

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра комп'ютерні електромеханічні системи і комплекси

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Підвищення енергоефективності тягового електроприводу електромобіля»

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕПА-23м

спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Василь ЛУБЯНСЬКИЙ 

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

« 19 » листопада 2024 р.

Опонент: к.т.н., доц. кафедри ЕСЕЕМ
Олексій БАБЕНКО 

« 07 » грудня 2024 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц. МИКОЛА Мошноріз 

« 19 » листопада 2024 р.

Вінниця ВНТУ – 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації електроприводу»

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

«27» 08 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Лубянському Василю Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення енергоефективності тягового електроприводу електромобіля

керівник роботи Жуков Олексій Анатолійович к.т.н. доц.

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

затверджені наказом ВНТУ від «17» 09 2024 року № 310.

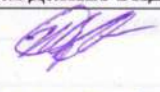
2. Строк подання студентом проекту (роботи): 30.11. 2024

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	 24.08.24	 19.11.24
Економічна частина	Шуле Ю.А., к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ	 24.08.24	 19.11.24

7. Дата видачі завдання « 24 » 08 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми магістерської	24.08.24	
2	кваліфікаційної роботи (МКР)	26.10.24	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Перший	02.11.24	
4	рубіжний контроль виконання МКР	09.11.24	
5	Виконання спеціальної частини МКР. Другий	16.11.24	
6	рубіжний контроль виконання МКР	19.11.24	
7	Виконання розділу «Економічна частина»	09.11.24	
8	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в	19.11.24	

Студент


(підпис)

Василь ЛУБЯНСЬКИЙ

Керівник роботи


(підпис)

Олексій ЖУКОВ

АНОТАЦІЯ

УДК: 621.311.24

Лубянський В.В. Підвищення енергоефективності тягового електроприводу електромобіля. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2024. 120 с.

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

У магістерській 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

Lubyansky V.V. Increasing the energy efficiency of the traction electric drive of an electric vehicle. Master's thesis in specialty 141 - electricity, electrical engineering and electromechanics, educational program - electrical engineering Vinnitsa: VNTU, 2024. – 120 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 145 titles; fig.: 26; tabl. 14.

In the master's qualification work, the electric drive of an electric vehicle was modernized, providing 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 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 КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНІЗМУ І РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ ...	9
1.1 Загальні відомості про електромобіль.....	9
1.2 Опис механічного і електричного устаткування	12
1.3 Постановка задачі проектування	19
2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ	21
2.1 Розрахунок тахограм робочого механізму.....	21
2.2 Розрахунок приведених інерційних мас та моментів інерції	25
2.3 Попередній розрахунок потужності приводного двигуна.....	30
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	33
3.1 Розрахунок системи ПЧ-АД.....	35
4 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА ЙОГО ПЕРЕВІРКА	37
4.1 Перевірка вибраного двигуна за нагрівом, перевантажувальною здатністю та умовами пуску.....	37
5 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТРУКТУРНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	39
6 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ КОЛА УПРАВЛІННЯ	44
6.1 Визначення і опис конструкції перетворювального агрегату.....	44
6.2 Визначення, опис функціональної схеми.....	47
6.3 Вибір і програмування контролера	61
7 РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САЕП	66
8 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САЕП	68
9 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА СТІЙКІСТЬ ТА ЯКІСТЬ	71
9.1 Оцінка стійкості	71
9.2 Оцінка якості	21
10 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	68

10.1 Розрахунок індуктивності згладжувального дроселя	75
10.2 Вибір сенсорів	76
10.3 Вибір задатчика інтенсивності	77
10.4 Розробка принципової схеми системи електроприводу	80
11 ОХОРОНА ПРАЦІ	86
11.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації електромобіля	87
11.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	91
11.2 Пожежна безпека	95
12 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	104
ВИСНОВКИ	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	111
Додаток А Технічне завдання.....	113
Додаток Б Графічна частина.....	114
Додаток В Протокол перевірки дипломної роботи на наявність текстових запозичень	136

ВСТУП

Актуальність. У сучасному світі пріоритетним завданням є перехід на екологічно чисті транспортні засоби, які мінімізують негативний вплив на довкілля. Традиційні автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння є одними з основних забруднювачів повітря через викиди парникових газів, монооксиду вуглецю та інших токсичних речовин. Саме тому електромобілі стають альтернативою, що здатна забезпечити чистіший транспорт, зменшуючи рівень забруднення та викидів.

Актуальність використання електромобілів зростає не лише через їхню екологічність, але й завдяки потенціалу в підвищенні енергоефективності. Вдосконалення систем керування електроприводами електромобілів відіграє ключову роль у досягненні оптимальних показників енергоспоживання та ефективної роботи. Нові підходи і технологічні рішення дозволяють поліпшити керованість транспортного засобу, знизити витрати енергії й підвищити загальну продуктивність електричних транспортних систем.

На сьогодні електромобілі мають значні перспективи завдяки розвитку акумуляторних технологій і вдосконаленню алгоритмів керування електроприводом. Інноваційні підходи в управлінні енергоспоживанням дозволяють оптимізувати потужність, зменшити час заряджання та збільшити запас ходу автомобіля. Вдосконалення систем керування є визначальним фактором у підвищенні конкурентоспроможності автомобілів на ринку.

Таким чином, дослідження у даній сфері та технічні рішення з врахуванням викликів сьогодення є актуальною задачею.

Мета роботи. Підвищити ефективність роботи тягового електропривода електромобіля за рахунок вибору кращої системи електропривода, що дозволить покращити динамічні показники, показники якості роботи електропривода та зменшити сумарні зведені економічні затрати при експлуатації електропривода.

Об'єкт дослідження – процес роботи тягового електропривода електромобіля.

Предмет дослідження – різні системи тягового електропривода електромобіля.

Методи дослідження. У процесі дослідження застосовувалися: теорія електричних машин; методи аналізу електричних кіл; методи комп'ютерного імітаційного моделювання для дослідження динаміки електромеханічних систем; методи частотного аналізу стійкості замкнутих систем.

Постановка задачі проектування.

- 1) виконати аналітичний огляд існуючих систем тягового електроприводу електромобіля;
- 2) розрахувати параметри систем електроприводу електромобіля;
- 3) розробити схему електроощадного керування електроприводом електромобіля;
- 4) здійснити моделювання запропонованої системи керування електроприводом електромобіля і зробити висновки про ефективність її роботи.

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 «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.

1 КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНІЗМУ І РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ

1.1 Загальні відомості про електромобіль

Електромобіль – це транспортний засіб, який використовує електричну енергію як основне джерело живлення для руху. [3] На відміну від традиційних автомобілів із двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ), електромобіль не потребує палива нафтопродуктів і працює за рахунок електричного приводу [14].

Основні конструктивні особливості електромобіля:

Силовий агрегат. Головним елементом руху є електродвигун, який отримує енергію від акумуляторних батарей або інших електричних джерел (наприклад, суперконденсаторів чи паливних елементів).

Джерело енергії. Енергію для роботи електродвигуна забезпечують:

Акумуляторні батареї, які накопичують та зберігають електричну енергію;

Генератори (у разі гібридної конструкції);

Паливні елементи, які можуть виробляти електроенергію в ході хімічної реакції (наприклад, воднево-кисневої).

Система керування електроприводом

Для оптимізації роботи електродвигуна використовуються системи керування, які забезпечують:

- ефективне використання запасу енергії;
- регулювання швидкості та крутного моменту;
- функціонування рекуперативного гальмування, що дозволяє частково відновлювати енергію.

Переваги електромобілів:

Екологічність – відсутність викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище під час роботи;

Енергоефективність – високий ККД електродвигунів у порівнянні з ДВЗ;

Економічність – зменшені витрати на обслуговування через простішу конструкцію та відсутність необхідності у паливі;

Безшумність – практично відсутній шум під час роботи електродвигуна.

Недоліки електромобілів:

Обмежений запас ходу через місткість акумуляторних батарей;

Час заряджання – залежить від потужності зарядної інфраструктури;

Маса акумуляторних батарей, що впливає на вагу електромобіля та динамічні характеристики.

Сучасні електромобілі активно вдосконалюються завдяки розвитку:

Акумуляторних технологій (збільшення щільності енергії, скорочення часу заряджання);

Інтелектуальних систем керування, що забезпечують ефективне використання енергії;

Рекуперативного гальмування, що дозволяє підвищити енергоефективність.

Таким чином, електромобілі є перспективним напрямом у транспортній галузі, що поєднує екологічність, енергоефективність та високий технічний потенціал.

Типовим представником є електромобіль концерну Opel, відомий як Opel Ampera (рисунк 1.1). Це електромобіль з подовженим запасом ходу (extended range electric vehicle, E-REV), розроблений як європейська версія Chevrolet Volt. Модель поєднує у собі електричний привід з можливістю використання додаткового двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) для збільшення загального пробігу.

Електропривод Opel Ampera працює на основі інтелектуальної системи керування, що забезпечує: режим чистої електротяги для коротких поїздок; плавне перемикавання на роботу генератора при зниженні заряду акумулятора; Рекуперативне гальмування – під час гальмування або уповільнення

електродвигун працює як генератор, відновлюючи електроенергію та заряджаючи акумулятор. Це підвищує енергоефективність та подовжує запас ходу.

Переваги Opel Ampera: висока енергоефективність на коротких дистанціях; можливість подовження ходу за допомогою ДВЗ; плавний хід та швидке прискорення завдяки електричному приводу.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд електромобіля Opel Ampera

Opel Ampera є класичним прикладом поєднання електричного приводу з розширеним запасом ходу, що робить його універсальним рішенням для міських та міжміських поїздок. Завдяки системі керування електроприводом та рекуперації енергії цей автомобіль демонструє відмінну енергоефективність, що є ключовим аспектом у розвитку сучасного електротранспорту.

1.2 Опис механічного і електричного устаткування

Раніше електромобілі виготовляли переважно шляхом переобладнання існуючих транспортних засобів, лише замінюючи двигун внутрішнього згоряння та паливний бак на електродвигун і тягову батарею, зберігаючи всі

інші конструктивні елементи. Однак через недоліки, такі як значна вага, менша гнучкість при проектуванні на зміну такому підходу прийшли сучасні електромобілі, які спеціально проектуються з урахуванням особливостей електричних приводів та вимог до кузова, рами і компоновки елементів приводу. Спрощена структурна схема основних блоків електромобіля наведена на рис. 1.2. В загальному випадку тяговий електропривод (ТЕП) електромобіля структурно містить [8, 9] джерело електричної енергії (тягова акумуляторна батарея), перетворювач напруги – пристрій, що дозволяє подавати на електричний двигун необхідну величину електроенергії та електричний струм необхідних параметрів, система керування забезпечує параметри, які повинна мати електроенергія при її подачі до ТЕД, тяговий електродвигун (ТЕД) – перетворює електричну енергію на механічну (прямий рух транспорту) або механічну на електричну (принцип рекуперативного гальмування), механічна трансмісія (МТ) служить для передачі механічного зусилля від ТЕД до рушія – ведучих коліс (ВК) електромобіля, педаль акселерометра служить в якості формувача завдання для системи керування



Рисунок 1.2 – Спрощена структурна схема електроприводу електромобіля

Легкові електромобілі (Battery Electric Vehicles, BEV) використовуються переважно для перевезення пасажирів на короткі та середні дистанції передусім в умовах міста та передмістя. Вони характеризуються високим ККД, відсутністю викидів шкідливих речовин та низьким рівнем шуму і тому вважаються комфортним, екологічно-чистим та економічним видом

транспорту, що зменшує залежність від карбонових видів палива. Як приклад можна навести Tesla Model S, Nissan Leaf, BMW i3.

Електромобілі – це транспортні засоби, які використовують один або кілька тягових електродвигунів в якості основного приводу для руху. Живлення електродвигунів відбувається від акумуляторних батарей.

Основними вимогами до електроприводів легкових електромобілів є висока динаміка, точне регулювання швидкості та моменту, а також висока надійність у різних умовах експлуатації.

Основними компонентами електромобіля (рис.1.3) є:

- Електродвигун. Перетворює електричну енергію в механічну. Робота двигуна електромобіля базується на використанні електричної потужності тягового акумулятора, що приводить колеса в рух. Деякі моделі обладнані мотором-генератором, який служить для приводу і рекуперації. В якості електродвигунів зазвичай використовуються синхронні, асинхронні, електродвигун-генератор, мотор-колесо.
- Контролер силової електроніки – керує роботою електродвигуна, регулює швидкість та момент.
- Тягова акумуляторна батарея. Накопичує і зберігає електричну енергію та забезпечує живлення тягового електродвигуна електроенергією.
- Система зарядки (бортовий зарядний пристрій) дозволяє заряджати батарею від зовнішніх джерел, випрямляє змінну напруги з мережі та керує струмом зарадяки тягової акумуляторної батареї.
- Інвертор забезпечує перетворення постійного струму від тягового акумулятора у змінний для живлення електродвигуна.
- Трансмісія (редуктор) – забезпечує передачу механічної потужності від електродвигуна до коліс.
- Порт зарядки служить для підключення зарядного пристрою до зовнішньої електромережі.

- Допоміжна акумуляторна батарея потрібна для живлення бортового електрообладнання напругою 12 В.
- Система охолодження призначена для відводу теплоти від тягової акумуляторної батареї.

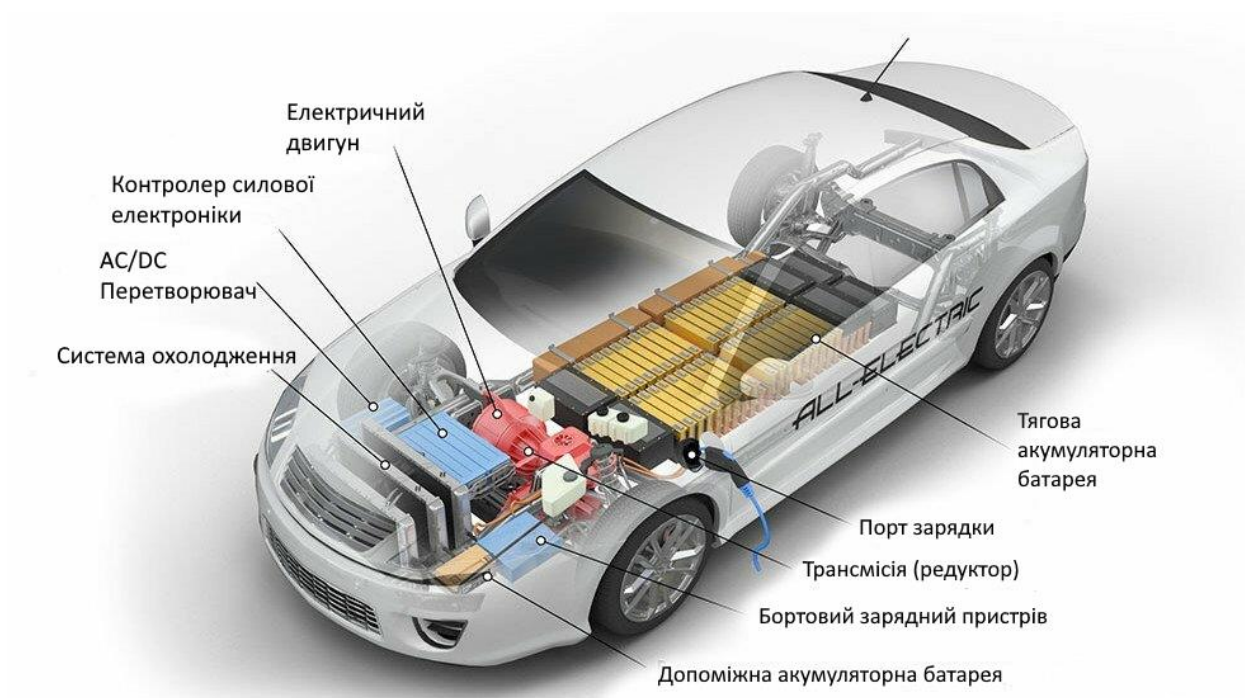


Рисунок 1.2 – Основні компоненти електромобіля

Приводний механізм. На відміну від автомобіля, сучасний електромобіль може мати різні конфігурації кінематичних схем через варіації характеристик електричної тяги та джерел енергії. Існують варіанти із застосуванням одного, двох чи чотирьох привідних електричних двигунів коліс [4, 5, 6, 7].

Розгнемо можливі конфігурації схем електроприводу електромобілів, які приведені на рисунку 1.4

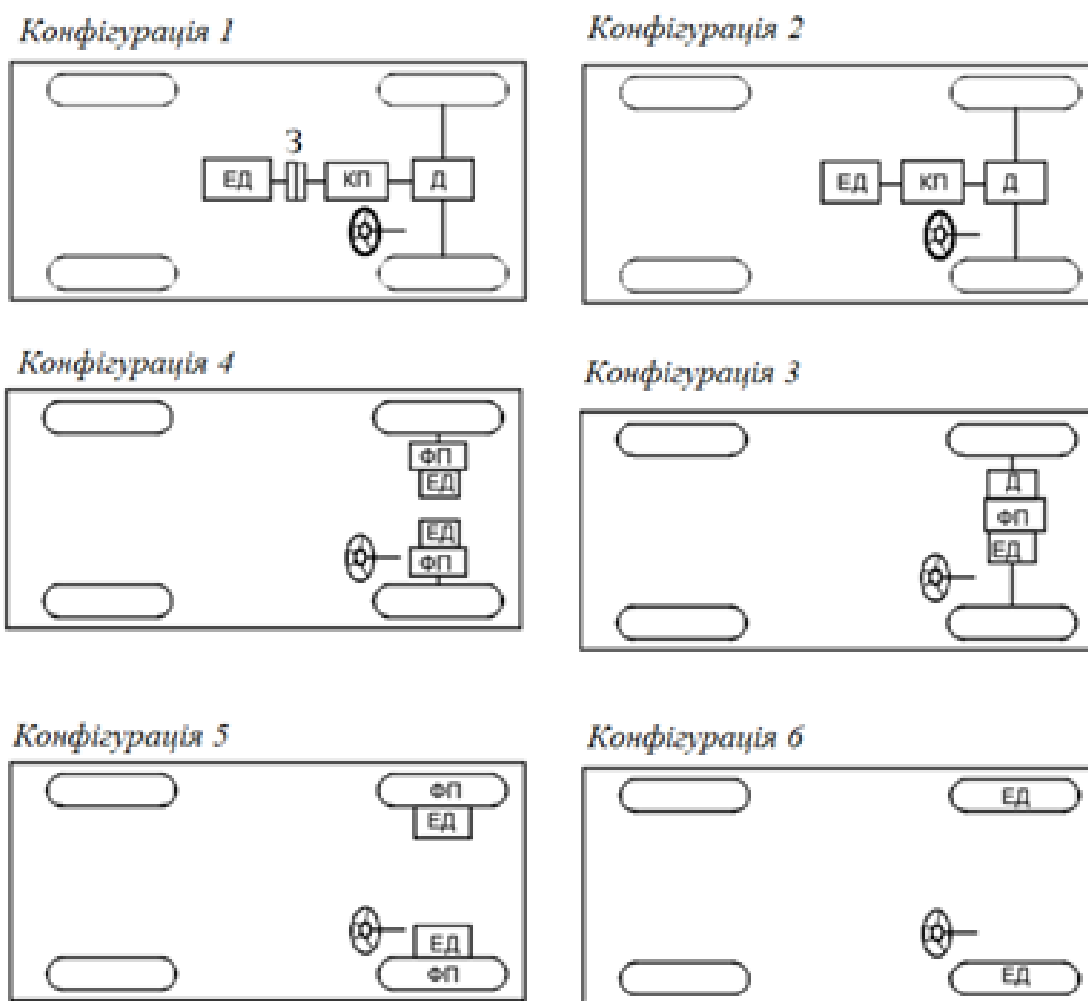


Рисунок 1.4 – Можливі конфігурації кінематичних схем електромобілів
 З – зчеплення; Д – диференціал; ФП – фіксована передача; КП – коробка передач; ЕД – електродвигун

Конфігурація 1. В ній електричний привод замінює традиційну трансмісію ТЗ з ДВЗ. Він складається з ЕД, зчеплення, коробки передач і диференціала. Зчеплення і коробка передач можуть бути замінені автоматичною коробкою передач. Муфта використовується для підключення або відключення живлення ЕД від ведучих коліс. Коробка передач забезпечує набір передавальних чисел для зміни профілю швидкості-потужності (крутного моменту) відповідно до вимог навантаження. Диференціал являє собою механічний пристрій (зазвичай набір планетарних шестерень), який дозволяє

колесам з обох сторін рухатися з різними швидкостями, коли транспортний засіб рухається по криволінійній траєкторії.

Конфігурація 2 з ЕД, який має постійну потужність у великому діапазоні швидкостей, фіксована передача може замінити багатошвидкісну коробку передач і зменшити необхідність в зчепленні. Це не тільки зменшує розміри і вагу механічної трансмісії, але також спрощує управління трансмісією, оскільки перемикання передач не потрібно.

Конфігурація 3 подібна до приводної передачі (конфігурації 2), має ЕД, фіксовану передачу і диференціал, які можуть бути додатково об'єднані в єдиний вузол, в той час, як обидві осі спрямовані на обидва ведучі колеса. Вся трансмісія ще більше спрощується і ущільнюється.

Конфігурація 4. Механічний диференціал замінений двома тяговими ЕД. Кожен з них веде одне бічне колесо і працює з різною швидкістю, коли автомобіль рухається по кривій дорозі.

Конфігурація 5. Для спрощення трансмісії тяговий ЕД може бути розміщений всередині колеса (повний привод). Зубчаста передача може бути використана для зменшення швидкості ЕД і підвищення крутного моменту. Зубчастий редуктор має перевагу через високошвидкісне передавальне число, а також вбудованим розташуванням вхідного і вихідного валів.

Конфігурація 6. В ній повністю відсутня будь-яка механічна передача між ЕД і ведучими колесами. Ротор тихохідного ЕД в мотор-колесі може бути безпосередньо з'єднаний з ведучим колесом. Регулювання швидкості ЕД еквівалентно контролю швидкості обертання колеса і, отже, швидкості автомобіля. Однак ця схема вимагає, щоб ЕД мав більш високий крутний момент для запуску і прискорення ТЗ.

Із приведених схем тягового електроприводу електромобіля розглянемо для прикладу конфігурацію 2. У цьому випадку багатоступінчаста коробка передач являє собою редуктор з фіксованим передаточним числом. Така схема

компоновки відрізняється простотою механічної частини, підвищеним ККД, високими масогабаритними показниками (рисунок 1.4).

Для того щоб проектувати новий електропривод електромобіля або модернізувати уже існуючий потрібно аналізувати графік траєкторії руху електромобіля у міському режимі. Це графік зміни швидкості в функції часу (рис. 1.5).

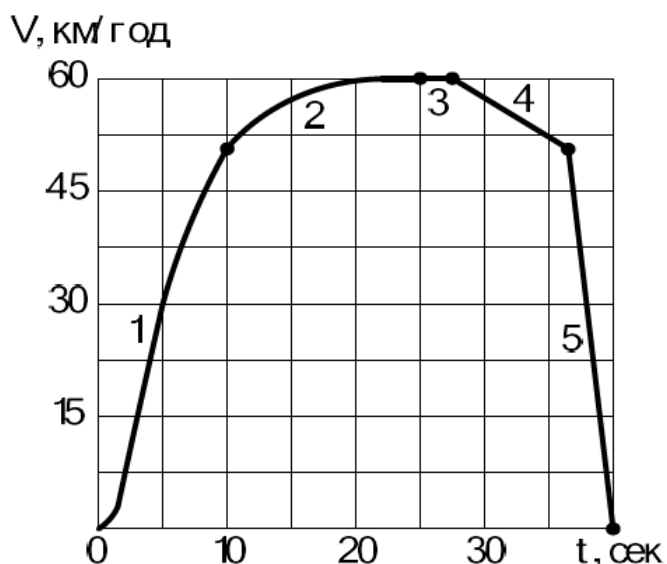


Рисунок 1.5 – Діаграма руху електромобіля у міському режимі

Діаграму руху можна розбити на 5 головних етапів:

1. Розгін електромобіля за рахунок пуску;
2. Розгін за допомогою автоматичної характеристики;
3. Рух зі сталою швидкістю;
4. Рух по інерції;
5. Гальмування.

Кінематична схема тягового механізму електромобіля згідно конфігурації 2 згідно рис. 1.4 зображена на рисунку 1.6. Конічна передача (1-2) виконує передачу крутного моменту тягового двигуна (9) на головну передачу (5) ведучого моста під кутом, що змінюється під час руху. Ходова частина об'єднує всі агрегати і механізми електромобіля, які призначені для передачі зусилля від двигуна до ведучого мосту і керування рухом електромобіля.

