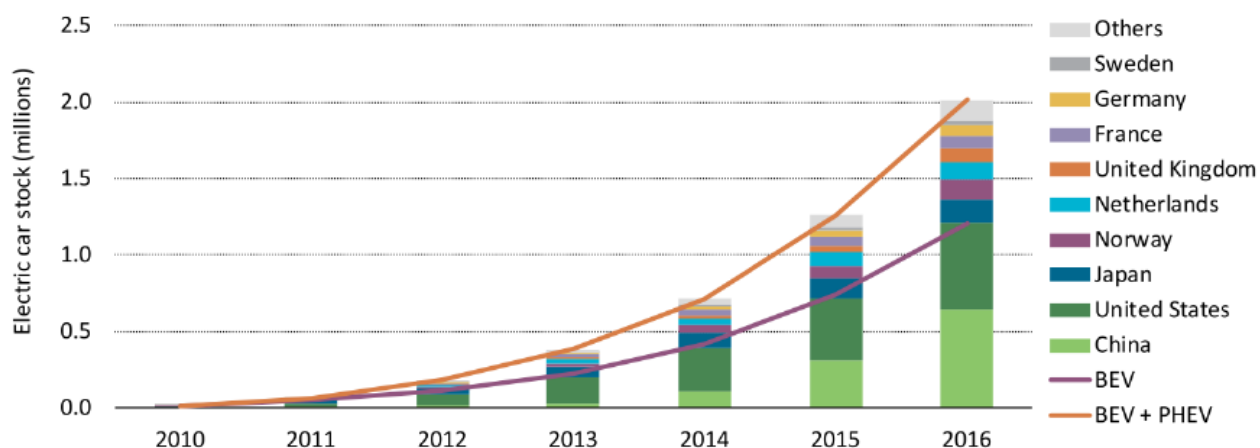


Рисунок 1.2 – Динаміка зростання кількості електромобілів у світі

Варто зазначити, що просте заміщення ДВЗ-авто електромобілями не гарантує повноцінного скорочення викидів, якщо енергопостачання ґрунтується на викопному паливі. Ефективність електромобілів з точки зору клімату залежить від частки відновлюваних джерел енергії у загальному електричному балансі. Лише за умови переходу до "зеленої" енергетики електротранспорт стане справжнім вирішенням кліматичної кризи.

Країни Європейського Союзу, усвідомлюючи масштабну загрозу зміни клімату та забруднення повітря, з 2015 року офіційно перейшли до впровадження стандарту "Євро-6" – чергової редакції екологічних вимог, що регулюють вміст шкідливих речовин у вихлопних газах. Цей стандарт встановлює гранично допустимі рівні викидів оксидів азоту (NO_x), твердих частинок (PM), вуглеводнів

та інших шкідливих компонентів, що утворюються в процесі роботи двигунів внутрішнього згоряння, особливо дизельних.

Відповідно до вимог «Євро-6», Європейське співтовариство активно стимулює автовиробників до переходу на енергозберігаючі та екологічно чисті технології, зокрема шляхом впровадження електрифікації силових агрегатів, удосконалення систем очищення відпрацьованих газів та зниження маси транспортних засобів.

Однак, вплив лише загальнонаціональних стандартів виявився недостатнім у боротьбі з локальними проблемами забруднення повітря у великих містах. У зв'язку з цим, місцеві органи влади в окремих європейських мегаполісах почали ухвалювати ще жорсткіші екологічні вимоги до транспортних засобів. Це зокрема: введення екологічних зон, заборона в'їзду дизельних авто, обмеження реєстрації транспортних засобів із ДВЗ, створення умов для пріоритетного використання електромобілів та громадського транспорту на альтернативних джерелах енергії.

У контексті активного зростання кількості електротранспорту та зміни вимог до екологічності, автомобільна промисловість перебуває на порозі глибоких перетворень. Основними факторами, що визначатимуть майбутнє галузі, є:

- автономність,
- підключення до цифрових сервісів (connected mobility),
- електрифікація,
- спільне використання транспорту (car sharing).

Кожен з цих векторів розвитку породжує нові технічні, економічні й соціальні виклики, на які автовиробники повинні реагувати швидко та стратегічно.

Попри активне зростання популярності електромобілів, двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) залишаються основою силових агрегатів для більшості виробників оригінального обладнання (ОЕМ). Однак з кожним роком економічна доцільність їх використання зменшується. Штрафи за перевищення норм викидів CO₂, прийняті в багатьох країнах, стають настільки високими, що інвестування в безвуглецеві технології вже є вигіднішою стратегією. Це створює

потужний стимул до переходу на транспорт з електрифікованим приводом, особливо на plug-in електромобілі (PEV).

Водночас, без суттєвого технологічного прориву – зокрема зниження вартості акумуляторів – ринок орієнтується на проміжне рішення: гібридні транспортні засоби з підзарядкою від мережі (PHEV). Такі автомобілі мають можливість пересуватися як за рахунок акумулятора, так і за допомогою ДВЗ, або ж у змішаному режимі. Це особливо актуально для міського використання: згідно з дослідженнями, середня щоденна дистанція, яку долає легковий автомобіль у ЄС, становить близько 50-70 км (дані 2020 року). Отже, більшість поїздок можуть здійснюватися виключно на електричній тязі, за умови регулярної нічної зарядки вдома. ДВЗ залишається резервним джерелом енергії на випадок тривалих подорожей або непередбачених маршрутів.

Окрему нішу займають "м'які гібриди" (mild hybrid), які не можуть рухатися виключно на електроенергії, але оснащені системами, що підтримують роботу ДВЗ. До них належать рекуперативне гальмування, система старт-стоп, а також додатковий стартер-генератор. Основною перевагою таких систем є невелика складність інтеграції, низька вартість у порівнянні з повними гібридами та відчутне зниження споживання пального й викидів CO₂. Завдяки цим перевагам, м'які гібриди є вигідним компромісом для виробників, які прагнуть підвищити ефективність силових установок без повної перебудови платформи.

З технічної точки зору, електродвигуни мають низку важливих переваг. Вони забезпечують високий крутний момент майже миттєво – особливо на низьких швидкостях, що є критичним під час прискорення або руху вгору схилом. Після досягнення необхідного моменту електродвигун підтримує постійну потужність, що забезпечує стабільну динаміку. Ці характеристики роблять електродвигун більш ефективним у міських умовах порівняно з ДВЗ.

На рисунку 2.3 наведено порівняння кривих крутного моменту для ДВЗ та електродвигуна.

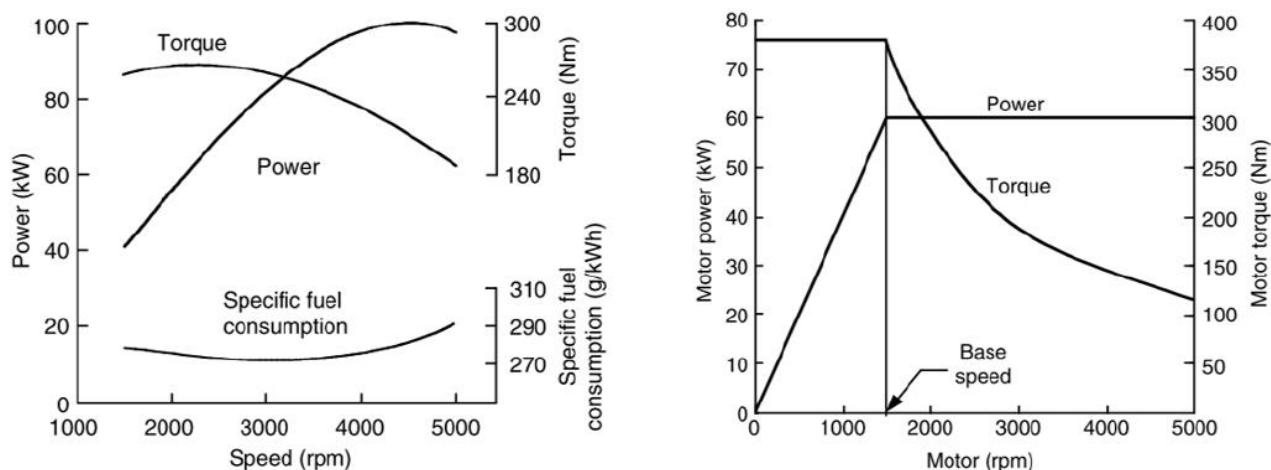


Рисунок 1.3 – Порівняння залежності крутного моменту та потужності від обертів для ДВЗ та електродвигуна

Як видно з графіків, крива крутного моменту електродвигуна різко зростає і залишається стабільною на широкому діапазоні обертів, у той час як для ДВЗ момент зростає поступово і досягає піку при вищих обертах. Це змушує використовувати складні багатоступеневі трансмісії для забезпечення прийнятної динаміки, що, своєю чергою, знижує загальну ефективність.

Таким чином, поступова електрифікація приводу транспортних засобів – від м'яких гібридів до повністю електричних електромобілів – є логічним і необхідним шляхом розвитку автомобільної галузі в умовах зростання екологічної відповідальності та вимог до енергоефективності.

1.2 Конструктивні особливості електромобіля

Електромобіль – це транспортний засіб, що використовує електричну енергію як основне джерело живлення для приводу. На відміну від традиційних автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ), електромобіль не потребує використання нафтопродуктів і функціонує завдяки електроприводу, що забезпечує більш екологічну та енергоефективну експлуатацію [3], [14].

Основними конструктивними елементами електромобіля є:

1. Силовий агрегат. Ключовим елементом руху є електродвигун, що живиться від електричних джерел енергії. Це можуть бути: акумуляторна батарея (найпоширеніше джерело живлення); суперконденсатори; паливні елементи (наприклад, воднево-кисневі); генератор (у випадку гібридної схеми).

2. Джерело енергії. Акумуляторні батареї – накопичують електроенергію для живлення двигуна. Генератори – присутні у гібридних моделях для підзарядки батарей або безпосередньої подачі струму. Паливні елементи – генерують електроенергію в результаті хімічних реакцій.

3. Система керування електроприводом – виконує управління роботою електродвигуна і включає: регулювання швидкості та крутного моменту; керування розподілом енергії; підтримку режимів рекуперативного гальмування, що дозволяє повертати частину енергії під час уповільнення.

Основні переваги електромобілів:

- Екологічність – повна відсутність викидів шкідливих речовин у процесі експлуатації;
- Висока енергоефективність – електродвигуни мають значно вищий ККД, ніж ДВЗ;
- Економічність – менші витрати на обслуговування, зокрема відсутність потреби в маслі, фільтрах тощо;
- Безшумність – електродвигуни працюють майже безшумно, що зменшує шумове навантаження в містах.

Основні недоліки електромобілів:

- Обмежений запас ходу, який залежить від ємності акумуляторів;
- Тривалий час заряджання, який варіюється залежно від типу зарядної станції;
- Маса акумуляторного блоку, що впливає на динамічні характеристики автомобіля та загальну енергоефективність.

Електромобілі вже сьогодні є не лише альтернативою традиційному транспорту, а й перспективним напрямом розвитку світової автомобільної індустрії, що поєднує інноваційність, екологічність та технологічний прогрес.

Типовим електромобілем є BMW i3 (рис. 1.4) – це повністю електричний міський автомобіль, розроблений німецьким автовиробником на спеціально створеній електромобільній платформі. Це задньопривідний чотиримісний хетчбек із двома парами дверей, де задні – розсувного типу, що полегшує доступ до салону.



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд електромобіля BMW i3

Електродвигун даної моделі – синхронний, з максимальною потужністю 125 кВт і максимальним крутним моментом 250 Н·м. Завдяки цим параметрам BMW i3 демонструє високу динаміку: розгін до 100 км/год становить 7,2 секунди, а максимальна швидкість обмежена 150 км/год. Така продуктивність робить його не лише зручним для пересування містом, а й здатним забезпечити комфортну їзду на міжміських маршрутах.

Основним джерелом енергії є літій-іонний акумулятор ємністю 42,2 кВт·год. У базовій комплектації запас ходу за циклом ЕРА складає близько 260 км. Існує також версія із додатковим двоциліндровим бензиновим двигуном-генератором (range extender), який не задіює колеса, а лише підзаряджає батарею, збільшуючи запас ходу до приблизно 245 км.

Час заряджання батареї становить близько 4,5 години при використанні побутової мережі 240 В і вбудованого зарядного пристрою потужністю 7,4 кВт.

Однією з важливих особливостей BMW i3 є його легка конструкція. Для зменшення маси автомобіля широко використовуються алюмінієві елементи та кузовні деталі з вуглецевого волокна. Це дозволяє компенсувати вагу батарей, підвищити енергоефективність і зберегти високу маневреність, навіть попри доволі високу посадку кузова.

Завдяки продуманій конструкції, сучасному електроприводу та цифровим можливостям, BMW i3 є яскравим прикладом ефективного міського електромобіля, який поєднує високий технічний рівень, комфорт та екологічність.

1.2 Конструкція та складові частини електроприводу електромобіля

На ранніх етапах розвитку електромобілів найпоширенішим був підхід, що передбачав переобладнання серійних автомобілів із із двигуном внутрішнього згоряння. У таких випадках ДВЗ і паливний бак замінювали на електродвигун і тягову акумуляторну батарею, при цьому інші конструктивні елементи, включно з шасі, підвіскою та трансмісією, залишалися майже без змін. Однак такий підхід мав низку суттєвих обмежень – надмірна маса, неефективне розміщення компонентів, недостатня гнучкість у проектуванні та обмежений запас ходу. Це зумовило перехід до створення електромобілів на спеціально розроблених платформах, які від початку враховують особливості електроприводу.

Сучасні електромобілі проектуються з урахуванням: розміщення тягової батареї в нижній частині кузова (для зниження центра мас), оптимізації аеродинаміки, підвищених вимог до безпеки високовольтних кіл, інтеграції електродвигунів та електроніки керування.

Такий підхід до конструювання дозволяє суттєво підвищити ефективність, керованість і надійність електромобіля, а також забезпечити кращий комфорт і зручність для пасажирів.

На рисунку 1.4 зображено типову архітектуру електромобіля з відображенням основних конструктивних компонентів та їх розміщення в кузові, що дозволяє чітко візуалізувати взаємне розташування систем електроприводу, енергоживлення та допоміжних модулів, що є важливим для розуміння принципу роботи електромобіля як єдиного цілого. Така компоновка є результатом спеціального проектування платформи електромобіля з урахуванням особливостей електроприводу, ергономіки, безпеки та енергоефективності.

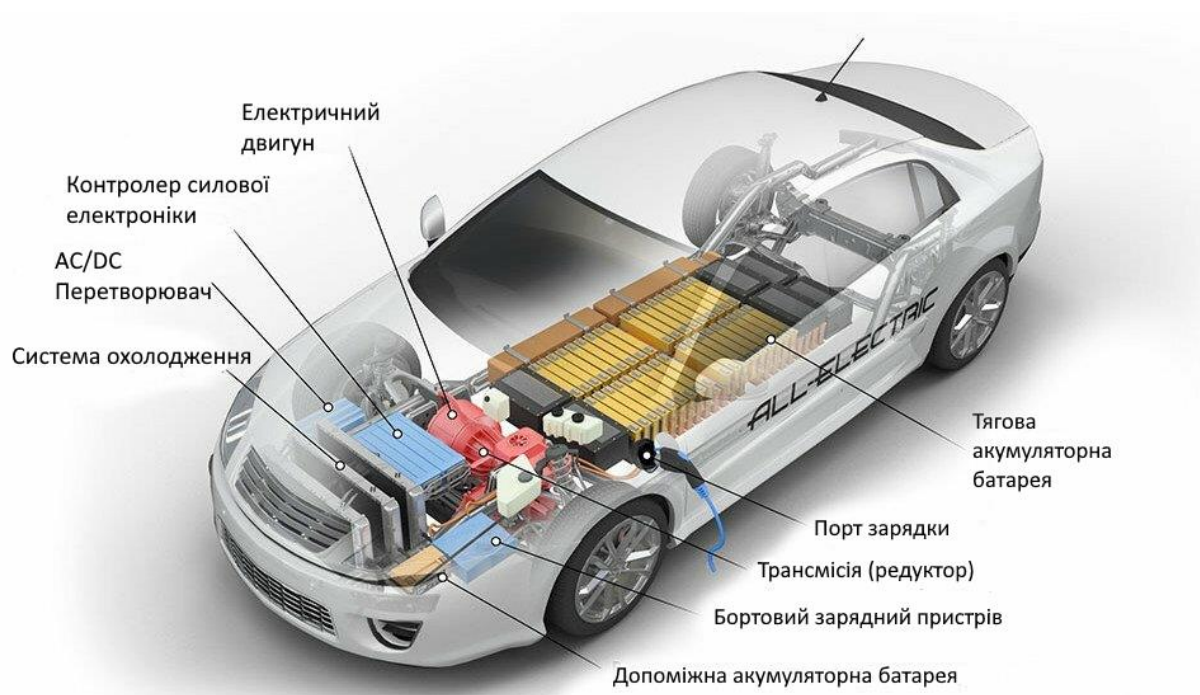


Рисунок 1.4 – Компоновка основних елементів електромобіля

Ключові елементи конструкції:

Тяговий електродвигун – розміщений у передній частині (або на задній осі в залежності від компоновки), забезпечує передачу крутного моменту на трансмісію.

Контролер силової електроніки – управляє електродвигуном, регулює швидкість обертання та крутний момент залежно від команд водія.

AC/DC перетворювач – виконує перетворення змінного струму у постійний та навпаки залежно від режиму роботи (заряджання або руху).

Система охолодження – забезпечує відведення тепла від електродвигуна, батарей та силовій електроніки для запобігання перегріву.

Тяговий акумуляторний блок – зазвичай розміщується вздовж днища автомобіля для зниження центра мас і підвищення стійкості. Постачає електроенергію на електродвигун і інші споживачі.

Бортовий зарядний пристрій – перетворює змінний струм із зовнішньої мережі у постійний для зарядки батареї.

Порт зарядки – роз'єм для підключення зовнішнього зарядного пристрою.

Допоміжна акумуляторна батарея (зазвичай 12 В) – забезпечує живлення допоміжних систем, таких як освітлення, мультимедіа, кермові системи, гальма тощо.

Трансмісія (редуктор) – передає обертовий момент від електродвигуна до коліс. У більшості випадків застосовується одноступенева редукторна передача.

На рисунку 1.5 представлено узагальнену функціональну схему електромобіля, яка демонструє взаємодію ключових елементів системи електроприводу, енергоживлення та керування [9].

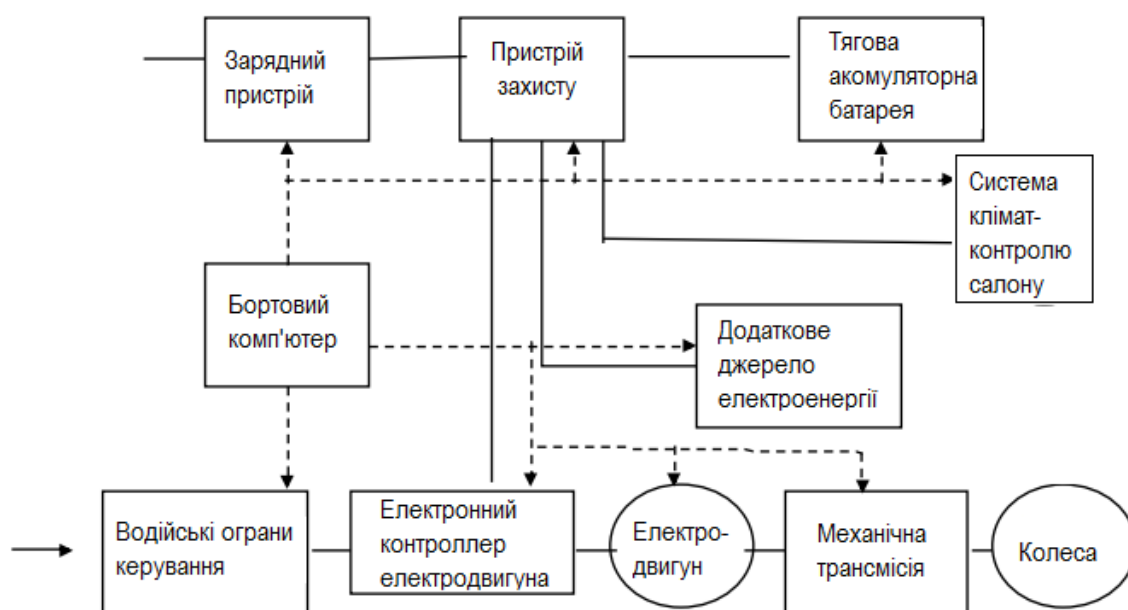


Рисунок 1.5 – Структура силовій частини електроприводу електромобіля

Зарядний пристрій може бути вбудованим у бортову систему електромобіля. У цьому випадку підключення до зовнішньої мережі змінного струму здійснюється безпосередньо до автомобіля, а контроль процесу зарядки виконує бортовий комп'ютер. Це дає змогу забезпечити оптимальний режим заряджання акумуляторної батареї з урахуванням її поточного стану.

Пристрій захисту, що включає в себе вимикачі, реле та запобіжники, розміщується між тяговою акумуляторною батареєю та іншими електричними компонентами. Його призначення – відключення живлення у разі виявлення несправностей, зокрема короткого замикання або перевантаження. У електромобілях застосовується ізольована система живлення: металевий корпус не є загальним провідником, а вся електропроводка має подвійну ізоляцію. Це дозволяє уникнути появи значних струмів при пробіі ізоляції в одній точці, однак подвійний пробій потенційно небезпечний і може спричинити коротке замикання всієї батареї.

Тягова акумуляторна батарея є основним джерелом енергії для електродвигуна. Існує декілька типів акумуляторів, які застосовуються в електромобілях, серед них: свинцево-кислотні (СК), нікель-кадмієві (Ni-Cd), залізо-нікелеві (Ni-Fe), нікель-металгідридні (Ni-MH), натрієво-сірчані (Na-S), нікель-хлоридні (Ni-Cl).

Найперспективнішими на сьогодні є літій-іонні та літій-полімерні акумулятори, а також паливні елементи, інерційні маховики і суперконденсатори, що перебувають на стадії активного розвитку. Ключові обмеження акумуляторних систем – це обмежена питома енергія, велика маса, довгий час зарядки і вартість.

Бортовий комп'ютер контролює роботу всіх основних вузлів і систем електромобіля, зчитує сигнали з датчиків, приймає команди від водія і за потреби ініціює захисні дії, наприклад відключення батареї чи обмеження потужності.

Додаткове джерело електроенергії, зазвичай допоміжна батарея напругою 12 В, живить допоміжні системи: зовнішнє та внутрішнє освітлення, приладову панель, системи обігріву та вентиляції, склопідйомники, склоочисники тощо.

Система клімат-контролю салону включає електричний кондиціонер та обігрівач, які можуть використовувати як акумуляторну енергію, так і теплові насоси (у сучасних моделях), забезпечуючи комфортні умови для пасажирів.

Електронний контролер електродвигуна виконує функцію перетворення електроенергії з постійної або змінної напруги у форму, необхідну для живлення тягового електродвигуна. Контролер також регулює швидкість обертання та крутний момент на основі сигналів з водійських органів керування, реалізуючи плавний старт, рекуперацію та захист двигуна.

Електродвигун забезпечує перетворення електричної енергії в механічну. На сучасних електромобілях застосовуються спеціалізовані асинхронні або синхронні двигуни змінного струму, що мають високий ККД, компактність, надійність і низькі вимоги до обслуговування. Такі двигуни можуть бути інтегровані безпосередньо у колесо (мотор-колеса) або передавати крутний момент через трансмісію.

Механічна трансмісія у електромобілі виконує роль передавального механізму між двигуном і колесами. Зазвичай це одноступенева редукторна передача з диференціалом, оскільки електродвигун може працювати в широкому діапазоні обертів без необхідності багатоступеневої коробки передач.

Водійські органи керування включають традиційні елементи – кермо, педаль акселератора, гальма, важіль стоянкового гальма тощо. Вони взаємодіють із електронною системою контролю, що передає команди до контролера двигуна та інших систем.

Колеса електромобіля є кінцевими виконавчими елементами, які безпосередньо передають тягове зусилля на дорожнє покриття. У класичній схемі вони з'єднані з двигуном через трансмісію, однак в деяких сучасних

рішеннях використовується концепція мотор-коліс, де електродвигун вмонтований безпосередньо в ступицю колеса.

У електромобілях застосовуються різні схеми реалізації електроприводу, які визначаються компоновкою електродвигунів, джерел енергії та передавальних механізмів.

Вибір конфігурації залежить від типу платформи, вимог до динаміки, вартості, ваги, а також типу приводу (передній, задній, повний).

На рисунку 1.6 наведено основні конфігурації електричної тяги електромобілів. [4, 5, 6, 7].

На рисунку 1.4 прийнято такі позначення:

З – зчеплення;

Д – диференціал;

ФП – фіксована передача;

КП – коробка передач;

ЕД – електродвигун.

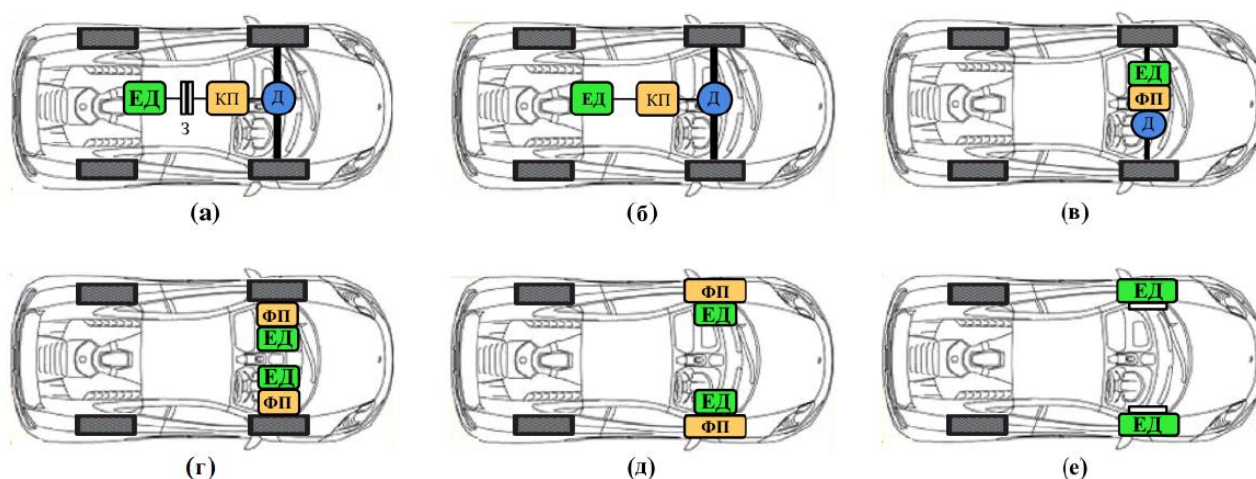


Рисунок 1.6 – Варіанти компоновки електроприводу в електромобілях

Конфігурація «а». Центральне розміщення двигуна з КП і диференціалом (класична задньопривідна компоновка). У цій схемі використовується один потужний електродвигун, розташований вздовж подовжньої осі. Через коробку

передач (КП) і диференціал (Д) крутний момент передається на задню вісь. Це найбільш поширений варіант у перших моделях електромобілів, де зберігалася типова архітектура ДВЗ-автомобіля, включаючи зчеплення (З). Диференціал – це механічний пристрій (зазвичай у вигляді набору планетарних або конічних шестерень), що забезпечує можливість обертання коліс одного мосту з різними кутовими швидкостями, наприклад, при русі транспортного засобу по криволінійній траєкторії.

Конфігурація «б» – електродвигун і КП розміщуються ближче до передньої осі, забезпечуючи передній привід. Така схема використовується в більшості бюджетних моделей, оскільки дозволяє спростити компоновку, зменшити втрати та забезпечити компактність та обійтися без зчеплення.

Конфігурація «в» – двигун з інтегрованим редуктором та диференціалом на задній осі. Компактне компонування електродвигуна, редуктора і диференціала в одному блоці дозволяє зменшити загальні габарити приводу та спростити передачу моменту. Це також сприяє зниженню ваги та втрат енергії в механічній трансмісії..

Конфігурація «г» – схема з двома електродвигунами на одну вісь, у якій по одному електродвигуну встановлено для кожного з бічних коліс однієї осі. Така компоновка дозволяє регулювати тягу окремо для лівого та правого колеса, замінюючи традиційний механічний диференціал. При русі на поворотах електроніка змінює швидкість обертання кожного двигуна, що дозволяє компенсувати різницю в довжині траєкторії і забезпечити плавне проходження повороту без пробуксовки. Це рішення поєднує високу керованість із спрощеною механічною конструкцією.

Конфігурація «д». Кожна вісь має окремий електродвигун, що забезпечує незалежний привід на передню і задню осі. Така схема дозволяє реалізувати повний привід без механічного зв'язку між осями, завдяки чому досягається висока адаптивність до дорожніх умов, точне регулювання крутного моменту на

кожну вісь, а також можливість реалізації рекуперації енергії окремо по кожній осі.

Конфігурація «е» – кожне з ведучих коліс має власний вбудований електродвигун, інтегрований безпосередньо в ступицю – так звані мотор-колеса. У такій системі відсутня будь-яка механічна передача між електродвигуном і колесом: ротор електродвигуна обертає колесо безпосередньо. Відповідно, швидкість обертання двигуна повністю еквівалентна швидкості обертання колеса, а отже, і швидкості руху автомобіля. Таке рішення дозволяє досягти найвищої ефективності у передачі енергії, забезпечує швидке керування тяговими характеристиками окремо для кожного колеса, зменшує втрати та масу трансмісії.

Для подальших розрахунків оберемо схему електроприводу згідно з варіантом (б) (рис. 1.6), яка передбачає передній привід з одним тяговим електродвигуном та фіксованою передачею. У цій конфігурації багатоступенева коробка передач не використовується; замість неї застосовується редуктор із постійним передаточним числом, що передає крутний момент від електродвигуна до диференціала та далі – на колеса.

Дана компоновка відзначається: простотою механічної частини, зниженими втратами енергії у трансмісії, підвищеним коефіцієнтом корисної дії (ККД), оптимальними масогабаритними характеристиками, що робить її особливо ефективною для міських електромобілів.

Для аналізу динаміки руху, розрахунку тягових характеристик і споживання енергії електромобіля використовується стандартний Європейський міський цикл руху (ECE-15, UDC). Він моделює типовий режим експлуатації транспортного засобу в умовах міста: короткі прискорення, часті зупинки, обмежені швидкості. Це графік зміни швидкості в функції часу (рис. 1.7).

