

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ,
ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ
ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ В МІСЬКОМУ ЦИКЛІ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач: Дмитро ГАГАРІН
гр. ЕТ 2022-1

Керівник: Ольга БАБІЧЕВА
доцент, к.т.н.


Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра електричного транспорту
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 Микола ХВОРОСТ
_____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Гагарін Дмитро Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ
ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ В МІСЬКОМУ ЦИКЛІ**
кваліфікаційної роботи Бабічева Ольга Федорівна, доцент, к.т.н.

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

затверджені наказом університету від 22.05.2026 №440-03

2. Строк подання бакалаврської кваліфікаційної роботи 10.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської роботи Матеріали переддипломної практики, дані по надійності та працездатності основних вузлів електротранспорту, літературні джерела з експлуатації, обслуговуванню та ремонту електротранспорту.

4. Зміст бакалаврської кваліфікаційної роботи :

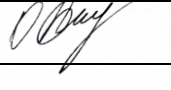


1. Аналіз стану питання щодо оптимізації енергоспоживання електромобілів.
2. Розробка технічного завдання та структури алгоритму енергоощадного керування електромобілем.

3. Математичне моделювання та оцінка ефективності алгоритму оптимізації енергоспоживання електромобіля.

4. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу: Актуальність дослідження, мета та практична значущість. Аналіз джерел і постановка проблеми. Структура алгоритму енергоощадного керування. Математична модель електромобіля. Міський цикл та імітаційна модель. Результати моделювання та оцінка ефективності. Охорона праці при дослідженні силової електроніки електромобіля. Висновки.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи


Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Ольга БАБІЧЕВА, доцент		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інженер		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доцент		

7. Дата видачі завдання 11.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Стан питання</i>	11.05 – 23.05.2026	
2	<i>Розділи 1, 2</i>	18.05 – 30.05.2026	
3	<i>Розділи 3, 4</i>	25.05 – 06.06.2026	
4	<i>Охорона праці та БНС</i>	01.06 – 13.06.2026	
5	<i>Оформлення паперового та електронного варіантів роботи</i>	08.06 – 13.06.2026	
6	<i>Підготовка доповіді та презентації</i>	08.06 – 13.06.2026	

Здобувач




(підпис)

Дмитро ГАГАРІН

(ім'я, прізвище)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи



(підпис)

Ольга БАБІЧЕВА

(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено процес енергоспоживання електромобіля в міському циклі та розроблено алгоритм верхнього рівня для енергоощадного керування тяговим електроприводом.

У першому розділі проаналізовано особливості енергоспоживання електромобілів у міських умовах, основні фактори впливу, існуючі методи оптимізації та підходи до формування їздових циклів.

У другому розділі сформовано технічне завдання, визначено параметри розрахункової моделі, розроблено функціональну структуру системи та логіку алгоритму керування.

У третьому розділі побудовано математичну й програмну модель електромобіля, сформовано міський цикл за реальним GPS-треком маршруту автобуса №83 у місті Харків та виконано моделювання у двох режимах: без алгоритму і з алгоритмом оптимізації. За результатами моделювання питома витрата енергії зменшилась з 14,30 до 13,60 кВт·год/100 км, що відповідає економії близько 4,94 %.

У розділі з охорони праці проаналізовано небезпечні та шкідливі фактори, а також запропоновано організаційно-технічні заходи безпеки.

Результати апробовано: Гагарін Д.В. , Антосик А.О. ДОЦІЛЬНІСТЬ ТА ПРОБЛЕМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ДО МЕРЕЖІ НА РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ // [Матеріали XIX Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «Сталий розвиток міст: поствоєнний період» \(91-ї науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова\) : в 5-и ч. / Ч. 2. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. С. 7-9](#)

Ключові слова: електромобіль, міський цикл, енергоспоживання, рекуперативне гальмування, тяговий електропривод, MATLAB/Simulink, алгоритм оптимізації.

Пояснювальна записка містить:
сторінок – 83, таблиць – 25, рисунків – 22, графічна частина складається з 9 аркушів презентаційного матеріалу.

ЗМІСТ

	Стор.
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЩОДО ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ	9
1.1. Особливості енергоспоживання електромобіля в міському циклі	9
1.2. Фактори, що впливають на енергоспоживання	12
1.3 Огляд існуючих методів оптимізації.....	15
1.4 Аналіз міських їздових циклів	19
1.5 Постановка задачі дослідження.....	23
2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА СТРУКТУРИ АЛГОРИТМУ ЕНЕРГООЩАДНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЕМ.....	26
2.1 Формування технічного завдання	26
2.2 Вибір параметрів електромобіля	28
2.3 Розробка функціональної структури системи	31
2.4 Розробка структурної та електричної принципової схем	34
2.5 Обґрунтування вибору параметрів керування	37
2.6 Розробка алгоритму роботи системи	40
2.7 Вибір методу розрахунку та програмної реалізації.....	43
Висновки до розділу	46
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ. 47	
3.1 Побудова математичної моделі електромобіля	47
3.2 Розрахунок основних вузлів та параметрів	50
3.3 Формування моделі міського циклу.....	59
Висновки до розділу	67
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ	69
4.1 Вступ.....	69
4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів.....	70
4.3 Організаційно-технічні заходи по забезпеченню безпеки.....	73

Висновки по розділу	77
ВИСНОВКИ.....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

ВСТУП

Зростання кількості електромобілів та розвиток міського електротранспорту підвищують вимоги до ефективності використання енергії акумуляторної батареї. У міських умовах транспортний засіб працює переважно в перехідних режимах: розгоні, гальмуванні, вибігу, зупинці та повторному старті. Саме ці режими супроводжуються підвищеними струмовими навантаженнями, піками потужності та втратами, але водночас створюють умови для рекуперації енергії.

Проблема енергозбереження в електромобілі не може розв'язуватися лише примусовим обмеженням швидкості або динаміки, оскільки автомобіль повинен зберігати прогнозовану реакцію на дії водія. Тому **доцільним** є розроблення алгоритму верхнього рівня, який аналізує режим руху, дії водія, стан батареї та фізичні обмеження тягової системи, а потім формує енергоощадне, але безпечне керуюче завдання для електропривода.