Конічний вал (7) розташований між валами тягового двигуна і центрального редуктора. З ведучим мостом конічний вал жорстко з'єднаний через фланцеву вилку. Конічний вал в зібраному стані відбалансований. Для ізоляції тягового двигуна від корпусу електромобіля між фланцями конічного валу двигуна встановлюється електроізоляційна муфта (8). Ведучий міст сприймає вагу частини рами і кузова електромобіля, а також передає тягове й гальмівне зусилля коліс (11) на кузов при русі.

Кінематична схема тягового механізму електромобіля, який призначений для перетворення і передачі механічної потужності від вала електродвигуна до коліс, зображена на рисунку 1.6.

Позначення на рисунку 1.6:

- 1 – тяговий двигун;
- 2 – вал двигуна;
- 3 – циліндрична ведуча шестерня головної передачі;
- 4 – циліндрична ведена шестерня головної передачі ;
- 5 – диференціал;
- 6 – напіввал;
- 7 – ведучі колеса;

Обертний момент тягового електродвигуна 1 передається за допомогою циліндричної ведучої шестерні головної передачі 3, веденій шестерні головної передачі 4 , диференціалу 5 , напіввалам 6 та ведучим колесам 7.

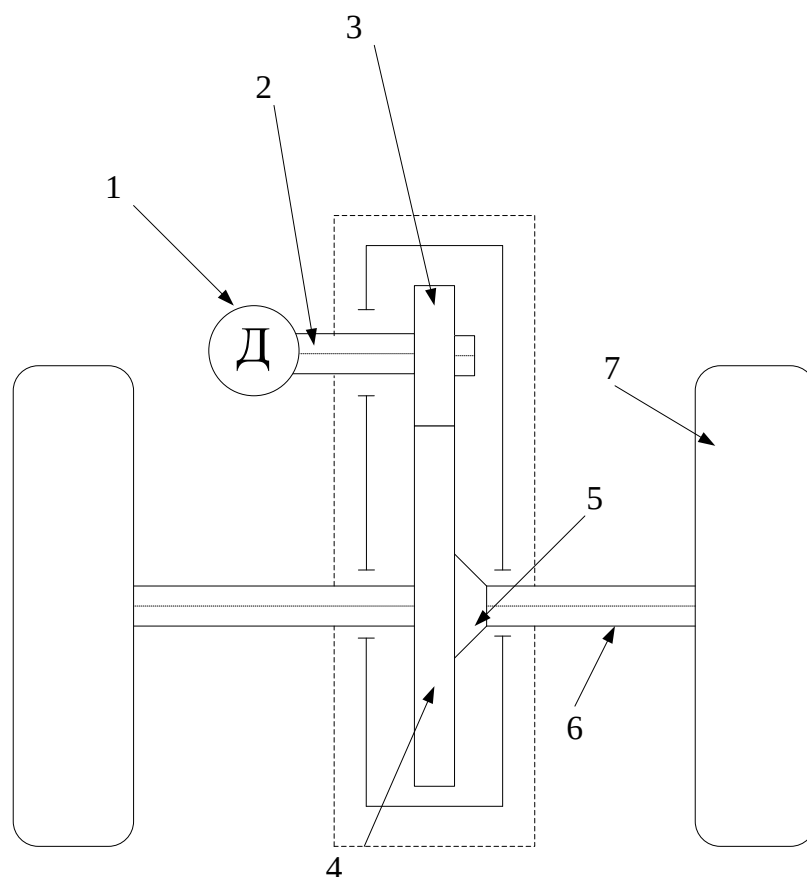


Рисунок 1.6 – Кінематична схема тягового механізму електромобіля

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	$\eta = 0,9$

Тяговий електродвигун (ТЕД) є основним силовим агрегатом електромобіля, який забезпечує створення тягового зусилля, що дозволяє електромобілю рухатися. Конструкція ТЕД постійного струму включає декілька основних компонентів: остов, який може бути циліндричним або багатограним; якор з колектором; головні та додаткові полюси; щіткові

апарати з графітовими електрощітками; вентилятор для охолодження; та підшипникові щити з підшипниками.

Остов є каркасом двигуна, що забезпечує його жорсткість і захист внутрішніх компонентів. Якір з колектором відповідає за перетворення електричної енергії в механічну. Головні та додаткові полюси створюють магнітне поле, необхідне для роботи двигуна. Щіткові апарати забезпечують передачу електричного струму до якоря через графітові щітки, що мінімізують знос і забезпечують стабільну роботу.

Вентилятор охолодження запобігає перегріву двигуна, забезпечуючи належний тепловий режим. Підшипникові щити з підшипниками зменшують тертя та підтримують плавність обертання якоря.

Раніше більшість ТЕД були двигунами постійного струму з послідовним (серійним) або змішаним (компаундним) збудженням. Двигуни з послідовним збудженням мають високу початкову потужність і добре підходять для електромобілів, які потребують високого тягового зусилля при старті. Двигуни зі змішаним збудженням поєднують властивості послідовного і паралельного збудження, що забезпечує стабільну роботу при різних умовах експлуатації та підвищує ефективність використання енергії.

На сьогодні активно впроваджується застосування асинхронних тягових двигунів. Наприклад, асинхронний тяговий двигун ДТА-1 (рисунок 1.7). Його характеристики: потужність - 180 кВт лінійна напруга - 407 В АС, лінійний струм - 305 А, момент на валу - 1150 Нм, частота обертання - 1500 об / хв, маса - 840 кг.



Рисунок 1.5 – Асинхронний тяговий двигун електромобіля

Асинхронні тягові електродвигуни змінного струму (АС - Alternating Current), керуються тяговим перетворювачем змінного струму і є сучасним та ефективним рішенням для електротранспорту. Такі двигуни мають кілька важливих переваг: вони потужніші, легші, компактніші і довговічніші порівняно з їх аналогами постійного струму. Окрім того, асинхронні двигуни не потребують постійного обслуговування, що знижує експлуатаційні витрати та підвищує надійність системи.

Більшість асинхронних ТЕД є електричними машинами змінного струму з напругою живлення 400 В. Вони мають короткозамкнений ротор та трифазну обмотку статора, яка з'єднана по схемі «зірка». Така конструкція забезпечує високу ефективність і надійність роботи двигуна, а також дозволяє досягти високих значень тягового зусилля і потужності.

Тяговий перетворювач змінного струму, який керує асинхронним ТЕД, є складною електронною системою, що забезпечує необхідну напругу і частоту для живлення двигуна. Він також відповідає за перетворення енергії з однієї

форми в іншу, що дозволяє оптимізувати роботу двигуна при різних режимах руху і знизити енергетичні втрати.

Під час руху електромобіля важливо, щоб двигун мав характеристики, які максимально сприяють створенню тягового зусилля. Відповідність електродвигунів різних систем вимогам тяги значною мірою залежить від їх характеристик, таких як магнітні, електромагнітні, електромеханічні та тягові властивості, а також діючі сили.

При виборі електропривода необхідно враховувати його надійність та економічність, а також умови, які забезпечують оптимальну тягу.

1.3 Постановка задачі проектування

Вимоги, що пред'являються до тягового електроприводу виражаються в надійності, підвищенні якості роботи, простоті виконання, економічності, оптимальності при виконанні необхідних критеріїв.

Система керування повинна бути легка в обслуговуванні та експлуатації і повинна мати хороші економічні показники. Джерелами економії електроенергії можуть бути:

- зниження втрат при пуску;
- зменшення втрат у елементах кола управління;
- використання рекуперації при гальмуванні.

Втрати енергії при електричному гальмуванні складаються з енергії, що розсіюється на гальмівних реостатах, втрат в реакторах і обмотках тягових двигунів, в конденсаторах фільтрів, комутаційних втрат в ключових елементах імпульсних перетворювачів.

Оптимізація параметрів системи керування, дасть змогу знизити втрати.

В технічних характеристиках паспортних даних транспортного засобу зазначено, що максимальна швидкість руху з технічно-допустимою максимальною масою, на горизонтальній ділянці дороги становить не менше 55 км/год. Максимальний підйом, який повинен долати ТЗ з технічно-допустимою

максимальною масою, зокрема з можливістю зупинки і руху з місця, на сухій дорозі з асфальтобетонним покриттям не менше 12%.

При модернізації електропривода електромобіля слід дотримуватися зазначених характеристик. Електрична схема та система керування повинна передбачати можливість реалізації наступних режимів роботи під час експлуатації:

- Рух транспортного засобу з низькими швидкостями на маневровій позиції.
- Нормальний автоматичний розгін.
- Рух з різними швидкостями.
- Службове електричне гальмування.
- Реверсування електродвигуна (зміна напрямку руху під час маневрування).
- Рекуперація кінетичної енергії електромобіля від двигуна, що в цей момент працює в режимі генератора, безпосередньо до мережі живлення.

Висновок. Було розглянуто конструктивні особливості та умови роботи електромобіля, наведена кінематична схема тягової передачі, охарактеризовано електричний двигун. Зазначено основні вимоги, що пред'являються до системи електроприводу електромобіля. Поставлено задачі проектування.

2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Розрахунок тахограм робочого механізму

Середня швидкість руху в м/с [6]:

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

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

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

Середній час руху між зупинками:

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

де S – середня відстань, яку долає ТЗ від зупинки до зупинки [5],

($S = 500$ м).

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

Середній час циклу:

$$t_u = t_p + t_n, \quad (2.3)$$

де t_n – тривалість паузи, для висадки-посадки пасажирів, ($t_n = 20$ с).

$$t_u = 45 + 20 = 65 \text{ (с)}.$$

Розглянемо такі режими руху [7]: при максимальному заповненні пасажирами салону і при холостому ході (відсутності пасажирів в салоні).

1. Транспортний засіб максимально заповнений.

Час розгону до усталеної швидкості:

$$t_{poz1} = \frac{v}{a_{poz1}}, \quad (2.4)$$

де a_{poz1} – прискорення розгону при максимальному завантаженні, [5]

($a_{poz1} = 0.6$ м/с²)

$$t_{poz1} = \frac{11.11}{0.6} = 18.52 \text{ (с)}.$$

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

$$t_{\text{гал1}} = t_{\text{роз1}}, \quad (2.5)$$

$$t_{\text{гал1}} = 18.52 \text{ (с)}.$$

Час усталеної роботи двигуна:

$$t_{\text{ycm1}} = t_p - t_{\text{роз1}} - t_{\text{гал1}}, \quad (2.6)$$

$$t_{\text{оно1}} = 65 - 18.52 - 18.52 = 27.96 \text{ (с)}.$$

2. Електромобіль під час холостого ходу (пустий салон).

Час розгону до усталеної швидкості:

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

де $a_{\text{роз2}}$ – прискорення розгону при холостому ході, ($a_{\text{роз2}} = 0.8 \text{ м/с}^2$).

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

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

$$t_{\text{гал2}} = t_{\text{роз2}} \quad (2.8)$$

$$t_{\text{гал2}} = 13.8875 \text{ (с)}.$$

Час усталеної роботи двигуна:

$$t_{\text{ycm2}} = t_p - t_{\text{роз2}} - t_{\text{гал2}} \quad (2.9)$$

$$t_{\text{ycm2}} = 65 - 13.8875 - 13.8875 = 37.225 \text{ (с)}.$$

Тахограми швидкості та прискорення двигуна електромобіля, побудовані по обчисленим значенням, приведені на рисунку 2.1 та 2.2.

З паспортних даних електромобіля загальне передаточне число трансмісії буде $i = 9,817$. Транспортний засіб (ТЗ) має два колеса на передній осі і чотири колеса на задньому мосту. Тип коліс: 8,25x22,5 дискові з нерозбірним ободом. Оскільки 1 дюйм = 2.54 сантиметра, тоді радіус коліс:

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

Кутова швидкість обертання колеса [7]:

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

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

Кутова швидкість обертання валу приводного двигуна:

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

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

Кутова швидкість обертання валу приводного двигуна під час холостого ходу: $\omega_0 = 0$.

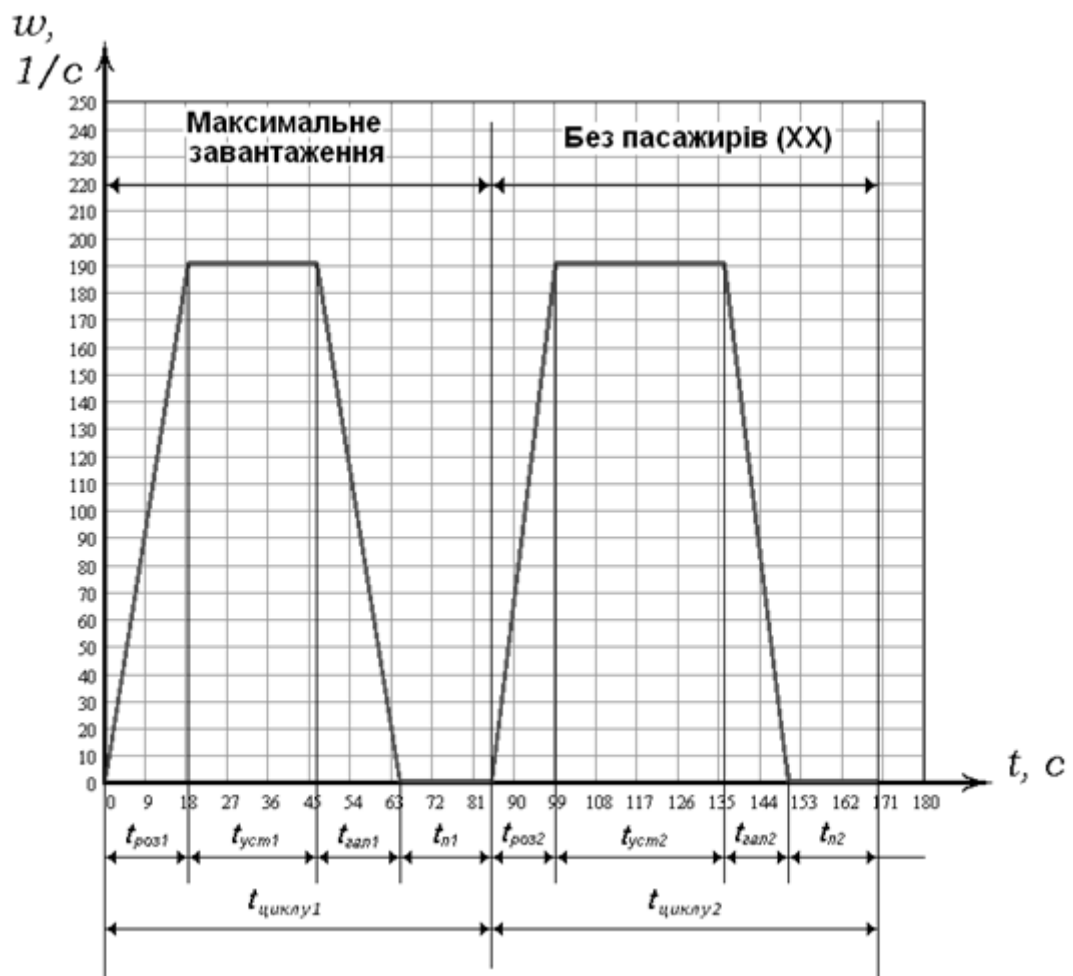


Рисунок 2.1 – Тахограма залежності кутової швидкості обертання ротора ω від часу t

Порахувавши інші значення кутового прискорення, отримаємо графік залежності кутового прискорення від часу, приведений на рисунку 2.2:

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

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

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

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

де ε_1 – кутове прискорення при повному завантаженні;

ε_2 – кутове прискорення під час холостого ходу, тобто без пасажирів у салоні.

Графіки тахограми залежності кутового прискорення ε від часу t приведено на рисунку 2.2

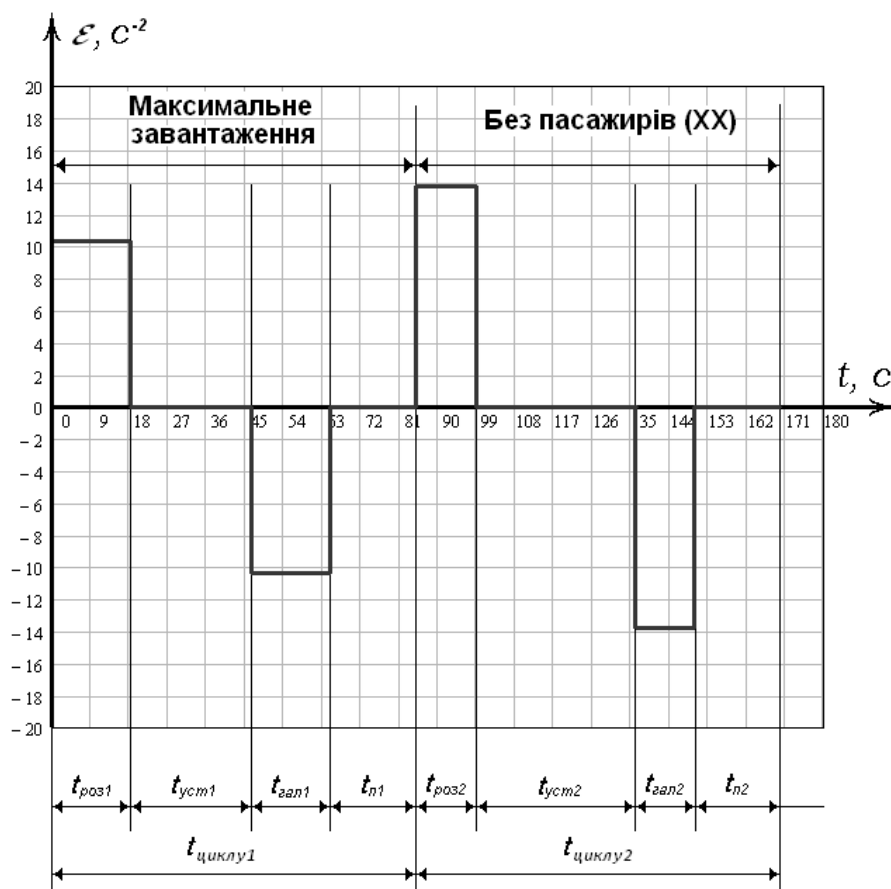


Рисунок 2.2 – Тахограма залежності кутового прискорення ε від часу t

2.2 Розрахунок приведених інерційних мас та моментів інерції

Виходячи з умови вибору двигуна [8]:

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

де $M_{\text{дв.макс}}$ – максимальний момент двигуна;

$M_{\text{оп}}$ – сумарний момент опору, що діє на двигун при найбільшому навантаженні.

Сумарний момент опору при максимальному навантаженні складається з статичної та динамічної складової:

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

Сили опору які діють на максимально навантажений електромобіль та статичний момент ТЕД приведено на рисунку 4.1

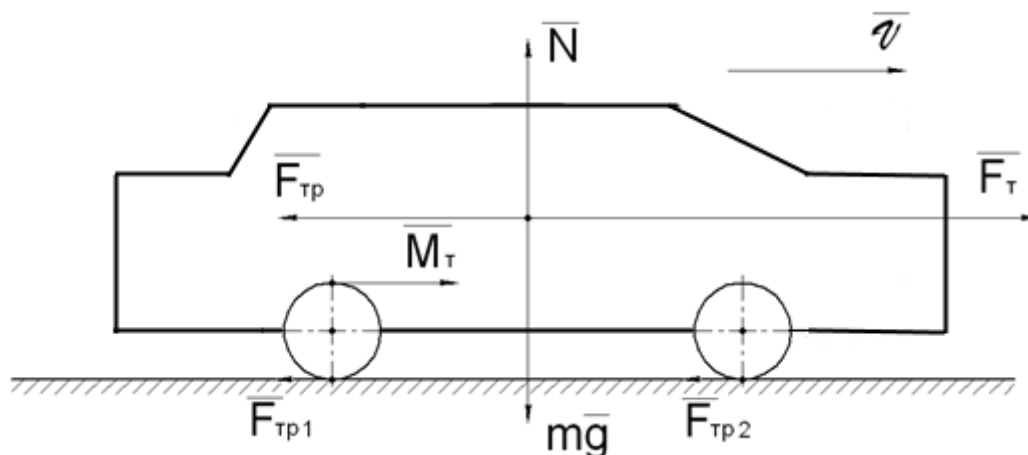


Рисунок 2.3 – Загальне зображення дії кінематичних сил на електромобіль під час його руху

де N – сила реакції опори;

mg – вага ТЗ при граничній місткості;

$M_{\text{т}}$ – момент тяги ведучих коліс задньої вісі;

$F_{\text{т}}$ – сила тяги;

$F_{тр1}, F_{тр2}$ – сили тертя, що діють на задню та передню вісь;

$F_{оп}$ – загальна сила опору руху максимально завантаженого ТЗ.

Статичний момент приведений до валу приводного двигуна визначається за формулою:

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

де M_T – момент тяги ведучих коліс;

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

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

Тяговий момент ведучих коліс:

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

де R – радіус колеса, ($R = 0,5715$ м).

F_T – сила тяги.

Сили, що діють на ТЗ при його русі на підйом приведено на рисунку 4.2:

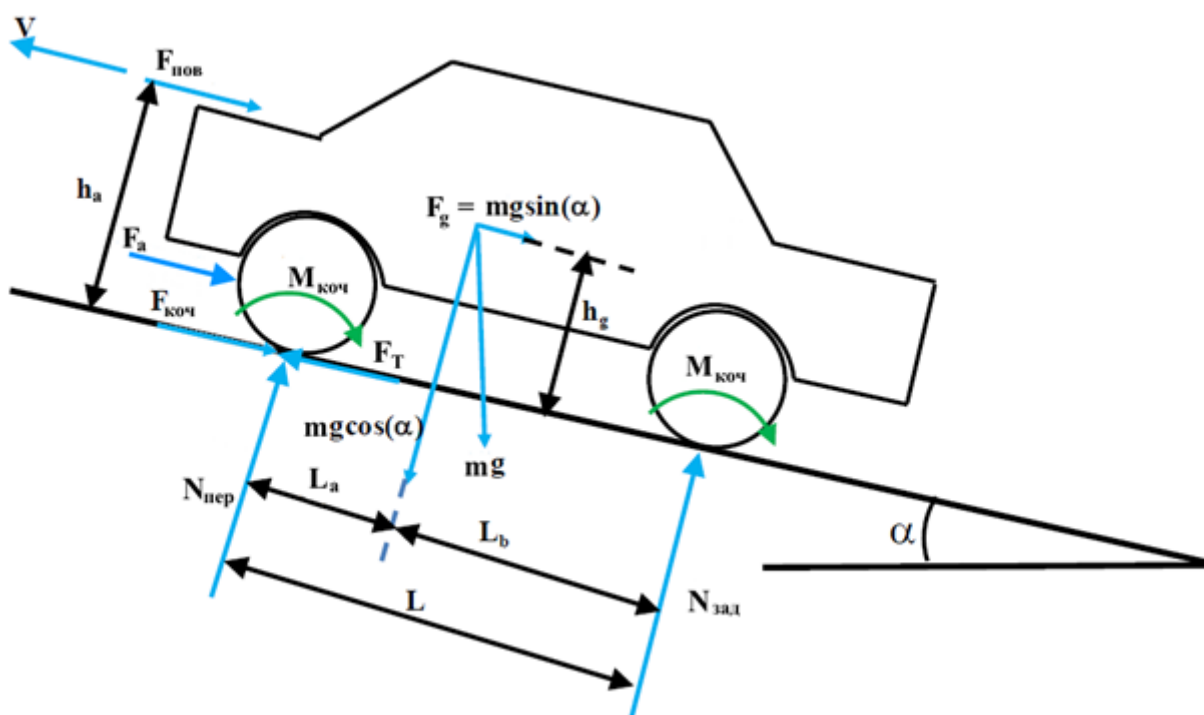


Рисунок 4.2 – Сили, що діють на електромобіль при його русі на підйом

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

Рівняння руху електромобіля з врахуванням, що вісь ОХ перпендикулярна до ТЗ та направлена у напрямку руху:

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

де α – максимально можливий кут підйому;

$F_{тр}$ – сила тертя-ковзання;

m_{max} – маса ТЗ при максимальному завантаженні;

g – прискорення вільного падіння, ($g = 9,81 \text{ м/сек}^2$).

Запишемо рівняння відносно осі ОУ:

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

Сила тертя:

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

де μ - коефіцієнт тертя-ковзання для асфальтних доріг, ($\mu = 0,02$);

Зробивши відповідні підстановки отримуємо формулу для обчислення сили тяги:

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

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

Допустима маса транспортного засобу згідно його характеристик складає 2000 кг. Допустиме відхилення маси в більшу сторону – 5 % (2100 кг).

Повна маса ТЗ [6]:

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

де m_{cn} – маса спорядженого електромобіля, ($m_{cn} = 1700 \text{ кг}$);

m_n – середня маса одного пасажир, ($m_n = 70 \text{ кг}$);

n – кількість сидячих місць ($n = 4$);

d – кількість водіїв, ($d = 1$);

m_o – маса багажу у одного пасажир, ($m_o = 2 \text{ кг}$).