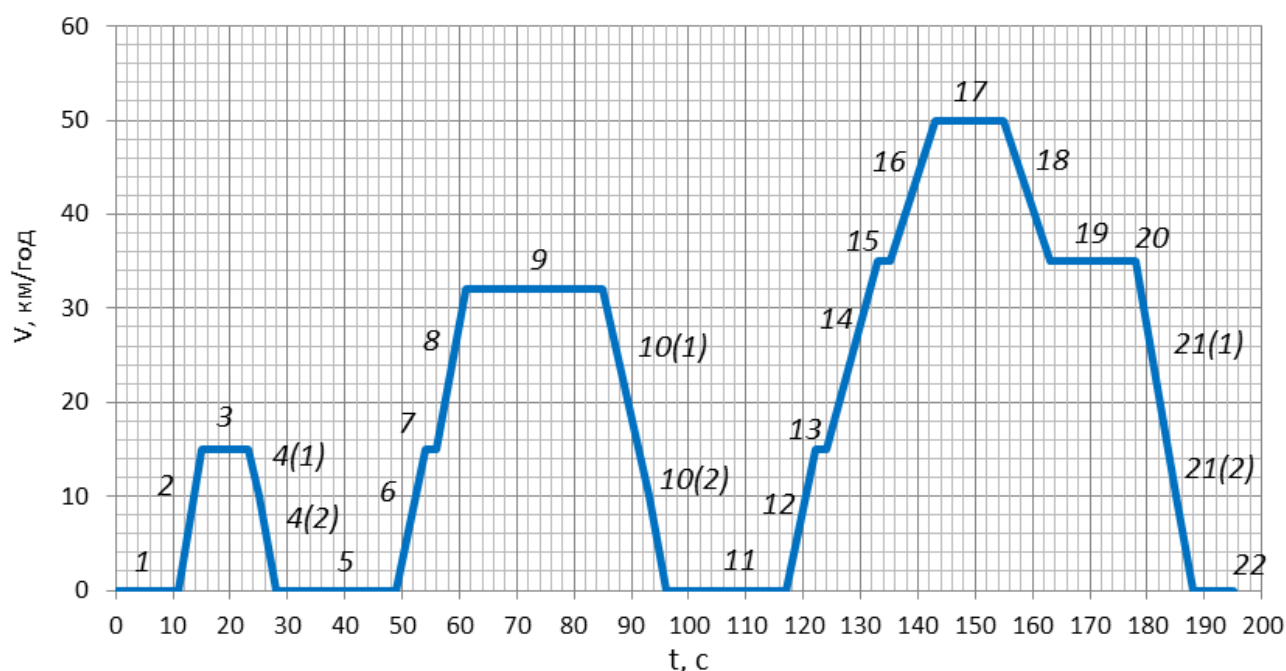


Рисунок 1.7 – Європейський міський цикл руху електромобіля (ECE-15)

Цикл триває 195 секунд і охоплює кілька фаз:

- розгін до 15-50 км/год,
- рух із постійною швидкістю (30-50 км/год),
- уповільнення до зупинки,
- повні зупинки на 10-20 секунд.

Профіль швидкості містить 22 характерні точки, які можна використати для поетапного аналізу навантаження на електродвигун, визначення тягових сил, потужності, витрати енергії та ефективності системи рекуперації.

Цей цикл широко застосовується при проектуванні міських електромобілів, розрахунках заповнення батареї, оптимізації енергетичного балансу, а також при порівнянні з іншими стандартними циклами (наприклад, WLTP, NEDC).

1.3 Кінематична схема тягового механізму електромобіля

Кінематична схема тягового механізму електромобіля, наведена на рисунку 1.8, відповідає компоновці з фіксованим передаточним числом, згідно з варіантом «б» (рис. 1.6). Така схема передбачає передавання крутного моменту від тягового

електродвигуна до ведучих коліс через редуктор і диференціал. Тяговий електродвигун з'єднаний із входним валом редуктора (вал 1), який через зубчасту передачу передає обертовий момент на вал 2. Далі момент надходить на головну передачу, а з неї – через диференціал – до півосей і ведучих коліс. Головна передача забезпечує зниження швидкості обертання та збільшення крутного моменту. Диференціал, у свою чергу, виконує функцію розподілу моменту між лівим і правим колесами та дозволяє їм обертатися з різними швидкостями при русі по кривій.

На рисунку 1.8 наведено кінематичну схему тягового механізму електромобіля, яка відображає послідовність передачі крутного моменту від електродвигуна до ведучих коліс через редуктор і диференціал.

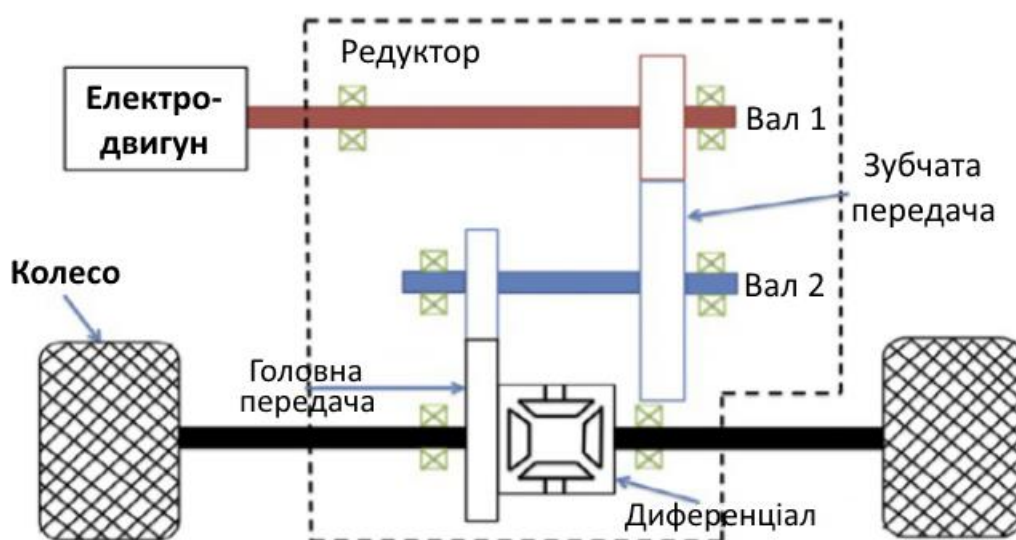


Рисунок 1.8 – Кінематична схема тягового приводу електромобіля з фіксованою передачею

Електродвигун встановлено на одній осі та з'єднано з первинним валом редуктора (вал 1).

Крутний момент від двигуна передається на зубчасту передачу, що з'єднує вал 1 з валом 2. Ця передача виконує функцію редуктора – зменшує швидкість обертання та відповідно збільшує крутний момент.

З вала 2 крутний момент надходить на головну передачу, а далі – на диференціал.

Диференціал розподіляє момент між лівим і правим приводними валами, що ведуть до приводних коліс.

Завдяки диференціалу забезпечується різна кутова швидкість обертання коліс під час проходження поворотів, що необхідно для стабільності руху.

У даній кінематичній схемі застосовується фіксоване передаточне число (тобто відсутня багатоступенева коробка передач).

Схема відзначається простотою конструкції, високим ККД і надійністю, що робить її доцільною для міських та комерційних електромобілів.

Технічні характеристики електромобіля наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики електромобіля

Загальна вага електромобіля, кг	$m_0 = 1700$
Вага навантаженого автомобіля, кг	$m = 1900$
Радіус валу ходового колеса, м	$r = 0,1405$
Радіус ходового колеса, м	$R_K = 0,4719$
коефіцієнт тертя ковзання в підшипниках кочення	$\mu = 0,015$
Передаточне число ведучого моста	$i = 9,817$
ККД трансмісії	$\eta = 0,9$

1.4 Аналіз типів електродвигунів електромобілів

Одним із ключових елементів електроприводу є електродвигун, який перетворює електричну енергію в механічну і забезпечує обертання ведучих коліс. Від вибору типу двигуна залежать:

- енергоефективність системи,
- діапазон швидкостей і моментів, що реалізуються,
- вага та габарити силового агрегату,

- витрати на виробництво та обслуговування.

У сучасних електромобілях застосовуються різні типи електродвигунів, кожен з яких має свої переваги та обмеження залежно від умов експлуатації, класу транспортного засобу й вимог до динаміки руху.

Найбільш поширені типи електродвигунів, які використовуються в електромобілях:

- двигуни постійного струму (щіткові та безщіткові),
- асинхронні двигуни змінного струму,
- синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM),
- вентильні реактивні двигуни (SRM),
- та інші спеціалізовані варіанти.

Двигуни постійного струму були одними з перших типів електричних машин, які застосовувалися в електромобілях ще на початку XX століття. Їх популярність на ранніх етапах розвитку електротранспорту зумовлювалася простотою керування, а також розділенням електричних і механічних процесів, що полегшувало реалізацію систем керування.

Однак із розвитком технологій виявилася низка суттєвих недоліків цього типу двигунів:

- наявність щітково-колекторного вузла, що зумовлює зношування контактів і потребу в частому обслуговуванні;
- підвищена маса двигуна порівняно з аналогами змінного струму;
- знижений ККД у широкому діапазоні навантажень;
- обмеження за частотою обертання та ризик іскріння.

Усе це призвело до витіснення двигунів постійного струму з транспортного сегмента після впровадження технологій векторного керування та інверторного живлення двигунів змінного струму.

Незважаючи на це, двигуни постійного струму все ще можуть знаходити застосування у малопотужних електроприводах – зокрема в електроскутерах,

дитячому електротранспорті, мобільних платформах та іншій побутовій техніці, де важливими є простота, низька вартість і відсутність складних алгоритмів керування.

Асинхронні електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором є одним із найпоширеніших типів електричних машин у промисловості, а згодом вони знайшли широке застосування і в електромобілях. Популярність таких двигунів зумовлена їхньою надійністю, простотою конструкції, низькими витратами на обслуговування, а також здатністю працювати в агресивних або забруднених середовищах [15].

Використання векторного керування дозволяє ефективно управляти асинхронними машинами в широкому діапазоні швидкостей і навантажень. Зокрема, стає можливим послаблення магнітного потоку в обмотках для розширення діапазону регулювання швидкості без втрати стійкості роботи. Таким чином, АД об'єднує переваги простої тягової машини змінного струму з пусковими та регулювальними характеристиками, подібними до двигуна постійного струму.

Для роботи в складі електромобіля асинхронний двигун має бути спеціально адаптований – відповідно до вимог тягових електричних машин. Це передбачає:

- герметизацію корпусу та захист від вологи/пилу;
- застосування високоякісних підшипників, що не потребують обслуговування протягом 30.000-50.000 годин;
- термостійку ізоляцію обмоток;
- високу механічну міцність для роботи при високих частотах обертання.

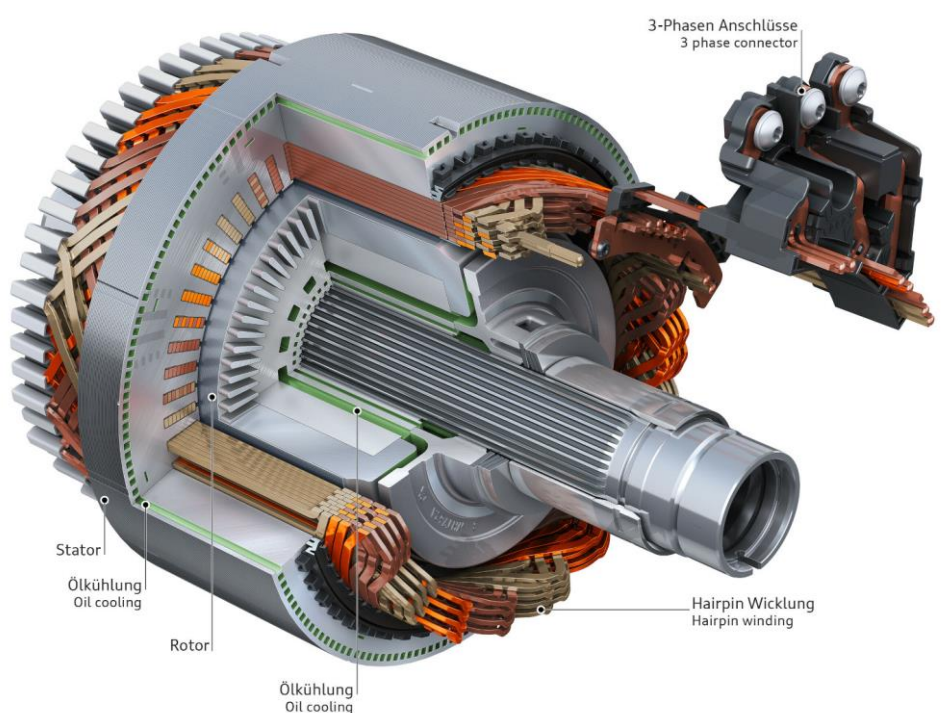


Рисунок 1.9 – Асинхронний тяговий двигун електромобіля

Асинхронний двигун може мати дещо більшу масу порівняно із синхронним двигуном із постійними магнітами (СДПМ). Однак це не є критичним фактором, оскільки вага двигуна зазвичай становить лише 2-5% від загальної маси електромобіля і є набагато меншою за масу тягової батареї.

Нові серії тягових АД досягають високої енергоефективності завдяки:

- збільшенню вмісту міді й електротехнічної сталі в активному об'ємі;
- зменшенню повітряного зазору між ротором і статором;
- підвищенню коефіцієнта заповнення пазів обмотками.

Завдяки подальшому вдосконаленню схем керування, систем охолодження та конструктивних матеріалів, асинхронні двигуни залишаються перспективним і надійним рішенням для застосування в електромобільному приводі, особливо в умовах, де важлива витривалість, простота та мінімальне технічне обслуговування.

Асинхронні тягові електродвигуни змінного струму (АС - Alternating Current), керуються тяговим перетворювачем змінного струму і є сучасним та ефективним рішенням для електротранспорту.

Синхронні двигуни з постійними магнітами (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) є одним з найбільш перспективних і ефективних типів електричних машин для використання в електромобілях. Вони становлять серйозну альтернативу асинхронним двигунам, особливо в системах, де потрібна висока енергоефективність і компактність.

На практиці такі двигуни вже знайшли широке застосування у серійних електромобілях та гібридах від провідних автовиробників, зокрема Toyota, Honda, Nissan, BMW, Tesla та інших.

Серед основних переваг PMSM можна відзначити:

- високу питому потужність (відношення потужності до маси двигуна);
- високий ККД у широкому діапазоні навантажень;
- низькі втрати тепла і, відповідно, ефективне тепловідведення;
- компактність конструкції та високу динамічність.

Проте є і певні технічні обмеження. Одним із них є обмежений діапазон постійної потужності – зона, в якій двигун може забезпечувати незмінну вихідну потужність при зростанні швидкості. Щоб розширити цей діапазон і забезпечити роботу при вищих швидкостях, застосовується метод керування із регулюванням кута випередження (кут провідності), який дозволяє ослаблювати магнітне поле і підвищувати швидкість до 3-4 разів вище базової.

До основних недоліків синхронних машин із постійними магнітами належать:

- ризик розмагнічування ротора при перегріві або впливі реактивного поля якоря;
- висока вартість через використання рідкоземельних матеріалів (наприклад, неодим, самарій-кобальт);
- підвищені вимоги до системи охолодження та контролю температури.

Попри це, PMSM залишаються одним з найефективніших типів двигунів для електромобілів, особливо для преміум-сегменту та високодинамічних

моделей, де важливими є компактність, точне керування і висока продуктивність.

Вентильні реактивні двигуни (Switched Reluctance Motors, SRM) останнім часом привертають дедалі більше уваги як перспективна альтернатива традиційним типам електродвигунів у системах електроприводу. Їх популярність зростає завдяки простій конструкції, відмінній надійності та ефективній роботі в складних умовах експлуатації.

До основних переваг SRM належать:

- проста та міцна конструкція: ротор не містить обмоток або постійних магнітів, що підвищує механічну стійкість;
- відмовостійкість: навіть при виході з ладу однієї фази двигун може продовжувати обмежену роботу;
- широкий діапазон постійної потужності, що дозволяє забезпечувати стабільну продуктивність на високих швидкостях;
- простота керування завдяки цифровій імпульсній системі управління;
- невисока вартість виготовлення завдяки відсутності рідкоземельних матеріалів.

Однак SRM має і низку характерних недоліків:

- висока пульсація крутного моменту, що може викликати вібрації при низьких швидкостях;
- підвищений рівень шуму у процесі роботи через різкі зміни електромагнітного потоку;
- складність оптимального керування для забезпечення рівномірної роботи на всьому діапазоні частот.

Незважаючи на ці обмеження, вентильні реактивні двигуни розглядаються як перспективне рішення для використання в електромобілях, особливо в умовах, коли критичними є витривалість, простота виготовлення та низька вартість. Активний розвиток силової електроніки та алгоритмів керування

дозволяє поступово нівелювати недоліки та розширювати сфери застосування SRM у транспорті.

Безколекторні двигуни постійного струму (Brushless DC Motor, BLDC) останніми роками активно застосовуються в різних галузях – від верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК) і побутової техніки до сервосистем і електромобілів. Зростаюча популярність цих двигунів зумовлена поєднанням високої енергоефективності, простої конструкції та широких можливостей керування.

Конструктивно BLDC є оберненою машиною постійного струму з постійними магнітами, де відсутній колекторно-щітковий вузол, а живлення подається у формі прямокутних імпульсів, що відрізняє ці двигуни від синхронних машин із синусоїдальним живленням.

Основні переваги безколекторних двигунів:

- високий ККД та велика питома потужність;
- високий пусковий момент;
- широкий діапазон регулювання швидкості;
- лінійна характеристика «момент-струм»;
- відсутність потреби в регулярному обслуговуванні (немає щіток, що зношуються);
- стійкість до зовнішніх впливів – пилу, вологи, вібрацій.

Ці двигуни поєднують механічну простоту асинхронних машин (завдяки відсутності колектора) з динамічними властивостями двигунів постійного струму, що дає їм переваги над обома класичними типами.

У галузі електромобілебудування безколекторні двигуни часто використовуються в легкому транспорті, мотор-колесах, а також у допоміжних системах – таких як кермові приводи, системи кондиціонування чи електричні насоси.

Під час руху електромобіля надзвичайно важливо, щоб електродвигун забезпечував характеристики, максимально сприятливі для створення необхідного

тягового зусилля. Відповідність електричної машини вимогам до тягового приводу залежить від магнітних, електромагнітних, електромеханічних і тягових властивостей, а також від здатності двигуна ефективно взаємодіяти з зовнішніми силами, які діють на автомобіль у процесі експлуатації.

При виборі типу електропривода для електромобіля доцільно враховувати: енергоефективність і динамічні характеристики; надійність роботи та термін служби без обслуговування; умови експлуатації (температура, вологість, вібрації); вартість виробництва і можливість реалізації систем керування. Правильно обраний електродвигун дозволяє забезпечити оптимальні тягові характеристики, знизити енергоспоживання та підвищити загальну ефективність електромобіля.

1.5 Основні вимоги та задачі проектування

При проектуванні тягового електропривода електромобіля необхідно враховувати комплекс вимог, що забезпечують не лише ефективну, а й надійну, економічну та просту в експлуатації роботу всієї системи.

До основних вимог належать:

- висока надійність та довговічність приводу в умовах тривалого циклічного навантаження;
- підвищення якості роботи електромобіля за динамічними та енергетичними показниками;
- простота конструкції та обслуговування елементів системи;
- енергетична ефективність та оптимальність за заданими критеріями експлуатації.

Система керування електроприводом повинна бути:

- зручною в експлуатації;
- інтуїтивно зрозумілою для користувача;
- економічною з точки зору енергоспоживання та втрат.

Джерелами підвищення енергоефективності можуть слугувати:

- зменшення пускових втрат;

- зниження втрат у силових і керуючих елементах схеми;
- використання рекуперативного гальмування, яке дозволяє повертати частину кінетичної енергії назад у джерело живлення або в акумуляторну батарею.

Втрати енергії під час рекуперації чи електричного гальмування включають: розсіювання енергії на гальмівних резисторах (у разі відсутності рекуперації); втрати в обмотках тягових двигунів та елементах силової електроніки (інверторах, фільтрах, ключових напівпровідниках); комутаційні втрати в перетворювачах, особливо за високих частот роботи.

Таким чином, оптимізація параметрів системи керування та вибір ефективних компонентів дозволяють значно знизити втрати електроенергії, підвищити ККД привода та покращити загальні техніко-експлуатаційні характеристики електромобіля.

При модернізації або розробці тягового електропривода електромобіля слід обов'язково враховувати встановлені експлуатаційні характеристики транспортного засобу. Електрична схема та система керування повинні забезпечувати реалізацію всіх необхідних режимів роботи, які виникають у процесі руху електромобіля.

До основних режимів експлуатації належать:

- рух з низькою швидкістю на маневрових ділянках (наприклад, під час паркування або точного під'їзду до місця заряджання);
- нормальний автоматичний розгін з урахуванням плавності та динаміки;
- рух із різними фіксованими або змінними швидкостями відповідно до умов дорожнього руху;
- електричне гальмування, включаючи динамічне або рекуперативне;
- рекуперація кінетичної енергії електромобіля від двигуна.

Забезпечення цих режимів роботи потребує чітко спроектованої системи керування, здатної ефективно управляти тяговим електродвигуном у широкому діапазоні навантажень і швидкостей.

Висновок. Було розглянуто конструктивні особливості електромобіля, принципи його роботи та ключові компоненти силової системи. Наведено кінематичну схему тягової передачі, охарактеризовано можливі типи електричних двигунів, що застосовуються в електромобілях, з аналізом їх переваг та недоліків. Окрему увагу приділено основним вимогам до системи електропривода, таким як енергоефективність, надійність, простота керування та здатність працювати в різних експлуатаційних режимах. Також сформульовано основні задачі проєктування електропривода, що мають бути враховані під час подальших розрахунків і вибору конфігурації електричного приводу.

2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТАХОГРАМИ ТА ПОТУЖНОСТІ ПРИВОДНОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

2.1 Розрахунок кінематичних параметрів тахограми циклу руху електромобіля

Середня швидкість руху транспортного засобу визначається за формулою [6]:

$$v = V \frac{1000}{3600}, \quad (2.1)$$

де V – середня швидкість руху в км/год, ($V = 40$ км / год).

$$v = 40 \frac{1000}{3600} = 11.11 \text{ (м/с)}.$$

Усереднена тривалість руху між зупинками транспортного засобу:

$$t_p = \frac{S}{v}, \quad (2.2)$$

де S – середня довжина ділянки між зупинками, м [5],

($S = 500$ м).

$$t_p = \frac{500}{11.11} = 45 \text{ (с)}.$$

Середня тривалість одного циклу:

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_n, \quad (2.3)$$

де $t_n = 20$ с – середній час паузи (посадки-висадки пасажирів).

$$t_{\text{ц}} = 45 + 20 = 65 \text{ (с)}.$$

Розглядаються два режими руху:

- при повному завантаженні салону пасажирями;
- при порожньому салоні (без пасажирів).

1. Рух при повному завантаженні.

Час розгону до сталої швидкості руху:

$$t_{\text{розл}} = \frac{v}{a_{\text{розл}}}, \quad (2.4)$$

де $a_{\text{розл}} = 0,6$ м/с² – прискорення при повному навантаженні.

$$t_{роз1} = \frac{11.11}{0.6} = 18.52 \text{ (с)}.$$

Вважаючи, що час гальмування дорівнює часу розгону, отримаємо:

$$t_{гал1} = t_{роз1}, \quad (2.5)$$

$$t_{гал1} = 18.52 \text{ (с)}.$$

Тоді час усталеного режиму руху:

$$t_{уст1} = t_p - t_{роз1} - t_{гал1}, \quad (2.6)$$

$$t_{уст1} = 65 - 18.52 - 18.52 = 27.96 \text{ (с)}.$$

2. Рух без пасажирів (холостий режим).

Час розгону:

$$t_{роз2} = \frac{v}{a_{роз2}}, \quad (2.7)$$

де $a_{роз2} = 0,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення без навантаження

$$t_{роз2} = \frac{11.11}{0.8} = 13.8875 \text{ (с)}.$$

Прийmemo, що прискорення при розгоні та прискорення під час гальмування однакові, тоді час гальмування до повної зупинки:

$$t_{гал2} = t_{роз2} \quad (2.8)$$

$$t_{гал2} = 13.8875 \text{ (с)}.$$

Час усталеної роботи двигуна:

$$t_{уст2} = t_p - t_{роз2} - t_{гал2} \quad (2.9)$$

$$t_{уст2} = 65 - 13.8875 - 13.8875 = 37.225 \text{ (с)}.$$

Графіки тахограм залежностей кутової швидкості та прискорення привідного двигуна від часу представлені на рисунках 2.1 та 2.2 відповідно.

Розрахунок кутової швидкості та кутового прискорення здійснюємо згідно з паспортними даними, де загальне передаточне число трансмісії становить $i = 9,817$.

Тип коліс: 8.25×22.5, тобто:

$$R_{\kappa} = 22.5 \cdot 2.54 = 57.15 \text{ (см)}. \quad (2.10)$$

Значення кутової швидкості обертання коліс знаходимо за формулою [7]:

$$\omega_{\kappa} = \frac{v}{r_{\kappa}}, \quad (2.11)$$

$$\omega_{\kappa} = \frac{11.11}{0.5715} = 19.44 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Значення кутової швидкості валу привідного двигуна обчислюється згідно виразу:

$$\omega = \omega_{\kappa} \cdot i, \quad (2.12)$$

$$\omega = 19.44 \cdot 9.817 = 190.8425 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Для режиму холостого ходу:

$$\omega_0 = 0.$$

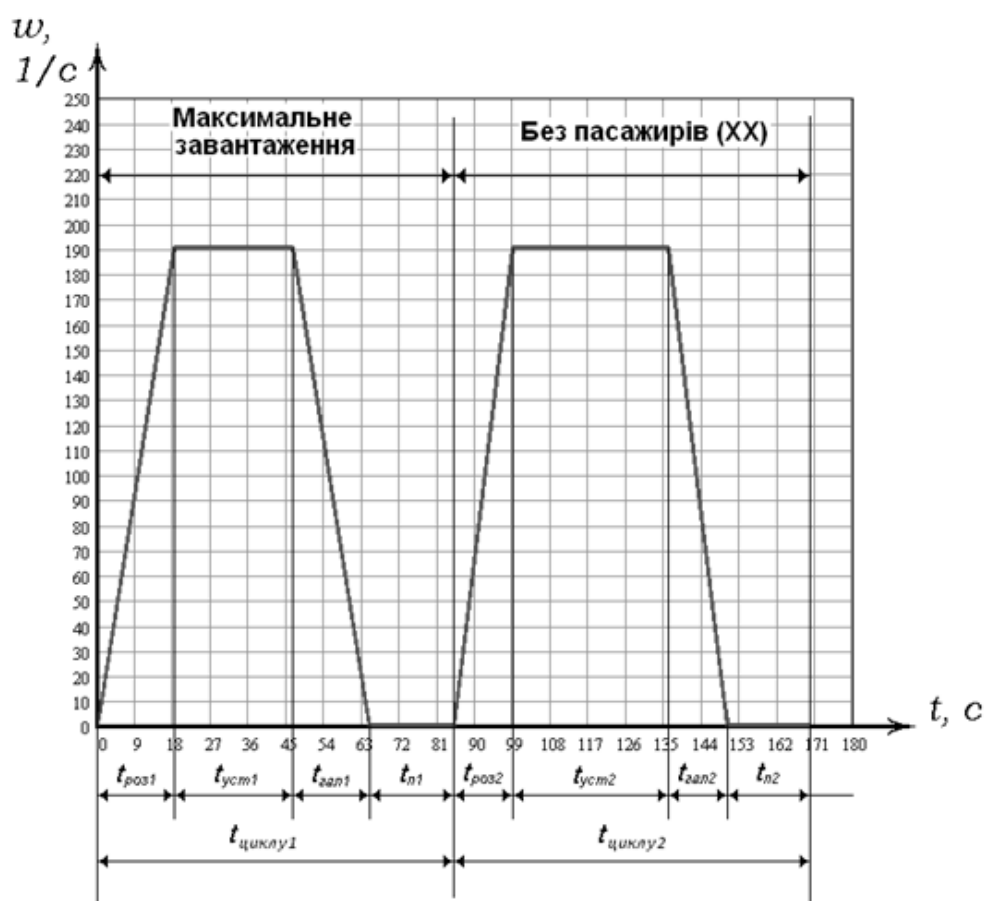


Рисунок 2.1 – Графік залежності кутової швидкості обертання ротора привідного двигуна від часу

Для побудови графіків тахограм (рисунок 2.2) порахуємо значення кутового прискорення:

$$\varepsilon = \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (2.13)$$

$$\varepsilon = \frac{\omega_{\text{поч}} - \omega_{\text{кін}}}{\Delta t}, \quad (2.14)$$

Повне навантаження:

$$\varepsilon_1 = \frac{0 - 190.8425}{18.52} = -10.31 \text{ (с}^{-2}\text{)}.$$

Без пасажирів:

$$\varepsilon_2 = \frac{0 - 190.8425}{13.8875} = -13.742 \text{ (с}^{-2}\text{)},$$

На основі розрахованих даних побудовано графіки: залежність кутової швидкості обертання ротора від часу (рисунок 2.1) та залежності кутового прискорення ротора від часу (рисунок 2.2).

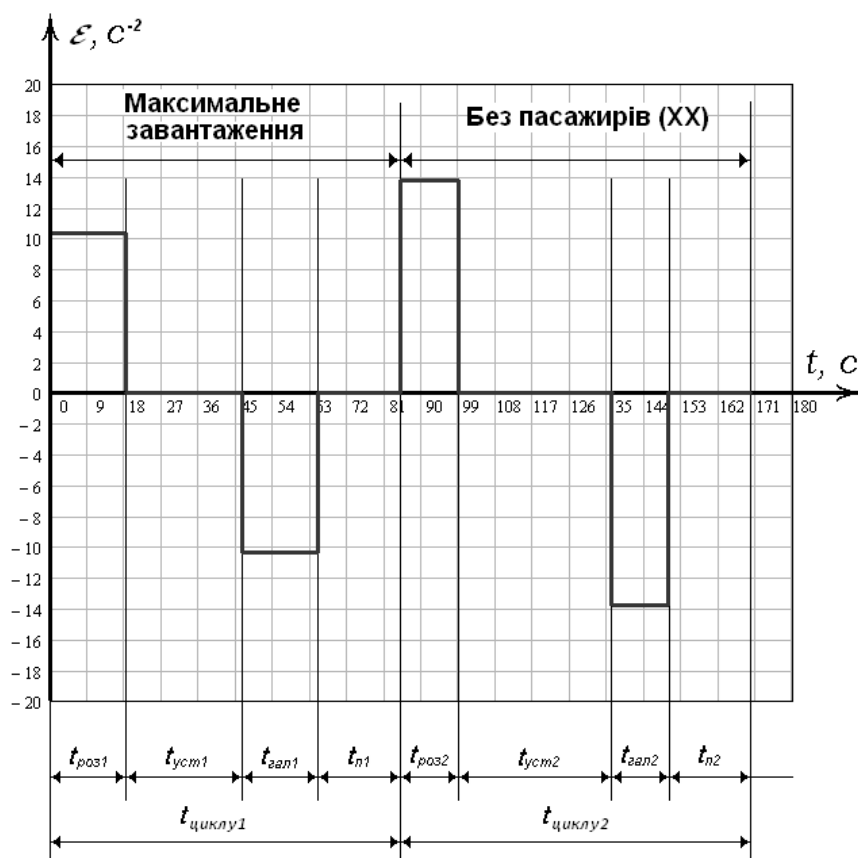


Рисунок 2.2 – Графік залежності кутового прискорення привідного двигуна від часу

Таким чином, за результатами розрахунків побудовано тахограми зміни кутової швидкості та кутового прискорення привідного двигуна електромобіля при різних режимах руху, які будуть використані для подальшого визначення потужності електроприводу.

2.2 Розрахунок приведених інерційних мас та моментів інерції

Виходячи з умови вибору електродвигуна [8], максимальний момент, який він здатен розвинути, має бути не меншим за сумарний момент опору при максимальному навантаженні:

$$M_{\text{дв.макс}} \geq M_{\text{оп}}, \quad (2.15)$$

де $M_{\text{дв.макс}}$ – критичний момент електродвигуна;

$M_{\text{оп}}$ – сумарний момент опору при найбільшому навантаженні транспортного засобу.

Сумарний момент опору $M_{\text{оп}}$ складається з двох компонентів:

$$M_{\text{оп}} = M_{\text{ст.макс}} + M_{\text{дин.макс}}. \quad (2.16)$$

$M_{\text{ст.макс}}$ – статичний момент опору,

$M_{\text{дин.макс}}$ – динамічний момент інерції.

На рисунку 2.3 представлено схему дії сил і моментів на електромобіль при горизонтальному русі.

Враховано сили тертя $F_{\text{тр1}}$, $F_{\text{тр2}}$, реакції опори N , та момент тяги ведучих коліс $M_{\text{т}}$, вагу електромобіля при максимальному завантаженні mg , силу тяги $F_{\text{т}}$, та загальну силу опору руху $F_{\text{оп}}$.