Метою роботи є розробка та розрахункова перевірка алгоритму оптимізації енергоспоживання електромобіля в міському циклі з урахуванням параметрів руху, дій водія, стану батареї та можливостей рекуперативного гальмування.

Об'єктом дослідження є процес енергоспоживання електромобіля під час руху в міському циклі.

Предметом дослідження є алгоритм верхнього рівня для енергоощадного керування тяговим електроприводом електромобіля.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі **завдання**:

1. Проаналізувати особливості енергоспоживання електромобіля в міському циклі, основні фактори впливу та існуючі методи оптимізації енергоспоживання.
2. Обґрунтувати вибір параметрів електромобіля та сформулювати технічне завдання на розробку алгоритму енергоощадного керування тяговим електроприводом.

3. Розробити функціональну структуру системи та логіку роботи алгоритму оптимізації енергоспоживання в режимах розгону, сталого руху, вибігу, гальмування та зупинки.
4. Побудувати математичну модель електромобіля з урахуванням сил опору руху, тягового моменту, потужності батареї, стану заряду та рекуперативного гальмування.
5. Сформувати модель міського циклу на основі реального GPS-треку, реалізувати алгоритм у розрахунковій моделі та виконати імітаційне моделювання.
6. Порівняти базовий та оптимізований режими керування за показниками енергоспоживання, пікової потужності, рекуперації, стану заряду акумуляторної батареї, а також проаналізувати питання охорони праці й електробезпеки.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання запропонованого підходу для попередньої оцінки алгоритмів енергоощадного керування електромобілем без проведення дорогого натурального експерименту.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЩОДО ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

1.1. Особливості енергоспоживання електромобіля в міському циклі

Енергоспоживання електромобіля у міському циклі формується під впливом механічних, електричних та експлуатаційних чинників. На відміну від руху з відносно сталою швидкістю, міський режим характеризується частими розгонами, гальмуваннями, зупинками на перехрестях, рухом у транспортному потоці та повторними стартами. Тому електромобіль значну частину часу працює не в сталому, а в перехідному режимі.

Під час розгону енергія акумуляторної батареї витрачається на подолання опору коченню, аеродинамічного опору та збільшення кінетичної енергії автомобіля. Чим більша маса транспортного засобу та інтенсивніше прискорення, тим більша потужність потрібна тяговому електродвигуну. Під час гальмування частина цієї енергії може втрачатися у вигляді тепла або частково повертатися до акумуляторної батареї завдяки рекуперативному гальмуванню.

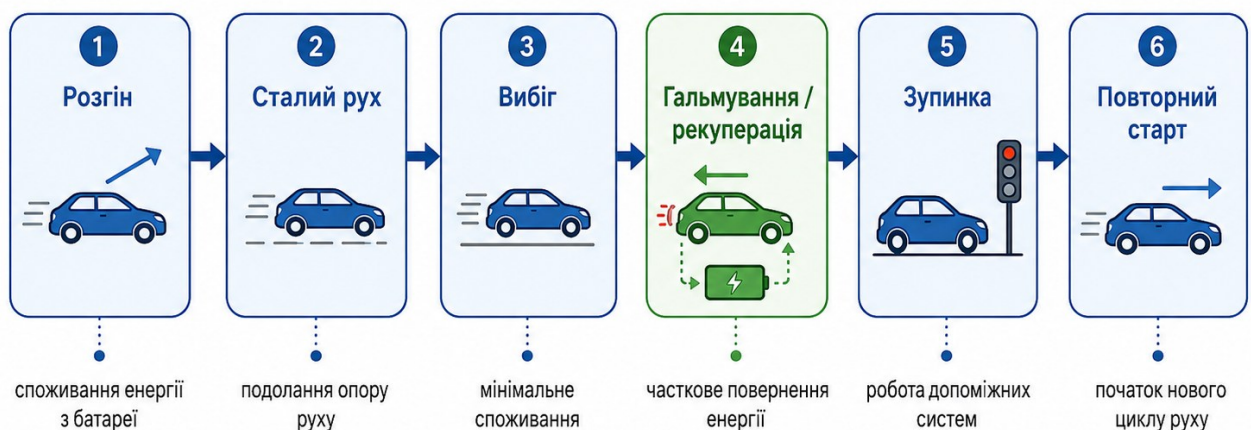


Рисунок 1.1. – Характерні режими руху електромобіля в міському циклі

Міський цикл має подвійний енергетичний характер. З одного боку, часті розгони збільшують витрати енергії, оскільки тяговий привід багаторазово працює в режимах підвищеного навантаження. З іншого боку, часті гальмування

створюють умови для рекуперації. Тому ефективність руху в місті залежить не лише від конструктивних параметрів електромобіля, а й від того, як система керування розподіляє тяговий і гальмівний моменти.

У стандартизованих підходах до оцінювання енергоспоживання враховується відмінність між міським, змішаним та швидкісним режимами руху. Процедура WLTP використовує визначені профілі швидкості для оцінювання енергетичних та екологічних показників легкових автомобілів [1]. У практиці ЕРА для електромобілів застосовуються окремі міські й шосейні цикли з урахуванням реальних факторів експлуатації, зокрема температури, роботи кліматичних систем та стилю керування [2].

Важливим фактором у міському циклі є маса автомобіля, оскільки кожен старт після зупинки потребує повторного витрачання енергії на прискорення всієї маси транспортного засобу. Аеродинамічний опір у місті зазвичай менший, ніж на трасі, через нижчі швидкості, однак повністю ігнорувати його не можна. Опір коченню, навпаки, залишається суттєвим у широкому діапазоні швидкостей і залежить від шин, маси, стану дороги та тиску в колесах.

Окрему роль відіграє тяговий електропривід. Електродвигун, інвертор, акумуляторна батарея та передавальні елементи мають власні втрати, які залежать від струму, моменту, частоти обертання та режиму роботи. У сучасних дослідженнях енергоспоживання електромобіля розглядається як результат взаємодії механічної моделі руху й електричної моделі силової установки [3]. Це важливо для даної роботи, оскільки алгоритм оптимізації має формувати керуючі завдання в межах фізичних можливостей приводу.