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

При визначенні α беремо максимальний підйом, який повинен долати електромобіль 18%. Тобто ТЗ повинен долати підйом висотою у 18 метрів та протяжністю у 100 метрів.

Тангенс α :

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

Звідки визначаємо кут α :

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

Сила тяги та тяговий момент ведучих коліс:

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

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

Статичний момент приведений до валу електродвигуна:

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

Динамічна складова визначається виходячи з умови:

$$M_{дин',маx} = J_{маx} \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.29)$$

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

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

Загальний момент інерції, приведений до валу двигуна при граничному завантаженні:

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

де $J_{дв}$ - момент інерції ТЕД;

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

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

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

i_k - передаточне число колісної передачі;

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

v - швидкість руху.

Момент інерції, що створюється обертовими частинами суттєво менший ніж момент інерції поступального руху. Тому складовими, що відповідають за момент інерції обертючих частин можемо знехтувати, врахувавши їх у коефіцієнті запасу.

Тоді момент інерції, приведений до валу електродвигуна:

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

Кутова швидкість обертання двигуна під час руху з номінальною швидкістю $v = 50$ км/год, враховуючи загальне передаточне число i та радіус колеса R :

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

Момент інерції приведений до валу тягового двигуна:

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

Кутове прискорення двигуна для розгону:

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

Динамічний момент під час розгону, для максимального завантаження:

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

Максимальний момент двигуна:

$$M_{дв.мах} = k_3 \cdot (M_{ст.мах} + M_{дин.мах}), \quad (2.36)$$

де коефіцієнт запасу ($k_3 = 1,1 - 1,3$).

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

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

Результати отримані за (2.37) та (2.38) показують діапазон моментів регулювання тягового електродвигуна.

Орієнтовне значення максимальної потужності тягового електродвигуна, виходячи з припущення, що двигун асинхронний:

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

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

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

де f – частота мережі;

p – кількість пар полюсів.

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

Орієнтована потужність двигуна:

$$P_{\text{дв}} = \frac{1680,842 \cdot 750}{9,55} = 132003 \text{ (Вт)}.$$

2.3 Попередній розрахунок потужності приводного двигуна

Сила, яка оцінює втрати в трансмісії [8]:

$$F_{\text{втр}} = F_{\text{тр}} + k_{\text{тр}} v, \quad (2.41)$$

де $F_{\text{тр}}$ – сила тертя в трансмісії при нульовій швидкості, ($F_{\text{тр}} = 102 \text{ Н}$);

$k_{\text{тр}}$ – коефіцієнт врахування впливу швидкості на силу тертя, ($k_{\text{тр}} = 11$).

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

Втрати потужності в трансмісії під час вибігу:

$$\Delta P_{\text{втр}} = F_{\text{втр}} v, \quad (2.42)$$

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

Втрати потужності в трансмісії в режимі тяги:

$$\Delta P_{mp2} = (1 - \eta_{\text{ц}} \cdot \eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{ш}}) P_{\text{дв}} + \Delta P_{mp1}, \quad (2.43)$$

де $\eta_{\text{ц}}$ – коефіцієнт корисної дії циліндричної передачі, ($\eta_{\text{ц}} = 0.98$);

$\eta_{\text{г}}$ – коефіцієнт корисної дії гіпоїдної передачі, ($\eta_{\text{г}} = 0.97$);

$\eta_{\text{ш}}$ – коефіцієнт корисної дії гіпоїдних шарнірів, ($\eta_{\text{ш}} = 0.995$);

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

$$\Delta P_{mp2} = (1 - 0.98 \cdot 0.97 \cdot 0.995) \cdot 132003 + 2490.9731 = 9639.3 \text{ (Вт)}.$$

Коефіцієнт корисної дії трансмісії:

$$\eta_{mp} = \eta_{\text{ц}} \cdot \eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{ш}} - \frac{\Delta P_{mp2}}{P_{\text{дв}}}, \quad (2.44)$$

$$\eta_{mp} = 0.98 \cdot 0.97 \cdot 0.995 - \frac{9639.3}{132003} = 0.873.$$

Потужність, яку розвиває електродвигун при граничній завантаженості:

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

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

$\psi_{\text{д}}$ – коефіцієнт опору дороги, ($\psi_{\text{д}} = 0.038$);

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

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

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

Потужність, яку розвиває електродвигун при відсутності пасажирів:

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

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

Враховуючи коефіцієнт запасу потужності тягового двигуна:

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

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

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

Висновок. Було розраховано потужність тягового електродвигуна електромобіля з врахуванням сил, що діють на нього під час руху. Побудовано навантажувальну діаграму.

З ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Розглянемо можливі варіанти тягових електродвигунів для електромобілів.

Тягові електричні двигуни постійного струму послідовного збудження – ці двигуни встановлювалися на перших електромобілях і забезпечували значне тягове зусилля завдяки високому пусковому моменту. Вони мають високий момент обертання при низьких швидкостях, що робить їх підходящими для пуску важких транспортних засобів.

Тягові електричні двигуни постійного струму змішаного збудження – ці двигуни поєднують у собі переваги послідовного та паралельного збудження, що дозволяє досягати кращих експлуатаційних характеристик. Порівняльна простота управління робить їх зручними для використання в електромобілях. Завдяки змішаному збудженню, ці двигуни забезпечують стабільний та ефективний рух на різних швидкостях і під різними навантаженнями.

Асинхронні тягові електричні двигуни – головними перевагами цих двигунів є їхня простота конструкції та компактні розміри. Завдяки відсутності щітково-колекторного вузла, асинхронні двигуни позбавлені багатьох недоліків колекторних двигунів, таких як знос щіток та елементів колектора, іскріння і перегрів при поганому контакті. Це значно знижує потребу в обслуговуванні та підвищує надійність і довговічність двигуна. Асинхронні двигуни також мають високий коефіцієнт корисної дії та стабільні характеристики, що робить їх популярними для використання у сучасних електромобілях.

Для управління тяговими електродвигунами можуть застосовуватися такі системи управління.

Реостатно-контакторна система керування з безпосередньою комутацією опорів у колах двигуна, з використанням проміжного низьковольтного обладнання, яке комутує сигнали, що керують силовими контакторами та з

використанням проміжних серводвигунів, які комутують струм у силовому колі двигуна.

Тиристорно-імпульсна система керування, яка використовує потужні тиристори для формування струмових імпульсів заданої частоти, замість комутації опорів.

Електронна система керування (транзисторна), яка дозволяє суттєво зменшити споживання електроенергії порівняно з реостатною системою.

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 $c = 7,7714$ 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 - Вартість системи електроприводу і приведені річні затрати [9], [10]

Система ЕП Показники	ШПП- ДПС	РКСК- ДПС	ПЧ-АД	ТРН-АД
Вартість двигуна, грн	420000	420000	250000	250000
Вартість САК, грн	213000	253000	221000	238650
Капітальні затрати, грн	633000	673000	471000	488650
Річні капітальні затрати, грн	170910	181710	127170	131940
Експлуатаційні затрати, грн	156000	156000	156000	156000
Додаткові витрати, грн	30856	30856	30856	30856
Приведені витрати, грн	635470	646270	591730	596590
ВСЬОГО, грн	96847	91927	862730	885240

Висновок. Для електропривода електромобіля найбільш вигідним варіантом є застосування системи “Перетворювач частоти – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором”.

4 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА ЙОГО ПЕРЕВІРКА

Вибираємо електродвигун [10], виходячи із заданої швидкості обертання і попереднього розрахунку його потужності, параметри вибраного двигуна наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1- Параметри тягового двигуна

Тип двигуна	A 280S4
Потужність $P_{\text{ном}}$, кВт	110
ККД, %	94
$\cos\varphi$	0,82
Номінальна напруга, В	220/380
Маса, кг	1175
Максимальний момент M_{max} , Н·м	2600
Фазна напруга ротора $U_{2\text{ф}}$, В	248
Струм ротора I_2 , А	154
Струм статора I_1 , А	147
Кількість обертів $n_{\text{ном}}$, об/хв	750
Момент інерції $J_{\text{де}}$, кг·м ²	5,25
Номінальний момент $M_{\text{ном}}$, Н·м	1500,8

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

Перевіримо вибраний електродвигун по нагріву за методом еквівалентного моменту [11], що ґрунтується на пропорційній залежності еквівалентного моменту та кількості теплоти, яка виділяється в двигуні.

Еквівалентний момент двигуна:

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

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

Обчислюємо номінальний момент двигуна:

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

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

Еквівалентний момент має бути меншим номінального:

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

$$1400,7 > 516.337 \text{ (Н·м)}.$$

Умова нагріву виконується, отже двигун обрано вірно.

Перевіримо електродвигун за умовою допустимого перевантаження.

Повинна виконуватися умова:

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

де $M_{\text{пвх}}$ – максимальний статичний момент на валу двигуна, $M_{\text{пвх}} = 715,857 \text{ Н·м}$;

λ – перевантажувальна здатність двигуна, ($\lambda = 2.5$).

$$3501,75 > 1680,482 \text{ (Н·м)}.$$

За умовою допустимого короточасного перевантаження двигун вибрано.

Висновок. Був вибраний приводний асинхронний двигун типу А 280S4 для системи електроприводу. Перевірка обраного двигуна за нагрівом і перевантаженням показала, що електродвигун вибрано вірно.

5 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТРУКТУРНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Приведемо структурну схему електроприводу електромобіля (рис.5.1) На схемі представлена структура електромеханічної системи електромобіля, яка складається з системи електричного живлення та системи керування. Зелені стрілки відповідають за передачу електричної енергії, а червоні – за сигнали управління.

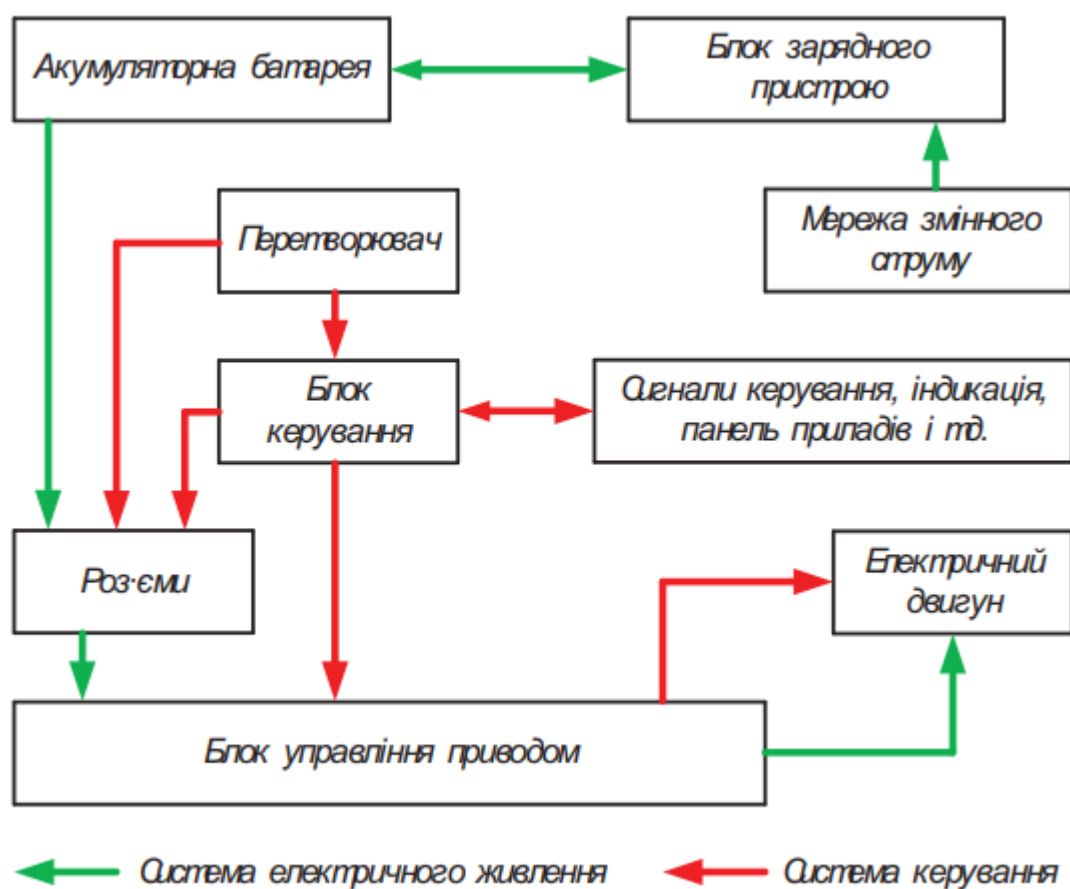


Рисунок 5.1 – Схема роботи електромеханічної системи малогабаритного електромобіля

Основні елементи та їх функції:

Акумуляторна батарея – є основним джерелом електричної енергії для живлення всіх вузлів системи електромобіля. Подає енергію до перетворювача, роз'ємів і блоку управління приводом.

Блок зарядного пристрою – забезпечує зарядку акумуляторної батареї від мережі змінного струму. Конвертує змінний струм у постійний для накопичення енергії в акумуляторі.

Перетворювач – призначений для перетворення електричної енергії з акумуляторної батареї в необхідний формат (наприклад, регулює напругу або частоту). Подає живлення до блоку керування.

Блок управління (система керування) – виконує функцію обробки сигналів керування. Забезпечує взаємодію між системою живлення та електродвигуном, контролює процеси передачі енергії. Передає сигнали до блоку управління приводом.

Роз'єми – є вузлом, що забезпечує передачу енергії від акумулятора до блоку управління приводом.

Блок управління приводом – центральний елемент, який керує роботою електричного двигуна. Обробляє дані від блоку керування та забезпечує живлення електродвигуна.

Електричний двигун – використовує електричну енергію для створення механічного руху коліс автомобіля. Отримує живлення через блок управління приводом.

Сигнали керування, індикація, панель приладів – забезпечують інтерфейс взаємодії водія з системою електромобіля. Містять індикатори стану акумулятора, швидкості, помилок та інших параметрів.

Алгоритм роботи системи. Електрична енергія з акумуляторної батареї подається до перетворювача та блоку управління приводом.

У разі низького заряду акумулятор підключається до блоку зарядного пристрою, який заряджає його від мережі змінного струму.

Блок керування обробляє сигнали керування від панелі приладів і контролює подачу енергії до електричного двигуна.

Через блок управління приводом забезпечується оптимальна робота електродвигуна з урахуванням умов руху.

Електродвигун отримує енергію від блоку управління приводом і перетворює її на механічний рух, що приводить колеса автомобіля в рух.

Зворотний зв'язок забезпечується сигналами від датчиків і індикацій, що передаються до панелі приладів, надаючи водію інформацію про роботу системи (швидкість, заряд акумулятора, індикація помилок тощо).

Схема демонструє роботу таких ключових систем. Система електричного живлення (зелені стрілки) забезпечує передачу енергії від акумулятора до електродвигуна. Система керування (червоні стрілки) відповідає за обробку команд і оптимізацію роботи приводу.

Ця структура забезпечує ефективну взаємодію усіх компонентів електромобіля, що дозволяє керувати енергоспоживанням, оптимізувати роботу електроприводу та забезпечувати надійний рух транспортного засобу.

В роботі пропонується створити систему керування, яка здатна підтримувати швидкість руху електромобіля на рівні, а також контролювати струм двигуна. Для забезпечення руху ТЗ використовується асинхронний двигун (АД). Регулювання швидкості цього двигуна здійснюється шляхом зміни частоти напруги електромережі. Система частотного керування асинхронним двигуном є підпорядкованою і складається з двох контурів: внутрішнього контуру струму та зовнішнього контуру швидкості. [12]

Внутрішній контур струму відповідає за контроль струму тягового двигуна, забезпечуючи стабільну роботу та захист від перевантажень. Зовнішній контур швидкості регулює швидкість обертання двигуна, підтримуючи її на необхідному рівні, при змінних умовах руху та навантаженнях. Така підпорядкована структура управління дозволяє досягнути високої точності та надійності у функціонуванні системи.

Дана система керування має можливість адаптивного налаштування, що дозволяє їй ефективно реагувати на зміни в експлуатаційних умовах і забезпечувати оптимальні режими роботи електро двигуна в різних ситуаціях. Це сприяє підвищенню загальної ефективності та економічності експлуатації електромобіля.

Внутрішній контур струму зображена у вигляді структурної схеми на рисунку 5.2.

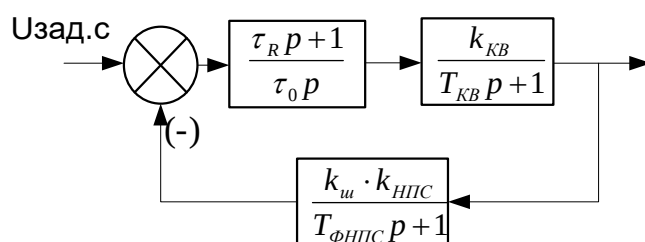


Рисунок 5.2 – Структурна схема контуру струму

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 $k_u \cdot k_{HПС}$ по напрузі та запізнення, зумовлене наявністю електричних фільтрів.

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

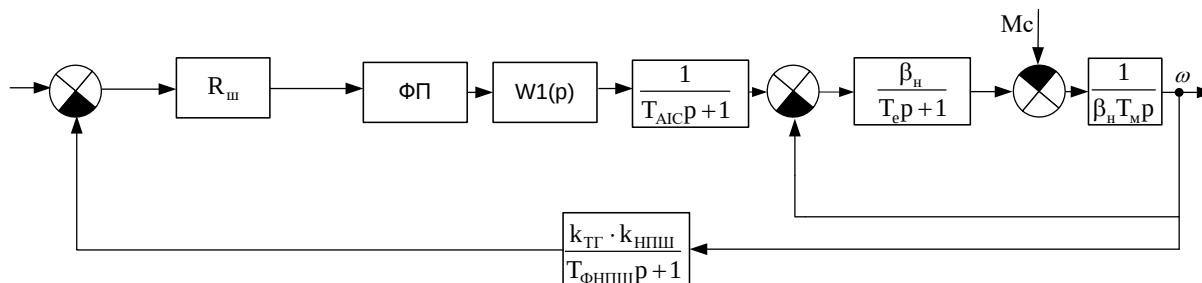


Рисунок 5.3 – Структурна схема контуру швидкості

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.

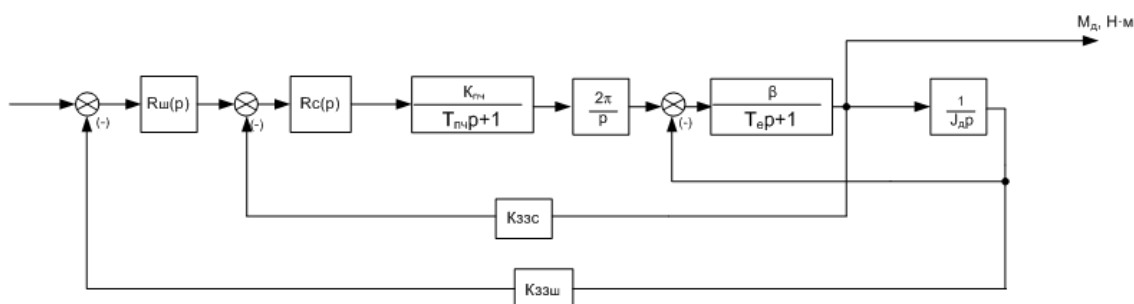


Рисунок 5.4 – Схема електрична структурна системи електропривода

Динаміка електроприводу зумовлена зміною задаючого сигналу та збурення, інтегральними та аперіодичними складовими передаточних функцій двигуна, керованого випрямляча, автономного інвертора струму та кіл 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:

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

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

Стала часу керованого випрямляча:

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

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

Постійна часу автономного інвертора:

$$T_{AIC} = 2 \cdot T_{KB}, \quad (5.4)$$

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

За передаточну функцію функціонального перетворювача візьмемо параболу, вершина якої піднята відносно нульового рівня на 1 в. од., що відповідає величині задаючого струму, який задає струм двигуна рівний номінальному.

До складу системи керування електроприводом входять такі компоненти: пульт керування, мікропроцесорна система керування, системи керування інвертором напруги, датчик постійної напруги, датчик постійного струму, датчики змінного струму по числу фаз тягового асинхронного двигуна, датчик обертів електродвигуна та дисплей.

Мікропроцесорна система керування забезпечує обробку та аналіз сигналів від датчиків, а також формування керуючих впливів для підтримки стабільної роботи двигуна. Система керування інвертором напруги відповідає за перетворення постійної напруги в змінну, необхідну для живлення асинхронного двигуна.

Датчики постійної напруги та струму здійснюють контроль параметрів електричного живлення, забезпечуючи захист системи від перевантажень і

несправностей. Датчики змінного струму, розташовані по фазах ТАД, дозволяють точно контролювати струми в обмотках двигуна.

Інтеграція мікропроцесорної системи дозволяє здійснювати точне управління та моніторинг роботи всіх компонентів електроприводу, що забезпечує оптимальні робочі характеристики і підвищує ефективність використання енергетичних ресурсів. Дисплей, встановлений на пульті керування, надає оператору можливість в режимі реального часу контролювати основні параметри роботи системи, що полегшує управління і діагностику можливих несправностей.

Висновок. Розроблено структурну схему електропривода електромобіля.

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

6.1 Визначення і опис конструкції перетворювального агрегату

При сучасному рівні силової напівпровідникової техніки, тяговий перетворювач на електромобілі став його головною частиною, оскільки саме його параметри та показники визначають властивості тягового приводу в цілому, такі як діапазон регулювання, плавність, якісні показники у перехідному процесі та ін.

Перетворювач призначений для живлення тягового електродвигуна (ТЕД) при роботі як у режимі тяги, так і в режимі електричного рекуперативного або реостатного гальмування. В залежності від конструктивного виконання, тягові перетворювачі бувають різних типів. Найпоширенішими видами тягових перетворювачів є трифазні перетворювачі (інвертори) за схемою Ларіонова («три паралельних напівмости») на тиристорних ключах (GTO) або на транзисторних ключах (IGBT), що прийшли на зміну приводів з реостатним регулятором. Також існують тягові перетворювачі для двигунів постійного струму, що з часом відходять на другий план, поступаючись ТП для керування двигунами змінного струму, тому що вони є вигіднішими, менш габаритнішими та ефективнішими в більшості випадків. Тяговий перетворювач має вигляд, приведений на рисунках 6.1 та 6.2.



Рисунок 6.1 – Зовнішній вигляд тягового перетворювача з блоком індикації та блоком автономного ходу



Рисунок 6.2 – Вигляд внутрішньої частини тягового перетворювача

Перетворювач частоти забезпечує плавний пуск і зупинку двигуна, а також дозволяє змінювати напрям обертання двигуна.

Перетворювач частоти відображає на цифровому дисплеї основні параметри системи: задану швидкість, вихідну частоту, струм і напругу двигуна, вихідну потужність, момент, стан дискретних входів, загальний час роботи перетворювача тощо.

Керування перетворювачем частоти можна здійснювати з вбудованої виносної цифрової панелі керування, або за допомогою зовнішніх сигналів. У другому випадку швидкість обертання задається аналоговим сигналом 0—10 В або 4—20 мА, а команди пуску, зупинки й зміни режимів обертання подаються дискретними сигналами. Можна відображати параметри системи у вигляді графіків на виносній графічній панелі керування.

Існує можливість управління перетворювачем частоти через послідовний інтерфейс (RS-232, RS-422 або RS-485) або від зовнішнього ПЛК з використанням спеціального протоколу (Profibus, Interbus, Device-net, Modbus тощо).

Економічний ефект від впровадження асинхронного електроприводу складається, зокрема, з чинників:

- 1) економія електроенергії в насосах, вентиляторах і компресорних агрегатах до 50 % за рахунок регулювання продуктивності шляхом зміни частоти обертання електродвигуна на відміну від регулювання продуктивності іншими способами (дроселювання, увімкнення-вимкнення, напрямний апарат);
- 2) підвищення якості продукції;
- 3) збільшення обсягу продукції, що випускається, і продуктивності виробничого устаткування;
- 4) зниження зносу механічних ланок і збільшенню терміну служби технологічного устаткування унаслідок поліпшення динаміки роботи електроприводу.

6.2 Визначення і опис функціональної схеми

Запропоновану функціональну схему слід розділити на три частини. Силу частину, частину керування і частину векторних перетворень. Дана схема векторного керування тяговид АД приведена на рисунку 6.3.