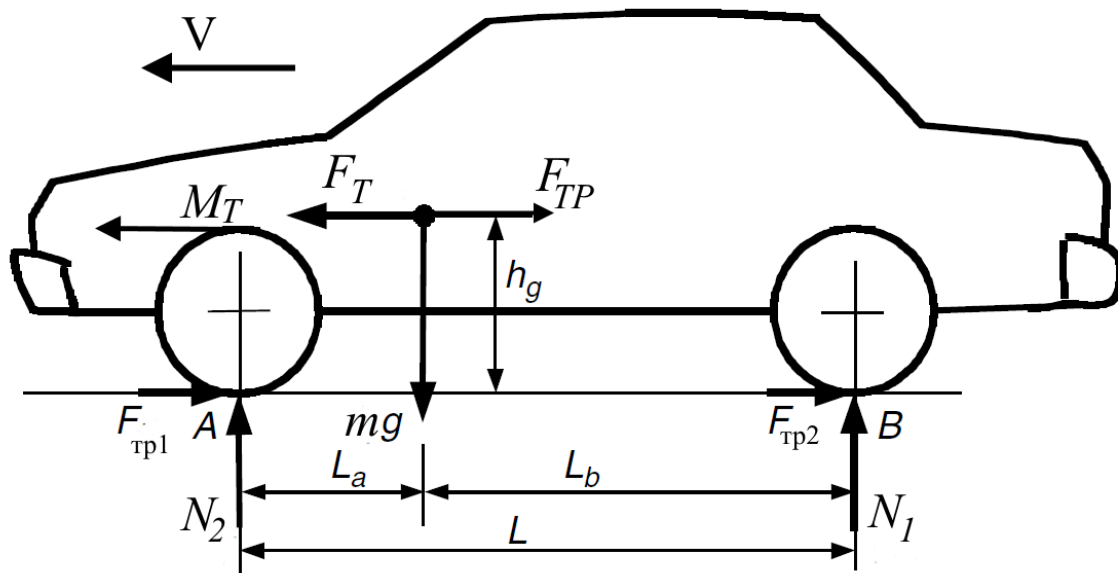


Рисунок 2.3 – Схема дії сил та моментів на електромобіль при горизонтальному русі

Статичний момент приведений до валу приводного двигуна визначається за формулою:

$$M_{cm.max} = \frac{M_T}{i \cdot \eta_{пер}}, \quad (2.17)$$

де M_T – момент тяги ведучих коліс;

i – передаточне число трансмісії, ($i = 9,817$);

$\eta_{пер}$ – ККД трансмісії, (приймаємо $\eta = 0,97$).

Момент тяги ведучих коліс визначається за формулою:

$$M_T = F_T \cdot R, \quad (2.19)$$

де $R = 0,5715$ м – радіус ведучого колеса,

F_T – сила тяги.

Сили, що діють на електромобіль під час руху на похилій ділянці дороги, зображені на рисунку 2.4:

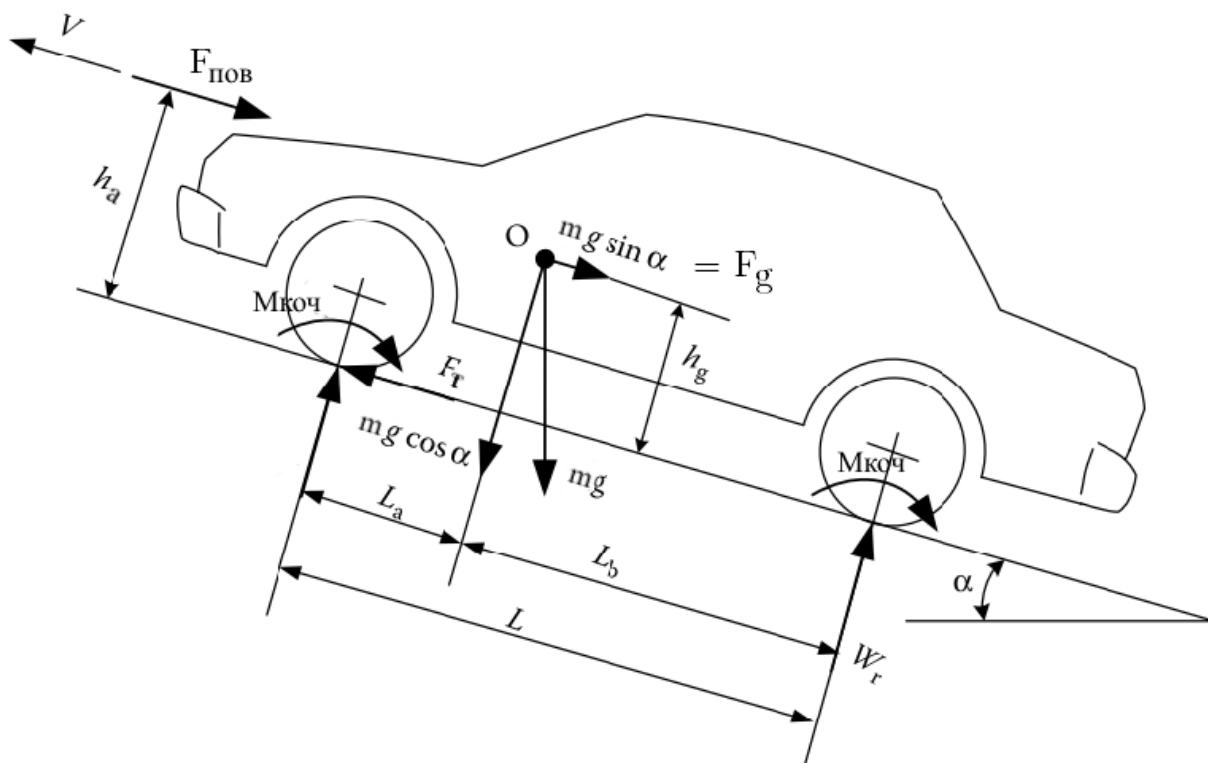


Рисунок 2.4 – Схема сил, що діють на електромобіль під час руху на підйом

Використовуючи другий закон Ньютона для осі, паралельної до руху:

$$\vec{F}_T + \vec{F}_{mp} + \vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a} . \quad (2.20)$$

Переходимо до осі, паралельної напрямку руху, враховуючи сили тертя кочення та сили тяжіння:

$$F_T - F_{mp} - mg \cdot \sin \alpha = m\mu g , \quad (2.21)$$

де α – кут нахилу підйому;

μ – коефіцієнт тертя (для асфальту $\mu = 0,02$);

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Сила реакції опори:

$$\begin{aligned} N - mg \cdot \cos \alpha &= 0, \\ N &= mg \cdot \cos \alpha. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Сила тертя:

$$F_{mp} = \mu N , \quad (2.23)$$

Тоді сила тяги:

$$F_T = m\mu g + \mu mg \cos \alpha + mg \sin \alpha \quad (2.24)$$

Або:

$$F_T = mg(\mu + \mu \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (2.25)$$

Допустима маса ТЗ – 2000 кг (з допуском +5 % приймаємо 2100 кг).

Розрахунок маси:

$$m = m_{cn} + m_n(n + k + d) + m_o n, \quad (2.26)$$

де $m_{cn} = 1700$ кг – споряджена маса,

$m_n = 70$ кг – маса одного пасажера,

$n = 4$ – кількість сидячих місць,

$d = 1$ – водій,

$m_o = 2$ кг – багаж.

$$m = 1700 + 70 \cdot (4 + 1) + 2 \cdot 4 = 2058 \text{ (кг)}.$$

Визначення параметрів підйому.

Висота підйому: 18 м, довжина – 100 м.

Тангенс кута:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{BC}{AC} = \frac{a}{b} = \frac{18}{100} = 0,18 \cdot 100\% = 18\% \quad (2.27)$$

Звідси:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{a}{b}\right) = 10,2^\circ \quad (2.28)$$

Сила тяги:

$$F_T = 2058 \cdot 9,81 \cdot (0,02 + 0,02 \cdot 0,98 + 0,17) = 13271,39 \text{ (Н)}.$$

Момент тяги:

$$M_T = 13271,39 \cdot 0,5715 = 7584,6 \text{ (Н)}.$$

Статичний момент:

$$M_{cm.\max} = \frac{7584,6}{9,817 \cdot 0,97} = 796,486 \text{ (Н)}.$$

Розрахунок динамічного моменту інерції.

Динамічний момент:

$$M_{\text{дин. max}} = J_{\text{max}} \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.29)$$

де J_{max} – загальний момент інерції, приведений до валу електродвигуна при максимальній завантаженості;

$\frac{d\omega}{dt}$ – кутове прискорення.

Загальний момент інерції при повному завантаженні:

$$J_{\text{max}} = J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{г}}}{i_{\text{г}}^2} + \frac{J_{\text{к}}}{i_{\text{г}}^2 \cdot i_{\text{ж}}^2} + m_{\text{max}} \frac{v^2}{\omega_{\text{дв}}^2}, \quad (2.30)$$

де $J_{\text{дв}}$ - момент інерції ТЕД;

$J_{\text{г}}$ - момент інерції обертових частин головної передачі;

$J_{\text{к}}$ - момент інерції ведучих коліс;

$i_{\text{г}}$ - передаточне число головної передачі;

$i_{\text{к}}$ - передаточне число колісної передачі;

$\omega_{\text{дв}}$ - кутова швидкість тягового двигуна;

v - швидкість руху.

$m_{\text{max}} \frac{v^2}{\omega_{\text{дв}}^2}$ – приведений момент інерції поступального руху, що дозволяє

перейти від поступальної до обертальної маси, еквівалентно навантажуючи вал двигуна.

Інерційний момент, що виникає внаслідок обертання окремих частин, є значно меншим порівняно з моментом інерції поступального руху. Тому вплив обертових частин можна знехтувати, врахувавши його у коефіцієнті запасу.

У такому разі момент інерції, зведений до вала електродвигуна, матиме вигляд:

$$J_{max} = m_{max} \frac{v^2}{\omega_{дв}^2}. \quad (2.31)$$

Кутова швидкість обертання валу електродвигуна:

$$\omega_{дв} = i \cdot \omega_k = i \cdot \frac{v}{R_k} = 9,817 \cdot \frac{50}{0,5715} = 190,84 \text{ (рад / с)}. \quad (2.32)$$

Приведений момент інерції при повному завантаженні:

$$J_{max} = 2058 \cdot \frac{50^2}{190,84^2} = 62,6 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}. \quad (2.33)$$

Кутове прискорення:

$$\left(\frac{d\omega}{dt} \right)_p = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega}{t_p} = \frac{190,84}{18,52} = 10,31 \text{ (с}^{-2}\text{)}. \quad (2.34)$$

Динамічний момент:

$$M_{дин.мах.} = J_{max} \cdot \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_p = 62,6 \cdot 10,31 = 645,41 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (2.35)$$

Максимальний момент електродвигуна:

$$M_{дв.мах} = K_3 \cdot (M_{ст.мах} + M_{дин.мах}), \quad (2.36)$$

де коефіцієнт запасу ($K_3 = 1,1 - 1,3$).

$$M_{дв.мах} = 1,1 \cdot (796,486 + 645,41) = 1586,085 \text{ (Н} \cdot \text{м)}, \quad (2.37)$$

$$M_{дв.мах} = 1,3 \cdot (796,486 + 645,41) = 1680,842 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (2.38)$$

Орієнтовна потужність асинхронного двигуна:

$$P_{дв} = \frac{M_{дв.мах} \cdot n_{дв}}{9,55}, \quad (2.39)$$

де $n_{дв}$ – частота обертання магнітного поля статора.

$$n_{дв} = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (2.40)$$

де f – частота мережі;

p – кількість пар полюсів.

$$n_{\partial\partial} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ (об/хв)}.$$

Попереднє значення потужності електродвигуна:

$$P_{\partial\partial} = \frac{1680,842 \cdot 750}{9,55} = 112003 \text{ (Вт)}.$$

2.3 Попередній розрахунок потужності тягового електродвигуна

Сила, яка оцінює втрати в трансмісії [8]:

$$F_{Bmp} = F_{mp} + k_{mp} v, \quad (2.41)$$

де F_{mp} – сила тертя в трансмісії при нульовій швидкості, ($F_{mp} = 102H$);

k_{mp} – коефіцієнт, що враховує збільшення сили тертя із зростанням швидкості, ($k_{mp} = 11$).

$$F_{Bmp} = 102 + 11 \cdot 11,11 = 224,21 \text{ (Н)}.$$

Втрати потужності в трансмісії під час вибігу:

$$\Delta P_{mp1} = F_{Bmp} v, \quad (2.42)$$

$$\Delta P_{mp1} = 224,21 \cdot 11,11 = 2490,9731 \text{ (Вт)}.$$

Втрати потужності в трансмісії в режимі тяги:

$$\Delta P_{mp2} = (1 - \eta_{\zeta} \cdot \eta_{\epsilon} \cdot \eta_{uu}) P_{\partial\partial} + \Delta P_{mp1}, \quad (2.43)$$

де η_{ζ} – коефіцієнт корисної дії циліндричної передачі, ($\eta_{\zeta} = 0,98$);

η_{ϵ} – коефіцієнт корисної дії гіпоїдної передачі, ($\eta_{\epsilon} = 0,97$);

η_{uu} – коефіцієнт корисної дії гіпоїдних шарнірів, ($\eta_{uu} = 0,995$);

$P_{\partial\partial}$ – орієнтовна потужність двигуна, ($P_{\partial\partial} = 132003 \text{ Вт}$).

$$\Delta P_{mp2} = (1 - 0,98 \cdot 0,97 \cdot 0,995) \cdot 132003 + 2490,9731 = 9639,3 \text{ (Вт)}.$$

Коефіцієнт корисної дії трансмісії:

$$\eta_{mp} = \eta_{\zeta} \cdot \eta_{\epsilon} \cdot \eta_{uu} - \frac{\Delta P_{mp2}}{P_{\partial\partial}}, \quad (2.44)$$

$$\eta_{mp} = 0,98 \cdot 0,97 \cdot 0,995 - \frac{9639,3}{132003} = 0,873.$$

Потужність, яку розвиває електродвигун при граничній завантаженості:

$$P_1 = \frac{V}{\eta_{mp}} (g \cdot m \cdot \psi_{\partial} + k_{нов} A_{нов} V^2), \quad (2.45)$$

де g – прискорення вільного падіння, ($g = 9.81 \text{ м/с}^2$);

ψ_{∂} – коефіцієнт опору дороги, ($\psi_{\partial} = 0.038$);

$k_{нов}$ – коефіцієнт опору повітря, ($k_{нов} = 0.02$);

$A_{нов}$ – площа лобового скла, ($A_{нов} = 8 \text{ м}^2$);

$$P_1 = \frac{11.11}{0.873} \cdot (9.81 \cdot 20875 \cdot 0.038 + 0.02 \cdot 8 \cdot 123,432) = 99.284 \text{ (кВт)}.$$

Потужність, яку розвиває електродвигун при відсутності пасажирів:

$$P_2 = \frac{V}{\eta_{mp}} (g \cdot m_{сн} \cdot \psi_{\partial} + k_{нов} A_{нов} V^2), \quad (2.46)$$

$$P_2 = \frac{11.11}{0.873} (9.81 \cdot 11500 \cdot 0.038 + 0.02 \cdot 8 \cdot 123,432) = 54.808 \text{ (кВт)}.$$

Враховуючи коефіцієнт запасу потужність тягового двигуна:

$$P = k_{зан} \cdot P_1, \quad (2.47)$$

де $k_{зан}$ – коефіцієнт запасу потужності двигуна, ($k_{зан} = 1.1$).

$$P = 1.1 \cdot 99.284 = 109.212 \text{ (кВт)}.$$

Висновок. Виконано попередній розрахунок потужності тягового електродвигуна електромобіля з урахуванням дії сил опору руху, втрат у трансмісії та режимів навантаження. Отримано значення потужності для граничного навантаження та руху без пасажирів. Побудовано навантажувальну діаграму.

З ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Для забезпечення ефективного функціонування електромобіля необхідно обрати таку систему електропривода, яка відповідала б вимогам до енергоефективності, надійності, довговічності, простоти експлуатації, а також забезпечувала техніко-економічну доцільність реалізації. У даному розділі здійснюється технічний аналіз найбільш поширених типів електродвигунів, що застосовуються або потенційно можуть застосовуватись у тягових системах електромобілів, з урахуванням особливостей відповідних систем керування.

Двигуни постійного струму (ДПС). Тягові електродвигуни постійного струму (переважно послідовного або змішаного збудження) історично застосовувались у перших електромобілях завдяки простоті керування, високому пусковому моменту та широкому діапазону регулювання. Однак наявність щітково-колекторного вузла обумовлює низьку надійність, потребу в регулярному обслуговуванні, а також зниження ККД і теплову нестабільність. Крім того, такі двигуни менш ефективні при реалізації рекуперації енергії. Системи керування для ДПС можуть бути реалізовані як реостатно-контакторні (з великими втратами), так і тиристорно-імпульсні, які забезпечують ширший функціонал, але мають обмежену ефективність у порівнянні з інверторними системами.

Синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ). Забезпечують високий ККД (до 96 %), малу масу при високій питомій потужності, стабільні характеристики та компактність. Вони є поширеним рішенням у легкових електромобілях. Проте до недоліків слід віднести:

- високу вартість матеріалів (рідкоземельні магніти);
- ризик розмагнічування при нагріванні;
- складність реалізації керування (векторне керування зі зворотним зв'язком по положенню ротора).

Системи керування СДПМ потребують високоточної електроніки (інвертори з ПД-регуляторами, датчиками положення, фільтрами струму), що ускладнює впровадження та збільшує вартість.

Асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором є одним із найпоширеніших типів у промисловому електроприводі і все частіше використовується в електромобілях (наприклад, Tesla Model S, де на задній осі застосовується саме АД). Переваги АД:

- проста, безщіткова конструкція, що забезпечує високу надійність і довговічність;
- відсутність колектора та контактних вузлів зменшує обслуговування;
- стабільна робота у широкому діапазоні навантажень;
- придатність до реалізації рекуперації енергії;
- невисока вартість і добра ремонтпридатність.

Вибирати електродвигун та систему керування будемо на основі [9]:

- 1) річних затрат на впровадження і обслуговування електроприводу;
- 2) надійність електроприводу.

3.1 Розрахунок системи ПЧ-АД

Капітальні затрати:

$$K = D + C, \quad (3.1)$$

де D – вартість двигуна;

C – вартість системи керування.

$$K = 250000 + 221000 = 471000 \text{ (грн.)}$$

Річні капітальні затрати:

$$K_p = 0,27 \cdot K, \quad (3.2)$$

$$K_p = 0,27 \cdot 471000 = 127170 \text{ (грн./рік)}.$$

Додаткові витрати (B), що залежать від кількості робочих змін та режиму роботи.

Час роботи механізму за рік:

$$t_{\text{рік}} = d \cdot z \cdot t, \quad (3.3)$$

де d – кількість робочих днів ($d = 250$);

z – кількість змін ($z = 2$);

t – кількість робочих годин в день ($t = 8$).

$$t_{\text{рік}} = 250 \cdot 2 \cdot 8 = 4000 \text{ (год)}.$$

Час роботи з урахуванням $TB = 40\%$:

$$t_{TB} = t_{\text{рік}} \cdot TB, \quad (3.4)$$

$$t_{TB} = 4000 \cdot 0,40 = 1600 \text{ (год)}.$$

Визначимо час роботи в перехідних режимах який приймемо рівним 25% від t_{TB} :

$$t_{\text{ПП}} = t_{TB} \cdot 0,25, \quad (3.5)$$

$$t_{\text{ПП}} = 1600 \cdot 0,25 = 400 \text{ (год)}.$$

Прийнявши потужність електродвигуна $P_{\text{ном}} = 100$ кВт і враховуючи вартість одного кВт потужності $c = 7,77$ грн/кВт визначимо додаткові втрати:

$$B = t_{\text{ПП}} \cdot P \cdot c, \quad (3.6)$$

$$B = 400 \cdot 100 \cdot 7,7714 = 308560 \text{ (грн./рік)}.$$

Приведені затрати на спорудження електропривода:

$$З = K_p + B + E, \quad (3.7)$$

де E – експлуатаційні витрати (15600 грн./рік).

$$З = 127170 + 308560 + 156000 = 591730 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на впровадження електроприводу при використанні ДПС і при використанні АД. Для визначення вартості електроприводу скористаємось з довідниковими даними.

Результати розрахунків приведено у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 - Порівняння техніко-економічних показників систем електропривода [9], [10]

Система ЕП Показники	ШП-ДПС	СДПМ-інвертор	ПЧ-АД
Вартість двигуна, грн	320000	420000	250000
Вартість САК, грн	150000	253000	221000
Капітальні затрати, грн	470000	673000	471000
Річні капітальні затрати, грн	108000	189000	127170
Експлуатаційні затрати, грн/рік	20600	17600	15600
Додаткові витрати, грн	40000	32000	30856
Приведені витрати, грн	168000	238000	172626
ВСЬОГО, грн	264847	270000	203542

ДПС вимагає частого технічного обслуговування, має обмежений ККД, найнижчу надійність, але просте керування.

СДПМ забезпечує найвищу ефективність, але суттєво дорожчий у реалізації і складніший у керуванні.

ПЧ-АД демонструє найкраще співвідношення «вартість-ефективність-надійність», що й обґрунтовує його вибір.

Висновок. На основі порівняння можна зробити висновок, що електропривод на базі асинхронного двигуна з перетворювачем частоти (ПЧ-АД) є найбільш доцільним для електромобіля. Він забезпечує високу енергоефективність при відносно низьких витратах, просту реалізацію та експлуатацію, а також мінімальні потреби в технічному обслуговуванні.

4 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА ЙОГО ПЕРЕВІРКА

Відповідно до заданих експлуатаційних умов, зокрема номінальної частоти обертання та попередньо визначеного значення потужності, для реалізації електроприводу було обґрунтовано вибір асинхронного електродвигуна типу Siemens 1PV5138-4WS24 [10]. Перелік основних технічних параметрів даного електродвигуна представлено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1- Параметри тягового двигуна

Тип двигуна	Siemens 1PV5138
Потужність $P_{\text{ном}}$, кВт	110
ККД, %	94
$\cos\varphi$	0,82
Номінальна напруга, В	380-400
Маса, кг	375
Максимальний момент M_{max} , Н·м	2600
Фазна напруга ротора $U_{2\phi}$, В	248
Струм ротора I_2 , А	154
Струм статора I_1 , А	147
Кількість обертів $n_{\text{ном}}$, об/хв	до
Момент інерції $J_{\partial\phi}$, кг·м ²	5,25
Номінальний момент $M_{\text{ном}}$, Н·м	1500

Зовнішній вигляд тягового електродвигуна приведено на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Тяговий електродвигун марки Siemens 1PV5138-4WS24

4.1 Перевірка вибраного двигуна за нагрівом, перевантажувальною здатністю та умовами пуску

Для оцінки правильності вибору електродвигуна здійснюється перевірка за критеріями нагріву, допустимого короточасного перевантаження та пускових характеристик. Перевірка за нагрівом проводиться методом еквівалентного моменту [11], який базується на пропорційній залежності між кількістю тепла, що виділяється в обмотках двигуна, та еквівалентним навантажувальним моментом..

Еквівалентний момент електродвигуна визначається за формулою:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum (M_i^2 \cdot t_i)}{t_{\text{ц}}}}, \quad (4.1)$$

Результати розрахунку:

$$M_{\text{екв}} = 516.337 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Обчислюємо номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P}{n}, \quad (4.2)$$

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{110000}{750} = 1400,7 \text{ (Н·м)}.$$

Перевірка за критерієм нагріву: квівалентний момент має бути меншим за номінальний:

$$M_{\text{ном}} > M_{\text{екв}}, \quad (4.3)$$

$$1400,7 > 516,337 \text{ (Н·м)}.$$

Умова виконується, отже, перевірка за нагрівом підтверджує правильність вибору двигуна.

Перевірка двигуна за перевантажувальною здатністю. Для короткочасного перевантаження повинна виконуватися умова:

$$\lambda \cdot M_{\text{ном}} > M_{\text{пвх}}, \quad (4.4)$$

де $M_{\text{пвх}}$ – максимальний момент навантаження, $M_{\text{пвх}} = 715,857 \text{ Н·м}$;

λ – допустимий коефіцієнт перевантаження, ($\lambda = 2,5$).

$$3501,75 > 1680,482 \text{ (Н·м)}.$$

Отже, умова допустимого короткочасного перевантаження також виконується.

Висновок. З урахуванням проведених перевірок було підтверджено, що вибраний асинхронний електродвигун типу Siemens 1PV5138-4WS24 для системи електропривода повністю відповідає вимогам щодо допустимого нагріву, короткочасного перевантаження та умов пуску.

5 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТРУКТУРНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Приведемо структурну схему електропривода електромобіля (рис. 5.1). На схемі представлена структура електромеханічної системи, яка реалізує взаємодію між системою електроживлення, блоками керування, силовими перетворювачами та електродвигуном електромобіля.

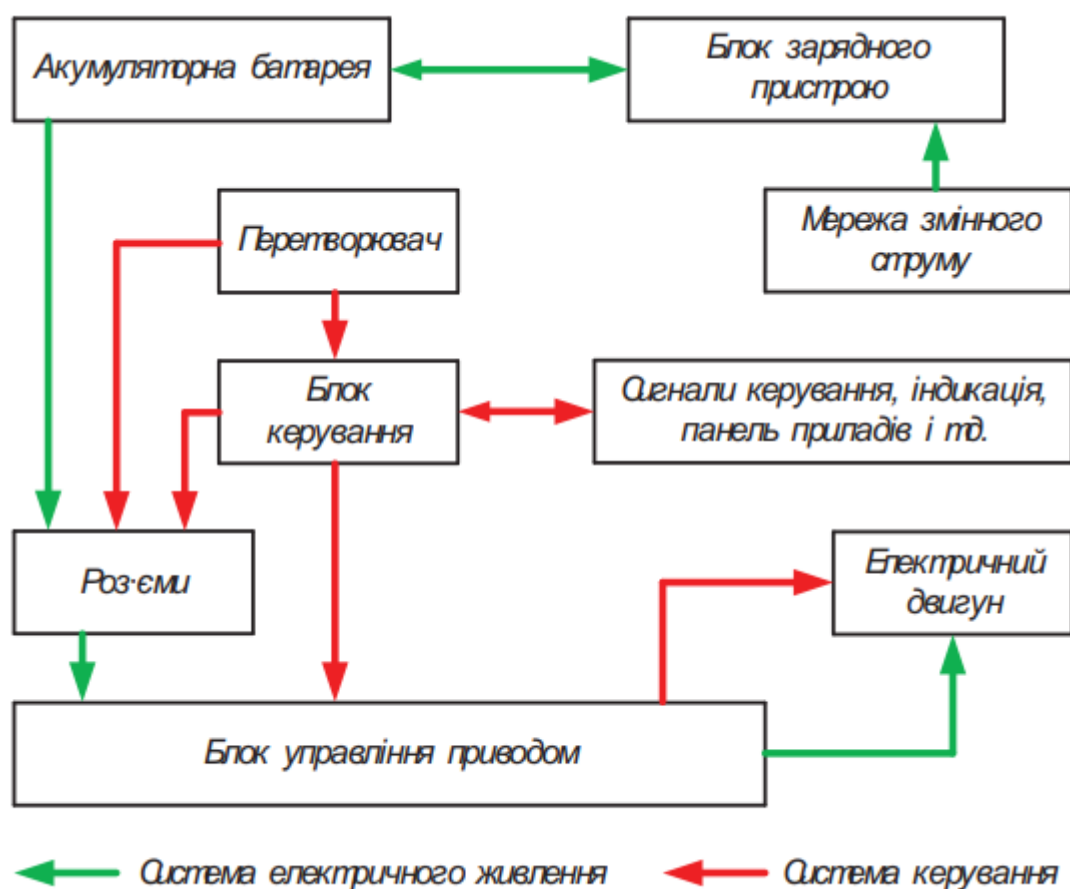


Рисунок 5.1 – Структурна схема системи електроприводу електромобіля

Основні структурні блоки та їх взаємодія.

Акумуляторна батарея – це основне джерело енергії електромобіля. Батарея формує постійну напругу, яка живить тяговий електродвигун через інвертор (перетворювач), а також допоміжні системи – через DC/DC-перетворювач.

Параметри:

- номінальна напруга: 300-800 В
- ємність: 40-100 кВт·год
- хімія: літій-іонна або літій-залізо-фосфатна (LiFePO_4)

Блок зарядного пристрою та мережа змінного струму. Зовнішнє джерело енергії (зарядна станція) подає змінний струм до блоку зарядного пристрою, який перетворює його у постійний струм для поповнення зарядки акумулятора. Потужність мережі змінного струму становить 3.3-22 кВт (залежно від того, чи це побутова чи швидка зарядка). Протоколи: CCS, CHAdeMO, AC Type 2.

Перетворювач (інвертор) – це силовий електронний пристрій, який перетворює енергію з акумуляторної батареї (DC) у змінну (AC) потрібної частоти та амплітуди для живлення тягового асинхронного двигуна. Виконує такі функції: управління частотою та напругою живлення двигуна, реалізація векторного або скалярного керування (SPWM, SVPWM), робота у режимах тяги та рекуперації.

Блок управління приводом – центральний керуючий пристрій, який об'єднує: обробку сигналів з акселератора, гальма, реверсу; формування сигналів керування для перетворювача; алгоритми запуску, розгону, обмеження струму/напруги; реалізацію ПІ/ПІД-регуляторів струму та швидкості двигуна. Обробляє дані від блоку керування та забезпечує живлення електродвигуна. Даний контролер приймає сигнали від блоку керування (електронної педалі акселератора або ECU) та формує керуючі сигнали для перетворювача, забезпечуючи точне регулювання крутного моменту та швидкості обертання двигуна.

Блок керування та панель індикації – це інтерфейс користувача та зв'язок з електроприводом. Включає: сигнали від педалі акселератора / гальма / реверсу; панель приладів (індикація потужності, SOC, температури); взаємодія з CAN-шиною автомобіля; забезпечує обмін інформацією між водієм та електроприводною системою, а також може включати функції безпеки, діагностики та обмеження швидкості. Забезпечує інтерфейс взаємодії водія з

системою електромобіля. Містить індикатори стану акумулятора, швидкості, помилок та інших параметрів.

Електричний двигун – асинхронний трифазний двигун (АД) є виконавчим механізмом електроприводу, який перетворює електроенергію у крутний момент та швидкість руху електромобіля.

Роз'єми – місце підключення системи до зарядних станцій, діагностики або сервісу. Через роз'єми реалізується: обмін енергією з мережею та передача сигналів керування.

На даній схемі зелені стрілки – це лінії електричного живлення: подача живлення до елементів приводу та допоміжних блоків. Червоні стрілки – лінії керування: обмін сигналами між блоками контролю, індикації, керування та електродвигуном.

Наведена структура охоплює основні компоненти та керуючі зв'язки електроприводної системи електромобіля. Вона дозволяє реалізувати повний спектр функцій: від заряджання та приводу коліс до інтеграції з системами керування та безпеки транспортного засобу. Саме така схема лежить в основі проектування тягових систем на базі асинхронного двигуна з частотним керуванням.

У роботі запропоновано створення системи керування, яка забезпечує підтримання постійної швидкості руху електромобіля, а також здійснює контроль струму тягового електродвигуна. Як виконавчий орган приводу використовується асинхронний електродвигун (АД), швидкість обертання якого регулюється шляхом зміни частоти напруги живлення. Система частотного керування асинхронним двигуном реалізована у вигляді підпорядкованої структури, що включає два замкнені контури: внутрішній контур регулювання струму та зовнішній контур регулювання швидкості [12].

Внутрішній контур призначений для контролю струму тягового електродвигуна, забезпечуючи стабільну роботу силової частини та захист від перевантажень. Зовнішній контур виконує функцію регулювання швидкості

обертання, підтримуючи її на заданому рівні навіть за умов змінного навантаження та змін у дорожньому профілі.

Такий ієрархічний підхід до побудови системи керування дозволяє досягти високої точності, стійкості та надійності функціонування електропривода. Запропонована система передбачає можливість адаптивного налаштування, що дає змогу ефективно реагувати на зміни в експлуатаційних умовах, зокрема зміни маси транспортного засобу, ухилу дороги або характеру руху. Це, в свою чергу, сприяє підвищенню загальної енергоефективності та економічності експлуатації електромобіля.