Під час розгону електропривід перетворює електричну енергію батареї на механічну енергію руху. Різке прискорення потребує більшої миттєвої потужності, збільшує струмове навантаження на батарею та може переводити електродвигун у менш ефективну область роботи. Тому енергозбереження має полягати не у примусовому зменшенні швидкості, а в раціональному формуванні тягового моменту відповідно до запиту водія та умов руху.

Під час гальмування електродвигун може працювати в генераторному режимі, повертаючи частину кінетичної енергії до накопичувача. Рекуперація особливо важлива в місті, де гальмування повторюються багато разів. Водночас її можливості обмежуються станом батареї, допустимим зарядним струмом, швидкістю руху, необхідним гальмівним зусиллям та вимогами безпеки [4].



Рисунок 1.2 – Енергетичні потоки електромобіля під час тяги та рекуперативного гальмування

Значний вплив має також водій. Ступінь натискання педалі акселератора, характер відпускання педалі, інтенсивність гальмування та частота зміни режимів визначають, наскільки різко електромобіль переходить між тяговим, вибіговим і гальмівним режимами. Алгоритм енергозбереження не повинен жорстко нав'язувати водієві певний стиль руху, оскільки це може погіршити прогнозованість керування та безпеку.

Доцільним є підхід, за якого система аналізує поточні дії водія та формує енергетично раціональний відгук тягового приводу. Якщо після початку розгону

водій додатково натискає акселератор, алгоритм має надати пріоритет динаміці. Якщо положення педалі стабільне або зменшується, система може забезпечити плавніше наростання моменту та зменшити пікові витрати енергії.

Отже, енергоспоживання електромобіля в міському циклі визначається повторюваними перехідними режимами, можливостями рекуперації, характеристиками тягового електропривода, силами опору руху та діями водія. Для подальшої розробки алгоритму об'єктом оптимізації має бути не зменшення швидкості як таке, а формування доцільних керуючих завдань для приводу в режимах розгону, сталого руху та гальмування.

1.2. Фактори, що впливають на енергоспоживання

Енергоспоживання електромобіля у міському циклі визначається сукупністю чинників, пов'язаних із конструкцією автомобіля, умовами експлуатації, дорожньою ситуацією та способом керування тяговим приводом. Для розробки алгоритму важливо розмежувати фактори, які можуть бути змінені алгоритмом, фактори, що лише враховуються, та зовнішні збурення.

У сучасних дослідженнях фактори енергоспоживання зазвичай групують за кількома напрямками: параметри транспортного засобу, динаміка руху, дорожньо-транспортні умови та зовнішнє середовище [5]. Також підкреслюється вплив зовнішніх умов, втрат, властивостей автомобіля, стилю керування та методів зниження витрат енергії [6].

Першу групу становлять конструктивні фактори: маса автомобіля, коефіцієнт аеродинамічного опору, площа лобової поверхні, тип шин, коефіцієнт опору коченню, передаточне число редуктора, характеристики електродвигуна, інвертора, акумуляторної батареї та допоміжних систем. Вони визначають фізичну основу енергоспоживання і необхідну силу тяги для руху в заданих умовах.



Рисунок 1.3 – Основні групи факторів, що впливають на енергоспоживання електромобіля

Маса автомобіля особливо важлива для міського циклу, оскільки під час кожного розгону частина енергії витрачається на збільшення кінетичної енергії транспортного засобу. У режимі частих зупинок і стартів цей вплив посилюється. У межах даної роботи маса не є керованим параметром, але має враховуватися під час розрахунку тягового моменту та енергетичних витрат.

Аеродинамічний опір залежить від форми кузова, площі лобової поверхні, густини повітря і квадрата швидкості. У міському циклі його вплив менший, ніж на трасі, проте на ділянках із підвищеною швидкістю він залишається значущим. Опір коченню залежить від маси автомобіля, шин, тиску в них, температури та стану дорожнього покриття. У практичній моделі його доцільно враховувати як складову рівняння балансу сил руху.

Окреме значення мають параметри тягового електропривода. Електродвигун, інвертор і батарея мають власні втрати, а їх ефективність

залежить від моменту, частоти обертання, струму, напруги та режиму роботи. Тому одна й та сама вимога до прискорення може бути реалізована з різними енергетичними наслідками. Саме це створює простір для алгоритмічного впливу.

Друга група – експлуатаційні фактори: дорожні умови, профіль маршруту, інтенсивність руху, кількість зупинок, температура навколишнього середовища, завантаження автомобіля, використання кліматичних систем і допоміжних споживачів. Більшість із них не підлягає прямому керуванню, тому в роботі вони розглядаються як вхідні умови або збурення.

Температурні умови впливають на стан акумуляторної батареї, роботу системи терморегулювання та споживання енергії на опалення або кондиціювання. У звітах Міністерства енергетики США зазначається, що холодна погода змінює запас ходу та енергоспоживання батарейних електромобілів через роботу HVAC-систем і властивості акумуляторів [7]. Допоміжні споживачі також впливають на енергетичний баланс, особливо в місті, де середня швидкість невелика, а тривалість поїздки може збільшуватися через затори.

Третя група пов'язана з режимом руху та діями водія. Положення педалі акселератора, інтенсивність розгону, характер гальмування та частота переходів між режимами безпосередньо впливають на миттєву потужність і втрати. Плавний стиль керування характеризується невеликими прискореннями та прогнозованим гальмуванням, тоді як динамічний стиль супроводжується різкими запитами тяги, високими піковими потужностями та інтенсивними гальмуваннями.

Для алгоритму важливо не примушувати водія до певного стилю, а адаптувати відгук приводу до його поточного запиту. Якщо після початку розгону водій додатково натискає акселератор, це може свідчити про потребу в більшій динаміці. Якщо положення педалі стабільне, поточний відгук можна вважати прийнятним. Якщо водій відпускає педаль, є можливість зменшити тяговий момент і посилити енергозберігаючий режим.

Важливим фактором є рекуперативне гальмування. Його ефективність залежить від швидкості автомобіля, необхідного гальмівного зусилля, стану батареї, допустимого зарядного струму та алгоритму розподілу гальмівного моменту між електродвигуном і механічною гальмівною системою. Огляди сучасних систем рекуперативного гальмування підкреслюють, що ефективність повернення енергії визначається не лише конструкцією, а й стратегією керування [4].