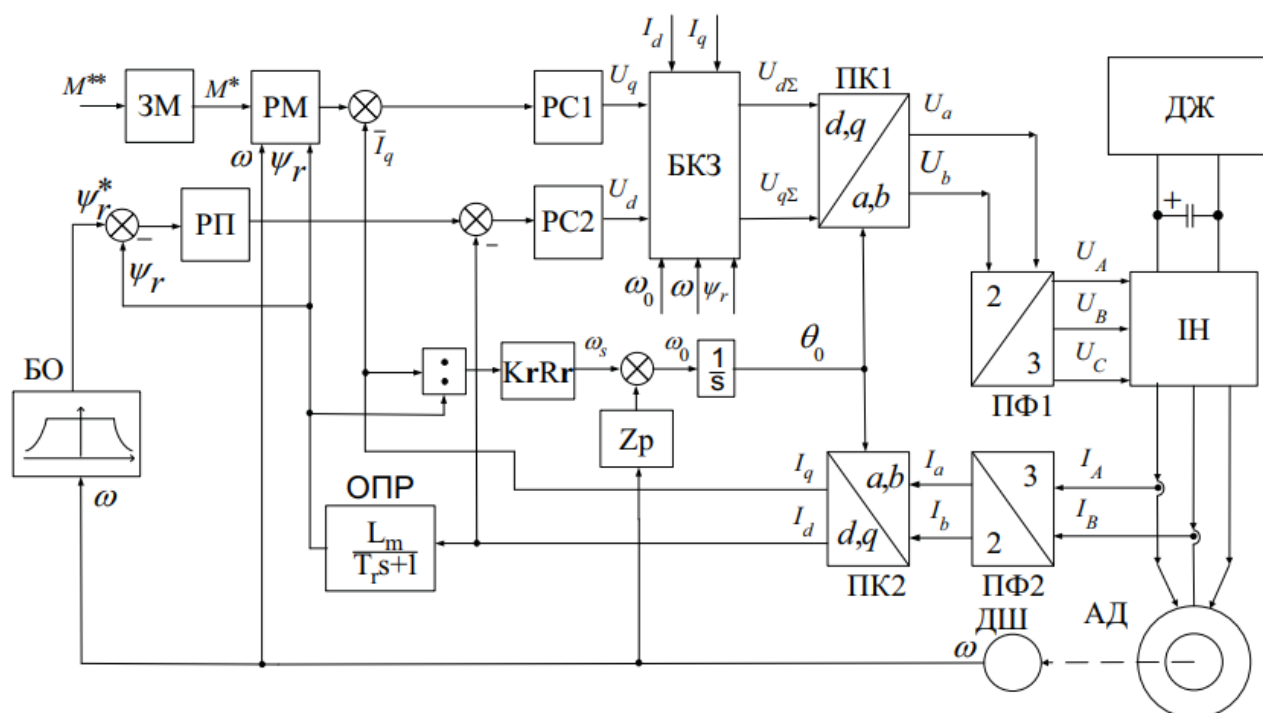


Рисунок 6.3 – Функціональна схема системи керування електроприводом електромобіля

Схема, приведена на рисунку 6.1 демонструє систему векторного керування тяговим асинхронним двигуном (АД), яка складається з трьох основних частин:

1. Силова частина – забезпечує подачу електричної енергії до асинхронного двигуна.
2. Частина керування – контролює роботу системи за допомогою обчислювальних алгоритмів.
3. Частина векторних перетворень – перетворює координати напруг і струмів для управління електродвигуном.

Основні блоки та їх функції:

1. Задаючий блок (ЗМ) – генерує задані значення моменту M^* та потокозчеплення ψ^* , які є основними сигналами для керування двигуном.

2. Регулятори (РМ і РП) – РМ (регулятор моменту) формує вихідний сигнал моменту, який надходить до пропорційно-інтегрального регулятора струму (РС1). РП (регулятор потокозчеплення) забезпечує підтримку заданого значення потокозчеплення ψ_r .

3. Перетворення координат (ПК1 і ПК2). ПК1 перетворює струми I_d , I_q у координати a , b (статорні компоненти). ПК2 виконує зворотнє перетворення для управління двигуном у векторній системі.

4. Блок ккомпенсування зв'язків (БКЗ). Це центральний блок керування напругою, який обчислює сигнали для інвертора на основі вхідних даних: струмів і потокозчеплення.

5. Датчики струмів та напруг (ПФ) – вимірюють фазні струми I_a , I_b та напруги двигуна для подальшої обробки в регуляторах.

6. Асинхронний двигун (АД) – приводить у рух колеса електромобіля завдяки поданій напрузі від інвертора.

7. Інвертор (ІН) – перетворює постійний струм із джерела живлення (ДЖ) на змінний струм для живлення обмоток асинхронного двигуна.

8. Обчислювальний блок (ОПР) – реалізує математичну модель двигуна для обчислення потокозчеплення та контролю його параметрів.

Принцип роботи системи наступний. Задаючий блок (ЗМ) формує задані значення моменту M^* та потокозчеплення ψ^* для двигуна.

Регулювання струму відбувається за рахунок подачі сигналів моменту та потокозчеплення до регуляторів РМ і РП, які забезпечують формування складових струмів I_d (поздовжня складова) та I_q (поперечна складова).

Перетворення координат. Струми I_d та I_q перетворюються в статорні координати a, b за допомогою ПК1.

Формування напруги відбувається завдяки блоку БКЗ, який обчислює напруги U_a, U_b , які подаються на інвертор через систему управління приводом.

Живлення асинхронного двигуна здійснюється через інвертор, що перетворює постійний струм у змінний і подає його на обмотки АД у необхідному форматі, що забезпечує рух автомобіля.

Зворотний зв'язок реалізований на основі датчиків струму та напруг, які передають інформацію про реальні значення струмів і напруг у блок обробки для корекції керування.

ДШ – датчик швидкості вимірює кутову швидкість обертання ротора асинхронного двигуна та передає сигнал про реальну швидкість ω до блоку обробки (БО) та регулятора потокозчеплення (РП). Цей сенсор забезпечує зворотний зв'язок для корекції керування швидкістю двигуна та допомагає у реалізації векторного керування, оскільки точне вимірювання швидкості необхідне для розрахунку потокозчеплення та моменту.

Ці елементи є критично важливими для точного векторного керування, оскільки без зворотного зв'язку по швидкості система не може коректно контролювати струми, момент та потокозчеплення двигуна.

Автономний інвертор напруги реалізований на основі IGBT-транзисторів, що являють собою біполярні транзистори з ізольованим затвором скорочено називаються англійською IGBT, являють собою гібрид біполярного транзистора і польового транзистора з ізольованим затвором (ПТІЗ). При подачі на затвор напруги, додатньої відносно точки емітера, IGBT відкривається і починає проходити струм від точки С через емітерно-базовий перехід біполярного транзистора і відкритий ПТІЗ до точки Е. При цьому відкривається біполярний

транзистор, через який проходить струм від точки С до точки Е. Буквами Е, С, G позначені емітер, колектор і затвор.

На рисунках 6.3 та 6.4 приведено умовні позначення IGBT [17].



Рисунок 6.3 – Умовне позначення IGBT

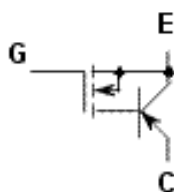


Рисунок 6.4 – Схема з'єднання транзисторів в єдиній структурі IGBT

Біполярний транзистор з ізольованим затвором (IGBT – Insulated-gate bipolar transistor) був створений у результаті досліджень, проведених 80-х роках 20 століття, шляхом каскадного включення в одній структурі BJT та MOSFET. Метою цих досліджень було нівелювати основні недоліки біполярного (керування струмом) та польового (великий спад напруги у відкритому стані для потужних приладів) транзисторів, що гальмувало розвиток перетворювальної техніки.

IGBT є складним напівпровідниковим приладом, виготовленим в одній структурі та має три виводи затвор, колектор та емітер.

По суті цей тип транзистора є MOSFET у колі керування і BJT у силовому колі. Це дозволило спростити схему і зменшити витрати керування у порівнянні з біполярними та дало змогу виготовити керовані напругою прилади на значно вищі класи напруг, ніж польові транзистори.

Таким чином, IGBT має три зовнішніх виведення: емітер, колектор, затвор. З'єднання емітера і стоку (D), бази та витоку (S) є внутрішніми.

Поєднання двох приладів в одній структурі дозволило об'єднати гідності польових і біполярних транзисторів: високий вхідний опір з високою струмовим навантаженням і малим опором у включеному стані.

Схематичний розріз структури IGBT зображений на рисунку 6.5. Біполярний транзистор утворений шарами p^+ (емітер), n (база), p (колектор); польовий - шарами n (джерело), n^+ (сток) і металевією пластинією (затвор). Шари p^+ і p мають зовнішні висновки, що включаються в силовий ланцюг. Затвор має висновок, що включається в ланцюг управління. На рис. 6.5 зображено структура IGBT IV покоління, виконаного за технологією "втопленого" каналу (trench-gate technology), що дозволяє виключити опір між p -базами і зменшити розміри приладу в кілька разів.

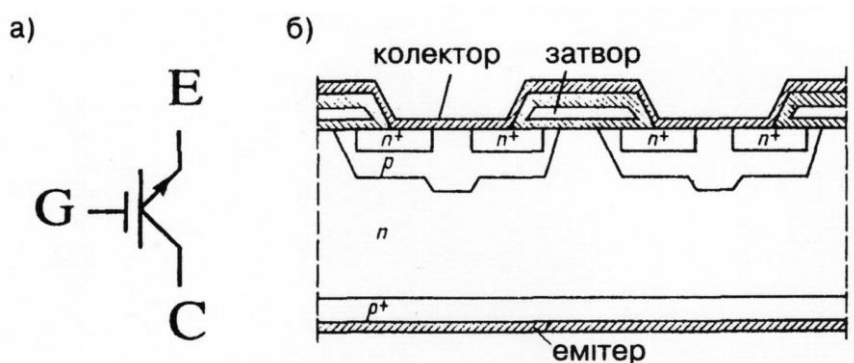


Рисунок 6.5 – Схематичний розріз структури IGBT

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. 6.6.

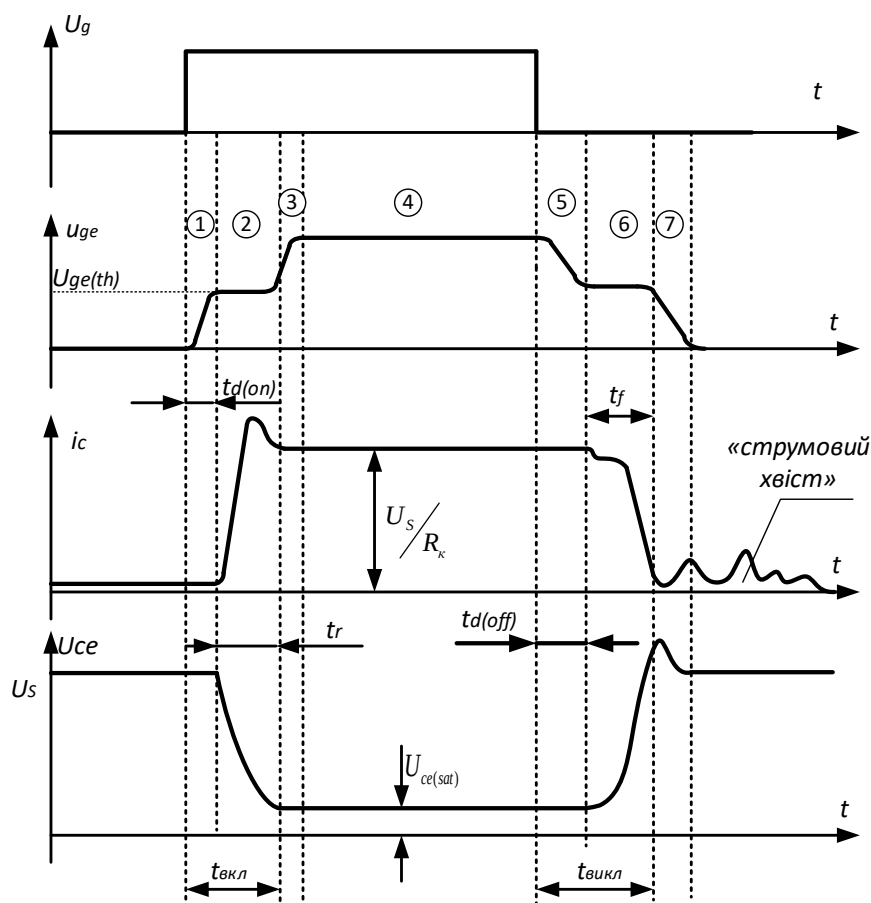


Рисунок 6.5 – Часові діаграми IGBT в ключовому режимі

У відкритому стані IGBT має аналогічні біполярному транзисторі властивості: незначне падіння напруги $U_{ce(sat)}$ при широкому діапазоні значень струму колектора.

Ділянка 1. При подачі напруги керування на затвор через резистор R_g починає заряджатись паразитна ємність C_{ge} . При цьому струм колектора та напруга колектор-емітер залишаються незмінними протягом часу затримки включення (turn-on delay time) $t_{d(on)}$.

Ділянка 2. При досягненні напруги U_{ge} певного значення $U_{ge(th)}$ транзистор починає відкриватись, струм I_c зростає, а напруга U_{ce} зменшується, у той час, як напруга U_{ge} під дією ефекту Міллера, що значно збільшує вхідну ємність, залишається незмінною протягом часу наростання (rise time) t_r струму колектора.

Ділянка 3, на якій відбувається дозаряд вхідної ємності до напруги U_g

Ділянка 4 відповідає відкритому стані транзистора, яка характеризується невеликим значенням напруги насичення $U_{ce(sat)}$ IGBT.

Ділянка 5. Після того як напруга керування зменшується до нуля відбувається затримка вимкнення (turn-off delay time) $t_d(off)$ внаслідок перезаряду ємності C_{ge} .

Ділянка 6, на якій відбувається наростання напруги U_{ce} , а струм колектора після невеликої затримки, пов'язаної з розсмоктуванням зарядів у базовому прошарку починає зменшуватись (час спаду (fall time) t_f). Але при цьому процес вимкнення не завершується

Ділянка 7. В базовому прошарку відбуваються складні внутрішні процеси рекомбінації носіїв заряду, що супроводжується неперіодичними коливаннями струму колектора. Цей процес має назву «струмового хвоста» й значним чином збільшує час та втрати енергії вимкнення. При чому цей процес продовжується деякий час і після того як напруга U_{ge} зменшиться до нуля.

Область безпечної роботи IGBT дозволяє успішно забезпечити його надійну роботу без застосування додаткових ланцюгів формування траєкторії перемикання при частотах від 10 до 20 кГц для модулів з номінальними струмами в кілька сотень ампер. Такими якостями не мають біполярні транзистори, сполучені за схемою Дарлінгтона. Так само як і дискретні, MOSFET витіснили біполярні в ключових джерелах живлення з напругою до 500 В, так і дискретні IGBT роблять те ж саме в джерелах з більш високими напругами (до 3500 В).

В даний час транзистори IGBT випускаються, як правило, у вигляді модулів в прямокутних корпусах з одностороннім притиском і охолодженням ("Mitsubishi", "Siemens", "Semikron" та ін) і пігулки виконанні з двостороннім охолодженням ("Toshiba Semiconductor Group") . Модулі з одностороннім охолодженням виконуються в міцному пластмасовому корпусі з паяними контактами та ізольованим підставою. Всі електричні контакти знаходяться у

верхній частині корпусу. Відведення тепла здійснюється через підставу. Типова конструкція модуля в прямокутному корпусі показана на рис.6.7.

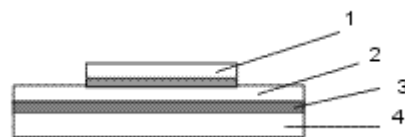


Рисунок 6.7 – Типова конструкція IGBT-модулі: 1 - кристал; 2 - шар кераміки; 3 - спайка; 4 - нижнє тепловиводячі підставу

Струм управління IGBT малий, тому ланцюг управління - драйвер конструктивно компактна. Найбільш доцільно розташовувати ланцюга драйвера в безпосередній близькості від силового ключа. У модулях IGBT драйвери безпосередньо включені в їх структуру. "Інтелектуальні" транзисторні модулі (ITM), виконані на IGBT, також містять "інтелектуальні" пристрою захисту від струмів короткого замикання, системи діагностування, що забезпечують захист від зникнення керуючого сигналу, одночасної провідності в протилежних плечах силової схеми, зникнення напруги джерела живлення та інших аварійних явищ. У структурі ITM на IGBT передбачається в ряді випадків система управління з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) і однокристальна ЕОМ. У багатьох модулях є схема активного фільтра для корекції коефіцієнта потужності і зменшення вмісту вищих гармонійних в живильній мережі.

IGBT-модуль по внутрішній електричній схемою може представляти собою одиничний IGBT, подвійний модуль (half-bridge), де два IGBT з'єднані послідовно (напівміст), реле (chopper), в якому одиничний IGBT послідовно з'єднаний з діодом, однофазний або трифазний міст. У всіх випадках, крім переривника, модуль містить паралельно кожному IGBT вбудований зворотний діод. Найбільш поширені схеми з'єднань IGBT-модулів наведено на рис. 6.8.

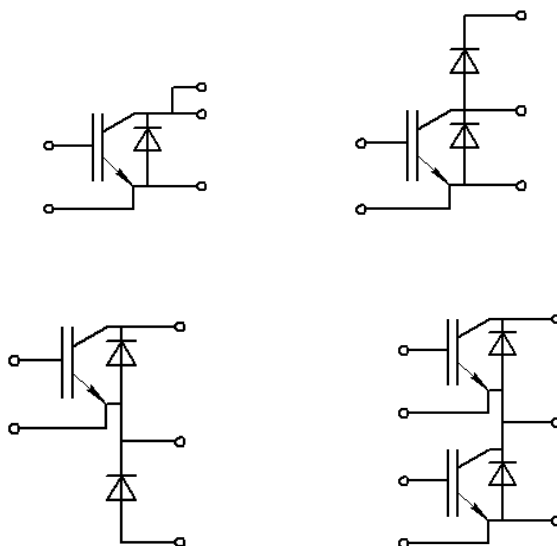


Рисунок 6.8 - Схеми IGBT-модулів

Сучасні IGBT-модулі знаходять сьогодні широке застосування при створенні некерованих і керованих випрямлячів, автономних інверторів для живлення двигунів постійного і змінного струму середньої потужності, перетворювачів індукційного нагріву, зварювальних апаратів, джерел безперебійного живлення, побутової та студійної техніки.

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) — це гібридний модуль, що містить швидкісні IGBT-транзистори, з'єднані в визначеній конфігурації, схему управління, оптимізовану по характеристикам управління затвору для даних транзисторів,

схему захисту від перевантажень і схему індикації стану. Для надійної роботи модуля схема захисту повинна вміти аналізувати режим перевантаження по струму (overload), режим короткого замикання навантаження (SC — short circuit), режим пробою (breakdown), а також падіння напруги управління (UVLO — Under Voltage LockOut) та 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 IPM у всіх випадках виявляється вище, ніж вартість набору дискретних комплектуючих, що взмозі вирішити ту ж задачу. Однак підвищення надійності, спрощення процесу зборки, зниження масо-габаритних показників без сумніву варті того, щоб використовувати в своїй розробці саме інтелектуальний силовий модуль.

Інтелектуальні силові модулі (IPM) поєднують в одному пристрої силовий ключ (одиничний, напівмостовий або 3-фазний мостовий), драйвер, оптимізований по сигналам керування, і пристрій захисту. Мінімальні довжини ліній зв'язку дозволяють отримати низькі значення розподілених індуктивностей, що зменшує рівень перехідних перенавантажень і рівень ЕМІ. Хороший тепловий зв'язок елементів кристала підвищує надійність роботи схеми захисту.

IPM представляють собою багат шарову конструкцію з епоксидною ізоляцією (в малопотужних модулях) або керамічною ізоляцією (в модулях середньої і великої потужності). Мідні лінії зв'язку елементів модуля напиляються безпосередньо на ізолятор, що виключає пайку. Елементи схеми управління розміщені на печатній платі, котра встановлюється безпосередньо на силовий модуль. Ця плата також являється багат шаровою і зазвичай має спеціальний екран для підвищення стійкості до ЕМІ. Один із варіантів конструкції IPM показаний на рис. 6.9.

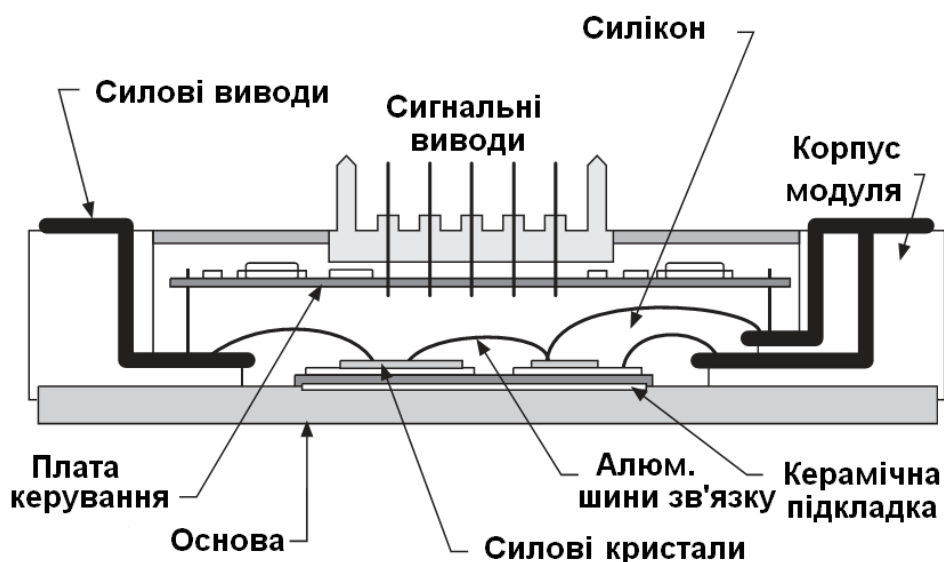


Рисунок 6.9 – Приклад конструкції IPM

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 зазвичай задається 2 види області безпечної роботи — ОБР для режиму короткого замикання (Short Circuit SOA — SCSOA) і ОБР для імпульсного режиму (Switching SOA — SSOA). SSOA задає обмеження на струм і напругу, одночасно діючи на модуль при вимкненні. В IPM, як правило, виключені велика кількість недопустимих поєднань за рахунок алгоритму роботи драйвера і налаштування схеми захисту. Тому безпечним для IPM вважається режим, коли напруга живлення не перевищує визначеного для модуля напруги джерела живлення (VCC), а перенапруга при вимкненні не перевищує граничного значення напруги колектор-емітер (VCES).

При короткому замиканні в схемі з нульовим імпедансом джерела живлення струм КЗ визначається тільки характеристиками силового ключа. SCSOA гарантує безпечну роботу в однократному режимі КЗ при напрузі

живлення нижче значення V_{CC} , при перенапрузі в колі колектор-емітер кожного модуля, меншим V_{CES} , і температурі кристала нижче $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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.

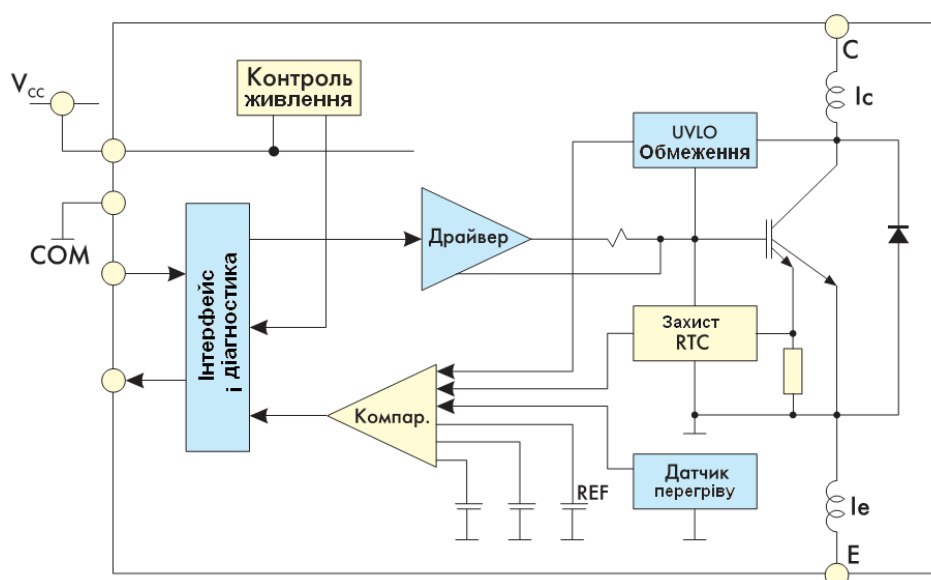


Рис. 6.10 – Типова структурна схема одиничного інтелектуального модуля

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 приведена типова структурна схема одиничного інтелектуального модуля. Схема захисту IPM визначає стан перевантаження і короткого замикання (захист RTC), перевищення напруги насичення, падіння напруги живлення (контроль живлення і UVLO) і температуру кристала (датчик перегріву). При відхиленні від норми будь-якого з перерахованих параметрів схема захисту відключає силовий транзистор і видає сигнал несправності. Модуль може також містити вбудований супресор (обмеження) для захисту від імпульсних перенапруг.