Структурну реалізацію внутрішнього контуру регулювання струму наведено на рисунку 5.2.

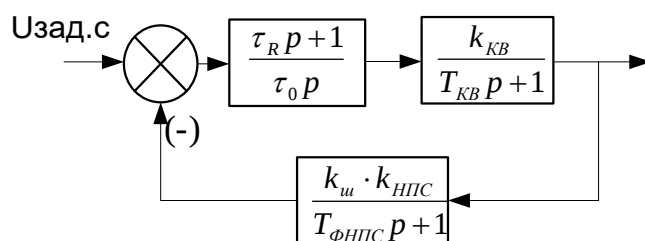


Рисунок 5.2 – Структурна схема контуру струму

В якості ПІ-регулятора обираємо пропорційно-інтегральну ланку з великою сталою часу τ_R та малою некомпенсованою — τ_0 .

Керований випрямляч має певний коефіцієнт передачі k_{KB} та затримку часу T_{KB} , зумовлену наявністю реактивних елементів.

Контур зворотного зв'язку за струмом має також коефіцієнт передачі $k_{ш} \cdot k_{HПC}$ по напрузі та запізнення, зумовлене наявністю електричних фільтрів.

Контур швидкості приведено у вигляді структури, зображеної на рис. 5.3.

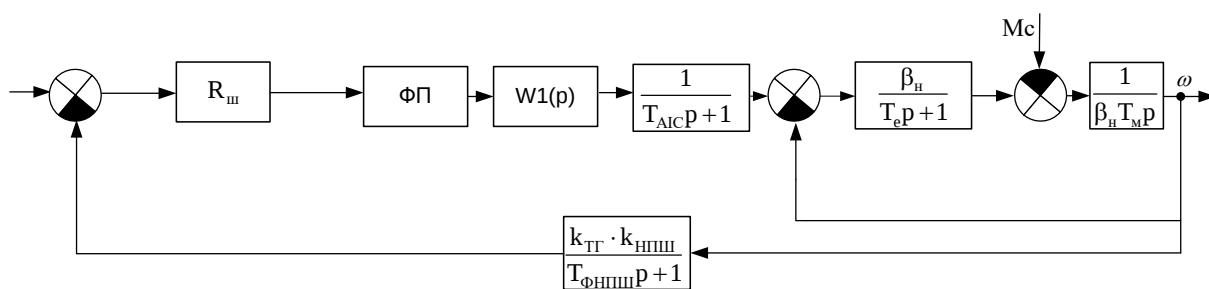


Рисунок 5.3 – Структурна схема контуру швидкості

В цьому випадку внутрішній контур струму зведено в один блок $W1(p)$. Аналогічно певну затримку часу T_{AIC} має автономний інвертор струму та контур зворотного зв'язку. Крім того, сигнал керування КВ подається з виходу функціонального перетворювача ФП, який забезпечує сталість співвідношення $U/f = \text{const}$. Регулятор, поки що представлений умовним позначенням $R_{ш}$, а детальну його будову розглянемо пізніше. Схема електрична структурна системи електропривода наведена на рисунку 5.4.

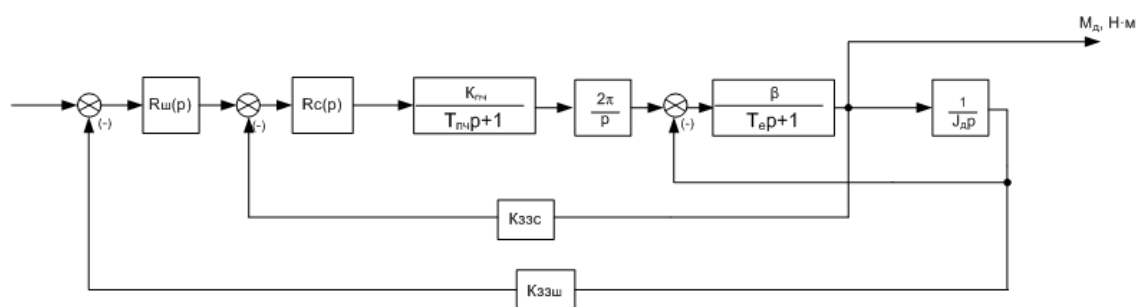


Рисунок 5.4 – Схема електрична структурна системи електропривода

Динамічні характеристики електропривода формуються під впливом зміни задавального сигналу та зовнішніх збурень, а також визначаються інтегральними й аперіодичними складовими передавальних функцій основних елементів системи. До них належать: електродвигун, керований випрямляч, автономний інвертор струму, а також контури зворотного зв'язку за швидкістю та струмом

Електромагнітна постійна часу двигуна:

$$T_e = \frac{1}{\omega_0 \cdot s_k}, \quad (5.1)$$

$$T_e = \frac{1}{314 \cdot 0,37} = 0,008(\text{с}).$$

Механічна стала часу:

$$T_m = \frac{J_{\text{дв}}}{\beta_H}, \quad (5.2)$$

$$T_m = \frac{0,0018}{0,41} = 0,004(\text{с}).$$

Стала часу керованого випрямляча:

$$T_{\text{КВ}} = \frac{1}{2 \cdot m \cdot f_1}, \quad (5.3)$$

$$T_{\text{КВ}} = \frac{1}{2 \cdot 6 \cdot 50} = 1,67(\text{мс}).$$

Постійна часу автономного інвертора:

$$T_{\text{АІС}} = 2 \cdot T_{\text{КВ}}, \quad (5.4)$$

$$T_{\text{АІС}} = 2 \cdot 1,67 = 3,34(\text{мс}).$$

Для опису функціонального перетворювача приймається передаточна функція у вигляді параболічної характеристики, вершина якої зміщена вгору на 1 відносну одиницю. Це відповідає значенню задавального струму, за якого тяговий електродвигун працює при номінальному струмі.

Система керування електроприводом включає такі основні компоненти: пульт керування, мікропроцесорну систему керування, систему керування інвертором напруги, датчики постійної напруги та струму, датчики змінного струму (по числу фаз тягового асинхронного двигуна), датчик частоти обертання двигуна, а також інтерфейсний дисплей.

Мікропроцесорна система виконує обробку та аналіз вхідних сигналів від усіх датчиків, а також формує відповідні керуючі впливи для забезпечення стабільної

та ефективної роботи електропривода. Підсистема керування інвертором напруги здійснює перетворення постійної напруги в змінну з параметрами, необхідними для живлення тягового асинхронного двигуна.

Сенсори постійної напруги та струму забезпечують моніторинг параметрів живлення, що дозволяє реалізувати захист системи від перевантажень, коротких замикань та інших аварійних режимів. Сенсори змінного струму, встановлені у фазах тягового двигуна, дозволяють контролювати миттєві значення фазних струмів для реалізації точного струмового керування.

Інтеграція мікропроцесорного керування забезпечує реалізацію складних алгоритмів керування, гнучке адаптування до змінних умов навантаження та оперативну діагностику системи. Дисплей, встановлений на пульті оператора, дозволяє в режимі реального часу відображати основні параметри роботи електропривода, що підвищує зручність управління, спрощує технічне обслуговування і сприяє своєчасному виявленню несправностей.

Висновок. Наведена структурна схема охоплює основні складові та зв'язки системи електропривода електромобіля. Вона дозволяє реалізувати повний спектр функцій: від зарядки та приводу коліс до інтеграції з системами керування та безпеки транспортного засобу. Саме така схема є основою проєктування тягових систем на базі асинхронного двигуна з частотним керуванням.

6 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ КОЛА УПРАВЛІННЯ

6.1 Розробка функціональної схеми електроприводу електромобіля

Запропонована функціональна схему електроприводу електромобіля (рисунок 6.1) дозволяє представити загальну архітектуру систем електропривода, енергопостачання, керування та допоміжного обладнання. Функціональна схема є основою для подальших розробок і логіки роботи системи електроприводу транспортного засобу.

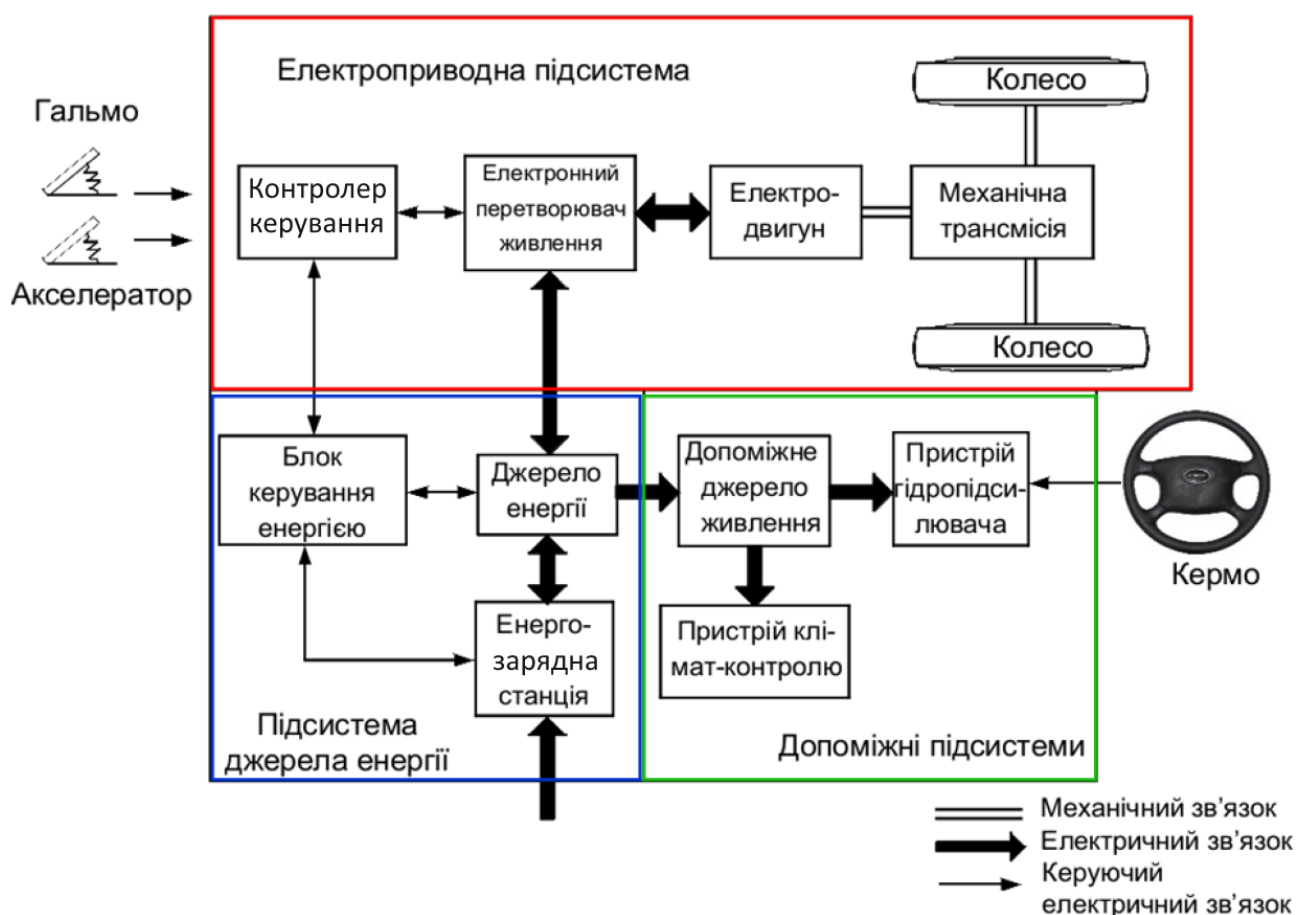


Рисунок 6.1 – Функціональна конфігурації електромобіля

На схемі виділено три основні підсистеми:

- електропривідна підсистема (обведена червоним),
- підсистема джерела енергії (обведена синім),

- допоміжні підсистеми (обведені зеленим).

Також показано зв'язки між підсистемами: механічні, електричні та керуючі сигнали. Нижче наведено докладний опис кожного елемента схеми.

Електропривідна підсистема. Ця підсистема забезпечує безпосереднє перетворення електричної енергії в механічну для приводу коліс транспортного засобу. До її складу входять такі функціональні блоки:

- Контролер керування – обробляє сигнали від органів керування водія (акселератора, гальма), а також від інших блоків системи та видає команди на керування потужністю електроприводу. Він визначає режим роботи електродвигуна відповідно до поточної ситуації на дорозі.

- Електронний перетворювач живлення – виконує функцію силового інвертора, перетворюючи постійну напругу від тягової батареї в змінний струм заданої частоти й амплітуди. Забезпечує живлення тягового електродвигуна, реалізує функції плавного пуску, зміни швидкості та рекуперативного гальмування.

- Електродвигун – є основним виконавчим органом, який перетворює електроенергію в крутний момент. У даному випадку передбачається використання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

- Механічна трансмісія – передає крутний момент від двигуна до ведучих коліс, одночасно узгоджуючи навантаження і зменшуючи швидкість обертання.

Підсистема джерела енергії. Ця підсистема відповідає за накопичення, зберігання та подачу електричної енергії до електроприводу і допоміжного обладнання.

Джерело енергії – це високовольтна тягово-акумуляторна батарея, яка забезпечує живлення електропривідної системи. Має системи захисту від перевантажень, перегріву та глибокого розряду.

Блок керування енергією – здійснює моніторинг параметрів батареї (напруга, струм, температура), виконує балансування осередків та управляє процесом заряджання. Також забезпечує електробезпеку.

Енергозарядна станція – забезпечує заряд батареї від зовнішньої мережі змінного струму через блок перетворення. Передбачає підключення до стандартної мережі та взаємодію з блоком керування.

Допоміжні підсистеми. Ці підсистеми не беруть безпосередньої участі в русі транспортного засобу, але забезпечують необхідні функції комфорту, безпеки та керованості.

Допоміжне джерело живлення – акумулятор (12 В), що живить усі споживачі з низьковольтною напругою: освітлення, мультимедіа, склоочисники, замки тощо.

Пристрій клімат-контролю – забезпечує підігрів і охолодження повітря в салоні, часто з окремим електроприводом для компресора кондиціонера та електронагрівача. Працює від допоміжного джерела або тягової батареї через перетворювач.

Пристрій підсилювача керма – у багатьох електромобілях використовується електрогідравлічний або повністю електромеханічний підсилювач. Живиться від допоміжної батареї та керується контролером керма.

На схемі представлено кілька типів з'єднань, що мають ключове значення для розуміння структури:

- Механічний зв'язок (суцільна чорна лінія) – між двигуном, трансмісією та колесами.
- Електричний зв'язок (товсті стрілки) – від джерел енергії до навантаження (двигун, клімат, підсилювач керма).
- Керуючий електричний зв'язок (тонкі стрілки) – сигнали керування від контролерів, панелей управління, систем BMS.

Принцип роботи. Робота системи електроприводу електромобіля координується через керуючі сигнали, що надходять від водія, зокрема через

педалі акселератора та гальма. Контролер керування, аналізуючи ці сигнали, формує відповідні команди для електронного перетворювача живлення, який забезпечує регулювання потоку потужності від джерела енергії до електродвигуна. При цьому визначається частота та амплітуда струму, що подається до тягової машини, залежно від необхідної швидкості та моменту.

У разі натискання гальма активується рекуперативний режим, під час якого електродвигун переходить у режим генератора. При цьому кінетична енергія транспортного засобу перетворюється на електричну, що повертається назад у акумуляторну батарею або частково використовується для живлення бортової мережі. Такі джерела енергії, як сучасні літій-іонні батареї або суперконденсатори, добре адаптовані до прийому рекуперативної енергії завдяки високому коефіцієнту прийому та короткому часу заряду.

Координація цих режимів забезпечується блоком керування енергією, який взаємодіє з контролером приводу. Цей блок також відповідає за керування процесом заряджання та розряджання тягової батареї, балансування елементів і контроль параметрів роботи джерела живлення.

Допоміжне джерело живлення забезпечує живлення приладів і систем, які не беруть участі в русі, але є критично важливими для комфорту та безпеки – таких як система клімат-контролю, підсилювач керма, зовнішнє та внутрішнє освітлення, мультимедіа тощо. Напруга в цих колах зазвичай становить 12, а енергія подається як безпосередньо від допоміжної АКБ, так і через DC-DC перетворювачі.

6.2 Вибір і опис елементів тягового перетворювача

На сучасному етапі розвитку силової напівпровідникової техніки тяговий перетворювач набуває ключового значення в структурі електропривода електромобіля. Саме характеристики та функціональні можливості перетворювача визначають основні експлуатаційні властивості привода:

діапазон регулювання, плавність пуску та гальмування, якість перехідних процесів тощо.

Тяговий перетворювач призначений для живлення тягового електродвигуна (ТЕД) як у режимі тяги, так і в режимах рекуперативного або реостатного гальмування. За конструктивним виконанням перетворювачі поділяються на кілька типів. Найбільш поширеними є трифазні інвертори, реалізовані за схемою Ларіонова («три паралельні напівмости») з використанням тиристорних ключів типу GTO або транзисторів типу IGBT. Такі пристрої повністю витіснили застарілі системи з реостатним керуванням.

Існують також тягові перетворювачі для двигунів постійного струму, однак вони поступово відходять у минуле, поступаючись перетворювачам для двигунів змінного струму через вищу ефективність, компактність і надійність останніх. Приклади зовнішнього та внутрішнього вигляду типового тягового перетворювача наведено на рисунках 6.2 та 6.3..



Рисунок 6.2 – Зовнішній вигляд тягового перетворювача з блоком індикації та блоком автономного ходу



Рисунок 6.3 – Вигляд внутрішньої частини тягового перетворювача

Перетворювач частоти забезпечує реалізацію основних функцій електропривода:

- плавний пуск і зупинку електродвигуна;
- реверс обертання шляхом зміни напрямку вихідної напруги;
- регулювання частоти обертання двигуна в широкому діапазоні;
- рекуперативне гальмування з поверненням енергії до акумулятора;
- підтримання оптимальних енергетичних режимів для зниження споживання електроенергії.

Сучасні перетворювачі оснащуються цифровими інтерфейсами для візуалізації параметрів роботи: вихідної напруги та частоти, струму, моменту, заданої швидкості, теплового навантаження, дискретних сигналів керування, часу роботи тощо. Керування можливе як з вбудованої цифрової панелі, так і шляхом подачі зовнішніх аналогових (0–10 В, 4–20 мА) або дискретних сигналів.

Для інтеграції в автоматизовані системи управління перетворювачі підтримують промислові комунікаційні інтерфейси (RS-232, RS-422, RS-485) та мережеві протоколи (Profibus, Interbus, DeviceNet, Modbus тощо).

Економічна ефективність впровадження системи асинхронного тягового електропривода Застосування частотно-регульованих приводів дозволяє суттєво підвищити енергоефективність систем електромобіля. Основними факторами, що забезпечують економічний ефект, є:

1. Зниження споживання електроенергії до 50% у системах із насосами, вентиляторами та компресорами завдяки регулюванню продуктивності шляхом зміни частоти обертання двигуна, на відміну від традиційних методів керування (дроселювання, вмикання-вимикання, механічне регулювання).

2. Підвищення якості та стабільності роботи приводу в динамічних режимах.

3. Зростання продуктивності технологічного обладнання завдяки оптимізації роботи електромеханічної системи.

4. Зменшення зносу механічних елементів і подовження ресурсу експлуатації, що знижує витрати на технічне обслуговування.

Таким чином, тяговий перетворювач не лише є ключовим функціональним елементом електропривода, а й безпосередньо впливає на техніко-економічні показники експлуатації електромобіля.

6.3 Функціональна схема векторного керування тяговим асинхронним двигуном

З метою забезпечення високої точності регулювання моменту, ефективної реалізації рекуперативного гальмування, а також розширення робочого діапазону швидкостей електропривода, у сучасних електромобілях доцільним є застосування векторного керування асинхронним двигуном (АД).

На рисунку 6.4 зображено функціональну схему системи векторного керування тяговим АД, яка структурно поділяється на три основні частини:

1. Силу частину – призначену для передачі електричної енергії від джерела живлення до електродвигуна;

Перетворювачі координат (ПК1 і ПК2) – ПК1 здійснює пряме перетворення фазних струмів I_d , I_q у координати a - b , тоді як ПК2 – зворотнє перетворення у координат a - b для подачі сигналів на інвертор.

Блок компенсування зв'язків (БКЗ) – виконує обчислення напруг, які з урахуванням даних про струми і потік подаються до інвертора для формування відповідної фазної напруги.

Інвертор (ІН) – перетворює постійний струм у трифазну систему змінного струму для живлення обмоток статора АД.

Асинхронний двигун (АД) – отримуючи сформовану напругу, перетворює електричну енергію на механічну, обертаючи привідні колеса транспортного засобу.

Датчики струмів і напруг (ПФ) – здійснюють вимірювання фазних струмів та напруг двигуна, необхідних для зворотного зв'язку і корекції керуючих дій.

Обчислювальний блок (ОПР) – реалізує математичну модель електродвигуна для оцінки поточного моменту, швидкості та положення ротора.

Датчик швидкості (ДШ) – вимірює частоту обертання ротора АД і передає сигнал до обчислювального блоку та модуля регулювання потоку (РП). Зокрема, за допомогою ДШ реалізується система зворотного зв'язку по швидкості, що дозволяє адаптувати керування під змінні умови руху електромобіля.

Векторна система керування функціонує наступним чином. Вхідні сигнали від органів керування (педалі акселератора або гальма) надходять до задаючого модуля, який формує необхідні значення моменту M^* і потоку ψ^* . Ці значення надходять до регуляторів РМ і РП, які розраховують струми в координатах d - q (поздовжня і поперечна складова). Перетворювач ПК1 трансформує виміряні фазні струми I_d , I_q у координати a - b , необхідні для векторного аналізу. ПК2 виконує зворотнє перетворення координат для формування напруг на фазах двигуна. Блок БКЗ на основі даних від ПК2 і датчиків струму розраховує миттєві значення напруг, які подаються до інвертора. Інвертор, у свою чергу, генерує

трифазну систему напруги для живлення обмоток статора АД, забезпечуючи обертання ротора.

Система передбачає замкнений контур зворотного зв'язку по струму, моменту і швидкості. За рахунок цього забезпечується точність та динаміка керування електроприводом при змінних навантаженнях і режимах руху.

Застосування векторного керування дозволяє реалізувати наступні функції:

- плавний пуск і зупинку електродвигуна;
- рекуперативне гальмування з поверненням енергії до акумулятора;
- динамічне регулювання швидкості руху;
- зниження енергоспоживання за рахунок оптимального формування струмів.

Таким чином, дана схема забезпечує високоефективне та гнучке керування тяговим АД, що є ключовим для електромобіля у міських та міжміських умовах експлуатації.

Автономний інвертор напруги побудований на базі IGBT-транзисторів – це біполярні транзистори з ізолюваним затвором (від англ. Insulated Gate Bipolar Transistor), які поєднують у собі характеристики біполярного транзистора та польового транзистора з ізолюваним затвором (ПТІЗ). Коли на затвор подається позитивна напруга відносно емітера, транзистор IGBT відкривається, і через нього починає протікати струм: від колектора (точка С), через емітерно-базовий перехід біполярного транзистора та відкритий канал ПТІЗ – до емітера (точка Е). У результаті відкриття біполярного транзистора струм рухається по шляху від точки С до точки Е. У схемах елементи позначаються літерами: Е – емітер, С – колектор, G – затвор.

На рисунку 6.5 приведено умовні позначення IGBT [17].

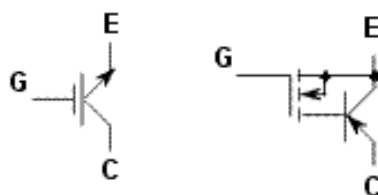


Рисунок 6.5 – Умовне позначення IGBT

Біполярний транзистор з ізольованим затвором (IGBT, англ. Insulated Gate Bipolar Transistor) було розроблено в 1980-х роках як результат поєднання ключових переваг двох типів напівпровідникових приладів: біполярного транзистора (BJT) та метал-оксидного польового транзистора (MOSFET). Основною метою створення IGBT було усунення недоліків обох згаданих типів: необхідність керування струмом у BJT та високий спад напруги у відкритому стані у потужних MOSFET, що суттєво обмежувало ефективність та широке впровадження силових електронних систем. IGBT є складним напівпровідниковим компонентом, що поєднує структури MOSFET (у колі керування) та BJT (у силовому колі) в єдиному кристалі. Така конфігурація забезпечує три основні виводи: затвор, колектор і емітер. З технічної точки зору, IGBT поєднує високу вхідну опірність і простоту керування, характерну для MOSFET, з високою провідністю у відкритому стані, властивою для BJT. Це дозволило значно зменшити енергетичні втрати на керування, спростити силову частину схеми та забезпечити ефективне комутаційне керування при високих рівнях напруги та струму.

Завдяки своїм характеристикам, IGBT знайшов широке застосування в перетворювальній техніці, зокрема в частотних перетворювачах, інверторах, тягових приводах електромобілів та в системах керування двигунами змінного струму, де важливі компактність, енергоефективність та високі показники надійності.

Таким чином, транзистор IGBT має три основні виводи: емітер, колектор і затвор. Внутрішнє з'єднання емітера з стоком (D), а також бази з витоком (S), реалізоване на рівні структури приладу. Поєднання характеристик двох типів транзисторів у межах однієї конструкції дало змогу об'єднати переваги польових і біполярних транзисторів: високий вхідний опір, здатність працювати з великими струмами і низький опір у відкритому стані.

Схематичне зображення конструкції IGBT наведено на рисунку 6.6. Біполярний транзистор формується шарами p^+ (емітер), n (база) та p (колектор), у той час як польовий транзистор складається з шарів n (джерело), n^+ (сток) і металевого затвору. Зовнішні виводи розташовані на шарах p^+ і p , через які здійснюється підключення до силового кола. Затвор, у свою чергу, має окремий вивід для з'єднання з керуючим колом.

На рисунку 6.6 б представлена структура IGBT четвертого покоління, виготовлена за технологією «втопленого» каналу (trench-gate technology), яка дозволяє мінімізувати опір між p -базами та істотно зменшити габарити приладу.

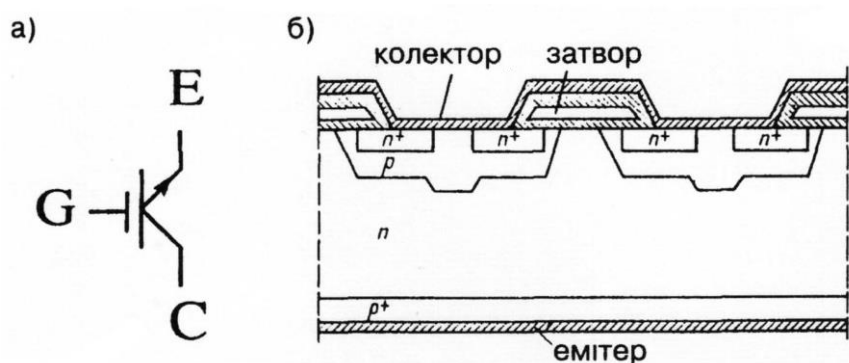


Рисунок 6.6 – Схематичний розріз структури IGBT

При роботі в ключовому режимі IGBT також мають деякі спільні властивості як з польовим, так і біполярним транзисторами. Їх ілюструють часові діаграми, подані на рис. 6.7.

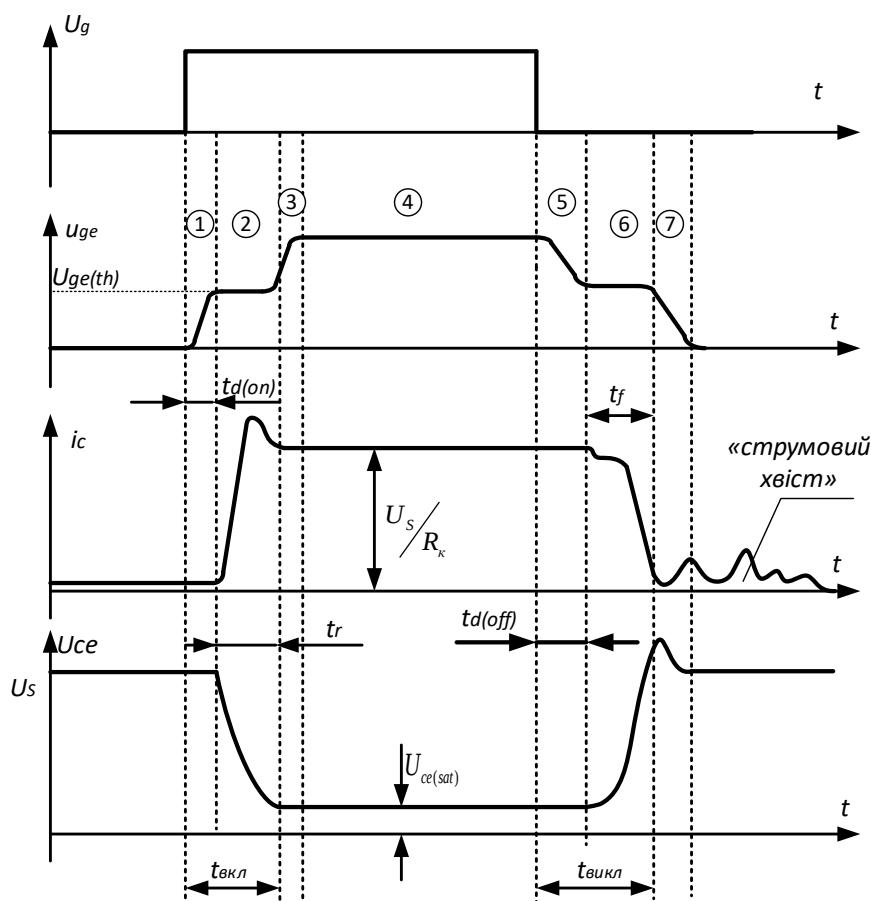


Рисунок 6.7 – Часові діаграми IGBT в ключовому режимі

У відкритому стані IGBT-транзистор демонструє характеристики, подібні до властивостей біполярного транзистора: низьке падіння напруги колектор-емітер $U_{ce(sat)}$ у широкому діапазоні струмів колектора.

Ділянка 1. Після подачі керуючої напруги на затвор через резистор починає заряджатися паразитна ємність. На цій ділянці струм колектора та напруга залишаються незмінними протягом затримки включення.

Ділянка 2. Коли напруга U_{ge} досягає порогового значення $U_{ge(th)}$ транзистор починає відкриватися, струм I_c зростає, а напруга U_{ce} зменшується. Завдяки ефекту Міллера, U_{ge} частково стабілізується через вплив вхідної ємності, незважаючи на зростання струму колектора (фаза наростання струму).

Ділянка 3. Відбувається дозаряд ємності затвор-емітер до рівня вхідної напруги U_g

Ділянка 4. Відповідає повністю відкритому стану IGBT. Характеризується мінімальним падінням напруги і максимально можливим струмом I_C .

Ділянка 5. Після припинення подачі керуючої напруги починається розряд ємності. Відбувається затримка вимкнення.

Ділянка 6. Напруга U_{CE} зростає, але струм колектора I_C ще зберігається через розосереджене заряджання й викликану індуктивністю комутацію (tail current) – час спаду струму

Ділянка 7. Відображає завершальну фазу, яка є результатом вивільнення накопичених носіїв заряду з базового шару. У цій фазі струм I_C повільно спадає до нуля, навіть після повного зникнення U_{GE} . Цей процес обумовлює подовжений час вимкнення та втрати перемикачання..

Область безпечної роботи IGBT-транзисторів дозволяє забезпечити їх стабільну та надійну роботу без потреби у додаткових колах формування траєкторії перемикачання. Це актуально при частотах комутації в діапазоні від 10 до 20 кГц для модулів з номінальними струмами в кілька сотень ампер. Подібними характеристиками не можуть похвалитися біполярні транзистори, зокрема ті, що з'єднані за схемою Дарлінгтона. Як MOSFET-транзистори свого часу витіснили біполярні транзистори в низьковольтних ключових джерелах живлення (до 500 В), так і дискретні IGBT поступово заміщають їх у високовольтних схемах з напругами до 3500 В.