Четверту групу становлять алгоритмічні фактори: спосіб перетворення запиту водія у завдання тягового моменту, обмеження пікової потужності, швидкість наростання моменту, вибір рівня рекуперації, контроль стану батареї та адаптація до поведінки водія. Саме ця група є основною для даної роботи, оскільки дозволяє зменшувати енергоспоживання без зміни конструкції автомобіля.

Таким чином, фактори енергоспоживання можна поділити на конструктивні, експлуатаційні, поведінкові та алгоритмічні. Конструктивні фактори задають фізичні межі, експлуатаційні визначають умови руху, поведінкові відображають дії водія, а алгоритмічні формують спосіб керування приводом. Для подальшої розробки найбільше значення мають швидкість, прискорення, положення педалей, оцінка навантаження, стан батареї, тяговий момент і режим гальмування.

1.3 Огляд існуючих методів оптимізації

Оптимізація енергоспоживання електромобіля є комплексною задачею, оскільки витрати енергії залежать від параметрів батареї, двигуна, маси транспортного засобу, режимів руху, дій водія, дорожньої ситуації та логіки керування тяговим приводом. У сучасних дослідженнях зазначається, що збільшення запасу ходу досягається не одним універсальним методом, а

поєднанням конструктивних, експлуатаційних та алгоритмічних рішень [8]. Для даної роботи найбільший інтерес становлять алгоритмічні методи.

Існуючі підходи можна поділити на кілька груп: рекомендації економного водіння, Есо-режими, засновані на правилах алгоритми, адаптивні стратегії, методи оптимального та прогнозного керування, алгоритми керування рекуперативним гальмуванням, а також методи нечіткої логіки, машинного навчання та нейромереж. Кожна група має власні переваги та обмеження.

Найпростішим напрямом є економне водіння та Есо-режими. Вони спрямовані на зменшення різких прискорень, підтримання помірної швидкості, завчасне уповільнення, використання вибігу та рекуперації. Перевагою є простота реалізації, але недоліком – залежність від поведінки водія та дорожньої ситуації. У місті пряме нав'язування економного стилю може знижувати зручність і прогнозованість керування.

Більш технічно визначеним є заснований на правилах підхід, тобто керування за заздалегідь заданими правилами. Наприклад, при невеликому запиті на прискорення може застосовуватися економний режим, при високому запиті – динамічний режим, а при гальмуванні та можливості приймання заряду батареєю – рекуперація. Перевагою таких алгоритмів є простота, прозорість і придатність до роботи в реальному часі.

Водночас зановані на правилах алгоритми слабо враховують зміну умов руху та індивідуальні особливості водія. Фіксовані пороги можуть бути ефективними в одному сценарії та недостатніми в іншому. Однакове положення педалі акселератора може означати різний намір залежно від дорожньої ситуації, тому для міського циклу бажано доповнювати базову логіку адаптацією.

Окремим напрямом є використання карт ефективності електродвигуна та інвертора. Система керування враховує, що привід має зони більшого й меншого ККД залежно від частоти обертання, моменту та навантаження. Метою є уникнення явно нераціональних режимів, пов'язаних із надмірними піками моменту або струму. Навіть за фіксованого передавального числа алгоритм може впливати на форму наростання моменту, пікову потужність і рівень рекуперації.

Адаптивні методи є розвитком занованої на правилах логіки. Їхні параметри змінюються залежно від режиму руху, стану батареї, інтенсивності розгонів і гальмувань або стилю водія. У дослідженнях енергоменеджменту підкреслюється важливість стратегій, здатних змінювати параметри відповідно до їздових циклів і реальних умов руху [9]. Для міста це особливо важливо через часті переходи між тягою, вибігом, гальмуванням і зупинкою.

Для даної роботи перспективним є адаптивний підхід, що поєднує короткочасний і довготривалий аналіз поведінки водія. Короткочасний аналіз дозволяє оцінити реакцію водія після натискання педалі акселератора або гальма. Довготривалий аналіз формує базові налаштування відповідно до типової манери керування конкретного водія.

Методи оптимального керування та динамічного програмування дозволяють знаходити енергетично вигідну траєкторію або стратегію керування за заданими обмеженнями. Вони можуть мати високий теоретичний ефект, але часто потребують повного їздового циклу або маршруту та значних обчислювальних ресурсів. У роботах з адаптивного енергоменеджменту динамічне програмування часто використовується як еталон або засіб оптимізації правил [9].

Прогнозне керування, зокрема Model Predictive Control, використовує модель об'єкта та прогноз майбутнього руху. Воно може враховувати швидкість, рельєф, обмеження, стан батареї та можливості рекуперації. Перевагою є врахування майбутніх подій, а недоліком – потреба у достовірних прогнозних даних, складність моделі та підвищені вимоги до обчислень.

Сучасні роботи з енергоефективного керування показують, що врахування переваг водія дозволяє поєднати енергоефективність із комфортом. В одному з досліджень оптимальне керування електромобілем поєднувало енергетичну ціль із моделлю переваг водія, включаючи бажану швидкість, плавність прискорення та комфортні дистанції [10]. Це близьке до ідеї даної роботи, де алгоритм має адаптуватися до поточних дій водія, а не жорстко нав'язувати економний режим.

Важливу групу становлять алгоритми керування рекуперативним гальмуванням. У реальних системах потрібно визначати частку електричного гальмування, момент підключення механічних гальм, обмеження за SOC, зарядним струмом, температурою та безпекою. Огляди систем гальмівного енергоменеджменту підкреслюють, що електричне та фрикційне гальмування можуть працювати в інтегрованій комбіновану систему гальмування, а модуль розподілу моменту визначає сценарій гальмування [4].



Рисунок 1.4 – Класифікація методів оптимізації енергоспоживання електромобіля

Для міського циклу рекуперативне гальмування має особливе значення через часті уповільнення та зупинки. Проте максимізація рекуперації не може бути єдиною метою, оскільки надмірне уповільнення може бути неприродним для водія. Ефективний алгоритм має керувати рівнем рекуперації з урахуванням запиту водія, стану батареї та обмежень приводу.