При перегріві модуля вище заданого значення датчик температури, встановлений на підставі модуля, видає сигнал несправності. По цьому сигналу схема управління відключає силові транзистори. В напівмостових і мостових конфігураціях відключаються зазвичай транзистори нижнього рівня. Повторне включення станеться після охолодження модуля до порогу включення. 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.

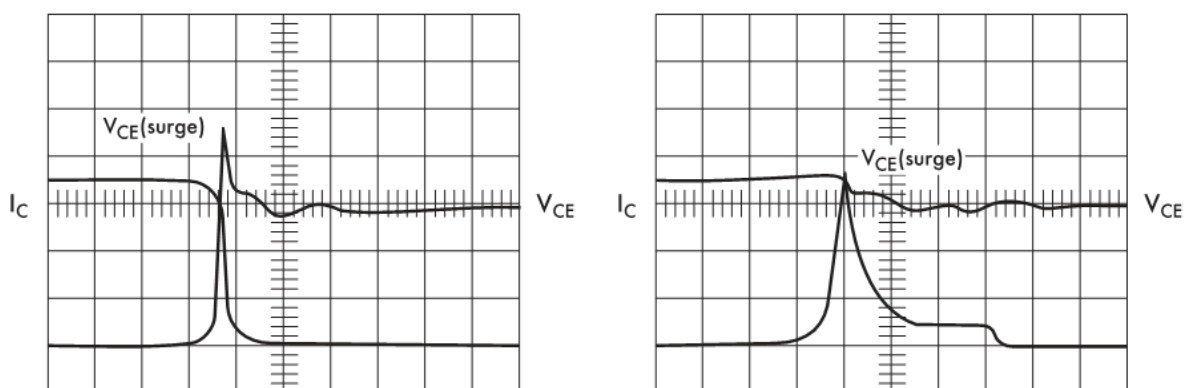


Рисунок 6.11 - Перехідна перенапруга при відключенні транзистора при миттєвому «жорсткому» і «м'якому» відключенні

Найбільш «інтелектуальні» схеми управління розрізняють два порогові значення струму — струм перевантаження, починаючи з якого починається аналіз несправності і формується контрольний сигнал, і струм КЗ, по якому відбувається відключення. Після виникнення стану перевантаження напруга на затворі знижується, що приводить до зменшення струму колектора. Потім, якщо стан перевантаження не припиняється, через 5–10 мкс напруга на затворі знижується до нуля. При цьому зниження напруги на затворі виробляється по

певному закону. Таке «м'яке» відключення необхідне для зменшення значення di/dt і зниження перехідного перенапруження при виключенні. На рис.5.3 показані процеси, що відбуваються при миттєвому «жорсткому» і «м'якому» відключенні. Видно, що в другому випадку рівень перенапруження набагато нижчий.

У сучасних ІРМ використовується безперервний моніторинг струму кожного силового ключа і загального струму вжитку. Це необхідно для визначення всіх видів струмових перевантажень, включаючи пробій на корпус. Стан КЗ настає при замиканні навантаження або збої контролера, коли відкриваючі сигнали поступають на обидва плеча напівмостового каскаду, викликаючи наскрізний струм. При цьому вимірюється безпосередньо струм силового каскаду, а не напруга насичення. Якщо струм колектора досягає порогового значення ISC , процес відключення починається миттєво. Проте зниження напруги на затворі відбувається в описаній вище послідовності для зменшення рівня перехідних перенапружень. Для зниження часу затримки між моментом виявлення стану КЗ і моментом відключення в найбільш «просунутих» ІРМ використовується так звана схема RTC — схема контролю струму в реальному часі (RTC — real time current control). Цей пристрій працює паралельно драйверу, «обходячи» всі стадії його роботи в режимі КЗ і знижуючи час обробки сигналу до 100 нс.

6.3 Розрахунок силового модуля для керування електродвигуном

Вибиратимемо інтелектуальний силовий модуль такий, щоб був розрахований на струм в колі та на напругу живлення мережі [13]. Визначимо силу струму, яка проходить через двигун, для того, щоб вірно підібрати інтелектуальний транзисторний модуль для його керування:

$$I_e = \frac{P_{\bar{a}\bar{a}}}{U_i}, \quad (6.1)$$

де $P_{\bar{a}\bar{a}}$ - потужність, на яку розрахований вибраний двигун;

U_i - напруга мережі.

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

Враховуючи те, що у нас три фази, на одну фазу приходитьсья:

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

Отже, врахувавши запас по струму та по напрузі, $K=2$, обиратимемо модуль:

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

$$U_{i\hat{a}} = U_i \cdot 2 = 600 \cdot 2 = 1200 \text{ (V)}. \quad (6.4)$$

З каталогу [18] вибираємо IGBT модуль 6MBi180S-120.

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 V
$V_{CE(sat)}@ 25^\circ\text{C}$	1,9 V
$(E_{on}+E_{off})@ 125^\circ\text{C}$	44 mJ
$R_{th(j-c)}$	0,085 K/W
Схема	Трифазний IGBT міст (Six-Pack)
Вага	0,16 кг
Країна походження	Словакія
Виробник	SEMIKRON



Рисунок 6.13 – Зовнішній вигляд, коробка, вибраного модуля

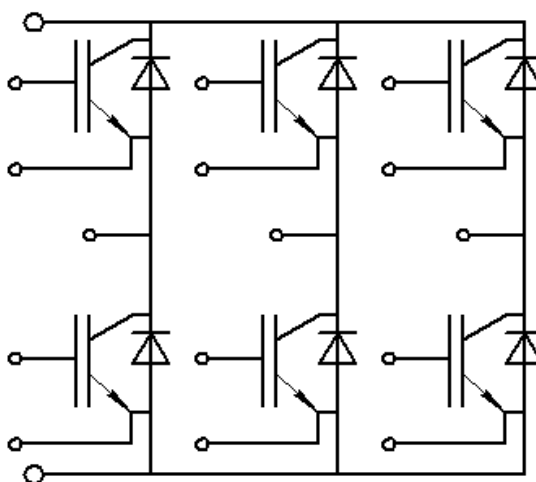


Рисунок 6.14 – Схема виконання IGBT модуля SKM300GB128D

Керування інтелектуальним силовим модулем, зовнішній вигляд та внутрішня конструкція якого наведена на рисунках 6.13 та 6.14, відбувається, як було описано розділом вище, з допомогою мікроконтролера. Що забезпечить виконання і дотримання заданого програмою фізичного процесу, а саме – плавне і економічне керування тяговим двигуном векторною широтно-імпульсною модуляцією. Контролер гарантує безвідмовність роботи, розширить можливості інженерних рішень (для випадку якщо з'явиться бажання чи необхідність змінити режим роботи інтелектуального силового модуля, наприклад, широтно-імпульсну модуляцію з векторної на звичайну, і навпаки) та збільшить можливості налаштування.

6.4 Вибір і програмування контролера

При наявності тільки тягового двигуна без можливості регулювання, він би негайно розганяв ТЗ до максимальної швидкості, одразу після отримання енергії з батареї. З цієї причини інженери розробили різноманітні методи для ефективного керування приводом електромобіля. Одним із перших таких рішень стали реостати, які використовувались у реостатно-контакторних системах керування.

Для уповільнення руху ТЗ за допомогою реостата, збільшували кількість витків за допомогою повзунка, що призводило до підвищення опору в системі. У випадку необхідності повної зупинки двигуна, реостат вмикали на максимальний опір.

Реостати значно нагріваються в будь-якому режимі, як у стані очікування, так і під час роботи. Протягом тривалого часу тепло, яке вони виділяли в навколишнє середовище, використовували для опалення салону в холодну пору року. Проте це рішення є неекономічним, оскільки влітку тепло від реостатів є зовсім недоречним. Сьогодні впроваджуються нові системи автоматичного керування, однією з яких є система на основі широтно-імпульсного перетворювача (ШІП).

Широтно-імпульсний перетворювач працює за іншим принципом: при досягненні максимального значення вхідної напруги він вимикається за допомогою спеціального вбудованого ключа, а потім знову вмикається. Це призводить до того, що на двигун подається середня напруга, яка утворюється внаслідок цих перемикань. ШІП регулює напругу, змінюючи довжину або ширину імпульсів, залишаючи при цьому стабільний період. Графічне зображення цього процесу (приклад наведено для частоти 3 кГц) представлено на рисунку. 6.15:

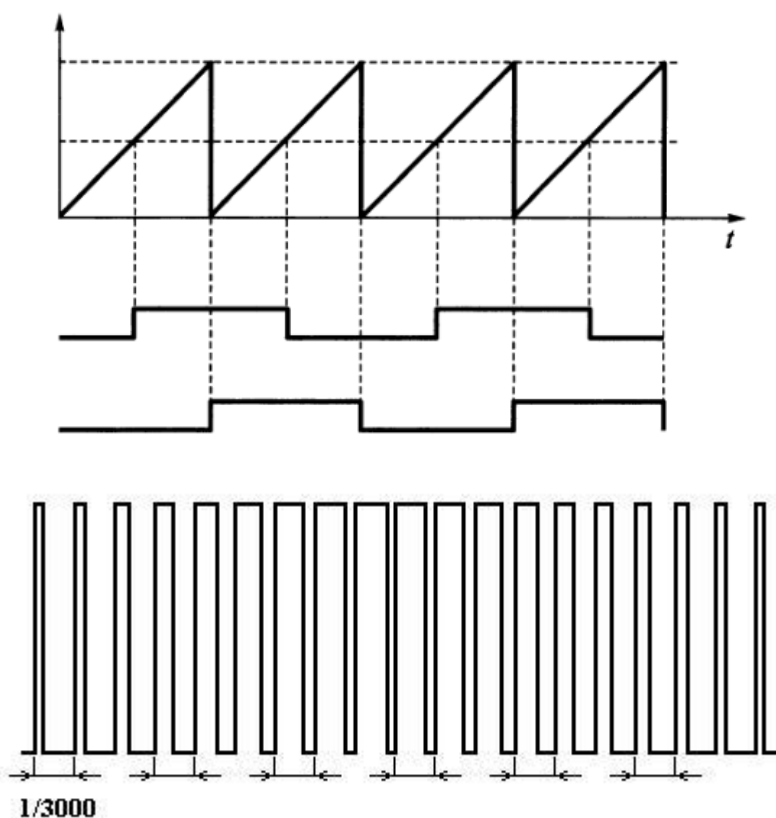


Рисунок 6.15 – Робота широтно-імпульсного перетворювача

Саме в цьому і полягає робота мікроконтролера – забезпечувати виконання фізичних процесів, що називаються широтно-імпульсною модуляцією.

Мікроконтролер – це мікросхема, усередині якої знаходиться мікро-ЕОМ [16]. У ньому є все, що необхідно для самостійної роботи:

- процесор;
- оперативна пам'ять – ОЗУ;
- постійна пам'ять – ПЗП;
- генератор тактової частоти;
- таймери;
- порти вводу/виводу;
- послідовні інтерфейси, і т.і.

Зовнішній вигляд мікроконтролера такий, як показано на рисунку 6.16.



Рисунок 6.16 – Зовнішній вигляд мікроконтролера MSP430.

У більшості мікроконтролерів є функція роботи з ШІП. Вони містять або модуль одного таймера `Timer_a`, або модулі двох таймерів `Timer_a` і `Timer_b`, і т.д.

Щоб отримати необхідні синусоїдальні сигнали та сигнали для векторного керування двигуном через модулі, можна використати драйвери, вбудовані в кожен транзисторну збірку, які керуються програмованим контролером АСК-196. Управління перетворювачем та його регулювання здійснює блок управління тяговим приводом (БУП), що належить до покоління приладів сімейства SIBAS 32. Це обладнання підтримує функції векторного керування та звичайного широтно-імпульсного модулятора (ШІМ).

Отож, слід використовувати наявне обладнання, перепрограмувавши його за допомогою спеціального програмного забезпечення SIEMENS SIMATIC STEP 7, що дозволить вдосконалити фізичний закон регулювання швидкості двигуна. Це є вигідним рішенням, оскільки не потребує одаткових витрат на придбання нового обладнання.

Висновок. Для асинхронного двигуна типу А 280S4 було обрано трифазний IGBT міст SEMIKRON. Керування модулем, обробка сигналів і прийом команд здійснюється існуючими контролерами та платами перетворювача електромобіля. Розроблено схему керування, яка відповідає поставленим задачам.

7 РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САЕП

Для побудови статичної характеристики електродвигуна використаємо спрощений варіант формули Клосса, який можна використовувати для розрахунку статичних характеристик потужних асинхронних електродвигунів.

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

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.

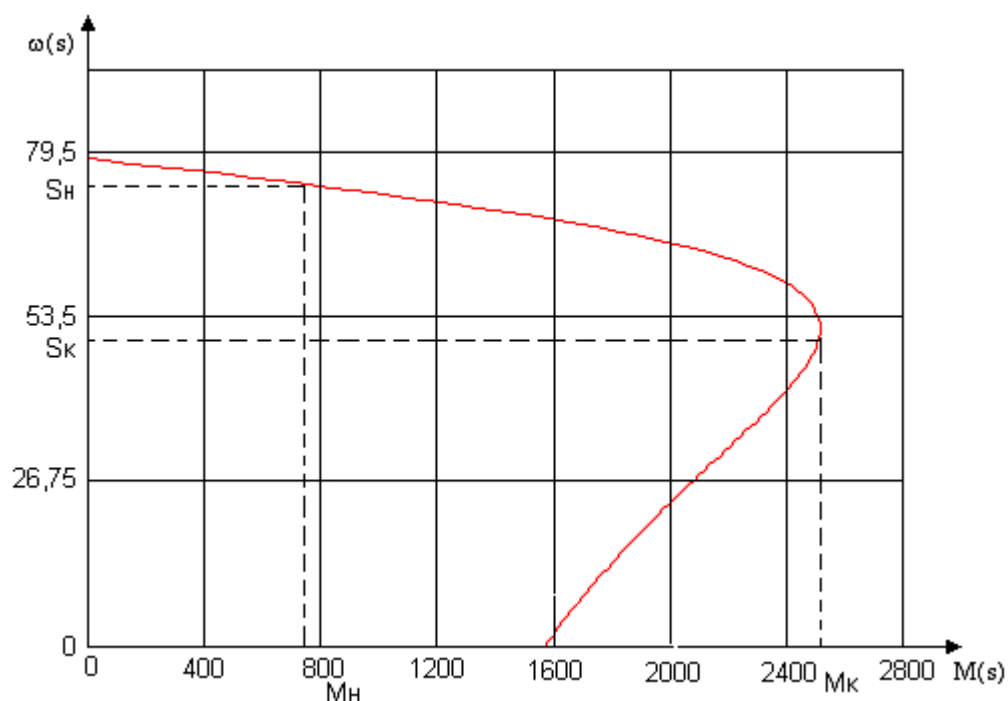


Рисунок 7.1 – Природна механічна характеристика двигуна

8 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САЕП

Розрахуємо статичний та динамічний моменти на валу електродвигуна при максимальній завантаженості салону пасажирами і при відсутності пасажирів [8].

1. При найбільшому завантаженні.

Статичний момент:

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

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

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.

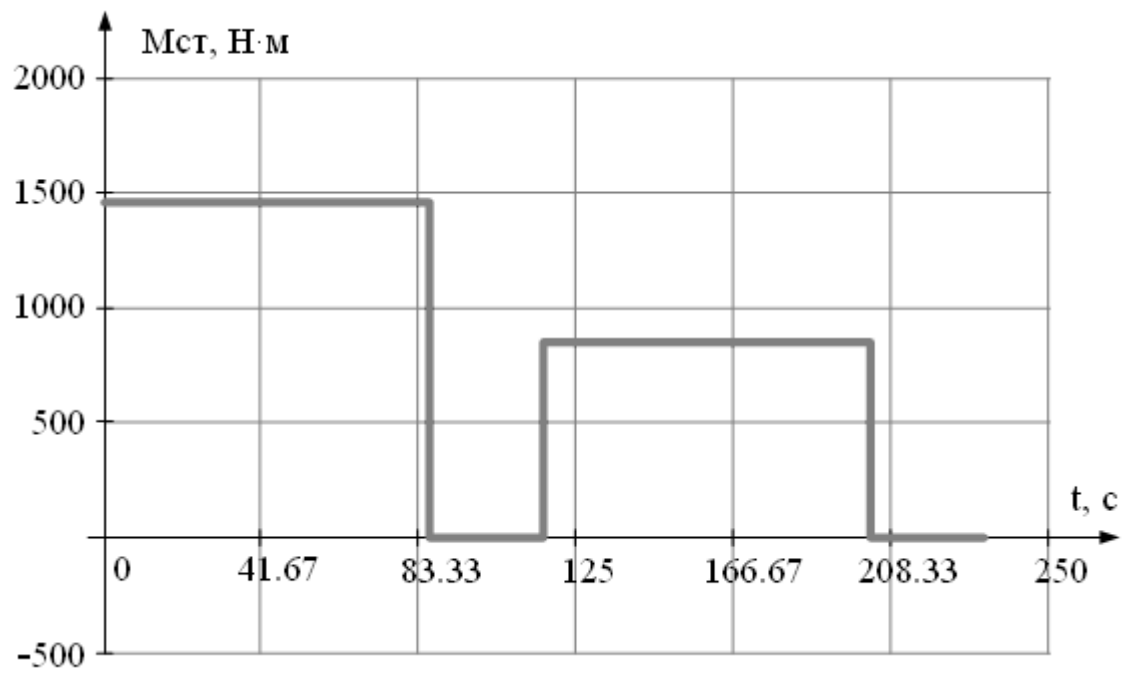


Рисунок 8.1 – Діаграма статичного навантаження двигуна

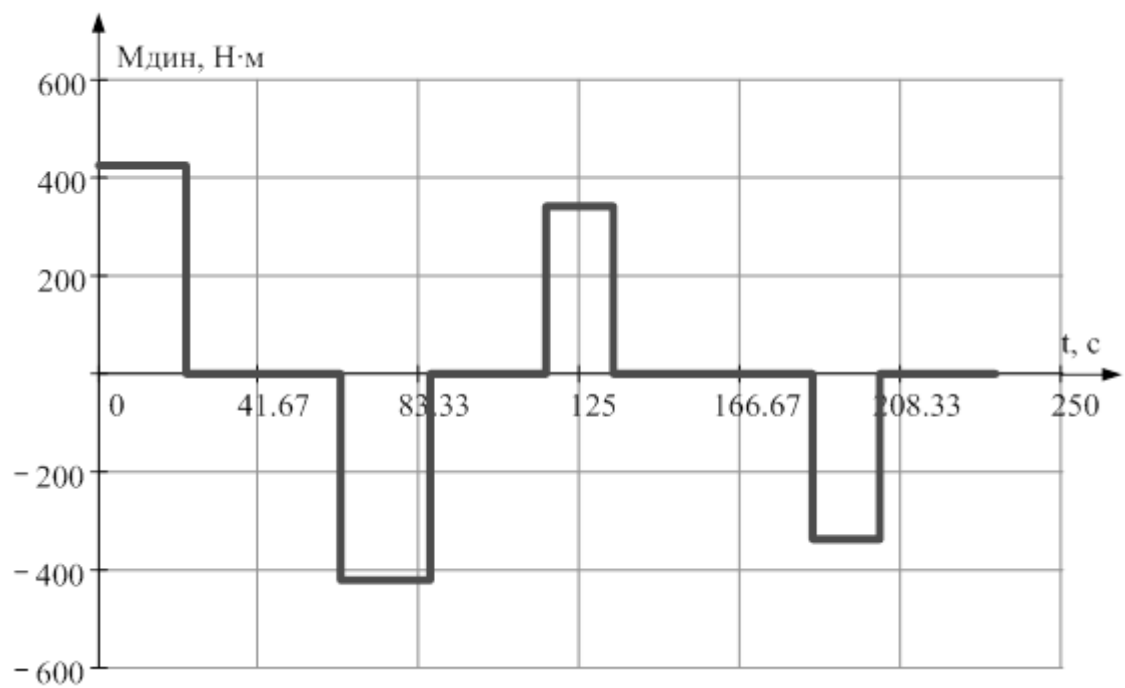


Рисунок 8.2 – Діаграма динамічного навантаження двигуна

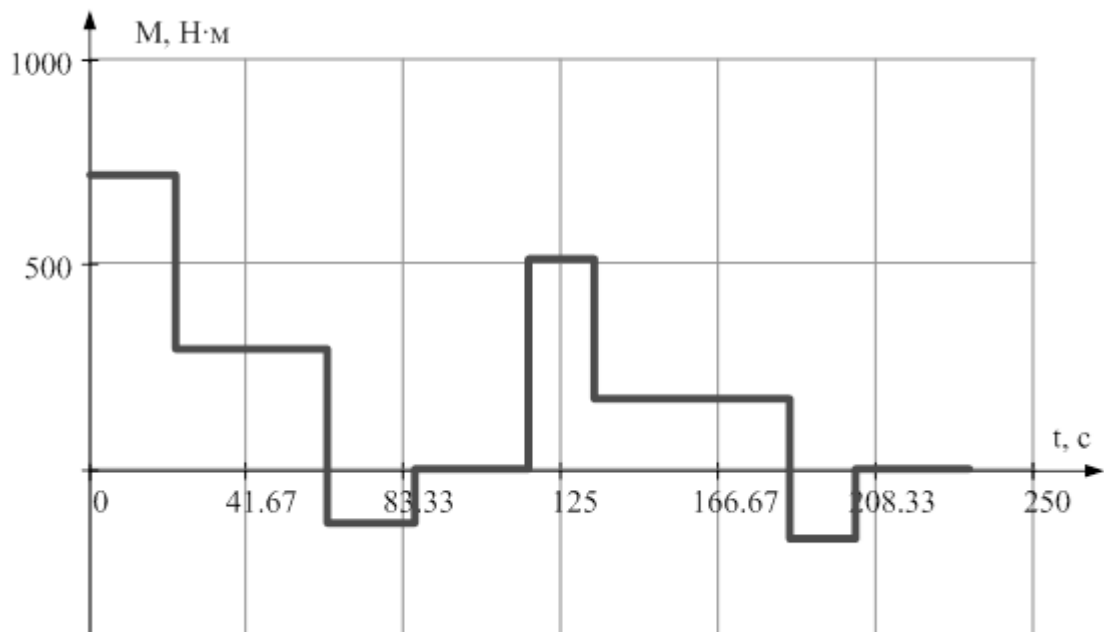


Рисунок 8.3 – Діаграма навантаження двигуна

Висновок. Побудовано динамічні характеристики, діаграми статичного та динамічного моментів двигуна, а також діаграму навантаження. Розглянуто тахограми швидкості та прискорення електродвигуна в режимах максимального навантаження і холостого ходу.

9 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА СТІЙКІСТЬ ТА ЯКІСТЬ

9.1 Оцінка стійкості

Щоб дослідити систему на стійкість скористаємося можливостями ППП Matlab. Для цього замінимо входи на In1, In2 та виходи на Out1, Out2. Структурна схема при цьому зображена на рисунку 9.1.