Сучасні IGBT, як правило, виготовляються у вигляді модулів, що розміщуються в прямокутних корпусах з одностороннім притиском та охолодженням. Такі модулі випускають компанії типу Mitsubishi, Siemens, Semikron тощо. Існують також варіанти у вигляді «пігулок» з двостороннім охолодженням, наприклад, від Toshiba Semiconductor Group. Корпуси з одностороннім охолодженням зазвичай виконані з міцного пластика, оснащені паяними виводами та мають ізольовану основу. Усі електричні з'єднання виведені на верхню частину корпусу, а тепловідведення здійснюється через основу. Типова конструкція такого модуля представлена на рисунку 6.7.

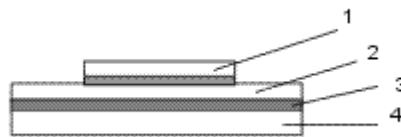


Рисунок 6.7 – Типова конструкція IGBT-модулі: 1 - кристал; 2 - шар кераміки; 3 - спайка; 4 - нижня тепловивідна підставка

Оскільки струм керування IGBT невеликий, керуючий ланцюг (драйвер) має компактну конструкцію. Найефективніше розміщувати драйвери якомога ближче до силового ключа, щоб мінімізувати вплив перешкод і зменшити довжину з'єднувальних провідників. У більшості IGBT-модулів драйвери інтегровані безпосередньо в конструкцію пристрою.

Так звані «інтелектуальні» транзисторні модулі (ІТМ), створені на базі IGBT, включають додаткові функціональні елементи: системи захисту від струмів короткого замикання, засоби діагностики, які реагують на втрату керуючого сигналу, попереджають одночасне відкриття ключів у протилежних плечах схеми, а також захищають від зникнення напруги живлення та інших аварійних режимів. У деяких ІТМ також передбачені вбудовані системи керування на базі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) і навіть однокристальні мікрокомп'ютери (ЕОМ).

Крім того, багато модулів оснащуються схемами активної фільтрації, які забезпечують корекцію коефіцієнта потужності та зменшення рівня вищих гармонік у мережі живлення.

За внутрішньою схемою IGBT-модуль може мати різну конфігурацію: одинарний транзистор, подвійний модуль типу «напівміст» (half-bridge), де два транзистори з'єднані послідовно, переривник (chopper), у якому один транзистор з'єднаний послідовно з діодом, а також повномостові однофазні або трифазні схеми. У всіх конфігураціях, крім переривника, кожен IGBT має паралельно підключений зворотний діод. Найбільш поширені типи схем IGBT-модулів представлені на рисунку 6.8.

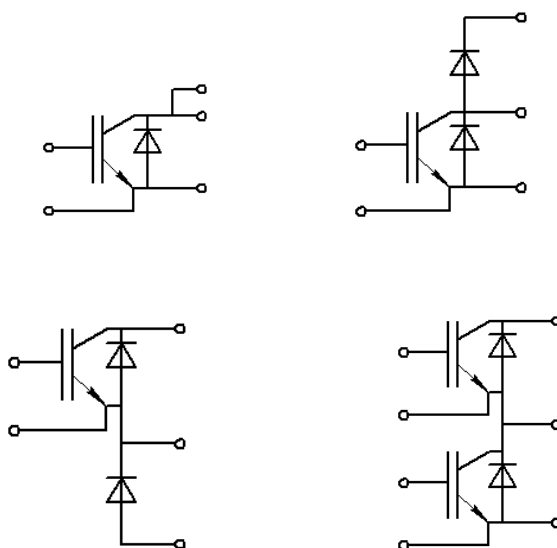


Рисунок 6.8 - Схеми IGBT-модулів

На сьогоднішній день сучасні IGBT-модулі широко використовуються у різних галузях силової електроніки. Вони застосовуються при розробці як керованих, так і некерованих випрямлячів, автономних інверторів для живлення електродвигунів постійного та змінного струму середньої потужності. Крім того, IGBT-модулі ефективно використовуються у складі перетворювачів для індукційного нагріву, зварювального обладнання, джерел безперебійного живлення (ДБЖ), а також у побутовій електроніці та професійній студійній апаратурі.

Особливої уваги заслуговують інтелектуальні силові IGBT-модулі, які мають високий рівень інтеграції завдяки наявності наступних вбудованих функцій:

- захист по струму;
- захист від КЗ;
- захист від пониженої напруги;
- захист по температурі;
- гальмівний транзистор;
- захист від замикання позитивного та від'ємного виводів.

Сучасний інтелектуальний силовий модуль, або IPM (Intelligent Power Module), являє собою гібридний пристрій, до складу якого входять високошвидкісні IGBT-транзистори, з'єднані у певній схемній конфігурації, а також вбудовані схеми керування та захисту. Система керування оптимізована відповідно до параметрів роботи затворів конкретних транзисторів, що входять до складу модуля. Крім того, IPM містить схему індикації стану та захисту, яка забезпечує контроль за робочими параметрами пристрою. Для забезпечення надійної та безпечної експлуатації інтелектуальний модуль повинен мати змогу виявляти і реагувати на наступні аварійні стани: перевантаження за струмом (overload), коротке замикання в навантаженні (SC – short circuit), пробій (breakdown), зниження керуючої напруги нижче допустимого рівня (UVLO – Under Voltage Lockout), а також перегрів (overheat) [18]. Усе це вже присутнє в самому інтелектуальному модулі, що являється його якісною перевагою перед звичайним IGBT-модулем із розробленою схемою до нього, що забезпечить виконання всіх вищеописаних параметрів.

Вартість інтелектуального силового модуля (IPM) зазвичай вища порівняно з вартістю набору дискретних елементів, які можуть виконувати аналогічну функцію. Проте використання IPM виправдане завдяки його значним перевагам: підвищена надійність роботи, спрощення монтажу та збирання пристрою, а також зменшення масогабаритних параметрів. У сукупності ці фактори роблять доцільним застосування саме інтелектуального силового модуля у конструкції сучасних електронних систем.

Інтелектуальні силові модулі (IPM) поєднують у єдиному корпусі силовий ключ (одиначний, напівмостовий або трифазний мостовий), драйвер, оптимізований під відповідні сигнали керування, а також інтегрований пристрій захисту. Завдяки мінімальній довжині внутрішніх з'єднувальних ліній досягається низьке значення паразитних індуктивностей, що істотно знижує рівень перехідних перенапруг і електромагнітних завад (ЕМІ). Ефективний тепловий зв'язок між елементами кристалу підвищує надійність функціонування

вбудованої схеми захисту, сприяючи стабільній роботі модуля в динамічних режимах навантаження.

IPM-модулі мають багат шарову конструкцію. У малопотужних моделях використовується епоксидна ізоляція, а в модулях середньої та високої потужності – керамічна. З'єднувальні мідні доріжки наносяться прямо на ізолюючий шар, що дозволяє уникнути пайки. Елементи керуючої схеми розміщуються на окремій друкованій платі, яка встановлюється безпосередньо на силовий модуль. Ця плата також є багат шаровою та зазвичай оснащується екраном для захисту від електромагнітних завад (ЕМІ). Один із варіантів конструкції IPM показаний на рис. 6.9.

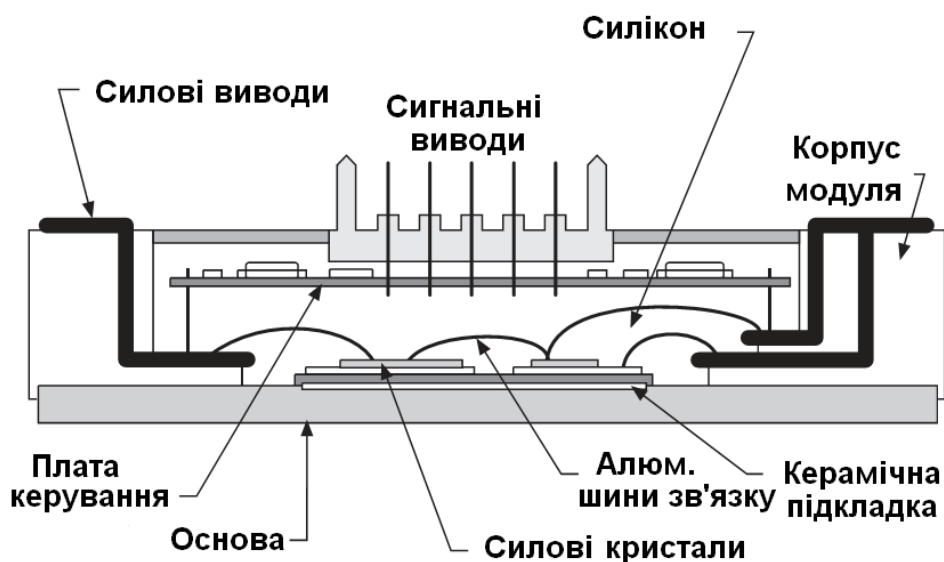


Рисунок 6.9 – Приклад конструкції IPM

Область безпечної роботи (ОБР або SOA – safe operating area) визначає допустимі поєднання струмів та напруг, при яких не порушується безпечна робота модуля. Тому бажано, щоб схема захисту обмежувала режими не по граничному струмі, а по параметрах області безпечної роботи. IPM мають вбудовані ланцюги керування та захисту, що дозволяє підвищити надійність функціонування порівняно зі звичайними модулями.

Для IPM-модулів зазвичай визначають два типи областей безпечної роботи: для короткого замикання (SCSOA – Short Circuit Safe Operating Area) і

для імпульсного режиму (SSOA – Switching Safe Operating Area). SSOA обмежує значення струму та напруги, які можуть діяти на модуль одночасно під час вимкнення.

У конструкції IPM передбачені алгоритми драйвера та налаштування захисту, що запобігають небажаним режимам роботи. Безпечним вважається такий режим, за якого напруга живлення не перевищує допустиме значення V_{CC} , а перенапруга при вимкненні – граничне значення між колектором і емітером (V_{CES}). У випадку короткого замикання при джерелі з нульовим імпедансом, величина струму визначається тільки параметрами силового ключа. Область SCSOA забезпечує безпечну роботу при одиничному короткому замиканні, якщо напруга живлення нижча за V_{CC} , перенапруга в колі колектор-емітер – менша за V_{CES} , а температура кристала не перевищує 125°C . Термін «однократний режим КЗ» має на увазі, що кількість коротких замикань обмежена (приводиться в технічних характеристиках) і час між КЗ значно більший теплового постійного часу кристала.

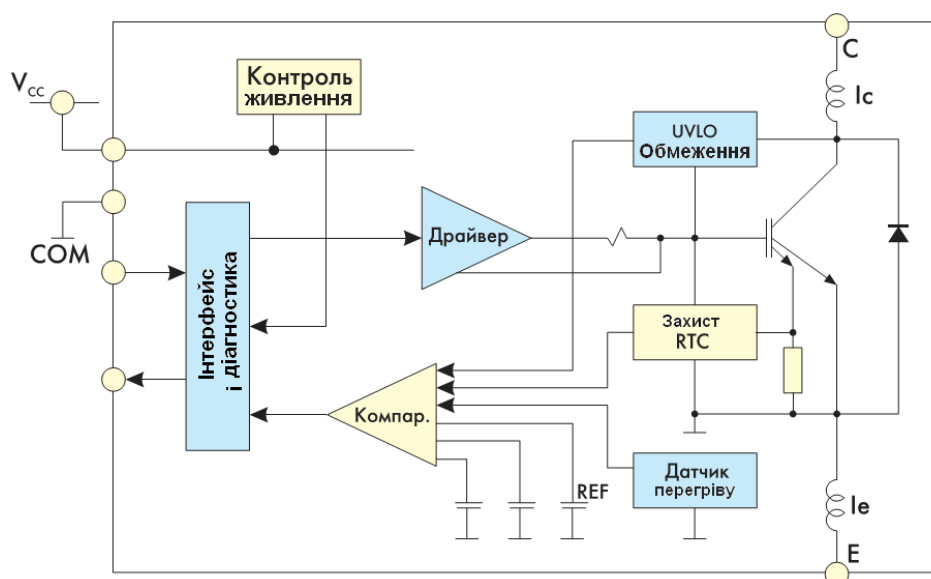


Рисунок 6.10 – Типова структурна схема одиничного інтелектуального модуля

Як і звичайні IGBT-транзистори, IPM не призначені для роботи в лінійному режимі. Вбудований драйвер IPM виключає будь-яку можливість лінійного режиму роботи, відключаючи силовий транзистор при підвищенні напруги насичення вище допустимого рівня. На рисунку 6.10 показано типову структурну

схему одиничного інтелектуального силового модуля. Система захисту в IPM виконує контроль перевантаження та короткого замикання (захист RTC), перевищення напруги насичення, падіння напруги живлення (контроль живлення та UVLO), а також температури кристала (датчик перегріву). У разі виходу будь-якого з цих параметрів за допустимі межі схема автоматично вимикає силовий транзистор і подає сигнал несправності.

Деякі модулі також оснащуються вбудованим супресором – елементом, що обмежує імпульсні перенапруги та додатково захищає модуль від короткочасних аварійних впливів.

У випадку перегріву вище встановленого порогу температурний датчик, розміщений у підставі модуля, генерує сигнал несправності. На основі цього сигналу схема керування відключає силові транзистори. У напівмостових і мостових схемах зазвичай відключаються транзистори нижнього плеча. Повторне вмикання модуля можливе лише після охолодження до заданого рівня. Проте наявність теплового захисту не може гарантувати, що потужний кристал не порушить роботу за будь-яких умов. Кристал може перегрітися до того, як розігріється основа модуля і термодатчик. Це може статися, наприклад, через збій контролера та підвищення частоти комутації або із-за появи брязкоту в ланцюзі управління. У IPM, як правило, використовуються IGBT з вбудованим датчиком струму. Якщо струм колектора модуля перевищує граничне значення у перебігу певного часу, модуль відключається. Це видно з графіків на рисунках 6.11 та 6.12.

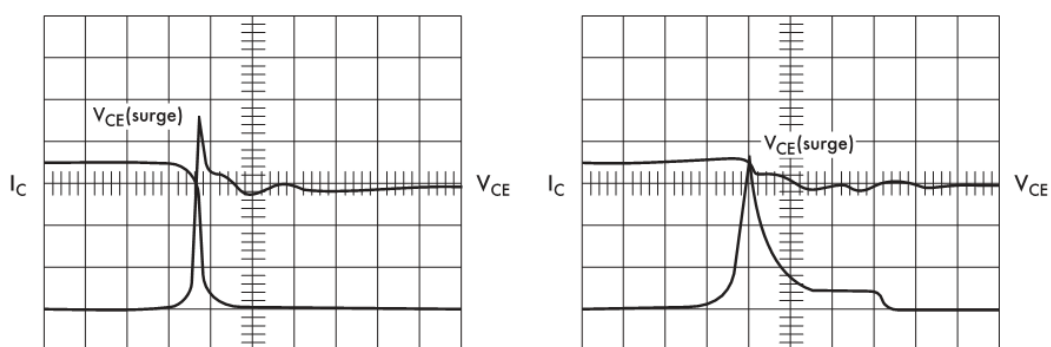


Рисунок 6.11 - Перехідна перенапруга при відключенні транзистора при миттєвому «жорсткому» і «м'якому» відключенні

Найсучасніші «інтелектуальні» схеми керування розрізняють два порогові рівні струму: струм перевантаження, при досягненні якого починається аналіз можливого дефекту і формується контрольний сигнал, та струм короткого замикання, при якому здійснюється повне вимкнення. Після виявлення перевантаження напруга на затворі поступово знижується, що призводить до зменшення струму через колектор. Якщо перевантаження зберігається, через 5–10 мкс напруга на затворі повністю опускається до нуля. Це зниження виконується згідно з визначеною кривою, що забезпечує так зване «м'яке» вимкнення. Такий підхід дозволяє зменшити швидкість зміни струму (di/dt) та обмежити перенапругу, яка виникає при вимкненні силового транзистора. На рис.6.11 показані процеси, що відбуваються при миттєвому «жорсткому» і «м'якому» відключенні. Видно, що в другому випадку рівень перенапруження набагато нижчий.

У сучасних інтелектуальних силових модулях (IPM) здійснюється безперервний моніторинг струму кожного силового ключа, а також загального споживаного струму. Це необхідно для своєчасного виявлення всіх типів струмових перевантажень, включаючи пробій на корпус. Стан короткого замикання (КЗ) може виникнути як у разі замикання навантаження, так і через збій у роботі контролера, коли сигнали на відкриття одночасно подаються на обидва плеча напівмостової схеми, що призводить до виникнення наскрізного струму. У таких випадках контролюється не напруга насичення, а безпосередньо струм у силовому каскаді. Якщо струм колектора перевищує задане порогове значення ISC , модуль миттєво ініціює процес відключення. Проте зниження напруги на затворі відбувається в описаній вище послідовності для зменшення рівня перехідних перенапружень. Для мінімізації затримки між моментом виявлення короткого замикання та відключенням силового ключа в найсучасніших IPM застосовується схема RTC (Real Time Current control) – система контролю струму в реальному часі. Вона працює паралельно зі схемою

драйвера, обходячи всі його стандартні етапи обробки сигналу при виникненні КЗ. Завдяки цьому вдається зменшити час реакції системи до 100 наносекунд.

6.4 Розрахунок силового модуля для керування електродвигуном

Для керування електродвигуном доцільно обрати інтелектуальний силовий модуль, параметри якого відповідають розрахованим значенням струму в колі та напруги живлення. Необхідний фазний струм визначається за виразом:

$$I_{\kappa} = \frac{P_{\text{дв}}}{U_{\text{м}}}, \quad (6.1)$$

де $P_{\text{дв}}$ - потужність, на яку розрахований вибраний двигун;

$U_{\text{м}}$ - напруга мережі.

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$I_{\kappa} = \frac{110000}{600} = 183,3 \text{ (A)}$$

Оскільки мережа трифазна, струм на одну фазу становитиме:

$$I_1 = \frac{I_{\kappa}}{3} = 61,1 \text{ (A)} \quad (6.2)$$

Враховуючи коефіцієнт запасу по струму $K=2$, розрахунковий струм становить:

$$I_{\text{мод}} = I_1 \cdot 2 = 61,1 \cdot 2 = 122,2 \text{ (A)}, \quad (6.3)$$

Напруга живлення (з урахуванням запасу):

$$U_{\text{мод}} = U_{\text{м}} \cdot 2 = 600 \cdot 2 = 1200 \text{ (В)}. \quad (6.4)$$

На основі отриманих значень обрано IGBT-модуль 6MBI180S-120.

Технічні характеристики обраного модуля наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Дані IGBT модуля SKM300GB128D

Корпус	fuji_62x122_PIM
Розрахований на струм (при $t \leq 80^{\circ}\text{C}$)	180 A
Розрахований на максимальну вхідну напругу	1200 В
$V_{CE(sat)}@ 25^{\circ}\text{C}$	1,9 В
$(E_{on}+E_{off})@ 125^{\circ}\text{C}$	44 mJ
$R_{th(j-c)}$	0,085 K/W
Схема	Трифазний IGBT міст (Six-Pack)
Вага	0,16 кг
Країна походження	Словачія
Виробник	SEMIKRON

Зовнішній вигляд модуля представлений на рис. 6.13, а електрична схема виконання – на рис. 6.14.



Рисунок 6.13 – Зовнішній вигляд вибраного модуля

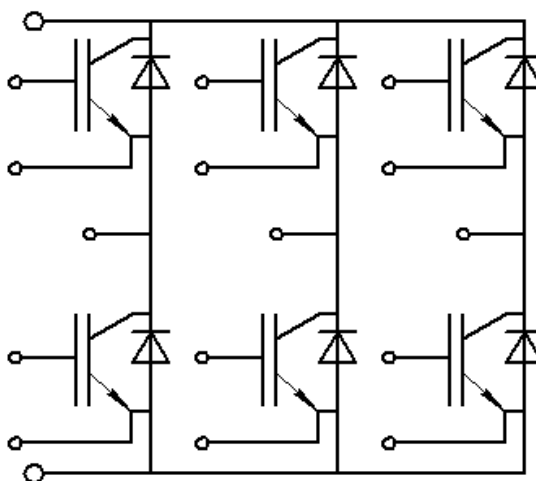


Рисунок 6.14 – Схема виконання IGBT модуля SKM300GB128D

Керування інтелектуальним силовим модулем здійснюється за допомогою мікроконтролера, так як описано у попередньому розділі. Це дозволяє реалізувати заданий програмою фізичний процес – плавне та енергоефективне керування тяговим двигуном із використанням векторної широтно-імпульсної модуляції. Такий підхід забезпечує надійну роботу системи, розширює можливості для інженерного вдосконалення (наприклад, при необхідності зміни режиму модуляції з векторної на стандартну і навпаки) та підвищує рівень гнучкості налаштувань.

6.5 Вибір мікронтролера

Потреба в ефективному керуванні тяговим двигуном електромобіля зумовила розвиток систем керування. У перших реалізаціях для цього використовувалися реостатно-контакторні схеми, які, незважаючи на простоту, не забезпечували енергоефективність.

Сучасні системи керування базуються на широтно-імпульсній модуляції (ШІМ), яка забезпечує плавне та економічне керування асинхронним двигуном. Принцип дії ШІМ-перетворювача полягає у зміні тривалості імпульсів при фіксованій частоті. Графік роботи ШІМ-системи представлено на рисунку 6.15.

Ключову роль у функціонуванні ШІМ-системи відіграє мікроконтролер, який виконує такі функції:

- генерує сигнали керування;
- забезпечує зворотний зв'язок по струму, напрузі, швидкості;
- обробляє сигнали з датчиків;
- формує командні сигнали для інвертора;
- виконує математичні обчислення для реалізації алгоритмів векторного керування тощо.

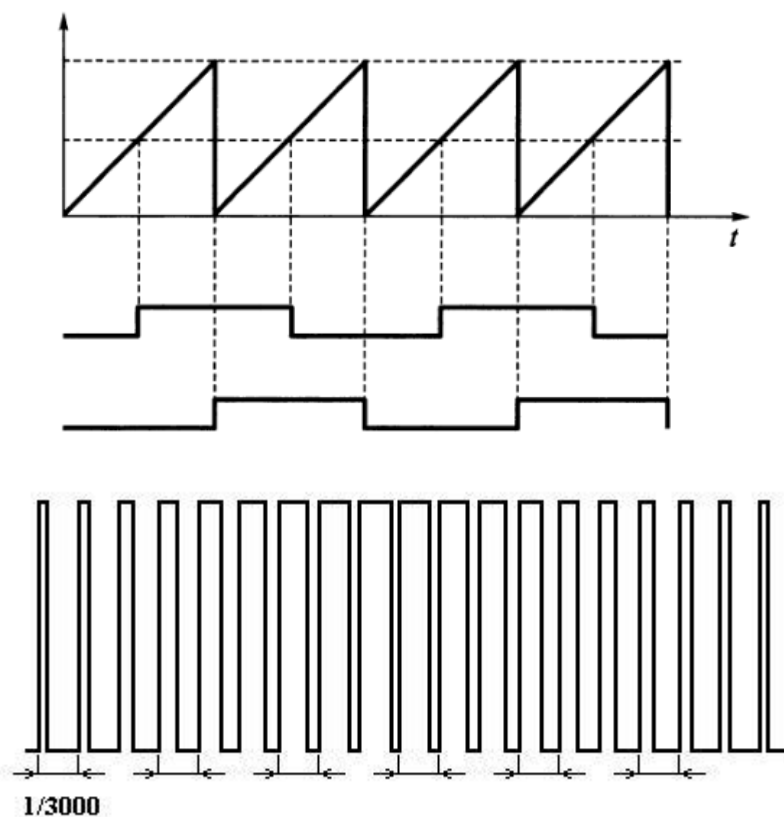


Рисунок 6.15 – Робота широтно-імпульсного перетворювача

На рисунку 6.16 представлено один із варіантів – мікроконтролер MSP430 від Texas Instruments, який характеризується низьким енергоспоживанням та наявністю вбудованих модулів для генерації ШІМ-сигналів.



Рисунок 6.16 – Зовнішній вигляд мікроконтролера MSP430.

Для реалізації векторного керування та комунікації із ШІМ-перетворювачем доцільно використовувати мікроконтролер з підтримкою промислових протоколів обміну, таких як Profibus, Modbus або DeviceNet. Також ефективним є застосування контролера з підтримкою програмного забезпечення SIEMENS SIMATIC STEP 7, що дозволяє реалізувати повний цикл керування у промислових умовах.

Висновок. Для керування асинхронним двигуном було обрано інтелектуальний IGBT-модуль SEMIKRON, сумісний із сучасними мікроконтролерами, які реалізують алгоритми векторного керування. Розроблена система керування повністю відповідає технічним вимогам до електропривода електромобіля.

7 РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САЕП

Для визначення статичної характеристики електродвигуна застосуємо спрощену формулу Клосса, яка придатна для розрахунку статичних характеристик потужних асинхронних двигунів.

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (7.1)$$

де M_k - критичний момент двигуна, Н·м;

s -ковзання;

s_k - критичне ковзання.

Всі необхідні параметри знайдемо з паспортних даних електродвигуна.

Номінальний момент двигуна:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}}, \quad (7.2)$$

$$M_{ном} = \frac{110000}{750 \cdot 0,1047} = 1400,83 \text{ (Н·м)}.$$

Перевантаження двигуна по максимальному моменту:

$$\lambda_m = \frac{M_{макс.}}{M_{ном}}, \quad (7.3)$$

$$\lambda_m = \frac{2600}{1400,83} = 1,86.$$

Критичний момент двигуна:

$$M_k = M_{max} = \lambda_m M_{ном}, \quad (7.4)$$

$$M_k = 1,86 \cdot 1400,83 = 2605,5 \text{ (Н·м)}.$$

Критичне ковзання:

$$s_{kp} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}, \quad (7.5)$$

$$S_{Kp} = \frac{0,014}{\sqrt{0,015^2 + 0,13^2}} = 0,07$$

Тоді вираз (7.1) стане таким:

$$M = \frac{5211}{\frac{s}{0,07} + \frac{0,07}{s}} \quad (7.6)$$

Побудована у Mathcad природна характеристика двигуна по спрощеній формулі Клосса, приведена на рисунку 7.1.

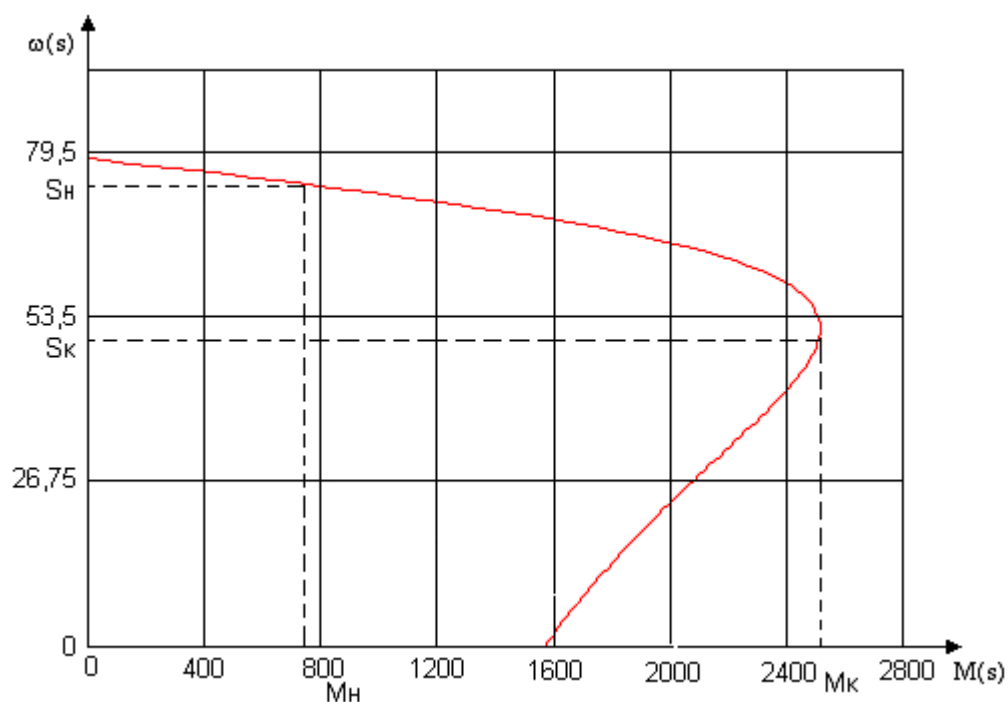


Рисунок 7.1 – Природна механічна характеристика двигуна

Висновок. Побудовано механічну характеристику вибраного асинхронного двигуна.

8 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САЕП

Проведемо розрахунок статичного та динамічного моментів на валу електродвигуна для двох граничних випадків експлуатації: при повному завантаженні салону пасажирями та за умови повної їх відсутності. Такий підхід дозволяє оцінити вплив зміни маси транспортного засобу на навантаження електродвигуна та його робочі режими [8].

1. При повному навантаженні електромобіля.

Статичний момент визначається за формулою:

$$M_{cm1} = 9550 \frac{P_1}{n}, \quad (8.1)$$

$$M_{cm1} = 9550 \frac{110}{750} = 1400,67 \text{ (Н·м)}.$$

Динамічний момент відомий з формули (2.35) і дорівнює 645,41 Н·м.

2. При відсутності пасажирів (холостий хід).

Статичний момент:

$$M_{cm2} = 9550 \frac{P_2}{n}, \quad (8.2)$$

$$M_{cm2} = 9550 \frac{69.338}{750} = 882.9 \text{ (Н·м)}.$$

Динамічний момент:

$$M_{дин2} = J_2 \frac{\omega}{t_{роз2}}, \quad (8.3)$$

$$M_{дин2} = 14.426 \frac{408.407}{17.361} = 339.365 \text{ (Н·м)}.$$

Діаграми моментів та навантаження електродвигуна, побудовані за допомогою Mathcad приведено на рисунках 8.1, 8.2, 8.3.