Методи нечіткої логіки, нейронних мереж, генетичних алгоритмів і навчання з підкріпленням застосовуються для складніших задач енергоменеджменту. Вони здатні працювати з нелінійними залежностями,

неповними даними та складними сценаріями руху [8]. Водночас такі методи потребують навчальних даних, перевірки, налаштування та мають нижчу прозорість. Для бакалаврської роботи повноцінне застосування AI/ML-методів є надмірним, хоча окремі ідеї адаптації можуть бути використані.

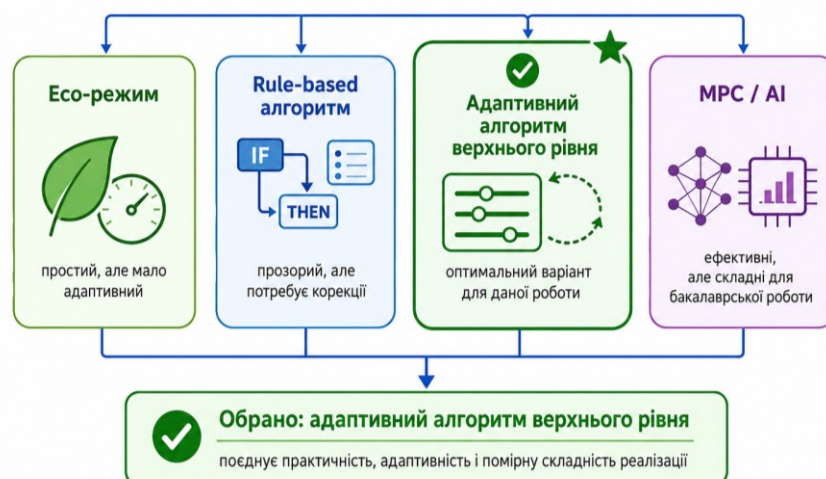


Рисунок 1.5 – Обґрунтування вибору адаптивного алгоритму верхнього рівня

Отже, для оптимізації енергоспоживання електромобіля в міському циклі доцільним є проміжний варіант між простим Есо-режимом і складним прогнозним керуванням. Найбільш обґрунтованим є алгоритм верхнього рівня з заснований на правилах основою та адаптивною корекцією, який використовує доступні сигнали автомобіля, аналізує режим руху, враховує реакцію водія та формує енергетично доцільне завдання для тягового приводу.

1.4 Аналіз міських їздових циклів

Для оцінювання енергоспоживання електромобіля необхідно мати опис режиму руху у вигляді залежності швидкості від часу. Такий опис називають їздовим циклом. Він відображає послідовність розгонів, руху з відносно сталою швидкістю, уповільнень і зупинок. Саме за ним розраховуються тягове зусилля,

потужність на колесах, енергія, спожита з батареї, та можлива частка рекуперованої енергії.

У практиці випробувань і моделювання застосовують стандартизовані та реальні їздові цикли. Стандартизовані цикли забезпечують порівнянність результатів у контрольованих умовах, а реальні будуються на основі фактичного руху автомобілів у певному місті або на маршруті. Для бакалаврської роботи доцільно використовувати ці підходи як різні рівні деталізації: стандартний цикл дає повторюваність, а спрощений модельний цикл дозволяє зосередитися на роботі запропонованого алгоритму.

Одним із поширених стандартних підходів є WLTP, закріплений у Правилах ООН № 154 [1]. Для даної роботи важливим є не сертифікаційний аспект WLTP, а сама ідея подання руху у вигляді послідовності фаз із різними швидкісними та динамічними характеристиками. WLTC у межах WLTP містить фази Low, Medium, High та Extra High [1]. Найближчою до міського режиму є фаза Low, оскільки вона включає нижчі швидкості, часті зміни швидкості та зупинки.

Іншим поширеним підходом є використання динамометричних графіків EPA: Federal Test Procedure, Highway Fuel Economy Test, New York City Cycle та US06 [2]. Для міської тематики особливо важливим є New York City Cycle, який характеризується низькошвидкісним рухом із частими зупинками. Це відповідає сутності міського режиму, де автомобіль часто працює у перехідних режимах.

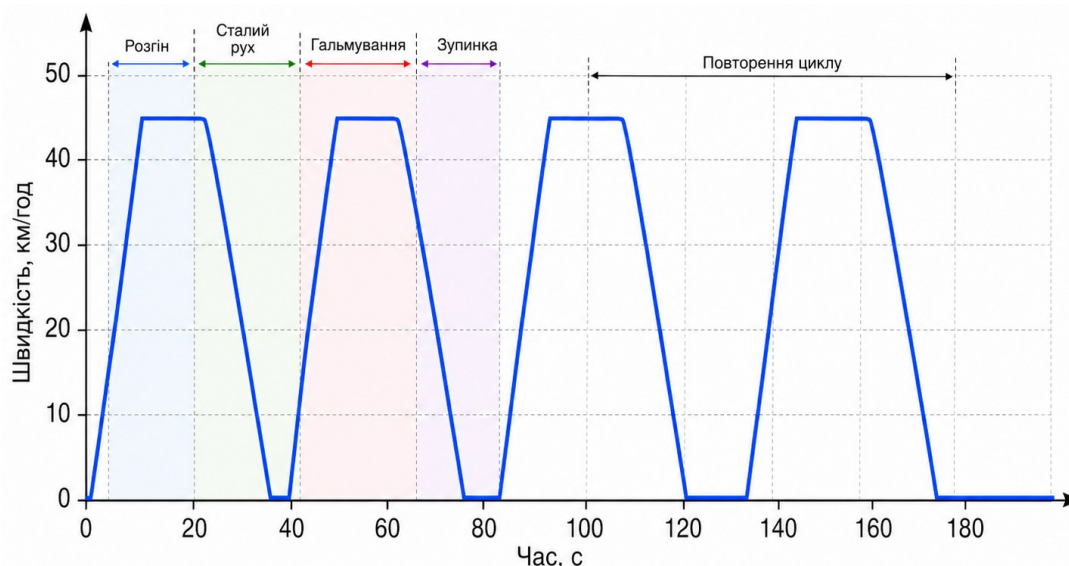
Міський цикл відрізняється від трасового збільшеною кількістю розгонів і гальмувань. Для електромобіля це має подвійне значення: кожен розгін потребує енергії для збільшення кінетичної енергії, а кожне гальмування створює можливість рекуперації. Тому енергоспоживання залежить не тільки від середньої швидкості, а й від структури циклу: кількості зупинок, тривалості розгонів, пікових прискорень, інтенсивності гальмування та можливостей повернення енергії.