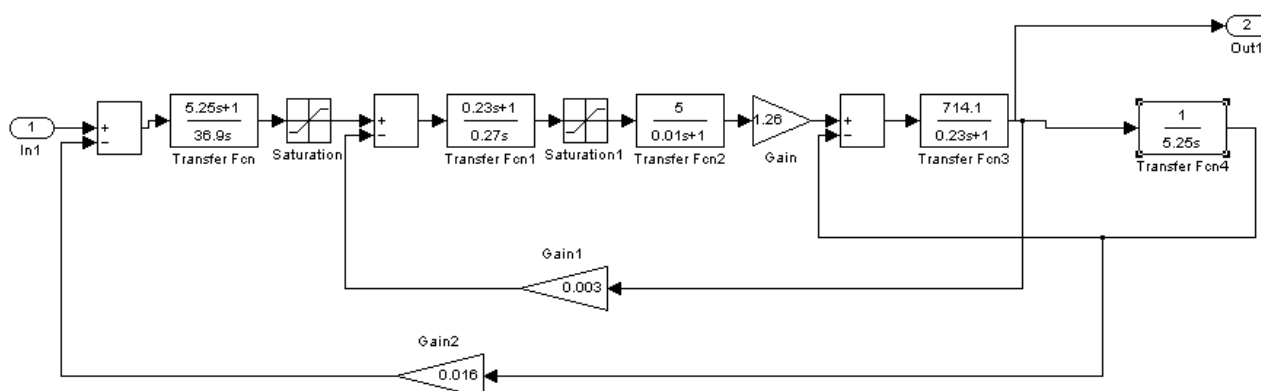


Рисунок 9.1 - Структурна схема ЕП електромобіля зібраної в Matlab

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

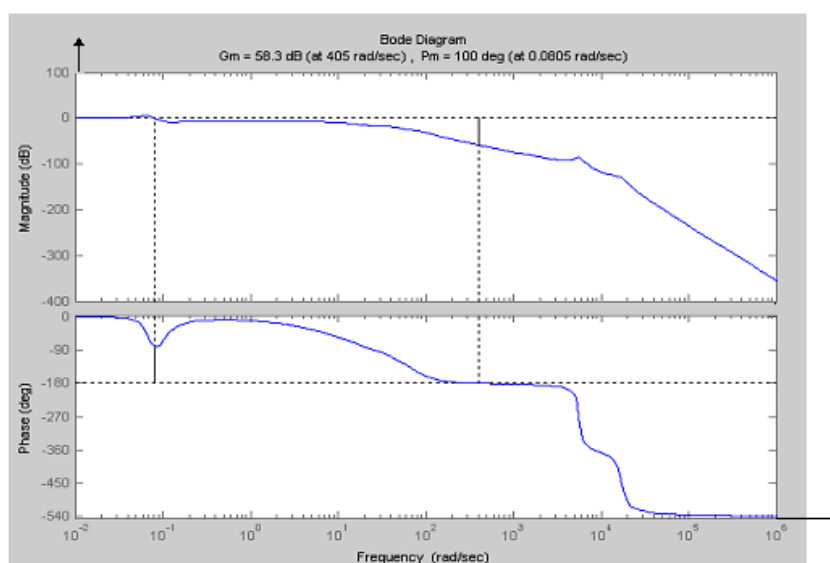


Рисунок 9.2 - Характеристики ЛАЧХ і ЛФЧХ по збурювальній дії

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

9.2 Оцінка якості

Визначення стійкості системи є недостатнім для повної характеристики її ефективності. Необхідно також дослідити якість системи під дією збурень. Використовуючи Matlab і команду `step(sys)`, можна отримати перехідний процес, який дозволяє оцінити якість системи. Графік перехідної характеристики наведено на рисунку. 9.3

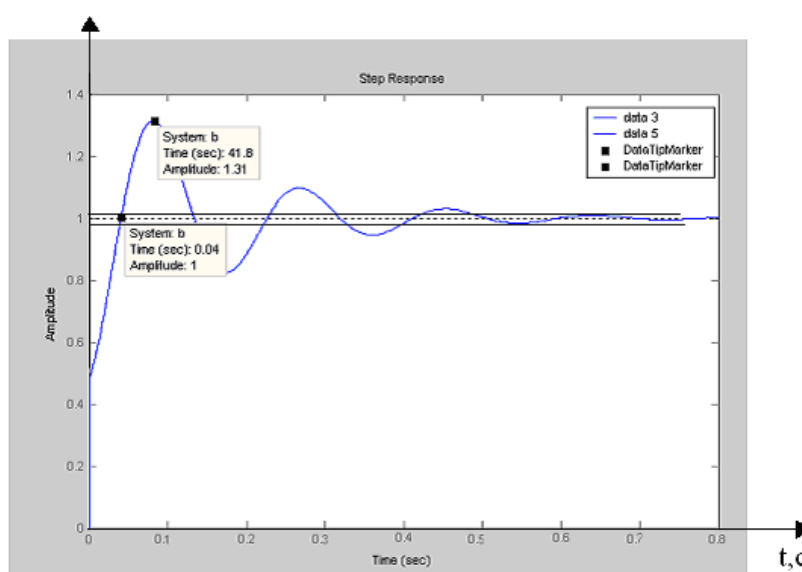


Рисунок 9.3 – Перехідна характеристика по збурювальній дії

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. З аналізу отриманих логарифмічних амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) та логарифмічної фазочастотної характеристики (ЛФЧХ) видно, що система є стійкою. Показник перерегулювання становить 31%. Кількість коливань становить три, що вказує на те, що система швидко стабілізується після збурень. Таким чином, система не тільки стійка, але й якісна в плані перехідних процесів при регулюванні.

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

Вибір сенсора швидкості здійснюємо за частотою, що подається на двигун 10 Гц. З каталожних даних вибираємо сенсор швидкості типу ДКС-М30-81У-1252-ЛА.02 частотою 2-50 Гц з такими параметрами: діапазон номінальної напруги 110-220В, номінальний струм - 250мА, падіння напруги - 9В, мінімальний струм навантаження - 5мА, залишковий струм - 3мА.

Вибір сенсора струму проводимо за струмом двигуна. З каталожних даних вибираємо сенсор струму типу ACS754SCB-200, на максимальний струм 200А. Цей сенсор застосовують для вимірювання постійного і змінного струму більше 100А. Існують сенсори на 130, 150 і 200А. Діапазон пропускання сенсора 35кГц, напруга ізоляції 3 кВ, внутрішній опір 100 мОм. Особливостями цього сенсора є маленький розмір, вмонтована силова шина та робота 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:

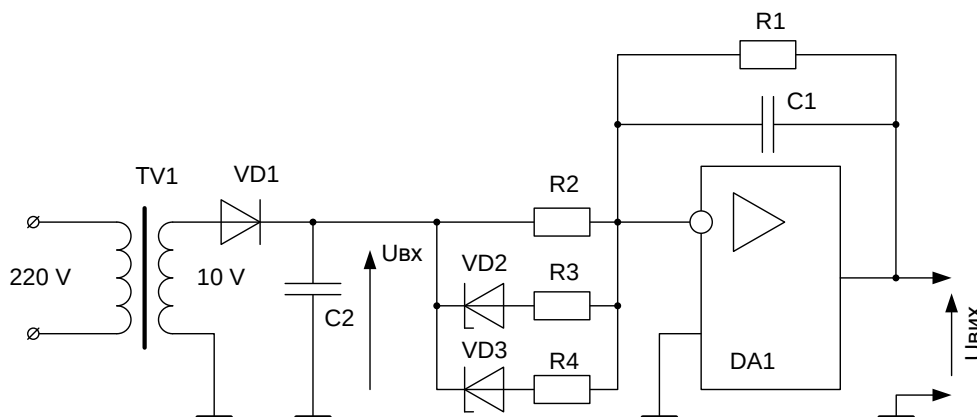


Рисунок 10.1 – Розрахункова схема задатчика інтенсивності

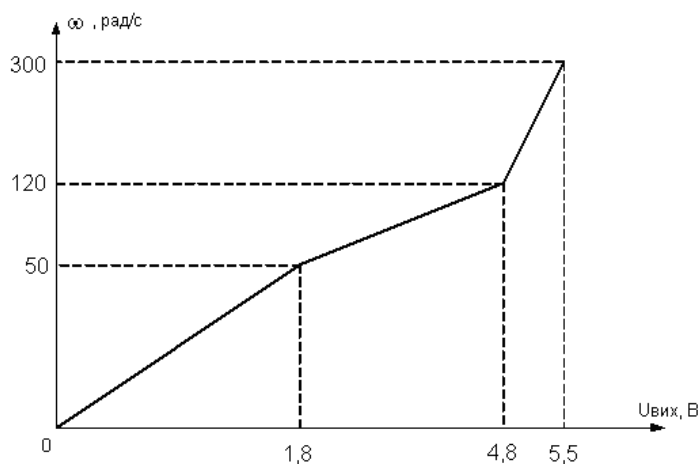


Рисунок 10.2 – Статична характеристика ЗІ

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 сходянковій 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:

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

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 зазначено, що блок управління тяговим перетворювачем та контролери встановлено в перетворювачі, а також обрано драйвери силових модулів, які з'єднані з контролерами за протоколом RS-485. Для програмування блоку управління використано програмне забезпечення компанії Siemens.

Для керування тяговим двигуном оберемо інвертор, який забезпечує не тільки динамічне гальмування, але й рекуперацію електричної енергії при гальмуванні (КЕРС). Спрощену електричну принципову схему представлено на рисунку. 10.1.

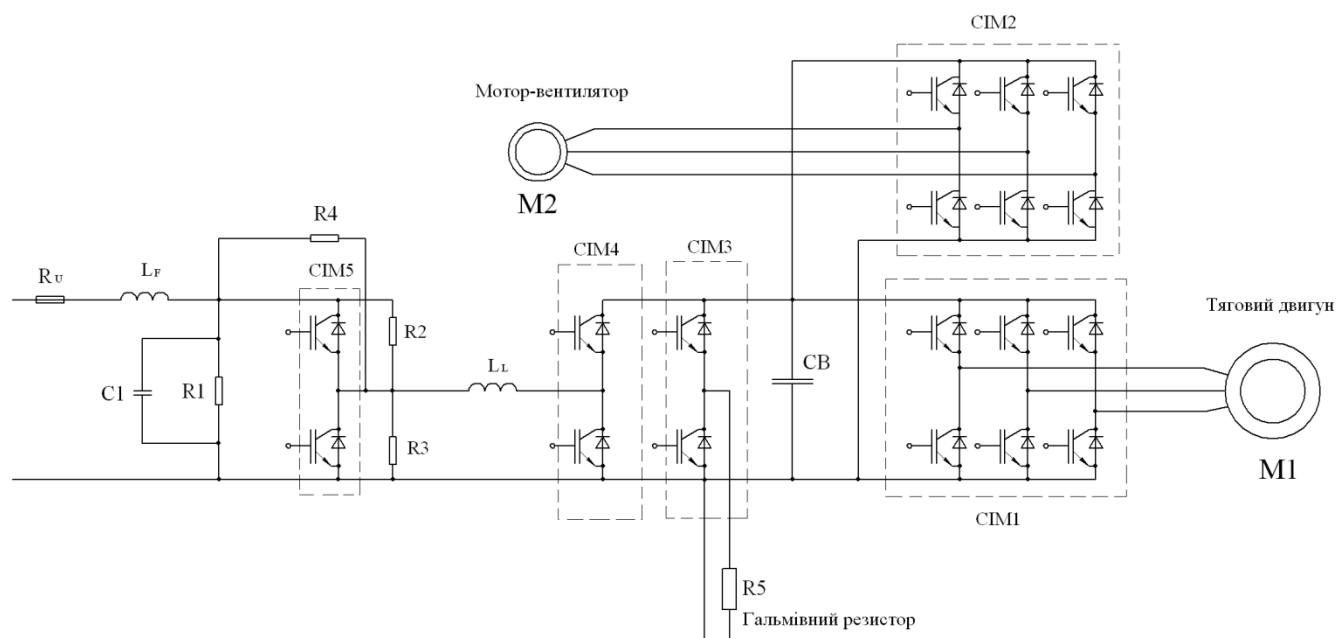


Рисунок 10.1 – Електрична принципова схема тягового електроприводу

На рисунку 10.1: M1 – тяговий двигун; M2 – мотор-вентилятор; CB – конденсаторна батарея; CIM1-CIM 4 – силові інтелектуальні модулі; R_U – високовольтний запобіжник; L_F , L_L – дроселі; C1 – конденсатор LC-фільтру; R1-R4 – реостати; R5 – гальмівний резистор.

В лівій частині схеми елементи вхідного фільтру, гальмівний переривач та інші.

Трифазний модуль слугує для перетворення постійного струму в змінний. У схемі використано трифазний IGBT модуль, який дозволяє змінювати ширину імпульсів, отримуючи струм, що змінюється за синусоїдальним законом необхідної частоти (від 0 до 150 Гц). При подачі трьох синусоїдальних струмів, зміщених один щодо одного на 120 градусів, в обмотки двигуна, двигун починає обертатися, а регулювання частоти дозволяє змінювати його швидкість. Трифазний IGBT модуль має два плеча – верхнє і нижнє, з відповідними входами: плюсовим і від’ємним. На ці входи подається 600 В від конденсаторної батареї, яка живиться від мережі. Середня точка між плечами модуля є виходом. Коли відкривається транзистор верхнього плеча, струм протікає від плюсового входу до середньої точки, до якої підключено вивід відповідної фази електродвигуна. При відкритті нижнього плеча струм протікає від двигуна до мінуса. Обидва плеча ніколи не відкриваються одночасно. Відкриваючи транзистори верхнього плеча, формується позитивна частина напівперіоду, і навпаки. Принцип роботи схеми ілюструється на рисунку.11.2.

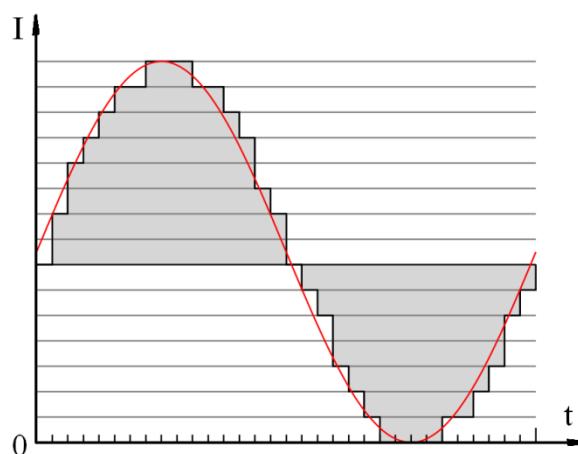


Рисунок 10.2 – Позитивна і від’ємна частини напівперіодів на виході інтелектуального силового модуля

Відкриттям і закриттям транзисторів в потрібний момент для отримання необхідної синусоїди керують драйвери, вбудовані в кожну діодно-транзисторну збірку, а вони в свою чергу керуються програмованим контролером АСК-196. Інверторів на схемі два – один для тягового

електродвигуна, інший – для асинхронного вентилятора, що служить охолоджувачем тягового перетворювача. Попередньо він живився від трьох силових збірок, однак вони не забезпечені захистом по струму від КЗ, пониженої напруги., тому часто вигорають при несправностях, тож є слабкою ланкою в електричній схемі. З цієї причини було замінено їх єдиним інтелектуальним силовим модулем SKM75GB128D. Керування відбувається аналогічно – через контролер та блок управління. Крім двох інверторів до складу перетворювача входять ще елементи вхідного фільтра і гальмівний переривач. Все це керується двома контролерами, які знаходяться в корпусі перетворювача.

Для переходу в режим гальмування асинхронна машина повинна споживати реактивну потужність від якого-небудь джерела, наприклад, від батареї конденсаторів. Тоді можливо здійснити гальмування і при відсутності напруги в контактній мережі, що для електромобіля є особливо важливим. Конденсаторна батарея СВ має значення ємності – 9600 мікрофарад.

За рекуперативне гальмування відповідає СІМ4. Відкриття верхнього плеча цього модуля забезпечує повернення електроенергії в контактну мережу. Постійно контролюється напруга в мережі, і якщо вона перевищує 750 В, електропривод переходить в режим реостатного гальмування. Це досягається відкриттям транзисторів верхнього плеча СІМ3 (гальмівного переривника, чоппера), в результаті чого гальмівне коло замикається через гальмівні резистори.

Блок управління містить об'єднуючу плату зі слотами, в які вставлено декілька плат, зокрема плата процесора, плата послідовного зв'язку та три плати вхідних/вихідних аналогових і дискретних сигналів. Плата послідовного зв'язку забезпечує три канали зв'язку. Перший і основний канал забезпечує зв'язок пристрою управління з тяговим перетворювачем через інтерфейс RS-485, передаючи всі команди на розгін і гальмування. Два інші канали, що працюють через інтерфейс RS-232, забезпечують зв'язок з панеллю оператора на пульті

водія, туди також виводяться діагностичні повідомлення та ряд параметрів, і підключаються до пристрою управління діагностичним пристроєм (ЦДП) або портативним комп'ютером для діагностування несправностей.

Плати вхідних дискретних сигналів забезпечують прийом керуючих команд з пульта і педального командоапарату водія, сигналів з численних датчиків і т.п. Тим самим зайняті і плати аналогових вхідних сигналів, відмінність тільки у вигляді самих сигналів (або 0 / 1, включено / вимкнено - для дискретних, або змінюються в широкому межі показники для аналогових, наприклад напруга бортової мережі). Плата дискретних вихідних сигналів займається передачею команд різних виконавчих механізмів вагона, починаючи з лампочок на пульті, закінчуючи відкриттям / закриттям дверей та управлінням контакторами механічних і рейкових гальм. Пристрій управління має свій власний стабілізований блок живлення. У висувній панелі з платами управління знаходяться три невеликих плати у верхньому ряду - це внутрішні джерела живлення, що перетворюють 24 В бортової мережі в стабілізовану напругу 5В, 12В, + /-15В для потреб перетворювача. Нижче знаходяться три великих плати. Крайня права – А50 - контролер вентилятора АСК-196. Він безпосередньо управляє інвертором вентилятора - саме за командами з цієї плати в потрібний момент відкриваються і закриваються транзистори. У дві мікросхеми ПЗУ записана програма управління.

З вагона у перетворювач заходить високовольтне живлення 600В, яке в подальшому інвертор перетворює в змінну напругу для роботи тягових двигунів. Перш ніж потрапити всередину перетворювача високовольтна лінія проходить через лінійний контактор. Дозвіл на його включення дає сам перетворювач, минаючи БУП, по окремій лінії - реле на платі А10 стоїть в ланцюзі включення лінійного контактора. Це робиться для подвійного контролю.

Інвертор живиться не безпосередньо від контактної мережі, а через конденсаторну батарею, яка на схемі розташована перед інвертором і позначена

як СВ. Ця батарея складається з 12 паралельно підключених конденсаторів загальною ємністю 9600 мікрофард. Інвертор фактично не контактує з мережею і не залежить від стрибків напруги у ній, оскільки завдяки вхідному стабілізатору напруга на конденсаторній батареї залишається постійною. Задача вхідного стабілізатора полягає в підтримці стабільної напруги на батареї.

Цю функцію виконують дві діодно-транзисторні збірки – силові інтелектуальні модулі – СІМ1 і СІМ2. СІМ1 обмежує зарядку конденсаторної батареї, коли напруга на батареї знижується нижче встановленого рівня, верхнє плече СІМ1 відкривається і підключає її до контактної мережі. Струм проходить через відкритий транзистор верхнього плеча СІМ1, дросель (LL) і зворотний діод СІМ2 (транзистор СІМ2 при цьому залишається закритим). Після підвищення напруги на СВ транзистор СІМ1 закривається, і цей процес відкриття та закриття повторюється постійно.

СІМ2 обмежує перевищення напруги, так якщо напруга на батареї перевищує допустимий рівень (наприклад, при гальмуванні), транзистор верхнього плеча СІМ2 відкривається і відводить надлишок енергії в контактну мережу.

СІМ3, призначений для ситуацій, коли напруга в контактній мережі перевищує 750 вольт і відведення надлишкової енергії туди стає неможливим. У цьому випадку відкривається транзистор верхнього плеча СІМ3, і струм проходить через гальмівні реостати.

Особливо важливим є процес першої зарядки конденсаторної батареї. Коли ТЗ вперше підключається і висока напруга подається до перетворювача, конденсаторну батарею не можна безпосередньо підключати до мережі. Для цього використовується зарядний резистор R1 з номіналом 1,43 Ом, який встановлено паралельно транзистору верхнього плеча СІМ1. Першочергова зарядка здійснюється через цей резистор. Після завершення зарядки батареї СІМ1 шунтує резистор, і струм більше не протікає через нього.

Висновок. Запропоновано принципову схему системи керування тяговим електроприводом електромобіля, яка побудована з використанням інтелектуальних силових модулів та описано роботу силового інвертора. Дана схема забезпечує стабільну роботу двигуна та рекуперативне гальмування.

11 ОХОРОНА ПРАЦІ

В даній роботі здійснюється модернізація системи керування тягового електропривода електромобіля. 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 пробію 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: Іа	17-23	75	не > 0,3
Теплий	Середньої важкості: Іа	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 ІІІ, 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, $\text{м/с}^* 10''$, 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 легко-займистих, горючих та важко горючих речовин і/або матеріалів на окремих ділянках площею не менше 10 м^2 кожна може перевищити $180 \text{ МДж} \cdot \text{м}^2$.

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 хвилинах) 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 хвилинах) 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 хвилинах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекрытия	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.

12 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Удосконалюється тяговий електропривод електромобіля, що в подальшому дозволяє зменшити витрати електроенергії, а також підвищити надійність системи цілому, що призведе до зменшення кількості пристроїв та зменшення затрат на поточні ремонти. Для визначення доцільності застосування даної системи керування проведемо економічний розрахунок двох варіантів із подальшим їх порівнянням.

12.1 Визначення величини затрат запропонованого варіанту

Кошторис на обладнання для базового і нового варіантів приведені в таблиці 12.1.

Таблиця 12.1 – Кошторис витрат на електроустаткування базового і нового варіанту.

Найменування електрообладнання	Кількість	Кошторисна вартість			
		Базова		Нова	
		За шт., грн	Всього, грн	За шт., грн	Всього, грн
Напівміст (Half-Bridge) IGBT-модуль	1	1600	1600	-	-
Трифазний інтелектуальний силовий IGBT-модуль	1	42000	42000	-	-
Двигун постійного струму	1	-	-	25000	25000

Продовження таблиці 12.1.

Асинхронний 4 полюсний двигун	1	-	-	25000	25000
Обігрівач	1	120	120	120	120
Вентилятор	1	25	25	25	25
Операційна панель	1	1300	1300	1300	1300
Всього			43445		29645
Транспортні витрати 7%			3041		2075
Всього ціна обладнання			46486		31720
Монтажні роботи 5%			2324		1586
Капітальні витрати			48810		33306

12.2 Розрахунок основного фонду заробітної плати

Оскільки розроблена система живиться напругою 480 В, то згідно ПУЕ обслуговувати дану установку може робітник у якого розряд не нижче четвертого, а група допуску не нижче третього по електробезпеці.

Оскільки, тарифна ставка першого розряду $TC_1 = 47$ грн/год, тарифний коефіцієнт 4 розряду складає 1,54, тому:

$$TC_4 = 1,54 \cdot 47 = 72,5 \text{ (грн/год)}.$$

Відповідно тарифна заробітна плата:

$$Z_T = TC_4 \cdot m, \quad (12.1)$$

де m – кількість годин на обслуговування в рік ($m = 220 \cdot 1 = 220$ год).

$$З_T = 72,5 \cdot 220 = 15924 \text{ (грн)}.$$

Оплата праці за професійну та майстерну діяльність:

$$П_{nm} = \frac{З_T \cdot H_{nm}}{100}, \quad (12.2)$$

де H_{nm} – надбавка за професійну діяльність (для працівників з четвертим розрядом становить 10%).

$$П_{nm} = \frac{15924 \cdot 10}{100} = 1592 \text{ (грн)}.$$

Оплата праці за шкідливих умов праці:

$$П_{yn} = \frac{З_T \cdot H_{yn}}{100}, \quad (12.3)$$

де H_{yn} – надбавка за умови праці, що для четвертого розряду складає 17%.

$$П_{yn} = \frac{15924 \cdot 17}{100} = 2707 \text{ (грн)}.$$

Всього постійна заробітна плата складає:

$$З_{пост} = З_T + П_{nm} + П_{yn}, \quad (12.4)$$

$$З_{пост} = 15924 + 1592 + 2707 = 20223 \text{ (грн)}.$$

Оплата премій:

$$П_{пр} = \frac{З_{пост} \cdot K}{100}, \quad (12.5)$$

де K – коефіцієнт премії ($K = 20 \%$).