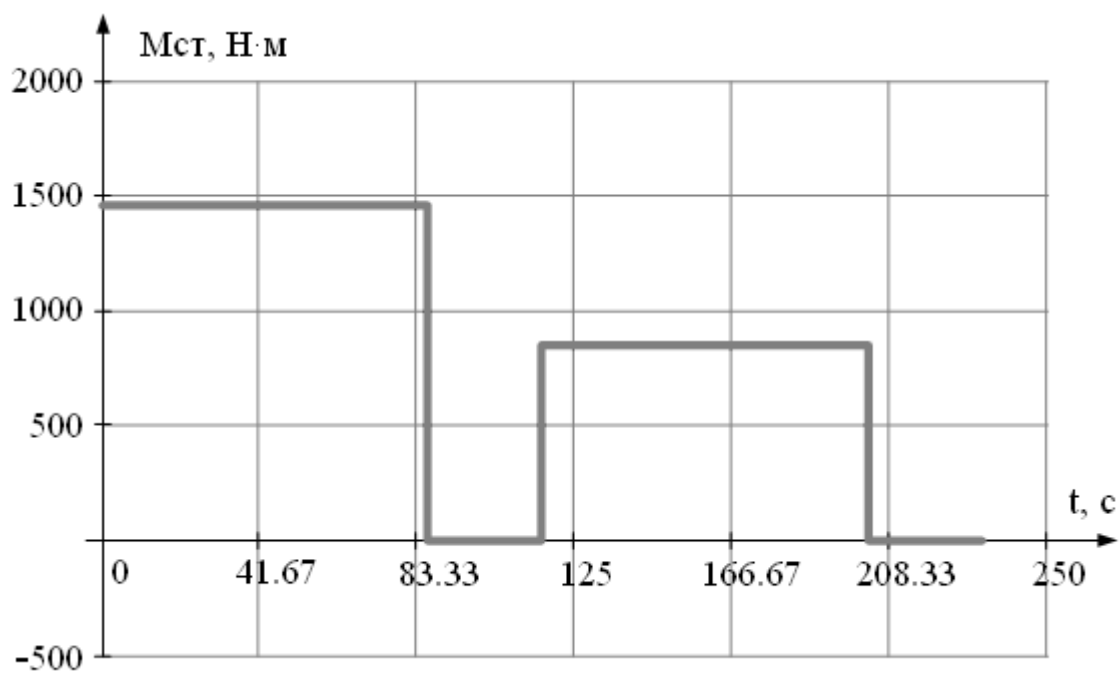


Рисунок 8.1 – Діаграма статичного навантаження двигуна

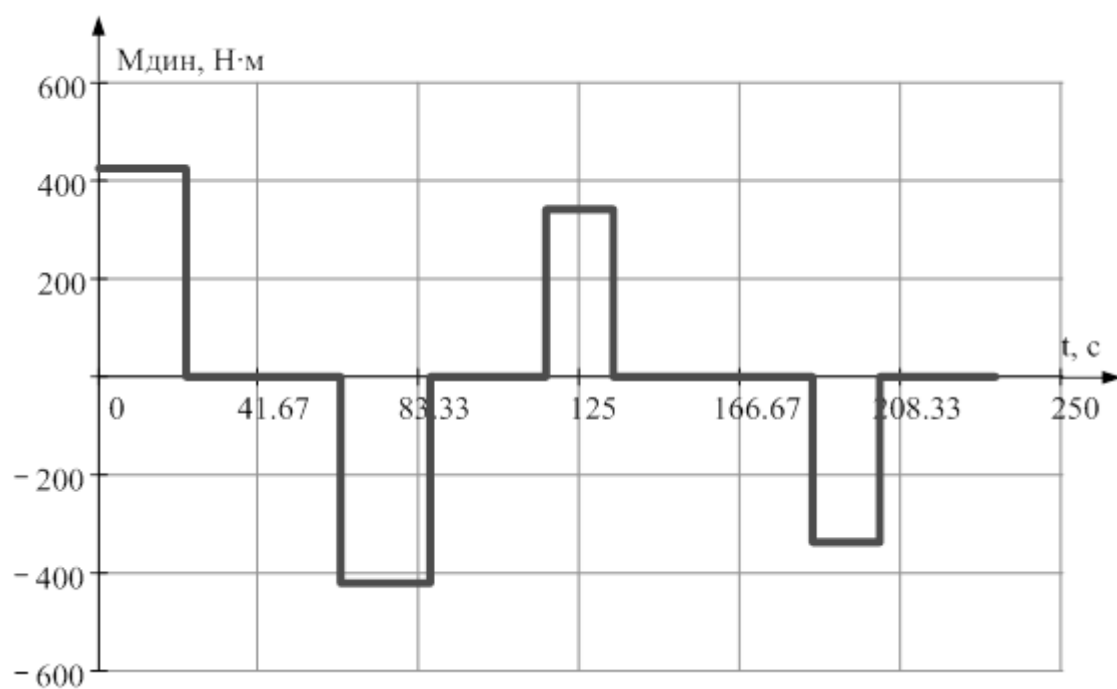


Рисунок 8.2 – Діаграма динамічного навантаження двигуна

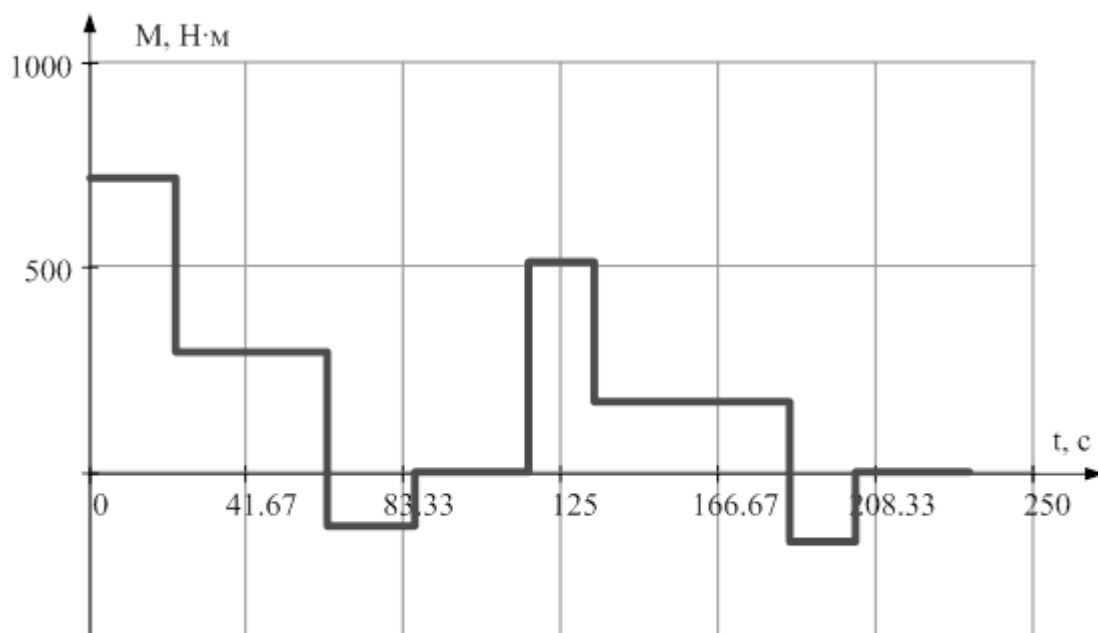


Рисунок 8.3 – Діаграма навантаження двигуна

Висновок. У даному розділі обудовано динамічні характеристики електродвигуна, діаграми статичного та динамічного моментів, а також діаграму навантаження. Проведено аналіз тахограм, що відображають зміну швидкості та прискорення двигуна в умовах максимального завантаження пасажирями та при роботі в режимі холостого ходу. Отримані результати дозволяють оцінити поведінку приводу в різних експлуатаційних ситуаціях.

9 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА СТІЙКІСТЬ ТА ЯКІСТЬ

9.1 Оцінка стійкості

Для аналізу стійкості системи скористаємося інструментами програмного середовища MATLAB. З цією метою вхідні сигнали буде замінено на блоки I_{n1} і I_{n2} , а вихідні – на O_{ut1} і O_{ut2} . Відповідна структурна схема системи представлена на рисунку 9.1.

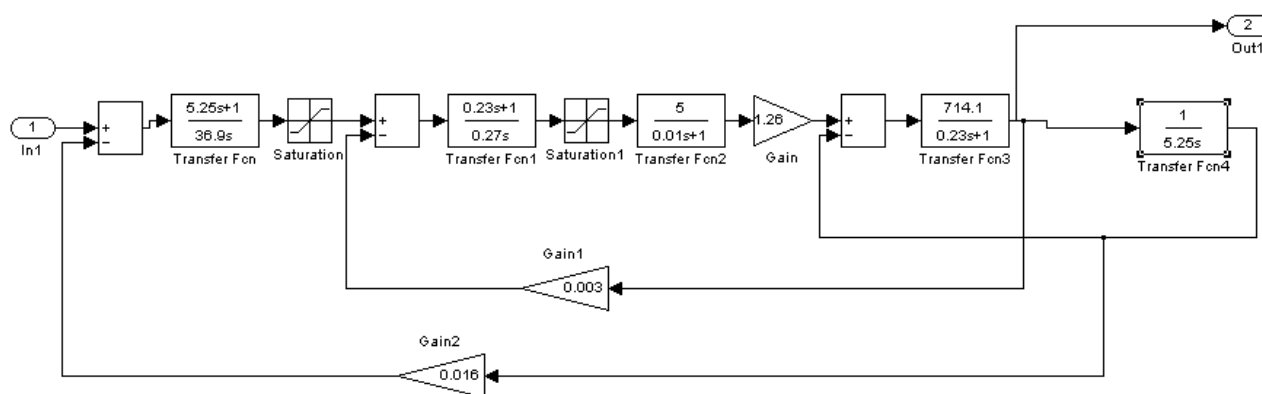


Рисунок 9.1 - Структурна схема ЕП електромобіля зібраної в Matlab

Використовуючи команди `[a,b,c,d]=linmod('untitled')`, `sys=ss(a,b,c,d)`, `systf=tf(sys)`, `margin(sys)` отримали ЛАЧХ і ЛФЧХ по збурювальній дії.

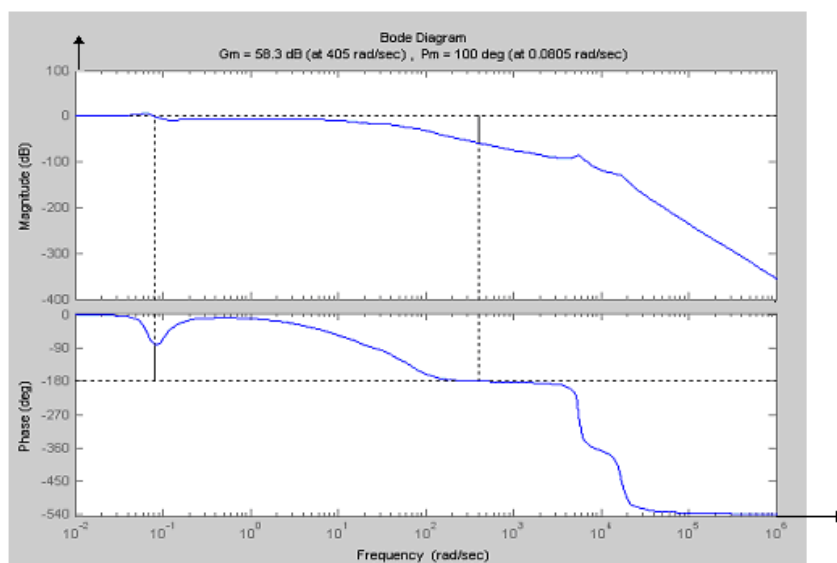


Рисунок 9.2 - Характеристики ЛАЧХ і ЛФЧХ по збурювальній дії

Запаси стійкості по амплітуді і по фазі приведено складають відповідно:
 $G_m = 58,3$; $P_m = 100$.

9.2 Оцінка якості

Оцінка стійкості системи є лише одним із етапів аналізу її ефективності. Для повної характеристики необхідно також дослідити якість функціонування системи при дії зовнішніх збурень. З використанням середовища MATLAB та команди `step(sys)` можна побудувати перехідний процес, що дає змогу оцінити такі показники, як час встановлення, перерегулювання та швидкодію. Графік отриманої перехідної характеристики наведено на рисунку 9.3.

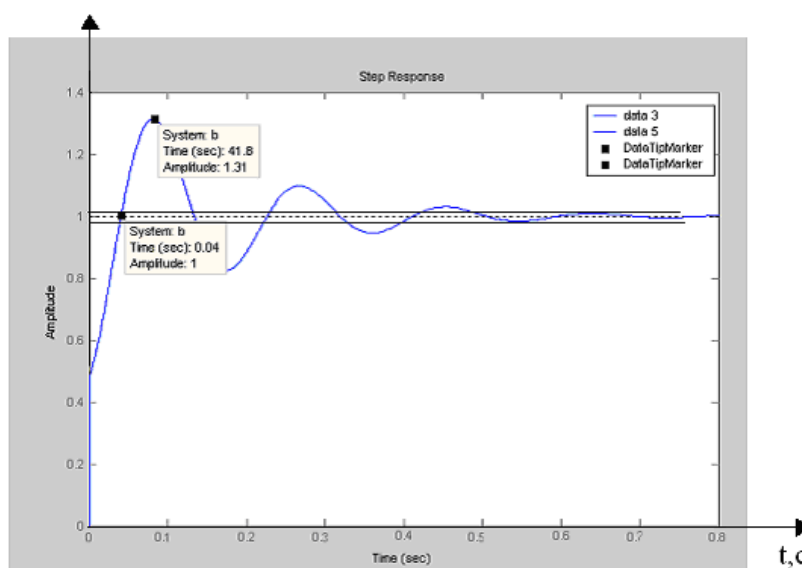


Рисунок 9.3 – Перехідна характеристика по збурювальній дії

По перехідному процесі знайдемо показники якості:

- час встановлення:

$$t_{вст} = 0,04 (с);$$

- усталене значення – значення на якому стабілізується система:

$$H_{уст} = 1;$$

- максимальне значення:

$$H_{\max} = 1,31;$$

- перерегулювання:

$$\sigma = \frac{H_{\max} - H_{уст}}{H_{уст}} \cdot 100\%, \quad (9.1)$$

$$\sigma = \frac{1,31-1}{1} \cdot 100\% = 31\%;$$

- час регулювання:

$$t_p = 0,56 \text{ (с)};$$

- кількість коливань:

$$N = 3;$$

- частота коливань:

$$f = \frac{N}{t_p}, \quad (9.2)$$

$$f = \frac{3}{0,56} = 5,36.$$

Висновок. На основі аналізу отриманих логарифмічної амплітудно-частотної (ЛАЧХ) та фазочастотної (ЛФЧХ) характеристик можна зробити висновок, що система є стійкою. Значення перерегулювання становить 31%, а кількість коливань – три, що свідчить про достатньо швидке згасання перехідного процесу після впливу збурень. Отже, система демонструє не лише стійкість, але й високу якість регулювання з точки зору поведінки у динаміці.

10 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Загальний вигляд повної електричної принципової схеми приведений в додатку Б.

10.1 Розрахунок індуктивності згладжувального дроселя

Необхідна індуктивність:

$$L = \frac{U_{d2}}{\omega_c \cdot \Delta I_{d2}} \cdot \left[\frac{\sqrt{1 - \left(\frac{3}{\pi} \cdot \cos \beta \right)^2}}{\frac{3}{\pi} \cdot \cos \beta} - \arccos \left(\frac{3}{\pi} \cdot \cos \beta \right) + \beta - \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \operatorname{tg} \beta \right], \quad (10.1)$$

де ΔI_{d2} - допустимі пульсації струму в реакторі;

ω_c – кругова частота мережі ($\omega_c = 314.16$ рад/с);

β – кут інвертування ($\beta = \pi/6$),

$$\Delta I_{d2} = (0,05 \div 0,1) \cdot I_{dn}, \quad (10.2)$$

$$\Delta I_{d2} = (0,05 \div 0,1) \cdot 121,8 = 6,09 \div 12,18 (\text{А}).$$

Приймаємо: $\Delta I_{d2} = 10$ А.

$$L = \frac{1200}{314,16 \cdot 10} \cdot \left[\frac{\sqrt{1 - \left(\frac{3}{3,14} \cdot \cos \frac{\pi}{6} \right)^2}}{\frac{3}{\pi} \cdot \cos \frac{\pi}{6}} - \arccos \left(\frac{3}{\pi} \cdot \cos \frac{\pi}{6} \right) + \frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{2 \sqrt{3}} \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{6} \right] \approx 0,084 (\text{Гн}).$$

Еквівалентна ємність комутуючих конденсаторів:

$$C_e = \frac{I_d \cdot t_B}{U_{d2}}, \quad (10.3)$$

де t_b – час вимикання тиристорів ($t_b=1,5$ мс),

$$U_{d2} \geq (1.2 \div 1.3) \cdot \sqrt{6} \cdot U_c, \quad (10.4)$$

де U_c – напруга статора,

$$U_{d2} \geq (1.2 \div 1.3) \cdot \sqrt{6} \cdot 380 = 1116,97 \div 1210,05 \text{ (В)}.$$

Вибираємо $U_{d2}=1200$ В.

$$C_e = \frac{121,8 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{1200} = 152,2 \text{ (мкФ)}.$$

Вибираємо з стандартного ряду ємностей Е 24 ємність комутуючого конденсатора (152,2 мкФ).

10.2 Вибір сенсорів

Для визначення швидкості обертання двигуна враховуємо частоту живлення, що становить 10 Гц. Відповідно до каталожних даних, обрано сенсор швидкості типу ДКС-М30-81У-1252-ЛА.02, який працює в частотному діапазоні від 2 до 50 Гц. Основні технічні характеристики: номінальна напруга – 110-220 В, номінальний струм – 250 мА, падіння напруги – 9 В, мінімальний струм навантаження – 5 мА, залишковий струм – 3 мА.

Для вимірювання струму двигуна сенсор обирається відповідно до значення робочого струму. З каталогу вибрано сенсор струму типу ACS754SCB-200, розрахований на максимальний струм 200 А. Цей датчик підходить для контролю як постійного, так і змінного струму, що перевищує 100 А. Існують варіанти на 130, 150 та 200 А. Основні характеристики: ширина смуги пропускання – 35 кГц, ізоляційна напруга – 3 кВ, внутрішній опір – 100 мОм. До переваг цього сенсора належать компактні розміри, наявність вмонтованої силової шини та здатність працювати в широкому температурному діапазоні.

10.3 Вибір задатчика інтенсивності

Схема інтегратора зібрана на операційному підсилювачі, яка забезпечує час наростання напруги приведена на рисунку 10.1:

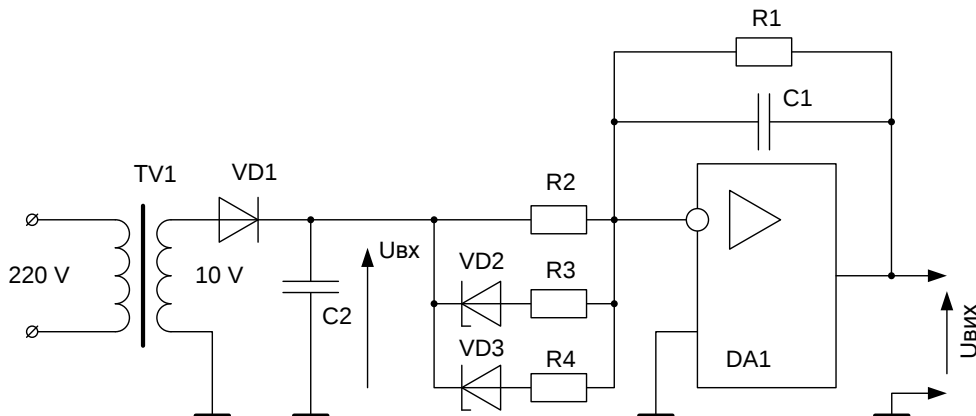


Рисунок 10.1 – Розрахункова схема задатчика інтенсивності

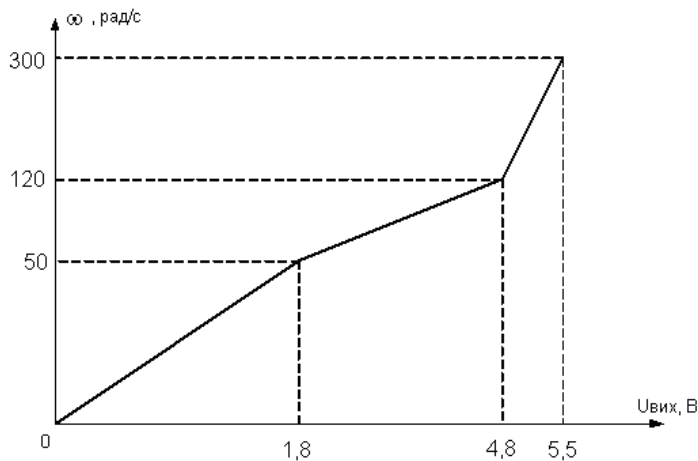


Рисунок 10.2 – Статична характеристика ЗІ

З графіка рисунок 10.2 знайдемо приблизні коефіцієнти пропорційності резисторів R1, R2, R3:

$$K_T = \frac{\Delta \omega}{\Delta U}, \quad (10.5)$$

де $\Delta \omega$ - зміна регулюючого параметра на одній ділянці;

ΔU - зміна вхідної напруги на тій же ділянці;

$$K_{T1} = \frac{50}{1,8} = 27,8,$$

$$K_{T2} = \frac{70}{3} = 23,3,$$

$$K_{T3} = \frac{180}{0,7} = 257,1.$$

При сходинковій подачі на задатчик інтенсивності 5,5 (В) в роботу включаються відразу всі резистори (R2, R3, R4). Прийmemo їх паралельний опір рівним $R_{\text{третього}} = 0,5 \text{ кОм}$.

Паралельний опір резисторів R2 і R3:

$$R_{\text{другого}} = n_1 \cdot R_{\text{третього}}, \quad (10.6)$$

$$n_1 = \frac{K_{T3}}{K_{T2}},$$

$$n_1 = \frac{257,1}{23,2} = 11,08,$$

$$R_{\text{другого}} = 11,08 \cdot 500 = 5540 \text{ (Ом)}.$$

Величина опору R₂:

$$R_2 = n_2 \cdot R_{\text{другого}}, \quad (10.7)$$

$$n_2 = \frac{K_{T2}}{K_{T1}},$$

$$n_2 = \frac{23,3}{27,8} = 0,84,$$

$$R_2 = 0,84 \cdot 5540 = 4653,6 \text{ (Ом)},$$

$$R_{\text{другого}} = \frac{R_2}{n_2}, \quad (10.8)$$

Вибераємо з ряду резисторів резистор номіналом $R_2 = 4,7$ (кОм).

$$R_{\text{другого}} = \frac{4700}{0,84} = 5595 \text{ (Ом)}$$

Знайдемо величину опору R_3 :

$$R_3 = \frac{R_2 \cdot R_{\text{другого}}}{R_2 + R_{\text{другого}}}, \quad (10.9)$$

$$R_3 = \frac{4653,6 \cdot 5595}{4653,6 + 5595} = 2541 \text{ (Ом)},$$

Вибераємо з ряду резисторів резистор номіналом $R_3 = 2,5$ (кОм).

Знайдемо величину опору R_4 :

$$R_4 = \frac{R_{\text{другого}} \cdot R_{\text{третього}}}{R_{\text{другого}} + R_{\text{третього}}}, \quad (10.10)$$

$$R_4 = \frac{5595 \cdot 500}{5595 + 500} = 459 \text{ (Ом)}.$$

Вибераємо з ряду резисторів резистор номіналом $R_4 = 4,5$ (кОм).

За номіналами резисторів знайдемо їх загальний опір:

$$R_{\text{третьего}} = 11700 \text{ (Ом)}.$$

Ємність конденсатора приймаємо $C = 1,13$ (мкФ).

Для керування схемою електроприводу [19] вибираємо задатчик інтенсивності ЗИ-1АИ.

10.4 Розробка принципової схеми системи електроприводу

У попередніх розділах було визначено архітектуру системи керування та обрано силові компоненти електроприводу. Зокрема, функції керування тяговим перетворювачем реалізуються вбудованими контролерами, які взаємодіють з драйверами силових модулів за протоколом RS-485. Програмування здійснюється за допомогою середовища Siemens, що дозволяє інтегрувати інтелектуальні алгоритми керування.

Для реалізації тягового електроприводу використовується інвертор, здатний не лише забезпечувати тяговий режим, але й реалізовувати рекуперацію енергії під час гальмування (KERS). Спрощену принципову електричну схему системи наведено на рис. 10.1.

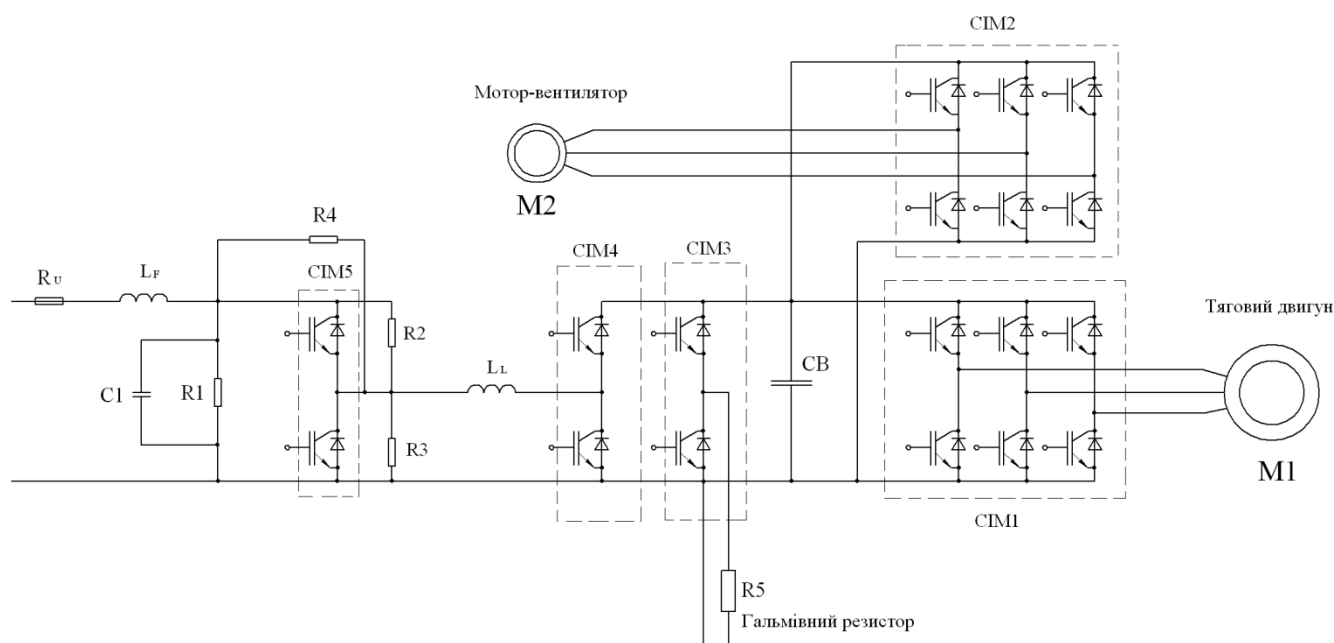


Рисунок 10.1 – Електрична принципова схема тягового електроприводу

На схемі позначено:

- M1 – тяговий електродвигун;
- M2 – мотор-вентилятор системи охолодження;
- C_B – конденсаторна батарея;
- CIM1-CIM 4 – інтелектуальні силові модулі;

- R_U – високовольтний запобіжник;
- L_F, L_L – дроселі фільтрації та лінійні;
- $C1$ – конденсатор фільтра;
- $R1-R4$ – обмежувальні резистори;
- $R5$ – гальмівний реостат.

Ліва частина схеми формує вхідний фільтр і елементи захисту.

Основна функція трифазного IGBT-модуля – перетворення постійного струму (від конденсаторної батареї) у змінний, із керованою частотою від 0 до 150 Гц. Завдяки цьому можна формувати три синусоїдальні струми, зсунуті на 120° один відносно одного, які подаються на обмотки тягового двигуна. Керування частотою дозволяє змінювати швидкість обертання ротора.

Трифазний інвертор містить два плеча (верхнє та нижнє), між якими знаходиться точка підключення фази двигуна. За допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) та чергування відкриття ключів формуються позитивна і негативна частини напівперіоду. Суть цього процесу відображено на рис. 10.2.

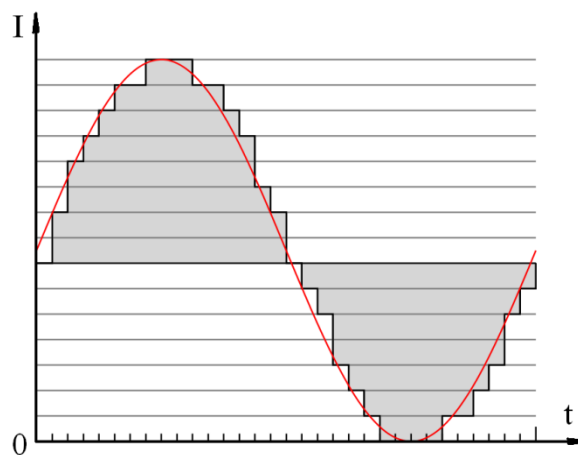


Рисунок 10.2 – Формування вихідної синусоїди за допомогою ШІМ

Роботою транзисторів інтелектуального модуля керують драйвери, які своєю чергою контролюються програмованим контролером АСК-196. У системі використано два інвертори – для живлення тягового двигуна (M1) та асинхронного вентилятора охолодження (M2). Через ненадійність старої схеми з

окремими збірками було запроваджено єдиний інтелектуальний модуль SKM75GB128D, що забезпечує кращий захист і стабільність роботи.

Конденсаторна батарея (ємність 9600 мкФ) стабілізує напругу та забезпечує живлення інверторів. Її заряд/розряд регулюється за допомогою модулів: CIM1 – відкривається при зниженні напруги на СВ і дозволяє її підзарядку; CIM2 – відкривається при перевищенні допустимої напруги, відводячи енергію в накопичувач; CIM3 – активується при перевищенні заданого порогу напруги, переводячи систему в реостатне гальмування; CIM4 – забезпечує рекуперацію енергії при гальмуванні.

Блок керування складається з об'єднуючої плати зі слотами, куди встановлюються:

- процесорна плата,
- плата послідовного зв'язку (3 канали: RS-485 до інвертора, 2×RS-232 до панелі та ПК),
- плати аналогових і дискретних входів/виходів.

Контролери приймають сигнали з пульта керування, педалі акселератора, датчиків температури, напруги, струму тощо, і формують сигнали керування двигуном, інверторами, контактами гальмівної системи тощо.

Блок містить також стабілізоване джерело живлення, що формує напруги ± 15 В, 12 В, 5 В із напруги бортової мережі 24 В. Контролер АСК-196, зокрема, керує інвертором вентилятора.

Інвертори отримують напругу від СВ, яка заряджається від мережі через CIM1/CIM2, стабілізуючи напругу та захищаючи електроніку від перепадів.

Високовольтне живлення надходить від акумуляторної батареї до перетворювача, де далі перетворюється інвертором у змінну напругу для живлення тягового електродвигуна. Перед потраплянням до інвертора, високовольтна лінія проходить через лінійний контактор, включення якого контролюється самим перетворювачем незалежно від блоку управління

перетворювачем (БУП) – через окремий ланцюг з реле, розташованим на платі A10. Це реалізовано з метою подвійного контролю вмикання.

Інвертор не підключений безпосередньо до мережі, а отримує живлення через буферну ємність – конденсаторну батарею, позначену на схемі як СВ. Вона складається з 12 паралельно з'єднаних конденсаторів із загальною ємністю 9600 мкФ. Завдяки стабілізуючому блоку на вході, напруга на батареї залишається постійною, що забезпечує захист інвертора від коливань напруги в мережі.

Стабілізацію напруги виконують два силові інтелектуальні модулі (СІМ) – СІМ1 і СІМ2. СІМ1 відповідає за контроль заряджання конденсаторної батареї. Якщо напруга на батареї опускається нижче заданого рівня, відкривається верхнє плече СІМ1 і підключає СВ до джерела живлення. Струм при цьому проходить через транзистор СІМ1, дросель LL, та зворотний діод СІМ2, при цьому сам транзистор СІМ2 залишається закритим. Після досягнення необхідного рівня напруги транзистор СІМ1 вимикається. Цей процес відбувається циклічно. СІМ2 захищає систему від перенапруги. У разі, коли напруга на СВ перевищує допустимий рівень (наприклад, під час гальмування), відкривається верхнє плече СІМ2, і надлишкова енергія відводиться назад у накопичувач. СІМ3 активується в ситуаціях, коли напруга в мережі перевищує задане значення і віддача енергії стає неможливою. У цьому випадку транзистор СІМ3 відкривається, і енергія скидається на гальмівний резистор R5, що запобігає перевантаженню системи.

Окрему увагу слід приділити первинному зарядженню конденсаторної батареї після підключення транспортного засобу до високовольтної лінії. Безпосереднє підключення СВ до мережі неможливе через високий пусковий струм. Тому заряд починається через резистор R1 номіналом 1,43 Ом, який з'єднаний паралельно з транзистором СІМ1. Після завершення зарядки СІМ1 замикає резистор, і подальший струм протікає вже в обхід R1.

Висновок. Розроблена принципова схема електроприводу електромобіля реалізована з використанням інтелектуальних силових модулів, багатоканальної системи керування та гнучких алгоритмів гальмування. Така архітектура

забезпечує ефективну роботу тягового електродвигуна, рекуперацію енергії та високу надійність у міських та міжміських умовах експлуатації.

.

11 ОХОРОНА ПРАЦІ

В цьому розділі розглянуті заходи та засоби з охорони праці під час монтажу та обслуговування електроприводу автономного транспортного засобу. Проаналізуємо шкідливі виробничі фактори, які впливають на електротехнічний оперативно-ремонтний персонал підприємства [25, 26]:

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил); фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

Електромобіль – транспорт для перевезення людей, і це положення з врахуванням вимогам до підвищення якості обслуговування пасажирів сприяє проявленню особливої уваги до питання вибору системи електроспоживання і засобів захисту, що забезпечують надійність її роботи і безпеку людини при контакті з системою як при нормальному режимі роботи, так і при відхиленні від них.