Однакова середня швидкість не означає однакове енергоспоживання. Два цикли можуть мати близьку середню швидкість, але суттєво різнитися за

кількістю зупинок, піковими прискореннями та тривалістю простою. Часті короткі розгони можуть бути енерговитратнішими, ніж рівномірний рух із тією самою середньою швидкістю. Навіть за наявності рекуперації повернути всю кінетичну енергію неможливо через втрати у приводі, батареї, шинах і гальмівній системі.

У наукових дослідженнях зазначається, що стандартні цикли не завжди точно відображають реальні умови руху електромобілів. Наприклад, Брейді та Махоні[11] розробили міський їздовий цикл для оцінювання енергетичної економічності електромобілів на основі даних фактичного руху протягом шести місяців. Це показує важливість урахування реальної динаміки міського руху.

Водночас для розробки алгоритму верхнього рівня не завжди потрібне відтворення повного реального циклу з великою кількістю випадкових факторів. Якщо метою є порівняння базового режиму та режиму з алгоритмом, доцільно застосувати спрощений модельний міський цикл. Він може містити повторювану послідовність: розгін від нуля до заданої швидкості, короткий сталий рух, гальмування з рекуперацією та зупинку.



Модельний міський цикл включає розгін, короткий рух зі сталою швидкістю, гальмування, зупинку та повторення послідовності.

Рисунок 1.6 – Узагальнений профіль швидкості електромобіля в модельному міському циклі

Такий цикл дозволяє чітко відокремити основні режими роботи приводу: тягу, сталий рух, вибіг, рекуперативне гальмування та зупинку. Він також дає змогу порівняти енергоспоживання до і після застосування алгоритму за однакових умов та оцінити вплив маси автомобіля, інтенсивності прискорення, рівня рекуперації, обмеження пікової потужності й реакції водія.

У даній роботі їздовий цикл не розглядається як об'єкт примусового керування. Алгоритм не повинен нав'язувати водієві задану траєкторію швидкості, оскільки в реальних умовах швидкість визначається дорожньою обстановкою, світлофорами, транспортним потоком, пішоходами та станом покриття. Цикл у моделі виконує роль зовнішнього навантаження, за яким перевіряється робота алгоритму.

Під час вибору циклу необхідно враховувати критерії ефективності: сумарну енергію, енергію рекуперації, пікову потужність, характер зміни тягового моменту, питому витрату енергії та умовний вплив на запас ходу. Надто простий цикл може не показати переваг алгоритму, а надто складний ускладнить пояснення отриманого ефекту. Тому доцільним є помірно спрощений модельний цикл.

Також бажано сформулювати кілька сценаріїв: спокійний міський рух із плавним розгоном, більш динамічний рух із частішими змінами швидкості та режим із повторюваними короткими ділянками розгін-гальмування, характерний для заторів або руху між світлофорами. Порівняння таких сценаріїв дозволить оцінити середній ефект і межі застосування алгоритму.

Міський цикл є зручним середовищем для перевірки рекуперативного гальмування. У трасовому русі гальмування трапляється рідше, а в місті часті зупинки створюють умови для регулярного повернення енергії. Водночас ефективність рекуперації залежить від правильного розподілу гальмівного моменту між електричним і механічним гальмуванням та від здатності батареї приймати зарядний струм.

У сучасних роботах зазначається, що результати оцінювання електромобіля можуть суттєво залежати від обраного циклу. Порівняння NEDC,

WLTC та інших циклів показує різну інтенсивність розгонів, вимоги до потужності та відповідність реальному запасу ходу [5]. Отже, вибір циклу безпосередньо визначає навантаження, у якому перевіряється ефективність алгоритму.

Таким чином, для задачі оптимізації енергоспоживання важливі не лише середня та максимальна швидкість, а й структура зміни швидкості у часі. Кількість розгонів, тривалість гальмувань, зупинки та повторюваність перехідних режимів безпосередньо впливають на витрати енергії та можливості рекуперації. Це дає підстави сформуванню модельний міський цикл для перевірки запропонованого алгоритму.

1.5 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз показав, що енергоспоживання електромобіля в міському циклі залежить не лише від конструктивних параметрів транспортного засобу, а й від характеру руху, дій водія, режимів роботи тягового електропривода та можливостей рекуперативного гальмування. У міських умовах електромобіль часто працює в перехідних режимах: розгону, короткого сталого руху, гальмування, зупинки та повторного старту. Саме ці режими значною мірою визначають витрати енергії та ефективність використання акумуляторної батареї.

З огляду на це доцільним є не примусове обмеження швидкості руху, а розробка алгоритму керування, який адаптує роботу тягового електропривода до поточного режиму руху, дій водія та фізичних обмежень електромобіля. Такий алгоритм має формувати енергоощадні керуючі впливи без погіршення керованості та безпеки руху.

Метою дослідження є розробка алгоритму оптимізації енергоспоживання електромобіля в міському циклі, який забезпечує адаптивне формування

керуючих завдань для тягового електропривода з урахуванням параметрів руху, дій водія, режиму експлуатації та можливостей рекуперативного гальмування.

Об'єктом дослідження є процес енергоспоживання електромобіля в умовах міського циклу руху.