Тому оплата премій дорівнює:

$$P_{пр} = \frac{20223 \cdot 20}{100} = 4044 \text{ (грн)}.$$

Всього основна заробітна плата становить:

$$З_{осн} = З_{посг} + П_{пр}, \quad (12.6)$$

$$З_{осн} = 20223 + 4044 = 3520,4 \text{ (грн)}.$$

Додаткова заробітна плата:

$$З_{дод} = 0,1 \cdot З_{осн}, \quad (12.7)$$

$$З_{дод} = 0,1 \cdot 3520,4 = 352,4 \text{ (грн)}.$$

Загальний фонд заробітної плати складає:

$$З_{заг} = З_{осн} + З_{дод}, \quad (12.8)$$

$$З_{заг} = 3520,4 + 352,04 = 3872,44 \text{ (грн)}.$$

12.3 Розрахунок експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів

Величина капіталовкладень для базового і нового варіантів:

$$K_б = 48810 \text{ (грн)},$$

$$K_н = 33306 \text{ (грн)}.$$

При встановленні системи з асинхронним двигуном та векторної широтно-імпульсної модуляції для керування призвело до зменшення витрат на електроенергію на 10%, завдяки методу, що дозволяє обчислювати моменти включення обмоток, для досягнення більш ідеальних характеристик якості приводу на базі електродвигуна, наприклад, для збільшення ККД. Тому при регулюванні швидкості обертання двигуна зменшується і кількість енергії, яку споживає двигун:

$$З_{енб} = P \cdot \Phi \cdot m_o \cdot K, \quad (12.9)$$

де P – потужність двигуна ($P = 110$ кВт);

Φ – кількість робочих годин в день ($\Phi = 1$ год);

m_0 – кількість робочих днів в рік ($m_0 = 251$ день);

K – вартість електроенергії ($K = 4,32$ грн/кВт · год).

$$Z_{\text{енб}} = 110 \cdot 1 \cdot 251 \cdot 4,32 = 8283 \text{ (грн)}.$$

$$Z_{\text{енн}} = Z_{\text{енб}} - 0,1 \cdot Z_{\text{енб}}, \quad (12.10)$$

$$Z_{\text{енн}} = 8283 - 0,1 \cdot 8283 = 9111,3 \text{ (грн)}.$$

Витрати на поточний ремонт обладнання. При використанні векторної ШІМ зменшуються пускові струми, втрати в кабелях, збільшує надійність всієї установки, тобто кількість поломок зменшується, а отже надійність системи електропривода зростає. Заплановані витрати на поточний ремонт і обслуговування при базовому варіанті становить 5%, а при новому 3,5%.

$$Z_{\text{рб}} = 0,05 \cdot K_{\text{б}}, \quad (12.11)$$

$$Z_{\text{рб}} = 0,05 \cdot 48810 = 2440,5 \text{ (грн)}.$$

$$Z_{\text{рн}} = 0,035 \cdot K_{\text{н}}, \quad (12.12)$$

$$Z_{\text{рн}} = 0,035 \cdot 33306 = 1165,71 \text{ (грн)}.$$

Амортизаційні відрахування:

$$Z_A = \sum N_A K_i, \quad (12.13)$$

де N_A - норма амортизаційних відрахувань ($N_A = 10\%$).

$$Z_{\text{Аб}} = 0,1 \cdot 48810 = 4881 \text{ (грн)},$$

$$Z_{\text{Ан}} = 0,1 \cdot 33306 = 3330,6 \text{ (грн)}.$$

Витрати на допоміжні матеріали для ремонту обслуговуючого ремонту при базовому варіанті 20%, а при новому 5% від фонду оплати праці:

$$Z_{\text{мб}} = 0,2 \cdot Z_{\text{заг}}, \quad (12.14)$$

$$Z_{\text{мб}} = 0,2 \cdot 24267 = 4853 \text{ (грн)}.$$

$$З_{\text{мн}} = 0,05 \cdot З_{\text{заг}}, \quad (12.15)$$

$$З_{\text{мн}} = 0,05 \cdot 24267 = 1213 \text{ (грн)}.$$

Повні експлуатаційні затрати:

$$З_{\text{еб}} = З_{\text{енб}} + З_{\text{рб}} + З_{\text{аб}} + З_{\text{мб}} + З_{\text{заг}}, \quad (12.16)$$

$$З_{\text{еб}} = 8283 + 2440,5 + 4881 + 4853 + 24267 = 44724,5 \text{ (грн)}.$$

$$З_{\text{ен}} = З_{\text{енн}} + З_{\text{рн}} + З_{\text{ан}} + З_{\text{мн}} + З_{\text{заг}}, \quad (12.17)$$

$$З_{\text{ен}} = 9111,3 + 1165,71 + 3330,6 + 1213 + 24267 = 39087,61 \text{ (грн)}.$$

12.4 Розрахунок економічної ефективності

Оскільки, $K_{\text{б}} > K_{\text{н}}$, додаткові капіталовкладення не здійснюються.

Розраховуємо річний економічний ефект за експлуатаційними витратами:

$$ЕЕ = З_{\text{еб}} - З_{\text{ен}}, \quad (12.18)$$

$$ЕЕ = 44724,5 - 39087,61 = 5636,89 \text{ (грн)}.$$

Висновок

Як видно за результатами обчислень, запропонована система електропривода ефективніша базової. Зниження експлуатаційних витрат пояснюється тим, що нова система більш надійна і потребує меншої кількості ремонтів та затрат на матеріали.

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі на тему «Підвищення енергоефективності тягового електроприводу електромобіля» проведено порівняльний аналіз систем керування електроприводом ТЗ для визначення найбільш ефективної системи.

Перевірено обраний двигун за здатністю перевантаження.

Для обраної системи електроприводу розраховано та підібрано потужність двигуна, захисні та керуючі апарати, елементи системи керування та інвертор.

Система автоматичного керування тяговим електродвигуном реалізована у вигляді інвертора на базі інтелектуального силового модуля з вбудованими драйверами. Система включає чотири силові модулі різних типів, які забезпечують запуск, регулювання швидкості, реверс, рекуперативне гальмування та гальмування через гальмівний резистор. Силові модулі з векторним керуванням забезпечують більш точне автоматичне керування, що обґрунтовує їх широке впровадження.

Проведено моделювання, яке показало, що поведінка системи відповідає реальним фізичним та електромеханічним процесам. Досліджено стійкість та якість системи електроприводу.

Отримані знання та досвід можуть бути основою для подальших досліджень і розробок у даній галузі.

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. Далека, М. В. Хворост, В. І. Скуріхін, Д. І. Скуріхін. ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 388 с.
9. Крамаренко Р. М. Стан та основні напрямки удосконалення роботи міського електричного транспорту в сучасних умовах // Збірка доповідей міжнар. конф. «Міський електротранспорт. Забезпечення сталого функціонування і розвитку». – Ялта, 2008.
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. Тролейбус Т19101 «Електрон» [Електронний ресурс] / Режим доступу : [https://uk.wikipedia.org/wiki/Електрон Т19](https://uk.wikipedia.org/wiki/Електрон_Т19).

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. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
25. 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.
26. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
27. 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.
28. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.

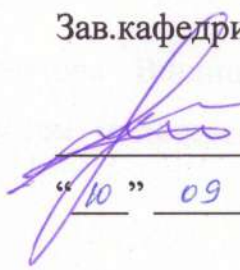
Додаток А

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

 Микола МОШНОРІЗ

« 10 » 09 2024 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ МКР.007.00.000 ТЗ

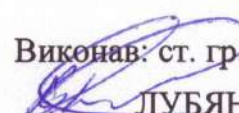
Керівник роботи

к.т.н., доц.

 Олексій ЖУКОВ

« 10 » 09 2024 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-23м

 ЛУБЯНСЬКИЙ Василь

« 10 » 09 2024 р.

Вінниця ВНТУ 2024

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки «Підвищення енергоефективності тягового електроприводу електромобіля».

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 магістерських 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	
Графічна частина	

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 ТЯГОВОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Актуальність. Використання електромобілів зростає не лише через їхню екологічність, але й завдяки потенціалу в підвищенні енергоефективності. Вдосконалення систем керування електроприводами електромобілів відіграє ключову роль у досягненні оптимальних показників енергоспоживання та ефективної роботи. Нові підходи і технологічні рішення дозволяють поліпшити керування транспортного засобу, знизити витрати енергії й підвищити загальну продуктивність електричних транспортних систем.

Мета роботи: Підвищити ефективність роботи тягового електропривода електромобіля за рахунок вибору кращої системи електропривода, що дозволить покращити динамічні показники, показники якості роботи електропривода та зменшити сумарні зведені економічні затрати при експлуатації електропривода.

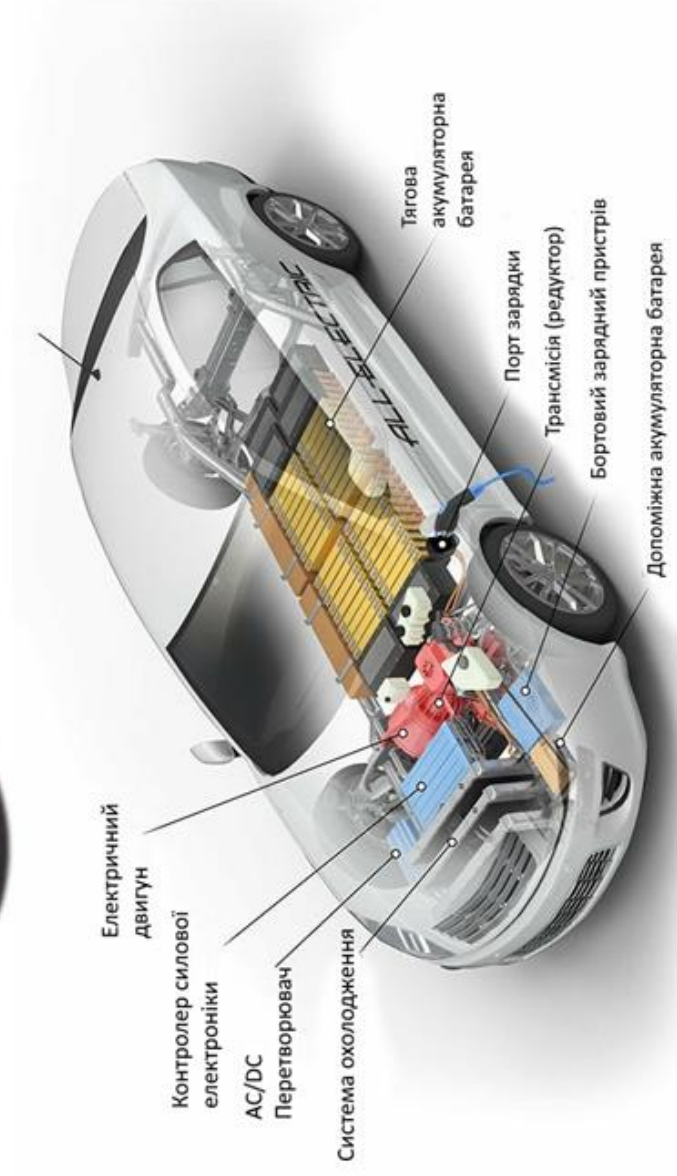
Мета досягається шляхом вирішення наступних задач:

- аналіз літературних джерел по темі роботи;
- визначення основних параметрів механізму тягового приводу електромобіля, від яких залежить вибір типу двигуна та системи керування;
- моделювання роботи системи електропривода з урахуванням динамічних режимів роботи.

Об'єкт дослідження – процес роботи тягового електропривода електромобіля.

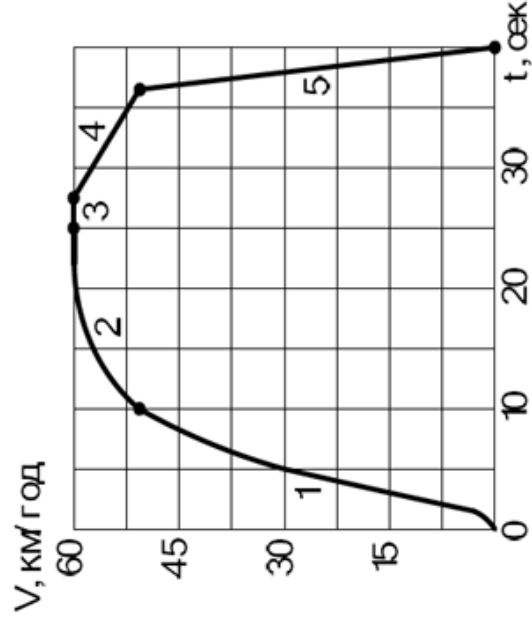
Предмет дослідження – різні системи тягового електропривода електромобіля.

Зовнішній вигляд та основні компоненти електромобіля



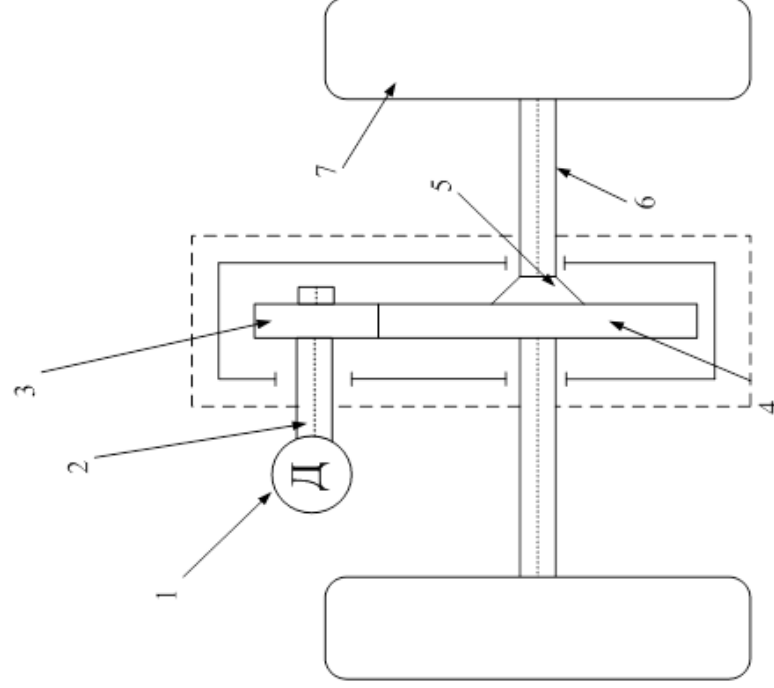
Основні технічні характеристики електромобіля

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	$\eta = 0,9$



Діаграма руху транспортного засобу

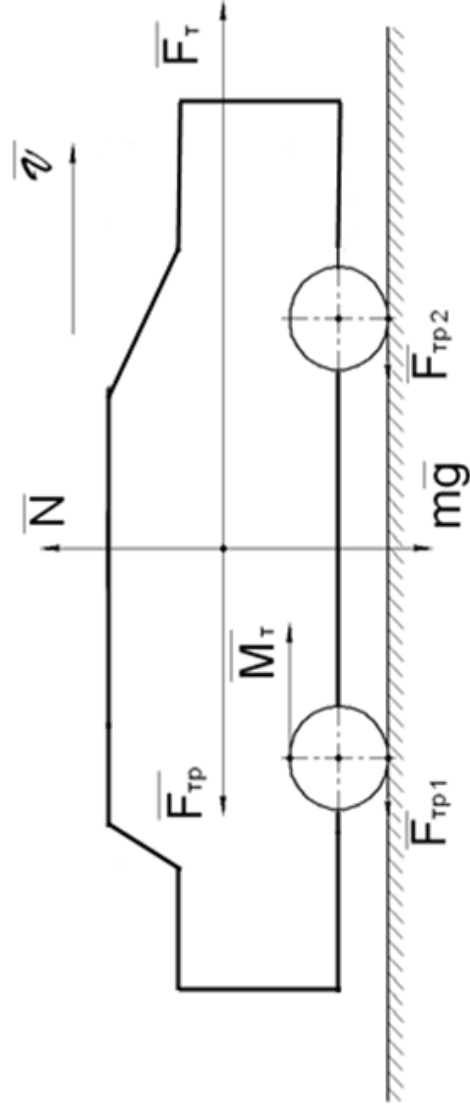
- Ділянки діаграми:
1. Розгін на пускових позиціях;
 2. Розгін за автоматичною характеристикою;
 3. Рух зі сталою швидкістю;
 4. Рух за інерцією (вибіг);
 5. Гальмування



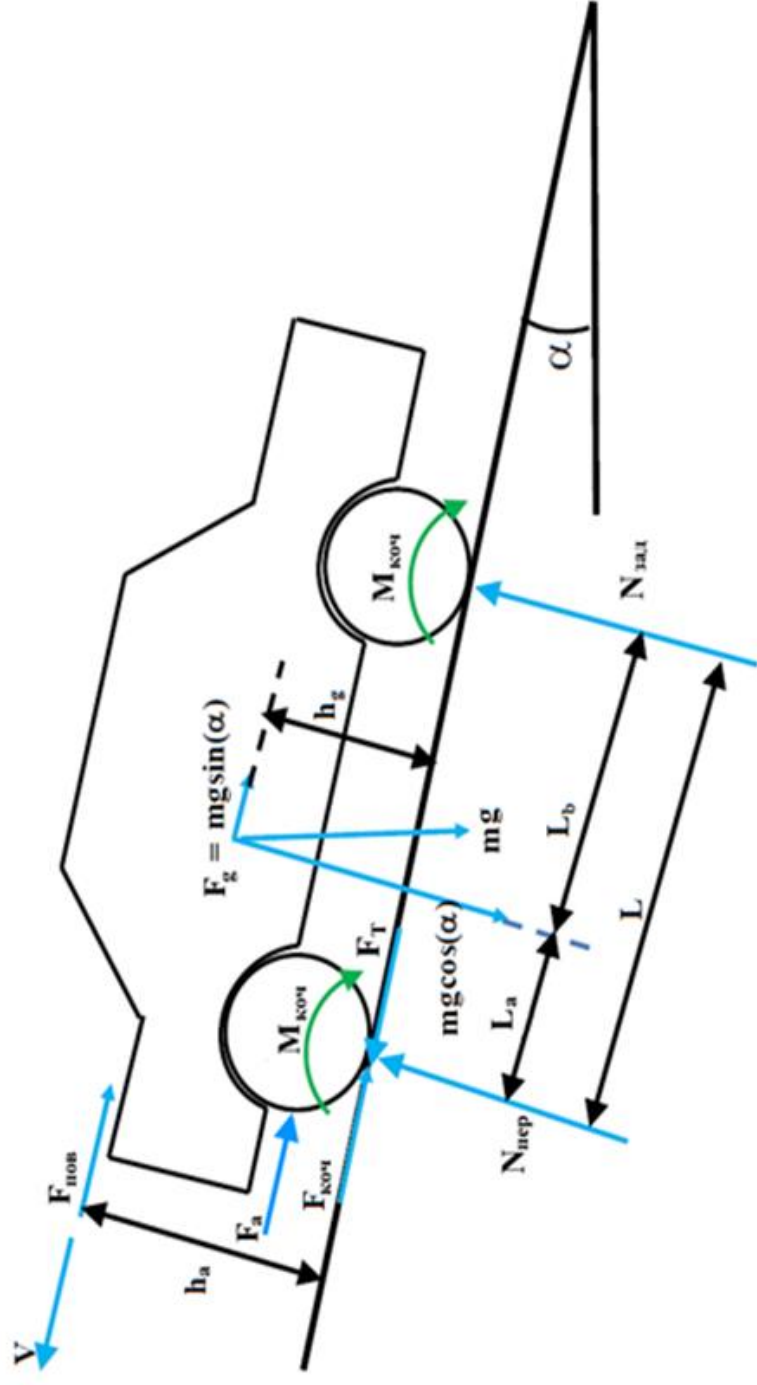
Кінематична схема механізму

- 1 – тяговий двигун; 2 – вал двигуна; 3 – циліндрична ведуча шестерня головної передачі; 4 – циліндрична ведена шестерня головної передачі; 5 – диференціал; 6 – напіввал; 7 – ведучі колеса

Сили, що діють на електромобіль на
горизонтальній ділянці руху



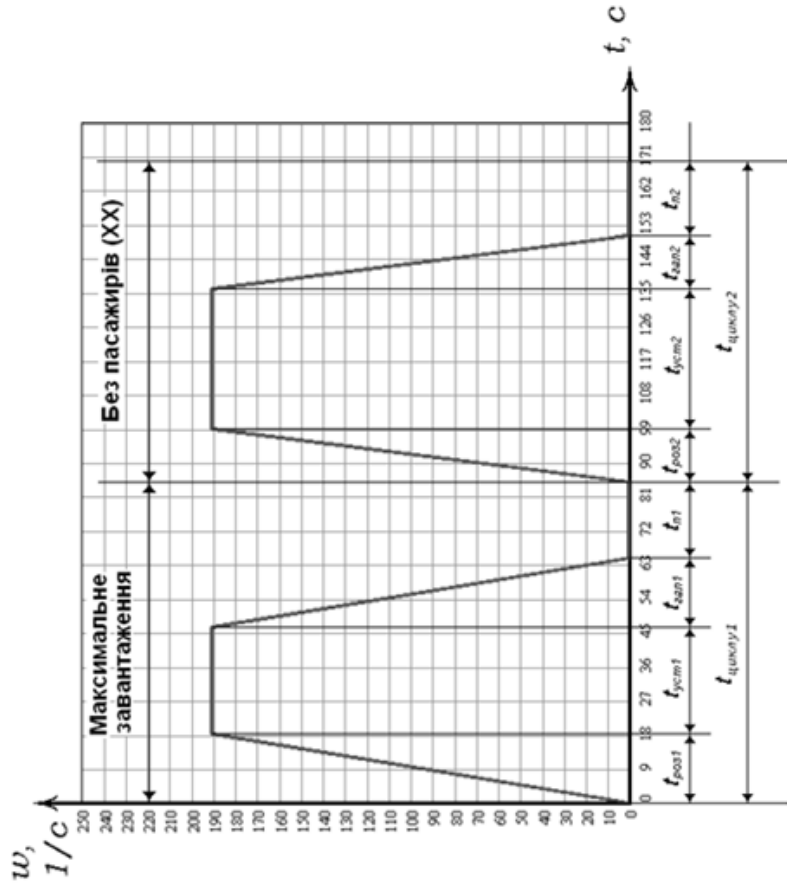
Сили, що діють на електромобіль при русі на підйом



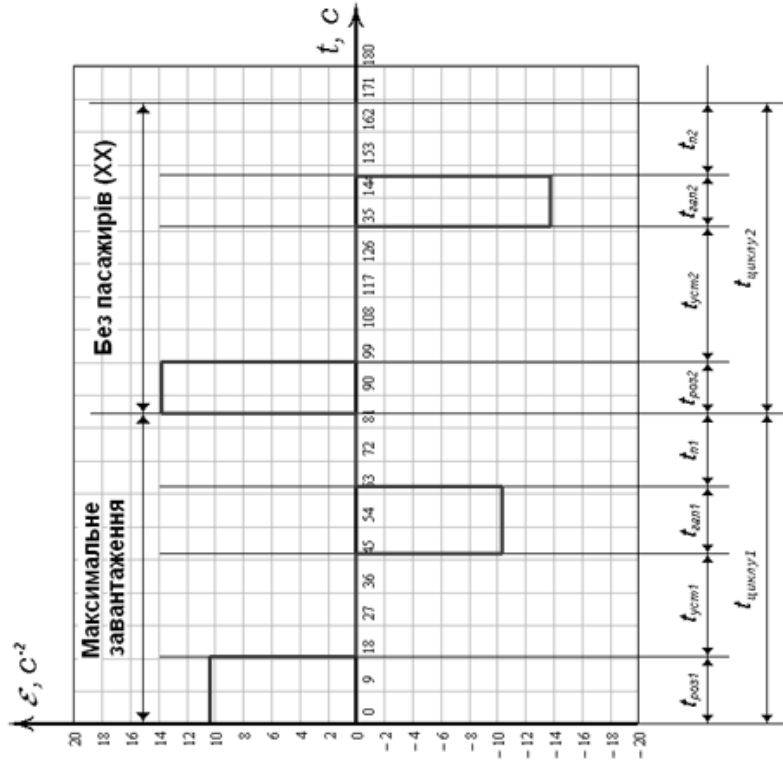
$$\vec{F}_T + \vec{F}_{mp} + \vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a}$$

$$P = \frac{V}{\eta_{mp}} (g \cdot m_{cn} \cdot \psi_{\partial} + k_{nos} \cdot A_{nos} \cdot V^2)$$

Тахограми швидкості та діаграми навантаження



Тахограма залежності кутової швидкості обертання ротора ω від часу t



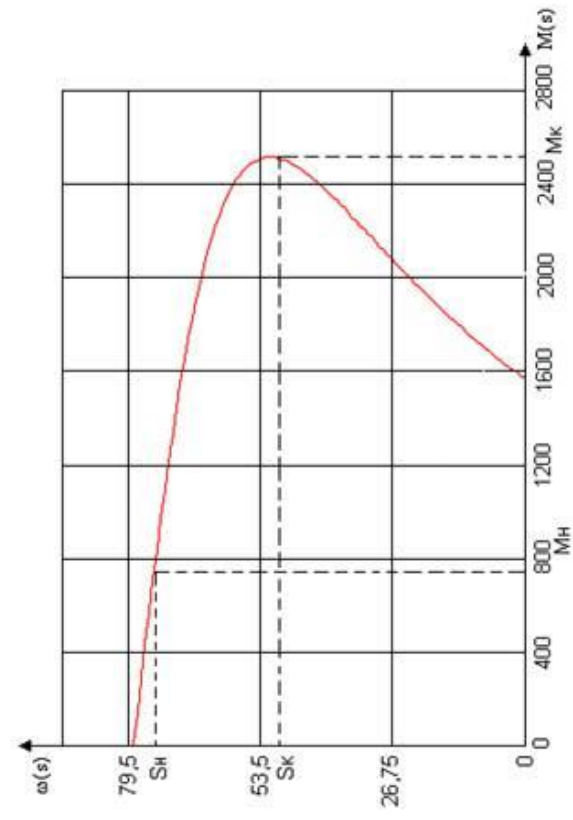
Тахограма залежності кутового прискорення ε від часу t