До числа важливих показників, що характеризують якість транспортного обслуговування, відноситься безпека перевозок, безпечне обслуговування засобів транспорту і систем електропостачання, а також безперебійність роботи транспорту.

11.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації електромобіля

Технічні рішення з безпечної організації робочих місць під час оперативного обслуговування ТЗ.

Електропроводка електромобіля виконана по двопровідній схемі і розділяється на високовольтну і низьковольтну. Високовольтна проводка з'єднує апарати і електричні машини, які живляться від контактної мережі постійної напруги 550 В. Відповідно з ГОСТ 12.1.013-78 умови праці за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у робочому приміщенні є струмопровідною.

Згідно із ГОСТ 12.1.030-81, в якості захисту від ураження людей електричним струмом застосовується заземлення. Крім того безпека експлуатації при нормальному режимі роботи забезпечується застосуванням ізолювальних пристроїв, огороженням струмоведучих частин, використанням малих напруг. Особи, що обслуговують електроустановки повинні користуватися ЗІЗ - спецвзуття, рукавиці. Засоби захисту необхідно періодично випробувати, їх слід захищати від механічних пошкоджень, впливу факторів, що погіршують їх діелектричні властивості.

Загальні вимога безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з ГОСТ 12.2.003-74, в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання любого виду і призначення.

В установках напругою до 1 кВ огороження роблять суцільними. Безпечні відстані між огороженнями і не ізольованими струмоведучими частинами регламентується ПУЕ і в установках до 1 кВ із суцільними огороженнями - 5см. Висота розміщення не огорожених струмоведучих частин залежить від значення напруги і рівня підготовки людей, що працюють з електроустаткуванням. Струмоведучі частини напругою до 1 кВ у місцях, де працюють люди, висота розміщення повинна бути не менше 3,5 м. Постійний контроль за ізоляцією, тому

що протягом часу відбувається старіння ізоляції, що може привести до пробую і створити небезпеку при дотику людини до ізольованих проводів. Використовують наступні кольори для маркування ізоляції: чорна - для силових ланцюгів; червона - для ланцюгів керування.

На ключах керування і приводах роз'єднувачів віддільників і вимикачах навантаження, а також на підставках запобіжників, за допомогою яких може бути подана напруга до місця робіт, вивішують плакат: "Не включати - працюють люди". На вентилях, що закривають доступ повітря в пневматичні приводи таких апаратів, вивішується плакат: "Не відкривати - працюють люди".

Приміщення в якому розташований електромобіль техогляду повинно бути сухим, світлим і теплим а також забезпечене роздягальною з вішалками для одягу.

Площа робочих приміщень повинна бути така, щоб на одного працюючого припадало не менше 4,5 м².

Стіни робочих приміщень мають бути світлих відтінків, а стеля повинна бути пофарбована в білий колір.

Не правильне поводження з електрообладнанням і джерелами електричної енергії може призвести до враження електричним струмом і виходу приборів електромобіля з ладу, тому:

- не проводити будь-яких втручань, як відкриття руками, так і за допомогою інструмента і сторонніх предметів в електрообладнання при встановлених на контактний провід струмоприймачів. Це стосується не лише електрообладнання 550 В, але і електрообладнання 24 В;

- не допускати струми витоку більше 0,003 А. Контроль струмів витоку проводять щодня міліамперметром або спеціальним пристроєм для вимірювання стану електроізоляції;

- ретельно слідкувати, щоб не виникали обриви проводів і інші порушення цілісності електричних кіл;

- суворо дотримуватися Правила техніки безпеки на міському транспорті.

Основні Правила безпечної експлуатації електромобіля:

- експлуатувати електромобіль тільки на дорогах I та II категорій з покриттям капітального типу і нахилами 0,08;
- не допускати роботу з перенавантаженням пасажирями. Експлуатація з перенавантаженням може призвести до поломки агрегатів автомеханічного і електричного обладнання, а також кузова електромобіля;
- не перевищувати найбільшу допустиму швидкість;
- не розпочинати руху, якщо тиск у повітря в пневмосистемі гальм і підвіски нижче $4,5 \text{ кгс/см}^3$, а також допускати зниження тиску в ній під час руху менше заданого;
- не допускати довготривалої роботи з не справним гідро підсилювачем рульового управління, а також довготривалого буксирування не справного електромобіля, так як при цьому сильно навантажується механізм рульового управління;
- у всіх випадках буксирування ТЗ слід застосовувати лише буксирне пристосування;
- конденсат з повітряних балонів необхідно зливати при тиску повітря в пневмосистемі вище атмосферного;
- підтримувати акумулятори в робочому стані;
- особливу увагу приділяти шинам, так як довговічність, а також нормальна робота підвіски, легкість управління ТЗ в великій мірі залежить від підтримання в них нормального тиску;
- для гальмування ТЗ на зупинках слід користуватися ручним гальмом; при русі ним користуватися заборонено;
- розбір і збір рульового механізму і насосу повинні виконувати тільки кваліфіковані механіки в умовах повної чистоти і тільки у випадку необхідності;
- електрообладнання повинно бути чистим і сухим, деталі, що зношуються не повинні мати граничних зносів. Регулювання системи управління, захисту і інших систем повинно суворо відповідати технічним даним;

- водій ТЗ зобов'язаний систематично слідкувати за станом електрообладнання и вимагати від ремонтного персоналу дотримання всіх технічних правил, що забезпечують належний стан електричних машин і апаратів;
- при русі на лінії водій повинен вести ТЗ на перегоні так, щоб з ввімкненим тяговим двигуном їзда складала приблизно 50% загального часу, 50% – на вибігу, тобто з вимкненим двигуном;
- з нормальним навантаженням їзда на ТЗ допускається без обмежень на підйомах до 35‰, будь-якої протяжності;
- експлуатація ТЗ на підйомах більше 80‰ не допускається. Забороняється рух назад зі швидкістю більше 15 км/год, а також при тиску повітря в пневмосистемі менше 4 кгс/см².

При експлуатації ТЗ необхідно підтримувати в справному стані і суворо дотримуватися порядку і строків технічного догляду. Надійна робота ТЗ забезпечується своєчасним і кваліфікованим його обслуговуванням.

Електробезпека.

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам під час виконання робіт:

1) Для запобігання електротравм від контакту зі струмопровідними елементами електроустаткування потрібно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні – написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати в закритих конструкціях підлоги.

2) При живленні однофазних споживачів струму при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі.

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал

зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

11.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

Мікроклімат. Категорія робіт, що виконується оперативним персоналом – Па – пов'язано з постійною ходьбою і перенесенням невеликих вантажів масою до 1 кг [26].

За ступенем впливу на тепловий стан людини мікрокліматичні умови визначаємо як допустимі (таблиця 11.1).

Таблиця 11.1 – Допустимі параметри мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	Середньої важкості: Па	17-23	75	не > 0,3
Теплий	Середньої важкості: Па	18-27	65 при 26 °С	0,2-0,4

Необхідно, щоб в приміщеннях була постійна циркуляція повітря або встановлений кондиціонер [27].

Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [26].

Таблиця 11.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб. м		Клас небезпеки
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Вуглецю оксид (СО)	3	1	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу товщиною в 1/8" на будь-якій ділянці вказує на необхідність у вживанні заходів з її очищення. Необхідно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (зернистість), тим вище небезпека.

Виробниче освітлення. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [27], роботи в депо потребують освітлення, яке характеризується розрядом зорової роботи III, підрозряд «в». Нормовані значення штучного, природного та суміщеного освітлення наведені в таблиці 11.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Таблиця 11.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак- ка зорової роботи	Найменший або еквівалент- ний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під- розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характе- ристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Висо- кої точн- ості	Від 0,3 до 0,5 включно	III	в	малий середній великий	світлий середній темний	600	200	-	3,0

Виробничий шум. Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях мають відповідати вимогам СН 3223-85, ГОСТ 12.1.003-85, ГР 2411-81 [28] і наведені в табл. 11.4.

Устаткування, що є джерелом шуму (вентилятори, електроінструмент, технологічне обладнання), слід використовувати поза межами приміщень.

Для забезпечення допустимих рівнів шуму на робочих місцях слід застосовувати засоби звукопоглинання, вибір яких має обґрунтовуватись спеціальними інженерно-акустичними розрахунками.

Таблиця 11.4 – Допустимі рівні звуку, еквівалентні рівні звуку і рівні звукового тиску в октавних смугах частот

Вид трудової діяльності, робочі місця	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Виконання усіх видів робіт на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Акустична обробка приміщень – це облицювання частини внутрішніх поверхонь огорожень звукопоглинаючими матеріалами, а також розміщення в приміщенні штучних звукопоглиначів, які представляють собою вільно підвішені

об'ємні поглинаючі тіла довільної форми. Найбільший ефект при акустичній обробці можливо отримати в точках, які розташовані в зоні відбитого звуку; в зоні прямого звуку акустичний ефект від застосування облицювання набагато менший. Звукопоглинаючі облицювання розміщують на стелі і в верхніх частинах стін при висоті приміщення не більше 6-8 м таким чином, щоб акустично оброблена поверхня складала не менше 60 % від загальної площі обмежуючих приміщення поверхонь. У вузьких і дуже високих приміщеннях доцільно облицювання розміщувати на стінах, залишаючи нижні частини стін (до 2 м висотою) не облицьованими, або проектувати конструкцію звукопоглинаючої підвісної стелі.

Виробнича вібрація.

Норми виробничої вібрації на постійних робочих місцях в приміщеннях підприємства, визначені за [26], наведено в таблиці 11.5.

Таблиця 11.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні полоси з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	32	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	1,3* 108	0,45 99	0,22 93	0,2 92	0,2 92	0,2 92	-	-	-	-

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, $\text{м/с}^2 \cdot 10^n$, в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

1. Створення амортизаторів в яких використовують пружини, гуму та інші пружні матеріали.
2. Розміщення будівельних конструкцій на масивних фундаментах.
3. Встановлення додаткових реактивних опорів.

Також серед технічних заходів уникнення шкідливого впливу вібрації – створення нових конструкцій інструментів і машин, вібрація яких не може виходити за безпечні для людини межі, а зусилля не повинні перевищувати 15- 20 кг. Усі деталі машин та агрегатів, що рухаються, повинні ретельно врівноважуватися, а для зменшення динамічних сил, які спричиняють вібрації, слід застосовувати змащування та ін.

11.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують «Правила пожежної безпеки в Україні» та інші правила пожежної безпеки для промислових підприємств і окремих об'єктів [27, 28]. Визначення пожежо- вибухонебезпечності речовин і матеріалів здійснюється за рекомендаціями [25], а, відповідно, категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок, де вони використовуються, зберігаються тощо, за [24].

Пожежо-вибухонебезпечність речовин і матеріалів – сукупність властивостей, що характеризують їхню здатність до виникнення і поширення горіння. Наслідком горіння, залежно від його швидкості та умов протікання, можуть бути пожежа або вибух. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначають показниками, вибір яких залежить від агрегатного стану речовини (матеріалу), та умов їхнього застосування.

Отже, приміщення, де здійснюється оперативне обслуговування, за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відносяться до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В; а також, частково, категорії В, в яких знаходяться та будуть знаходитися (зберігатися) легкозаймисті, горючі і/або важко

горючі рідини, а також речовини і/або матеріали, як здатні вибухати та горіти або тільки горіти під час взаємодії з водою, киснем повітря і/або один з одним; тверді горючі і/або важко горючі речовини та матеріали (включно горючий пил і/або волокна), за умови, що питома пожежна навантага для твердих і рідких легкозаймистих, горючих та важко горючих речовин і/або матеріалів на окремих ділянках площею не менше 10 м² кожна може перевищити 180 МДж•м².

Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується III ступенем вогнестійкості. До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [26] наведено в таблиці 11.6.

Таблиця 11.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхові (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	самонесучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [25] наведено в таблиці 11.7.

Таблиця 11.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	2	REI 60	2	1

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 11.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 11.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 11.8 (знаменник).

Таблиця 11.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

На території депо встановлено 54 порошкових (ВП) та водо-пінних (ВВП)

вогнегасників ємністю 5 та 9 л.

Висновок: розроблено рекомендації з охорони праці та технічні рішення з правил безпечної експлуатації.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі на тему «Підвищення енергоефективності електроприводу автономного транспортного засобу» здійснено порівняльний аналіз систем керування тяговим електроприводом транспортного засобу з метою визначення найбільш ефективної конфігурації.

Було виконано перевірку вибраного електродвигуна на відповідність умовам перевантаження, що дало змогу переконатися у його придатності до експлуатації в обраній системі.

Для обґрунтованого вибору компонентів електроприводу виконано розрахунок потужності двигуна, підібрано необхідні захисні та керувальні пристрої, елементи системи керування та силовий інвертор.

Система автоматичного керування тяговим електродвигуном реалізована на базі інвертора з використанням інтелектуального силового модуля із вбудованими драйверами. До складу схеми входять чотири типи силових модулів, які забезпечують ключові функції електроприводу: запуск двигуна, регулювання швидкості обертання, реверс, рекуперативне гальмування та режим гальмування на гальмівний резистор. Застосування векторного керування дозволяє досягти високої точності автоматичного регулювання, що обґрунтовує його широке використання в сучасних системах електроприводу.

Проведене імітаційне моделювання підтвердило, що динаміка та поведінка системи відповідають реальним фізичним та електромеханічним процесам. Також було досліджено показники стійкості та якості керування системою.

Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших досліджень і конструкторських розробок у сфері електроприводу автономного транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Україна: транспорт. [Електронний ресурс] / Велика українська енциклопедія. – Режим доступу: <https://vue.gov.ua/> Україна:_транспорт
2. Транспортна мережа Вінниці. [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://city1.vin.com.ua › ua/main/p_trans.html
3. I. Shchur, I. Havdo, Y. Biletskyi. Modeling of two-motor front-wheel drive control for electric vehicle with electronic differential based on energetic macroscopic representation. Energy Engineering and Control Systems, 2020, Vol. 6, No. 1, pp. 51 – 60.
4. Ehsani M., Gao Y., Longo S., та ін. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: CRC press, Taylor & Francis Group, 2018. 58 сСучасний тролейбус. Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://naukatehnika.com/sovremennyijtrollejbus.html>
6. ЗАТ «Львівський автомобільний завод», Тролейбус Е183 та його модифікації: Керівництво з експлуатації. – Львів, 2006. – 147 с.
7. Технічна експлуатація міського електричного транспорту: Навч.посібник. / В.Х.Далека, В.Б.Будниченко, Е.І.Карпушин, В.І.Коваленко. Харків: ХНАМГ, 2007.- 286 с.
8. Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина : навч. посібник / В. Х. Далєка, М. В. Хворост, В. І. Скуріхін, Д. І. Скуріхін. ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекєтова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекєтова, 2018. – 388 с.
9. Бойко С. М., Жуков О. А., Лапіна О. С. Свідєцтво про реєстрацію авторського права на твір № 132096 UA. Науковий твір «Концепція проектування перонного автобуса на електротязі для регіонального аєропорту». Державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій». Дата реєстрації 16 грудня 2024 р.
10. Двигуни. Каталог. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.a-a-a.ru/>

11. Двигуни. Каталог. . [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://ventilator.kiev.ua/production/electric_motors/index.html
11. Левковець П.Р., Зеркалов Д.В., Мельниченко О.І., Казаченко О.Г. Управління автомобільним транспортом: Навч.посібник / За ред.Д.В. Зеркалова. – К.: Арістей, 2006.- 416 с..
12. Вимірювальні системи сучасних електромеханічних комплексів. Навчальний посібник / І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, О.А. Жуков – Кривий Ріг, 2022. – 161 с.
12. ГрабкоВ.В., Розводюк М.П., ГрабенкоІ.В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина І. Машини постійного струму: Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 86 с.
13. Розрахунок і проектування трифазного силового масляного трансформатора. Курсове проектування: електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання / Розводюк М. П., Проценко Д. П., Бомбик В. С., Жуков О. А. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 149 с.
14. Zhukov O., Lubianskiy V. Portable diagnostic system of the electromechanical complex of the electric car. Proceedings of the 8th International scientific and practical conference «Perspectives of contemporary science: theory and practice», Lviv, 16-18.09.2024. 2024. Pp. 174-177.
14. Басов Г. Г. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу: навчальний посібник, / Г. Г. Басов, С. І. Яцько. – Харків : «Апекс+», 2005. – 248 с.
15. Карлссон В. Audis nya magiska låda ska rädda bensinbilar [Електронний ресурс] / В. Карлссон // Carup.se. – 2025. – 30 січня. – Режим доступу: <https://carup.se/audis-nya-magiska-lada-ska-radda-bensinbilar/>.
16. IGBT-модулі. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.igbt.ru>
17. Інтелектуальні силові модулі. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://electronics.org.ua>

18. Широтно-імпульсна модуляція. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://club.shelek.ru/viewart.php?id=163>
20. Тітяєв Д. К., Мірошник Д.Н., Порівняльний аналіз векторної і традиційної широтно-імпульсної модуляції. - Донецьк: ДНТУ, 2008. – 59 с.
21. Грабко В. В., Кучерук В. Ю., Возняк О. М. Мікропроцесорні системи керування електроприводами. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2009. – 146 с.
22. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода. Київ, «Кондор», 2003. – 408 с.
23. Жуков О.А., Доценко В.М. До питання впровадження джерел розосередженої генерації в системи електропостачання об'єктів інфраструктури електротранспорту. Всеукраїнська науково-практична конференція «Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті». Харків, 2023. С. 175.
24. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва.
25. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
26. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
27. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.
28. До питання проектування електроприводу перонного автобуса на електротязі / О.А. Жуков, А.М. Фаренюк // Матеріали LIV науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 24-27 червня 2025 р. – Електрон. текст. дані. – 2025. – Режим доступу:
<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/904/1576/2888-1>

Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедри КЕМСК

К.т.н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

« 4 » березня 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА
АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

08-24.БДР.022.00.000 ТЗ

Керівник роботи

К.т.н., доц.

Олексій ЖУКОВ

« 4 » березня 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕМСА-216

ФАРЕНЮК Артем

« 4 » березня 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки «Підвищення енергоефективності електропривода автономного транспортного засобу».

Скорочене найменування розробки – «Електропривода електромобіля».

Замовник – Кафедра електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем бакалаврських кваліфікаційних робіт.

3 Призначення розробки і галузь використання

Електромобіль призначений для пасажирських перевезень в містах України та за кордоном. Використовуватиметься на автомобільних дорогах міста.

4 Вимоги до розробки

Електропривод електромобіля повинен забезпечувати надійну роботу в повторно-короткочасному режимі при великій частоті включень. Експлуатація здійснюється в нормальних умовах.

5 Технічні характеристики

Діаметр ходового колеса – 0,5715 м;

Габаритні розміри електромобіля визначаються в залежності від потрібної компоновки машини.

6 Комплектація розробки

Електромобіль має суцільно-металевий кузов вагонної компоновки з трьома бічними дверима, колісну формулу 2х2. Приводиться в рух від електричного двигуна.

7 Етапи виконання

Основна частина	06.05.2025р
Графічна частина	20.05.2025р

8 Конструктивне виконання

Складові електроприводу виготовляються окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки.

9 Технічне обслуговування та ремонт

До оперативного обслуговування електроустановками допускаються працівники, які знають їхні схеми, інструкції з експлуатації, особливості конструкції та роботи обладнання і пройшли навчання та перевірку знань.

10 Показники технологічності

Електропривод електромобіля – двигун, апаратура керування, провідники, кабелі і т.п. виконується на сучасній елементній базі.

12 Живлення електропривода

Живлення електромобіля відбувається від акумуляторної батареї постійного струму напругою.

13 Порядок контролю та прийняття

Виконання етапів графічної та розрахункової документації бакалаврської дипломної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

Додаток Б
(обов'язковий)

ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

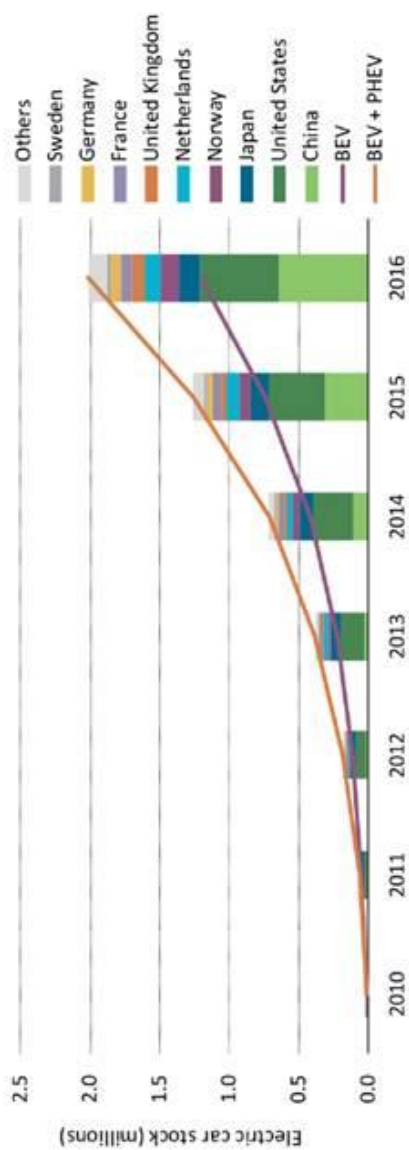
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА
АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Актуальність. Перехід до екологічно чистого та енергоефективного транспорту є одним із пріоритетів сучасної інженерії. Електромобілі розглядаються як перспективна альтернатива традиційним авто з ДВЗ завдяки низькому рівню шкідливих викидів і високій енергоефективності. Одним із ключових елементів, що визначають ефективність електромобіля, є система тягового електропривода. Її вдосконалення, зокрема в частині алгоритмів керування, дозволяє оптимізувати енергоспоживання, покращити динаміку руху та підвищити рівень рекуперації. Тому дослідження та оптимізація таких систем є актуальним і важливим завданням для розвитку сучасного електротранспорту.

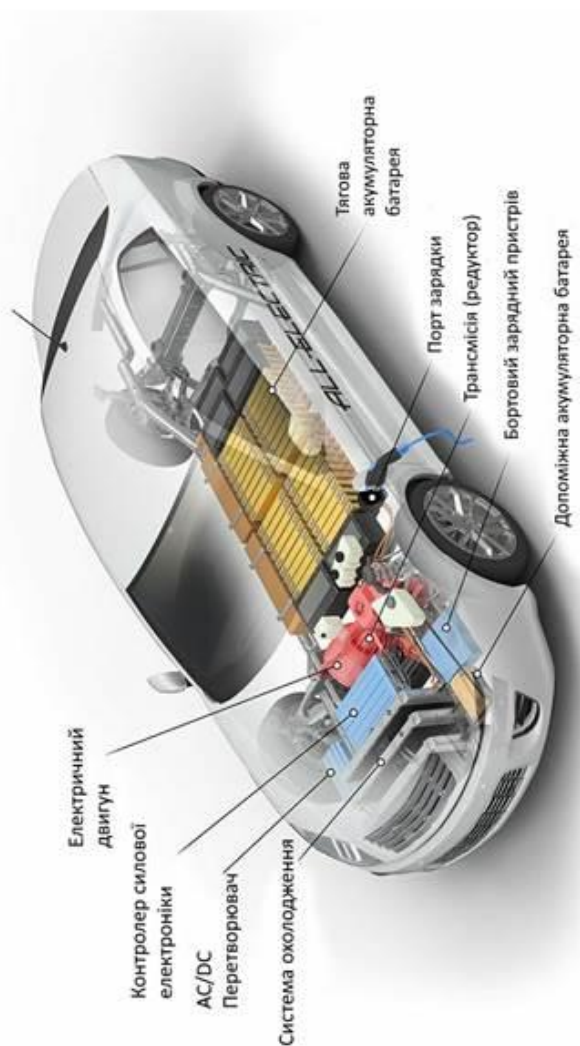
Мета роботи: Підвищення ефективності функціонування тягового електропривода електромобіля шляхом вибору оптимальної структури системи керування. Це дозволить покращити динамічні характеристики транспортного засобу, забезпечити стабільну та надійну роботу приводу, а також зменшити приведені витрати під час експлуатації.

Мета досягається шляхом вирішення наступних задач:

- аналітичний огляд існуючих систем тягового електропривода ;
- розрахунок основних параметрів системи електропривода;
- розробка схеми керування тяговим електроприводом
- моделювання запропонованої системи керування.



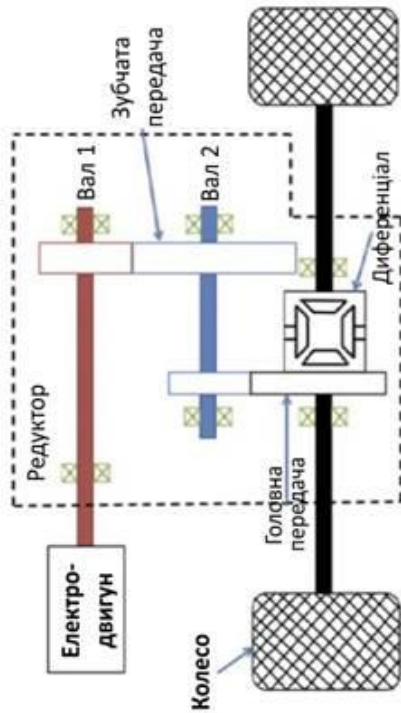
Динаміка зростання кількості електромобілів у світі



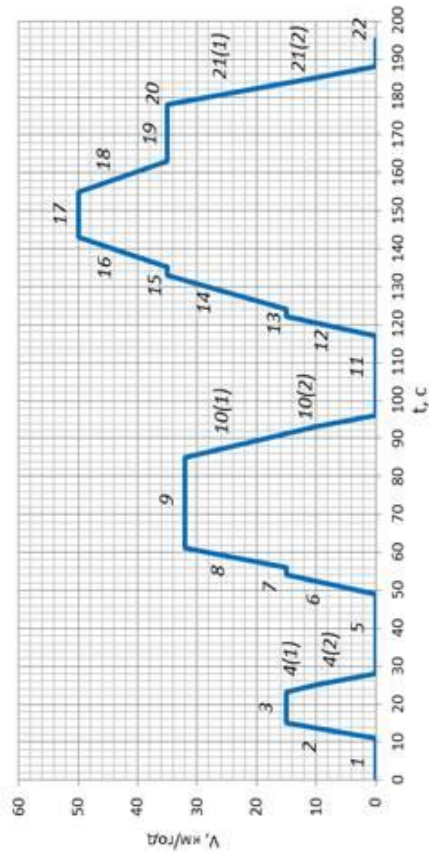
Зовнішній вигляд та основні компоненти електромобіля

Основні технічні характеристики електромобіля

Загальна вага електромобіля, кг	$m_0 = 1700$
Вага навантаженого автомобіля, кг	$m = 1900$
Радіус валу ходового колеса, м	$r = 0.1405$
Радіус ходового колеса, м	$R_k = 0.4719$
коефіцієнт тертя ковзання в підшипниках кочення	$\mu = 0.015$
Передаточне число ведучого моста	$i = 9,817$
ККД трансмісії	$\eta = 0.9$



Кінематична схема механізму



Європейський міський цикл руху електромобіля (ECE-15)

Схема дії сил та моментів на електромобіль при
горизонтальному русі

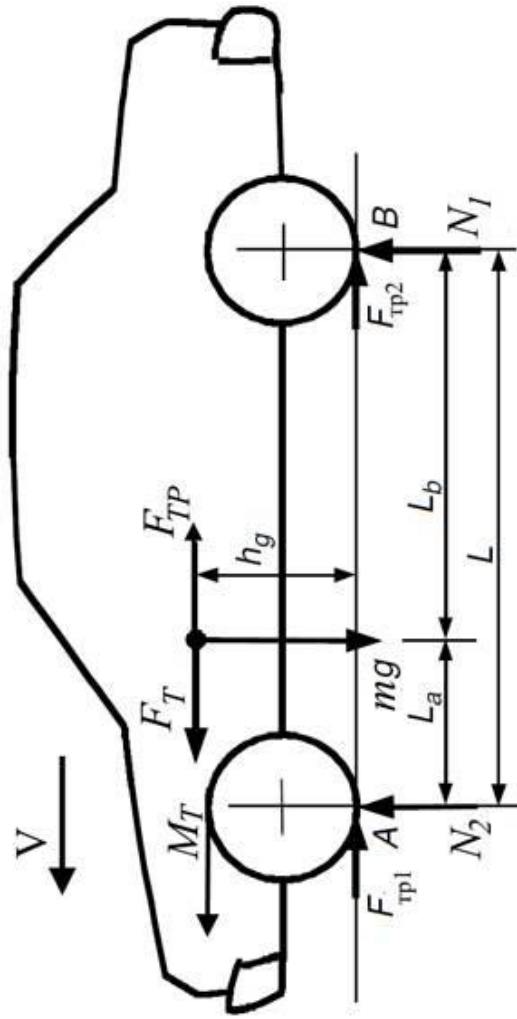
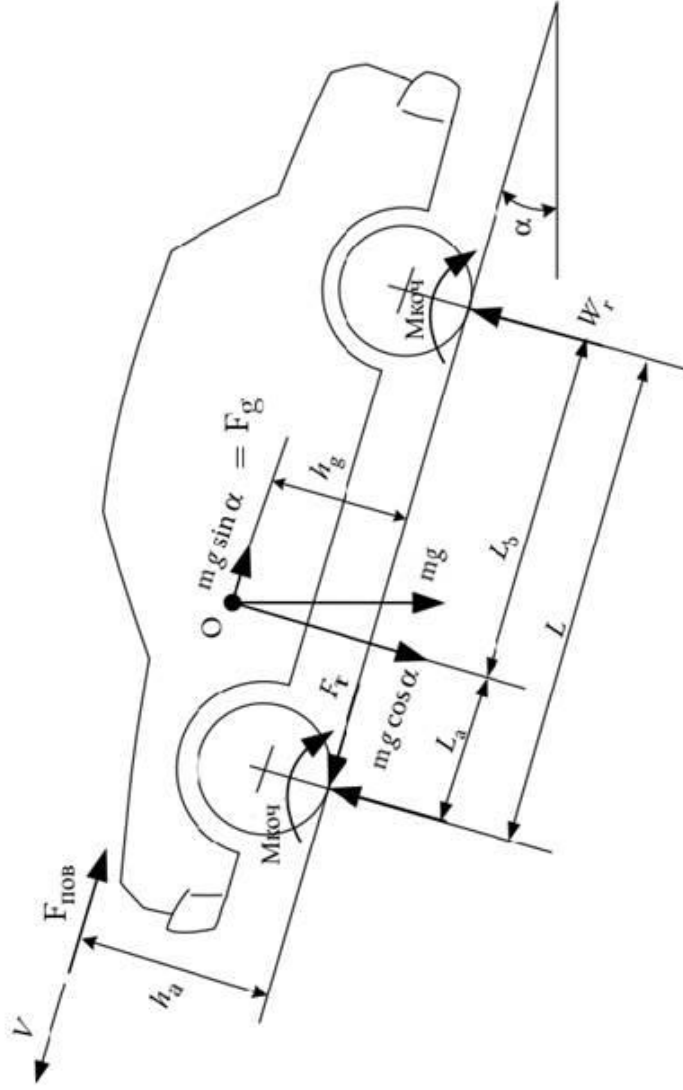