Предметом дослідження є алгоритм верхнього рівня для енергоощадного керування тяговим електроприводом електромобіля з урахуванням режимів руху, дій водія та можливостей рекуперативного гальмування.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати особливості енергоспоживання електромобіля в міському циклі руху.
2. Систематизувати основні фактори, що впливають на витрати енергії електромобіля.
3. Розглянути існуючі методи оптимізації енергоспоживання електромобілів та визначити їх переваги й обмеження.
4. Проаналізувати міські їздові цикли як основу для моделювання режимів руху електромобіля.
5. Визначити вхідні та вихідні параметри алгоритму оптимізації енергоспоживання.
6. Розробити функціональну структуру системи адаптивного керування тяговим електроприводом.
7. Описати логіку короткочасного та довготривалого аналізу дій водія.
8. Побудувати математичну модель руху електромобіля в міському циклі.
9. Реалізувати запропонований алгоритм у розрахунковій моделі.
10. Виконати порівняння базового та оптимізованого режимів керування за показниками енергоспоживання.

Методами дослідження є аналіз науково-технічних джерел, систематизація факторів енергоспоживання, математичне моделювання руху електромобіля, розрахунок сил опору руху та тягової потужності, моделювання міського їздового циклу, а також порівняльна оцінка базового й оптимізованого режимів

керування. Для перевірки алгоритму доцільно використати середовище MATLAB або MATLAB/Simulink.

Критеріями ефективності запропонованого алгоритму є зменшення сумарного енергоспоживання за цикл, зниження пікової потужності, збільшення частки рекуперованої енергії, зменшення різких змін тягового моменту та збереження прийнятної динаміки електромобіля.

Очікуваним результатом роботи є розроблена структура алгоритму оптимізації енергоспоживання електромобіля, визначені його вхідні та вихідні параметри, описана логіка прийняття рішень у режимах розгону, сталого руху та гальмування, а також виконана розрахункова оцінка ефективності алгоритму на модельному міському циклі.

2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА СТРУКТУРИ АЛГОРИТМУ ЕНЕРГООЩАДНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЕМ

2.1 Формування технічного завдання

Після аналізу джерел та постановки задачі дослідження необхідно перейти до інженерного уточнення майбутньої розробки. У цьому розділі технічне завдання розглядається як основа для побудови функціональної структури, математичної моделі та алгоритму енергоощадного керування тяговим електроприводом електромобіля.

У межах роботи розробляється алгоритм верхнього рівня. Він не замінює конструкцію електродвигуна, силового інвертора або низькорівневих контурів регулювання струму. Ці елементи розглядаються як виконавча частина системи, параметри якої задають фізичні межі керування. Основна увага приділяється формуванню бажаного тягового моменту, допустимої швидкості наростання моменту, рівня рекуперативного гальмування та обмеження пікової потужності.

Призначенням алгоритму є зменшення енергоспоживання електромобіля під час руху в міських умовах без примусового нав'язування водієві економного стилю. У міському циклі часто повторюються розгін, короткий сталий рух, гальмування, зупинка та повторний старт, тому найбільший ефект очікується саме від оптимізації перехідних режимів.

Основна ідея технічного завдання полягає в тому, що алгоритм не змінює мету дії водія, а оптимізує спосіб її реалізації через тяговий привід. Якщо водій вимагає прискорення, система повинна забезпечити розгін, але може сформувати момент більш плавно та енергетично раціонально, якщо це не суперечить поточному запиту. Якщо водій посилює натискання педалі, пріоритет зміщується до динаміки; якщо запит стабільний або зменшується, алгоритм може підвищити пріоритет енергозбереження.

Об'єктом, для якого формується технічне завдання, є умовний міський електромобіль з тяговою батареєю, інвертором, електродвигуном, трансмісією,

системою керування та датчиками параметрів руху. Така структура відповідає загальній архітектурі сучасного електромобіля. Для реальних транспортних засобів додатково враховуються вимоги електробезпеки до високовольтної системи, зокрема положення UN Regulation No. 100 [12].

До основних вхідних параметрів алгоритму належать швидкість, прискорення, положення педаль акселератора і гальма, частота обертання двигуна, поточний момент, напруга і струм батареї, стан заряду SOC, температура батареї та електропривода, а також оцінка навантаження автомобіля. Частина цих величин може вимірюватися безпосередньо, а частина оцінюється розрахунково.

Вихідними параметрами алгоритму є керуючі завдання для виконавчого рівня: бажаний тяговий момент, обмеження максимальної потужності, допустима швидкість наростання моменту, заданий рекуперативний момент і ознака пріоритету між динамікою та економією. У такому вигляді алгоритм не втручається в низькорівневе керування, але визначає, які завдання має виконати система приводу.

Основними вимогами до алгоритму є робота в реальному часі, обмежена обчислювальна складність, збереження безпечної та прогнозованої реакції автомобіля, урахування фізичних меж батареї й електропривода, а також придатність до перевірки в розрахунковій моделі. При цьому енергозбереження не може мати пріоритет над безпекою, стійкістю руху або явним запитом водія на інтенсивне гальмування чи прискорення. Підхід функціональної безпеки для автомобільних Е/Е систем загалом регламентується ISO 26262 [13].

Для програмної перевірки алгоритму доцільно використати MATLAB або MATLAB/Simulink. Такі середовища застосовуються для системного моделювання електромобілів, аналізу силової установки, оцінки енергоспоживання та перевірки алгоритмів керування [14].

Таблиця 2.1 – Узагальнені вимоги до алгоритму верхнього рівня

Група вимог	Зміст вимоги	Практичне значення
Функціональність	Формування завдань тягового моменту, рекуперації та обмеження потужності.	Зв'язує інформацію про рух із виконавчим рівнем приводу.
Адаптивність	Урахування короткочасної реакції водія та довготривалої манери керування.	Дозволяє уникнути жорсткого нав'язування економного режиму.
Безпека	Пріоритет дій водія, гальмування і фізичних обмежень над економією.	Запобігає непрогнозованій поведінці автомобіля.
Реальний час	Швидке формування команди без помітної затримки.	Забезпечує прийнятний відгук тягової системи.
Моделювання	Можливість реалізації у MATLAB/Simulink та порівняння з базовим режимом.	Дозволяє кількісно оцінити ефективність алгоритму.

2.2 Вибір параметрів електромобіля

Для подальшого розрахунку необхідно задати вихідні параметри електромобіля, які визначають фізичні межі роботи алгоритму. До них належать маса автомобіля, характеристики тягового приводу, акумуляторної батареї, коліс, трансмісії, а також параметри опору руху.