Техніко-економічне обґрунтування вибору системи ЕП

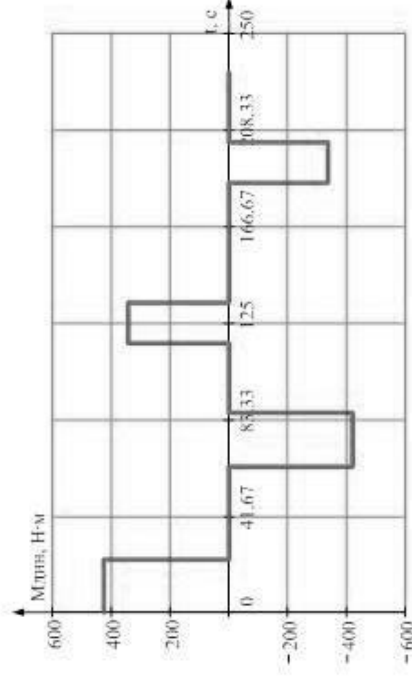
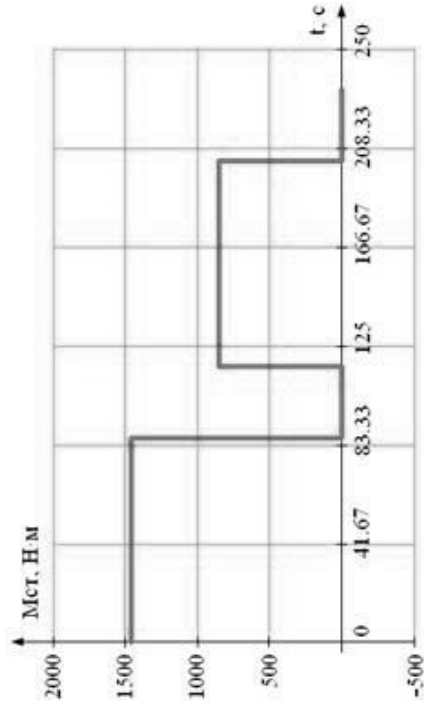
Система ЕП Показники	ШП- ДПС	РКСК- ДПС	ПЧ-АД	ТРН-АД
Вартість двигуна, грн	420000	420000	250000	250000
Вартість САК, грн	213000	253000	221000	238650
Капітальні затрати, грн	633000	673000	471000	488650
Річні капітальні затрати, грн	170910	181710	127170	131940
Експлуатаційні затрати, грн	156000	156000	156000	156000
Додаткові витрати, грн	30856	30856	30856	30856
Приведені витрати, грн	635470	646270	591730	596590
ВСЬОГО, грн	96847	91927	862730	885240

Параметри вибраного двигуна та його механічна характеристика

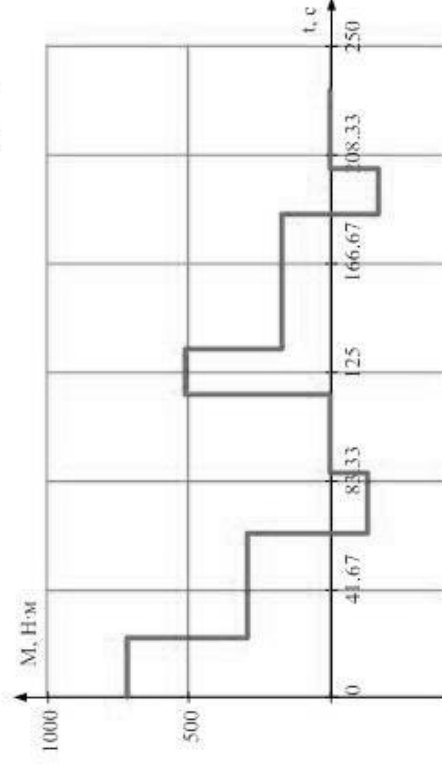
Тип двигуна	A 280S4
Потужність $P_{\text{ном}}$, кВт	110
ККД, %	94
$\cos\varphi$	0,82
Номінальна напруга, В	220/380
Маса, кг	1175
Максимальний момент M_{max} , Н·м	2600
Фазна напруга ротора $U_{2\text{ф}}$, В	248
Струм ротора I_2 , А	154
Струм статора I_1 , А	147
Кількість обертів $n_{\text{ном}}$, об/хв	750
Момент інерції $J_{\text{об}}$, кг·м ²	5,25
Номінальний момент $M_{\text{ном}}$, Н·м	1500,8



Діаграми навантаження двигуна



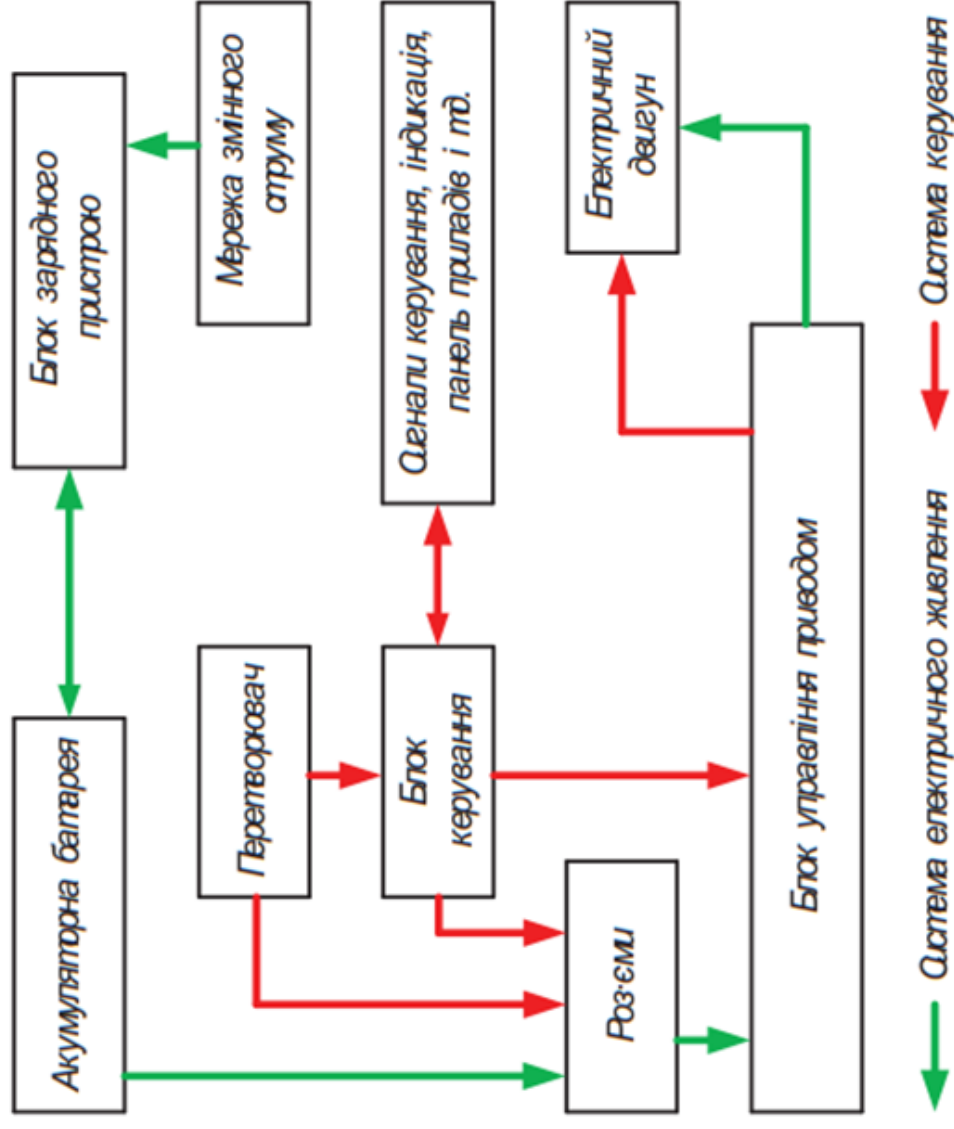
Діаграма статичного навантаження



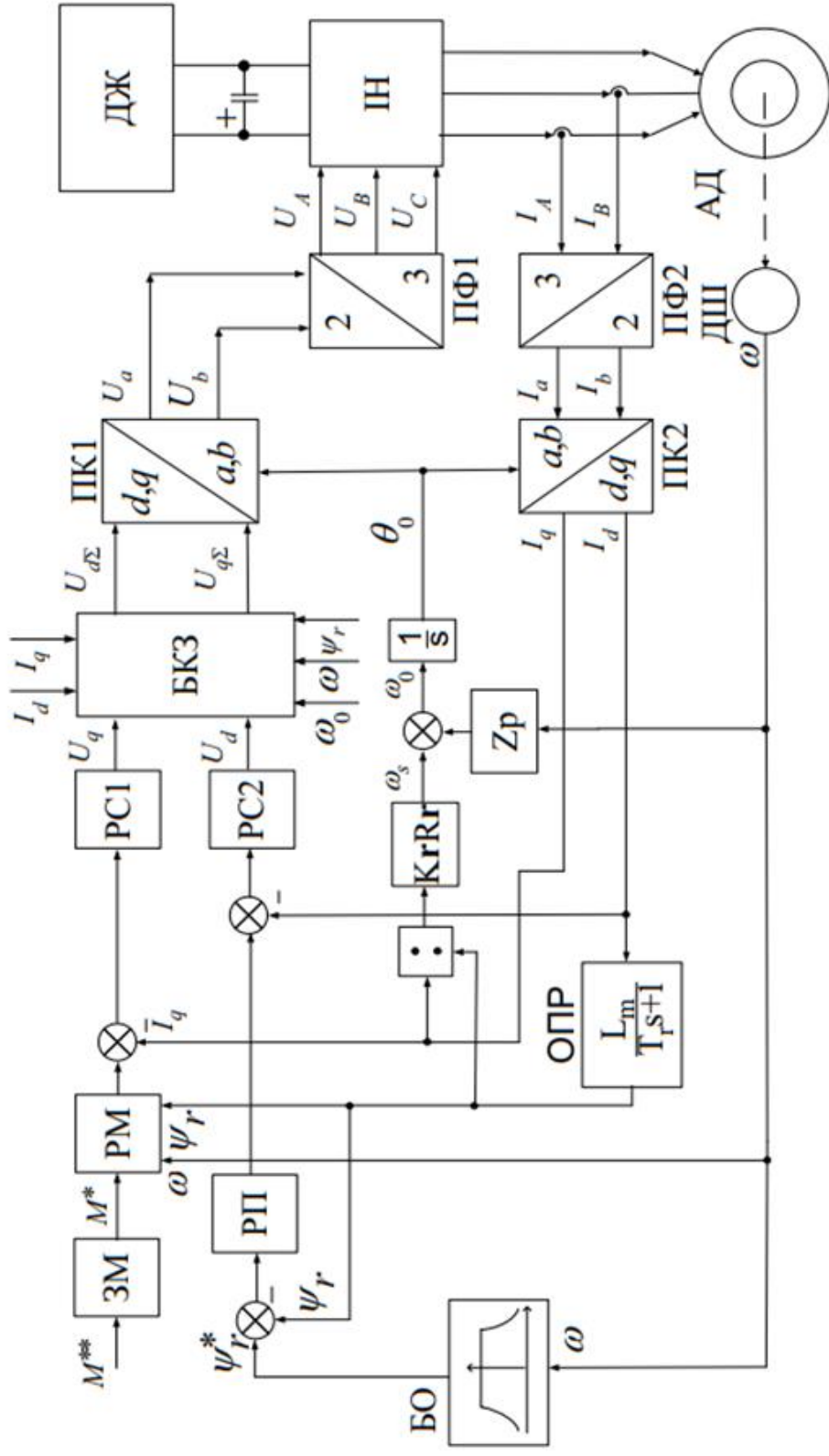
Діаграма динамічного навантаження

Діаграма сумарного навантаження

Структурна схема системи електропривода



Функціональна схема системи електропривода



Зовнішній вигляд тягового перетворювача



Структура силового перетворювача



Зовнішній вигляд

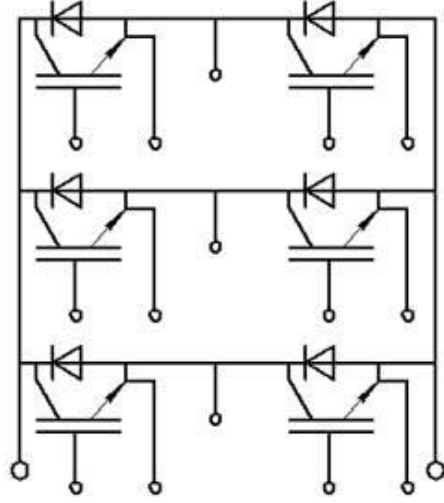
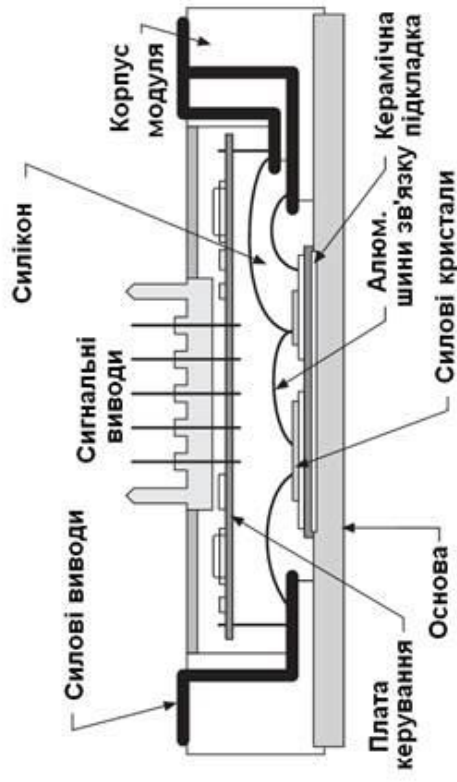
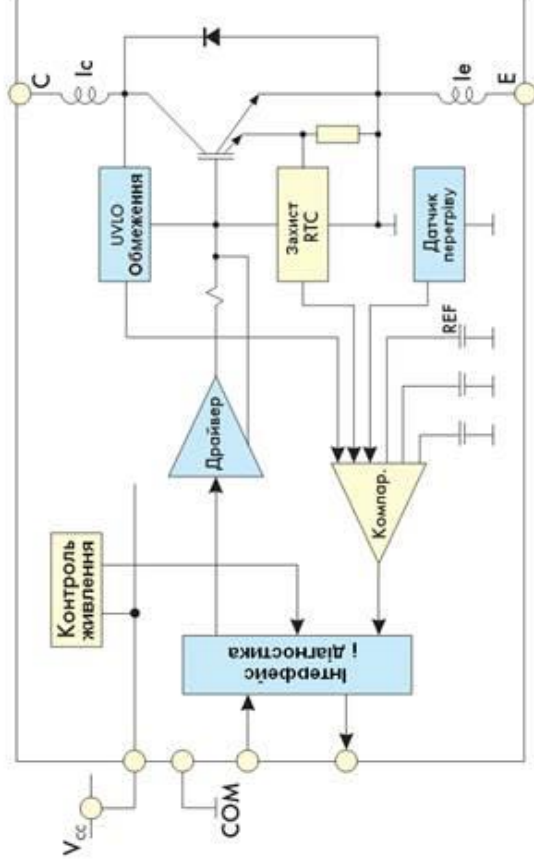


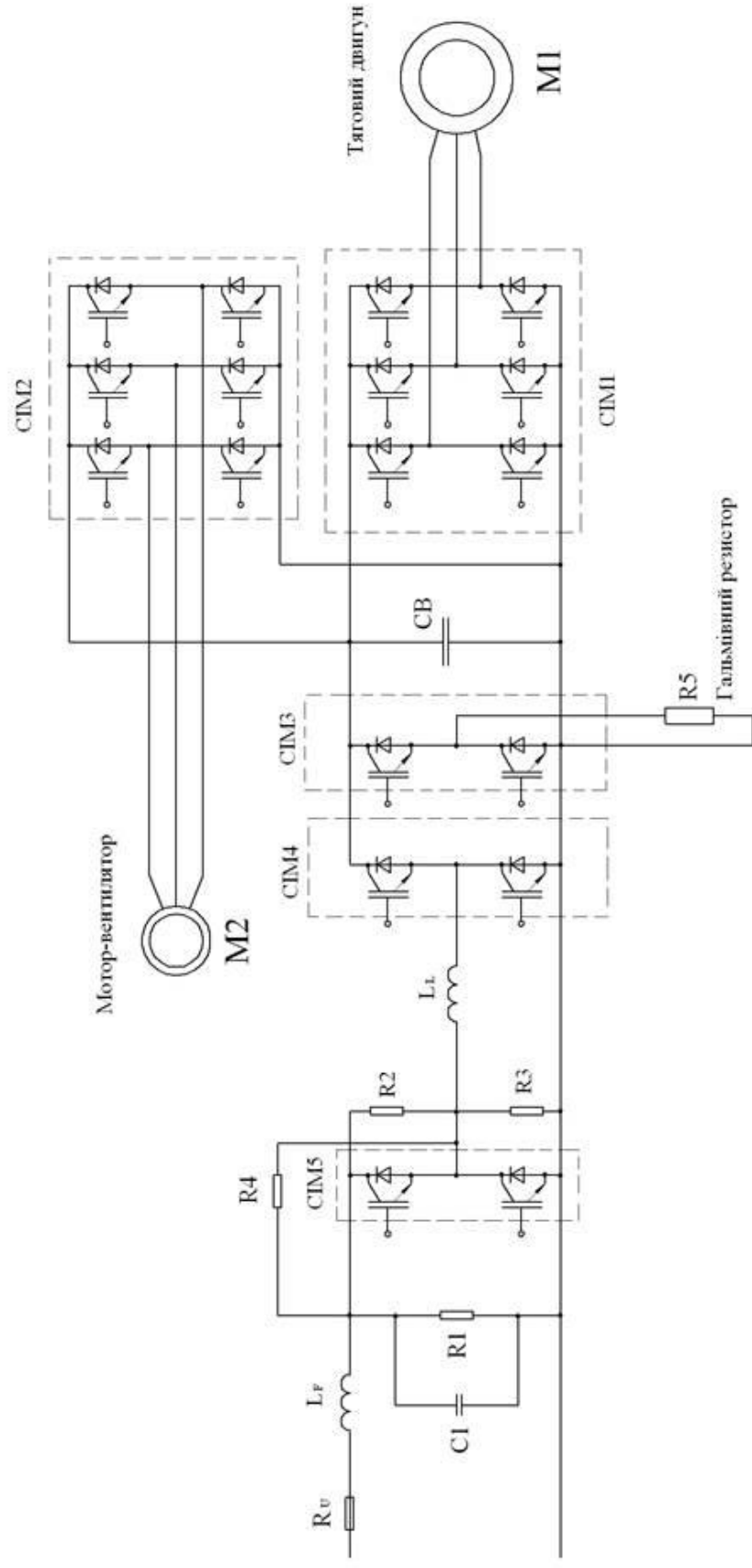
Схема виконання



Структурна схема інтелектуального модуля

Принципова електрична схема системи електроприводу

15



Результати моделювання та дослідження системи електропривода на стійкість і якість

16

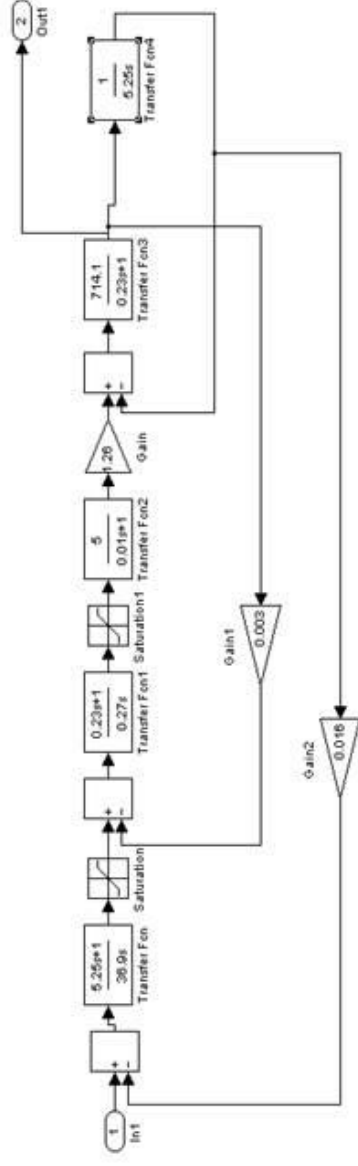
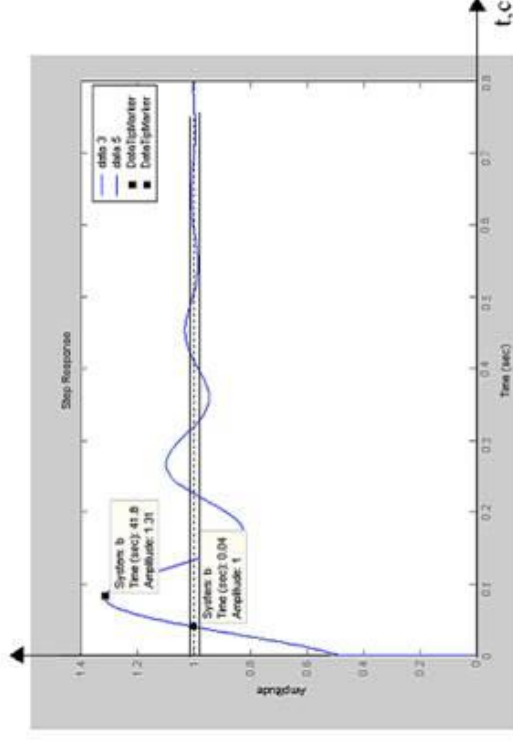
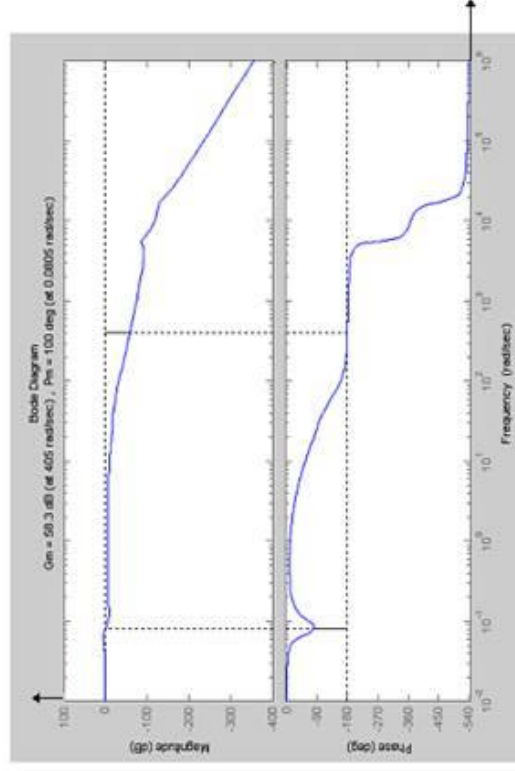


Схема моделювання системи електроприводу



Перехідна характеристика

Характеристика ЛАЧХ і ЛФЧХ по збурювальній дії

Висновки

- В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було проаналізовано роботу електропривода та системи керування тяговим приводом електромобіля, і обрано систему ПЧ-АД з векторним керуванням.
- Для даної системи електроприводу обрано двигун на основі розрахованої потужності.
- Перевірено обраний двигун за здатністю перевантаження.
- Побудовано природну механічну характеристику приводного двигуна.
- Система автоматичного керування тяговим електродвигуном реалізована у вигляді інвертора на базі інтелектуального силового модуля з вбудованими драйверами. Система включає чотири силові модулі різних типів, які забезпечують запуск, регулювання швидкості, реверс, рекуперацію гальмування.
- Проведено моделювання обраної системи, в результаті чого можна зробити висновок про адекватність поведінки системи реальним фізичним та електромеханічним процесам.
- Здійснено дослідження системи електроприводу на стійкість та якість.
- Розроблено структурну, функціональну та принципову схему системи електроприводу.
- Перевірено правильність проведених розрахунків шляхом комп'ютерного моделювання в ГПП Matlab.

Опубліковано тези доповіді за результатами міжнародної конференції

PORTABLE DIAGNOSTIC SYSTEM OF THE ELECTROMECHANICAL COMPLEX OF THE ELECTRIC CAR

Zhukov Oleksii
PhD, docent
Lubianskiy Vasyl
Student
Vinnytsia National Technical University,
Vinnytsia, Ukraine

Introductions. Today, electric cars are being actively introduced in the world. Such a rapid increase in their share in the transport industry requires the development of the appropriate infrastructure. The relevance of the work consists in providing easy monitoring of the technical condition of the electromechanical part of the electric car and performing diagnostics of the machine system before starting operation or, for



ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Підвищення енергоефективності тягового електроприводу електромобіля»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-23м

Науковий керівник: к.т.н., доц. Жуков О.А.
(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності Turnitin

Оригінальність	82 %
Загальна схожість	18 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☐ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

□ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор  Лубянський В.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Особа, відповідальна за перевірку  Надточ Д.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Експерт _____
(за потреби) (підпис) (прізвище, ініціали, посада)

08-24.МКР.007.00.000

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення енергоефективності тягового електроприводу електромобіля	Літ.	Маса	Висота
Розробив:	Лубянський В.В.			19.02.24				
Перевірив	Жуков О.А.			19.02.24				
Т. контр.								
Рецензент	Баденко			19.02.24		Аркуш	Розмір	
Норм.кон.	Жуков О.А.			19.02.24				
Затверд.	Мошноріз М.М.			19.02.24				

ВНТУ, гр. ЕТН-23