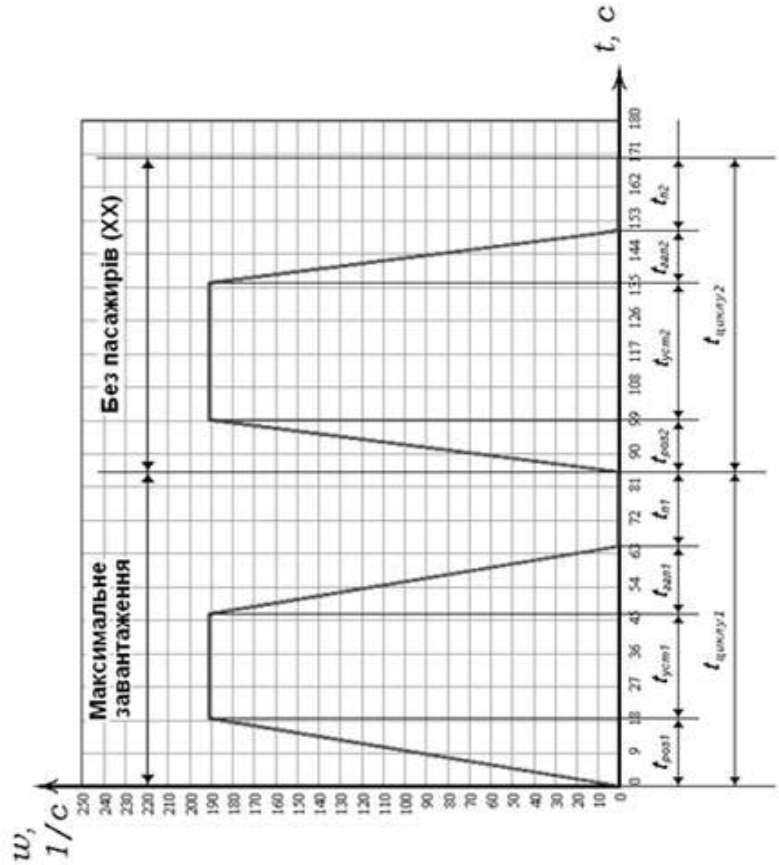
Схема сил, що діють на електромобіль під час руху на підйом



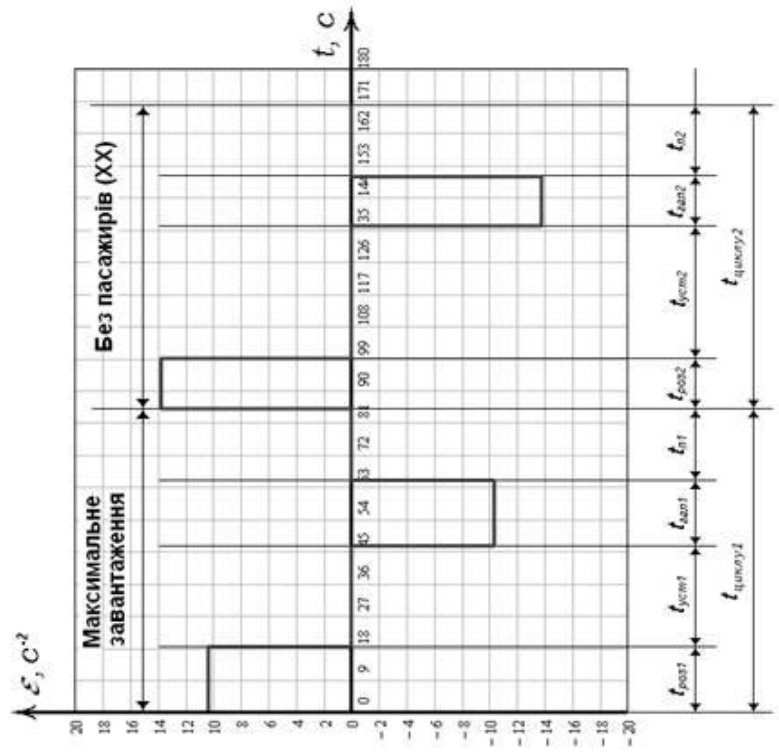
$$\vec{F}_T + \vec{F}_{mp} + \vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a} \quad P = \frac{V}{\eta_{mp}} (g \cdot m_{cn} \cdot \psi_{\partial} + k_{\gamma_{\text{тос}}} \cdot A_{\gamma_{\text{тос}}} V^2)$$

Тахограми швидкості та діаграми навантаження

7



Тахограма залежності кутової швидкості обертання ротора ω від часу t



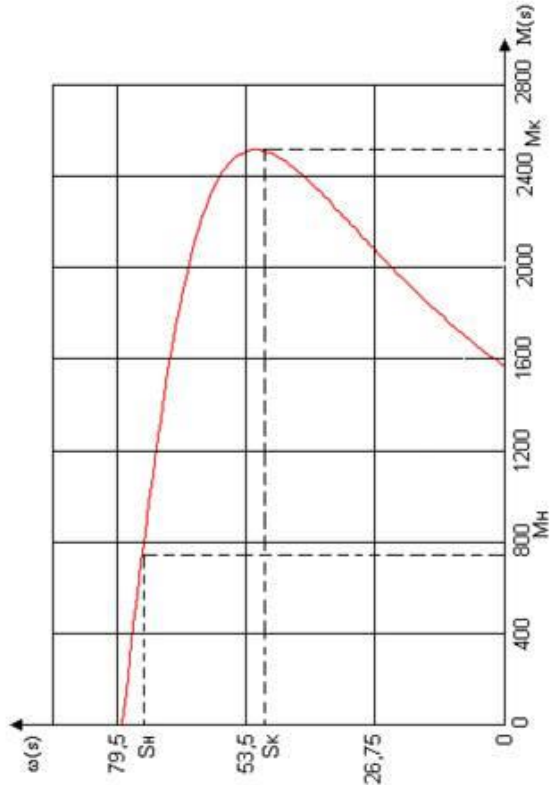
Тахограма залежності кутового прискорення ϵ від часу t

Техніко-економічне обґрунтування вибору системи ЕП

Система ЕП Показники	ШП-ДПС	СДПМ-інвертор	ПЧ-АД
Вартість двигуна, грн	320000	420000	250000
Вартість САК, грн	150000	253000	221000
Капітальні затрати, грн	470000	673000	471000
Річні капітальні затрати, грн	108000	189000	127170
Експлуатаційні затрати, грн/рік	20600	17600	15600
Додаткові витрати, грн	40000	32000	30856
Приведені витрати, грн	168000	238000	172626
ВСЬОГО, грн	264847	270000	203542

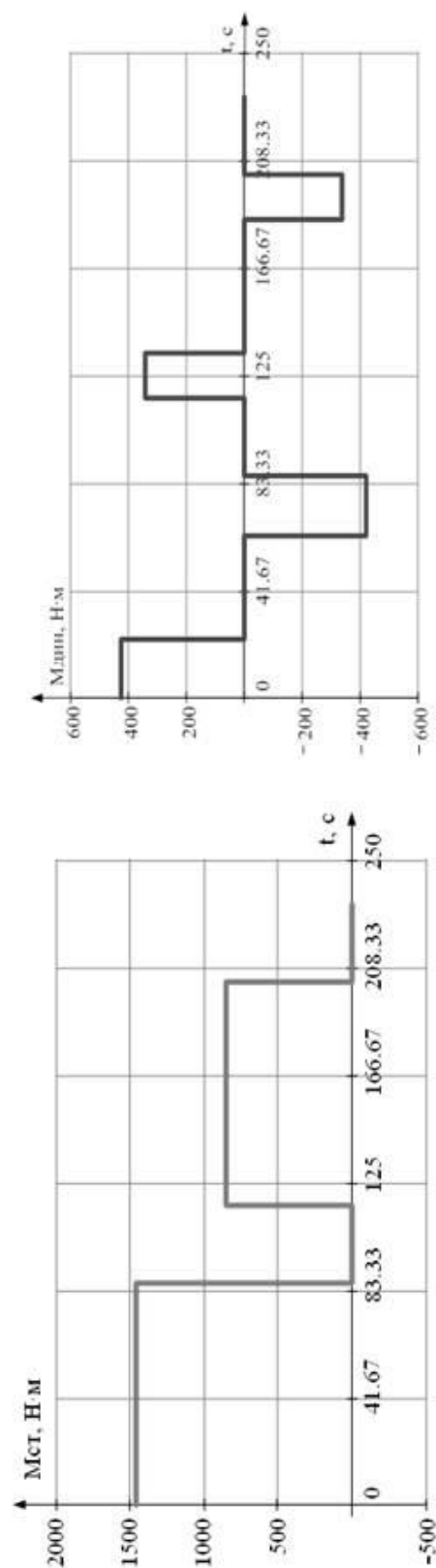
Параметри вибраного двигуна та його механічна характеристика

Тип двигуна	Siemens 1PV5138
Потужність $P_{\text{ном}}$, кВт	110
ККД, %	94
$\cos\varphi$	0,82
Номінальна напруга, В	380-400
Маса, кг	375
Максимальний момент M_{max} , Н·м	2600
Фазна напруга ротора $U_{2\phi}$, В	248
Струм ротора I_2 , А	154
Струм статора I_1 , А	147
Кількість обертів $n_{\text{ном}}$, об/хв	до
Момент інерції $J_{\text{де}}$, кг·м ²	5,25
Номінальний момент $M_{\text{ном}}$, Н·м	1500



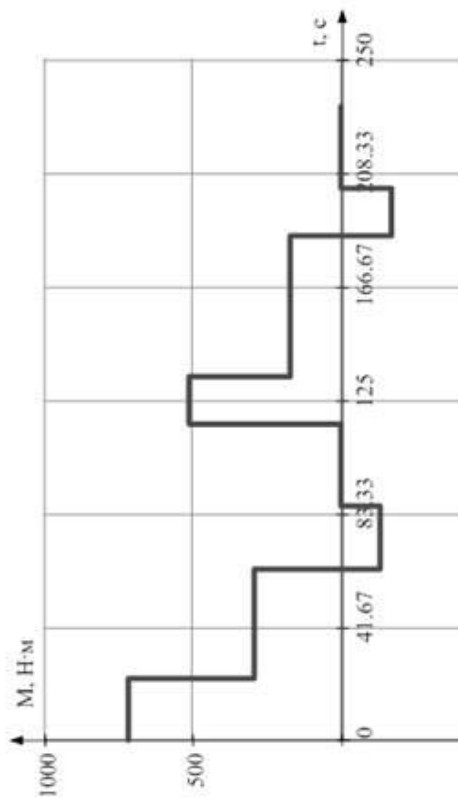
Зовнішній вигляд тягового електродвигуна

Діаграми навантаження двигуна



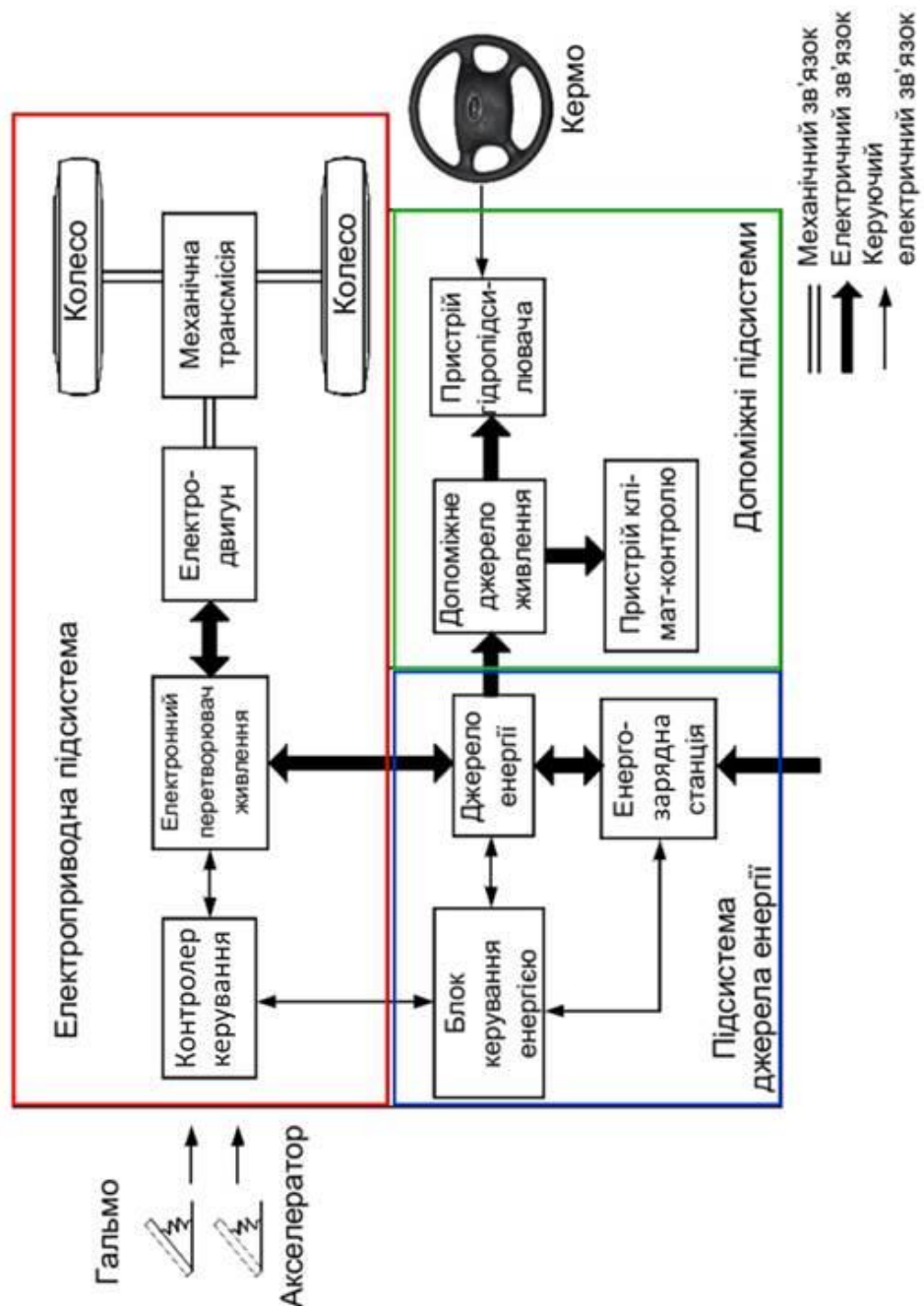
Діаграма статичного навантаження

Діаграма динамічного навантаження

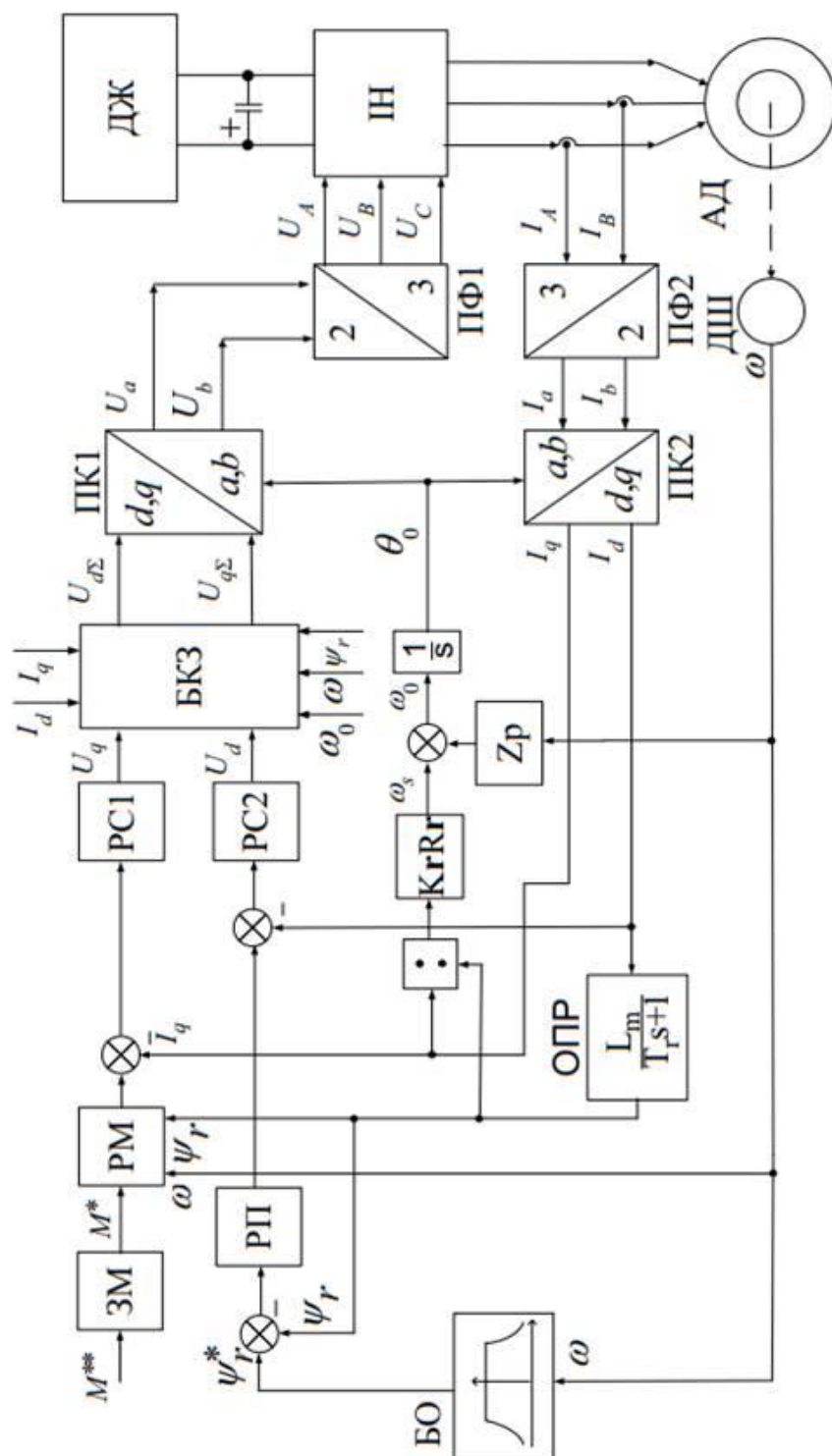


Діаграма сумарного навантаження

Структурна схема системи електропривода



Функціональна схема системи електропривода



Зовнішній вигляд тягового перетворювача та контролера



Структура силового перетворювача



Зовнішній вигляд

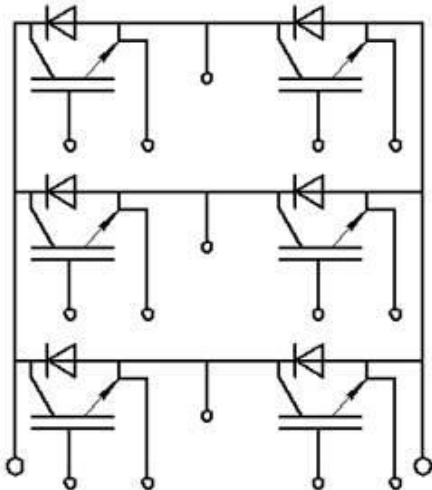
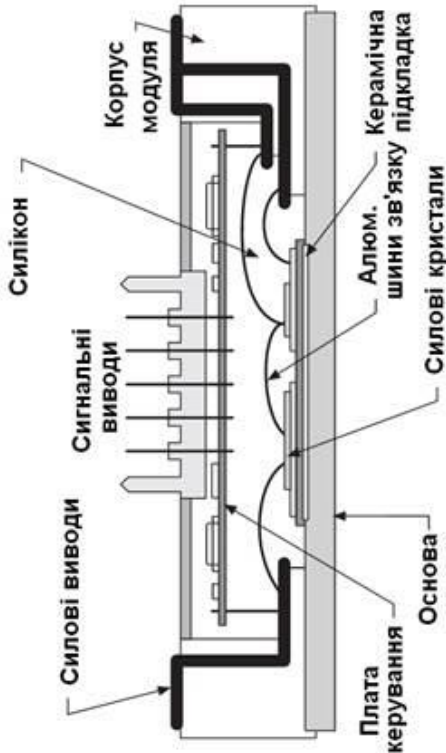
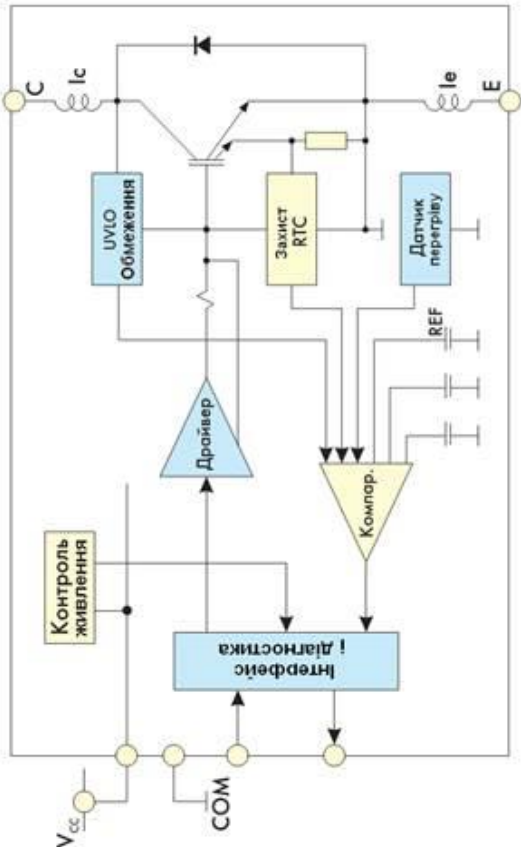
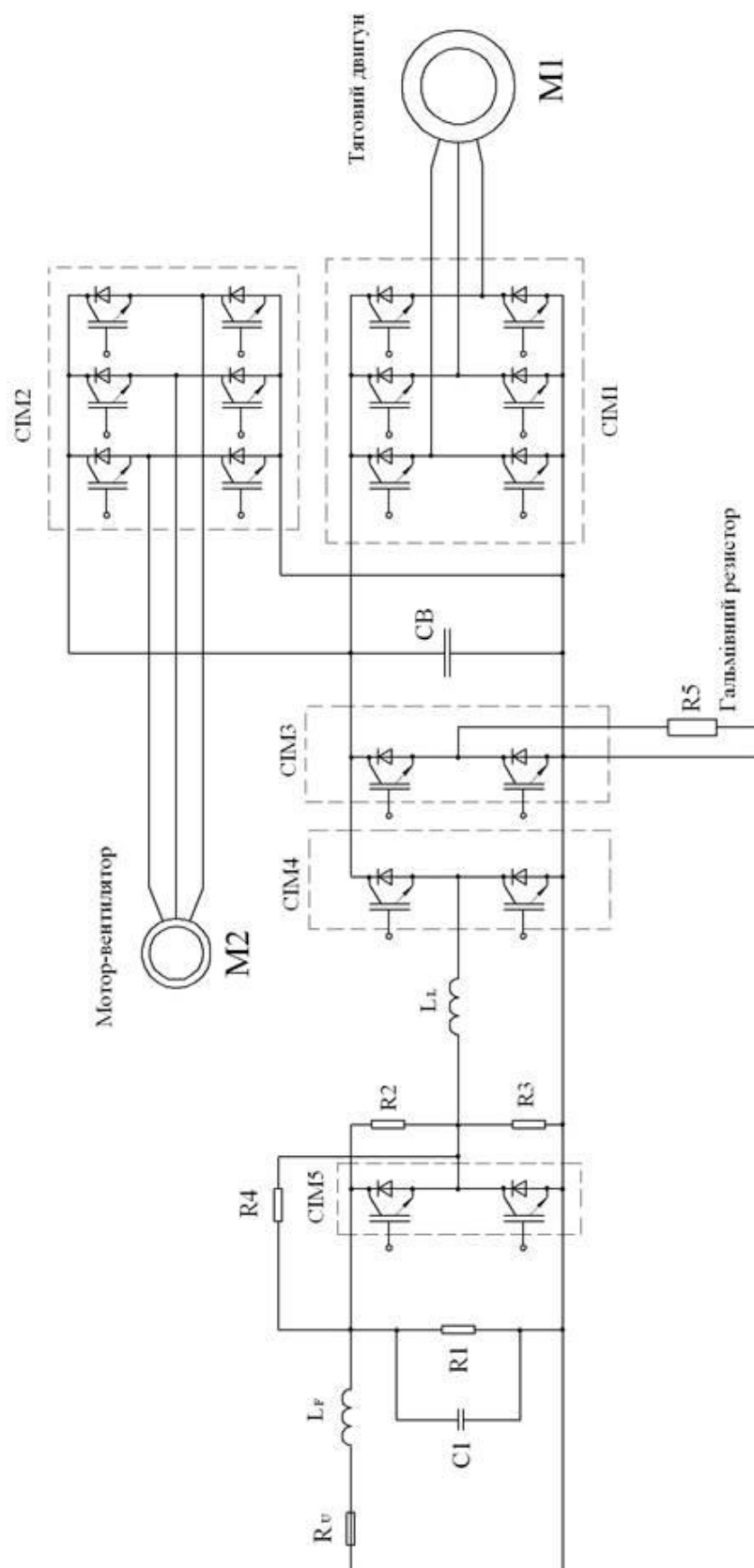


Схема виконання



Структурна схема інтелектуального модуля

Принципова електрична схема системи електроприводу



**Результати моделювання та дослідження системи електропривода
на стійкість і якість**

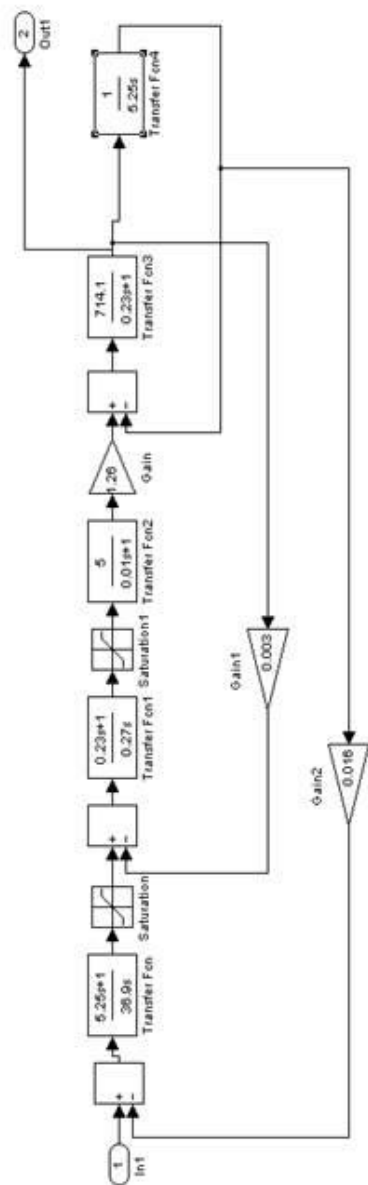
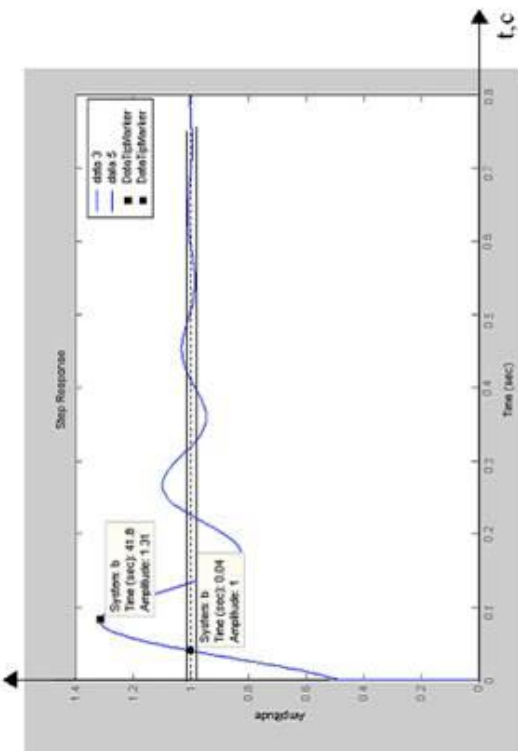
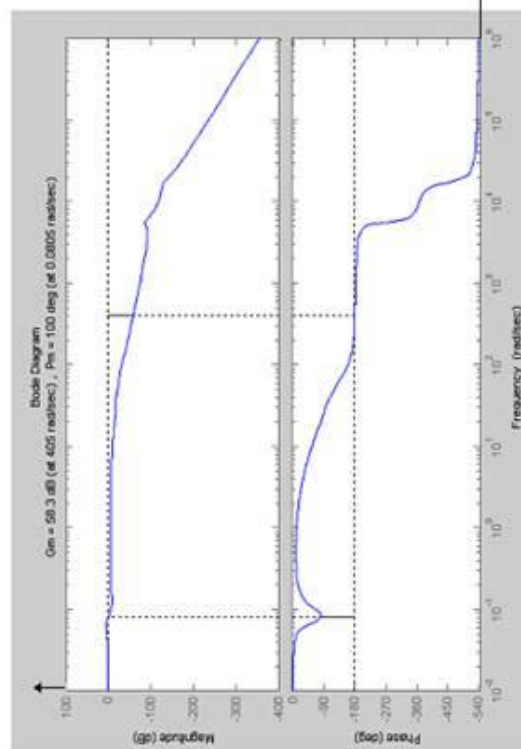


Схема моделювання системи електроприводу



Перехідна характеристика

Характеристика ЛАЧХ і ЛФЧХ по збурювальній дії

- В результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було здійснено порівняльний аналіз систем керування тяговим електроприводом транспортного засобу з метою визначення найбільш ефективної конфігурації.
- Виконано перевірку вибраного електродвигуна на відповідність умовам перевантаження.
- Виконано розрахунок потужності двигуна, підібрано необхідні захисні та керувальні пристрої, елементи системи керування та силовий інвертор.
- Побудовано природну механічну характеристику приводного двигуна.
- Система автоматичного керування тяговим електродвигуном реалізована у вигляді інвертора на базі інтелектуального силового модуля з вбудованими драйверами.
- Проведене моделювання підтвердило, що динаміка та поведінка системи відповідають реальним фізичним та електромеханічним процесам. Також було досліджено показники стійкості та якості керування системою.
- Здійснено дослідження системи електроприводу на стійкість та якість.
- Розроблено схему керування системою електроприводу.
- Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших досліджень і конструкторських розробок.

УДК 629.423

Артем ФАРЕНЮК¹
Олексій ЖУКОВ¹

ДО ПИТАННЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПЕРОННОГО АВТОБУСА НА ЕЛЕКТРОТЯЗІ

¹Вінницький Національний Технічний Університет

Анотація

Перонні автобуси є важливою частиною аеропортової інфраструктури, що забезпечує швидке та комфортне перевезення пасажирів між терміналом і літаком. Одним із перспективних напрямів їх розширення є перехід на електричний привод. Розглянуто основні підходи до проектування електроприводу перонного автобуса на електричному, зокрема вибір типу електричного двигуна, трансмісії та мажущої акумуляторної батареї. Проаналізовано ефективність використання літій-іонних акумуляторів і можливості інтеграції систем рекуперації енергії гальмування.

Ключові слова: перонний автобус, електропривод, акумуляторна батарея, електродвигун, рекуперація.

Abstract

Airport buses are an important part of the airport infrastructure, providing fast and comfortable transportation of passengers between the terminal and the aircraft. One of the promising areas of their development is the transition to electric traction. The main approaches to designing the electric drive of an airport bus on electric traction are considered, in particular the choice of the type of electric motor, transmission and traction battery. The efficiency of using lithium-ion batteries and the possibilities of integrating regenerative braking systems are analyzed.

Key words: airport bus, electric drive, battery, electric motor, regeneration.

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Підвищення енергоефективності електропривода автономного транспортного засобу
Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕМ, гр. ЕМСА-216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 16,95 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Гарант ОП

(прізвище, ініціали, посада)

Мошноріз М.М.

(підпис)

(підпис)

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

Особа, відповідальна за перевірку

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Жуков О.А.

(прізвище, ініціали, посада)

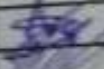
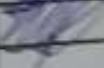
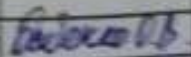
Здобувач

(підпис)

Фаренюк А.М.

(прізвище, ініціали)

08-24.БКР.022.00.000

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата			
Розробив:		Фаренюк А.М.		20.05	Підвищення енергоефективності електропривода автономного транспортного засобу		
Перевірив:		Жуков О.А.		20.05			
Т. контр.							
Рецензент				10.06			
Норм. кон.		В.Яноч О.О.		23.06	БНТУ, гр. EMCA-215		
Затверд.		Мошноріз М.М.		23.06			