У роботі доцільно орієнтуватися не на абстрактний транспортний засіб, а на серійний електромобіль як джерело реалістичних числових параметрів. Як розрахункову основу прийнято Tesla Model Y Long Range / Premium RWD, оскільки ця модель належить до поширеного класу батарейних електричних кросоверів і може використовуватися як у міських, так і в змішаних режимах руху.

Частина технічних параметрів Tesla Model Y уточнюється за відкритими базами даних. За даними EV Database для близьких задньопривідних версій наведено корисну ємність батареї близько 75 кВт·год, напругу приблизно 357 В, потужність близько 220 кВт і момент 420 Н·м [15]. EVSpecifications наводить близькі значення маси, потужності та батарейних характеристик для європейської версії [15]. Розбіжності між джерелами пояснюються модельними

роками, ринками та батарейними виконаннями, тому в роботі приймається узгоджений розрахунковий набір параметрів.

Метою такого вибору є не побудова цифрового двійника Tesla Model Y, а отримання реалістичної бази для перевірки алгоритму верхнього рівня. Прийняті параметри можуть бути змінені в моделі, що дозволяє надалі адаптувати алгоритм до іншого електромобіля.

Таблиця 2.2 – Вихідні параметри електромобіля, прийняті для моделювання

Параметр	Прийняте значення	Обґрунтування
Базовий прототип	Tesla Model Y Long Range / Premium RWD	Серійний електромобіль кросоверного класу.
Споряджена маса	1900 кг	Округлено за відкритими даними для Model Y Premium RWD EU.
Розрахункова маса	2000 кг	Враховує водія та невелике корисне навантаження.
Повна маса для перевірки	2300 кг	Використовується для аналізу впливу збільшеного навантаження.
Коефіцієнт аеродинамічного опору	0,22	Прийнято за відкритими даними для Model Y.
Лобова площа	2,65 м ²	Узагальнене значення для електрокросовера.
Коефіцієнт опору коченню	0,010	Типове значення для шин із низьким опором коченню.
Радіус колеса	0,36 м	Відповідає шині близько 255/45R19.
Передаточне число редуктора	9,0	Розрахункове значення для одноступеневої передачі.
Номінальна потужність двигуна	120 кВт	Умовна межа тривалої роботи.
Максимальна потужність двигуна	220 кВт	Відповідає відкритим даним для задньопривідних версій [15].
Максимальний момент двигуна	420 Н·м	Консервативне значення за EV Database [15].
Корисна ємність батареї	75 кВт·год	Прийнято за EV Database [15].
Номінальна напруга батареї	357 В; у моделі 360 В	Округлення використане для спрощення розрахунків.
Робочий діапазон SOC	20–90 %	Забезпечує запас для розряду та рекуперації.
ККД тягового режиму	0,90	Узагальнює втрати двигуна, інвертора і трансмісії.
ККД рекуперації	0,65	Враховує втрати при перетворенні та заряджанні батареї.
Максимальна швидкість	201 км/год	Використовується як верхнє обмеження, не як міський режим.

Прийняті параметри визначають механічні та електричні межі моделі. Маса, коефіцієнт опору коченню, аеродинамічний опір і лобова площа використовуються для розрахунку сил опору руху. Потужність і момент двигуна задають допустимі межі керуючої команди. Ємність, напруга та SOC батареї визначають доступну енергію та можливість рекуперації. Радіус колеса і передаточне число зв'язують тягову силу на колесах із моментом електродвигуна.

Для зв'язку параметрів автомобіля з подальшим моделюванням застосовується спрощена модель поздовжньої динаміки. Вона не деталізує усі процеси в електродвигуні та інверторі, але достатня для оцінки тягового зусилля, потужності, моменту та енергоспоживання.

$$F_i = m \cdot a \quad (2.1)$$

$$F_k = m \cdot g \cdot f \quad (2.2)$$

$$F_a = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot v^2 \quad (2.3)$$

$$F_t = F_i + F_k + F_a \quad (2.4)$$

$$P_w = F_t \cdot v \quad (2.5)$$

$$T_w = F_t \cdot r_w \quad (2.6)$$

$$T_m = T_w / (i \cdot \eta_{tr}) \quad (2.7)$$

де m - маса автомобіля;

a - прискорення;

g - прискорення вільного падіння;

f - коефіцієнт опору коченню;

ρ - густина повітря;

C_x - коефіцієнт аеродинамічного опору;

A - лобова площа;

v - швидкість;

r_w - радіус колеса;

i - передаточне число редуктора; η_{tr} - ККД трансмісії.

Таблиця 2.3 – Параметри, що використовуються алгоритмом як контрольовані та обмежувальні

Група параметрів	Параметри	Роль у роботі алгоритму
Параметри руху	швидкість, прискорення, фаза їздового циклу	Визначення режиму руху та потрібної тягової потужності.
Дії водія	педалі акселератора і гальма, швидкість зміни положення педалей	Оцінка поточного запиту та реакції водія.
Параметри приводу	момент, потужність, частота обертання, ККД	Фізичні межі формування тягового завдання.
Параметри батареї	U , I , SOC, допустима зарядна і розрядна потужність	Обмеження споживання енергії та рекуперації.
Алгоритмічні параметри	коефіцієнт економії, коефіцієнт динаміки, режим пріоритету	Визначають зміщення керування в бік економії або динаміки.

Отже, параметри електромобіля прийнято на основі реальної серійної моделі, але подано в узагальненому вигляді. Це забезпечує реалістичність розрахунку і водночас не обмежує алгоритм конкретною комерційною платформою.

2.3 Розробка функціональної структури системи

Функціональна структура системи оптимізації енергоспоживання визначає склад інформаційних і керуючих блоків, а також зв'язки між ними. Вона не деталізує силові кола інвертора або внутрішні регулятори електродвигуна, а

показує, як інформація про рух, дії водія та стан тягової системи перетворюється на керуюче завдання для приводу.

У прикладних моделях електромобілів MATLAB/Simulink окремо виділяються модель водія, блоки контролерів, батарея, електрична машина та трансмісія. Керування тяговим моментом і рекуперацією може виконуватися на рівні контролера вищого рівня [14]. Саме до такого рівня належить алгоритм, який розробляється в даній роботі.

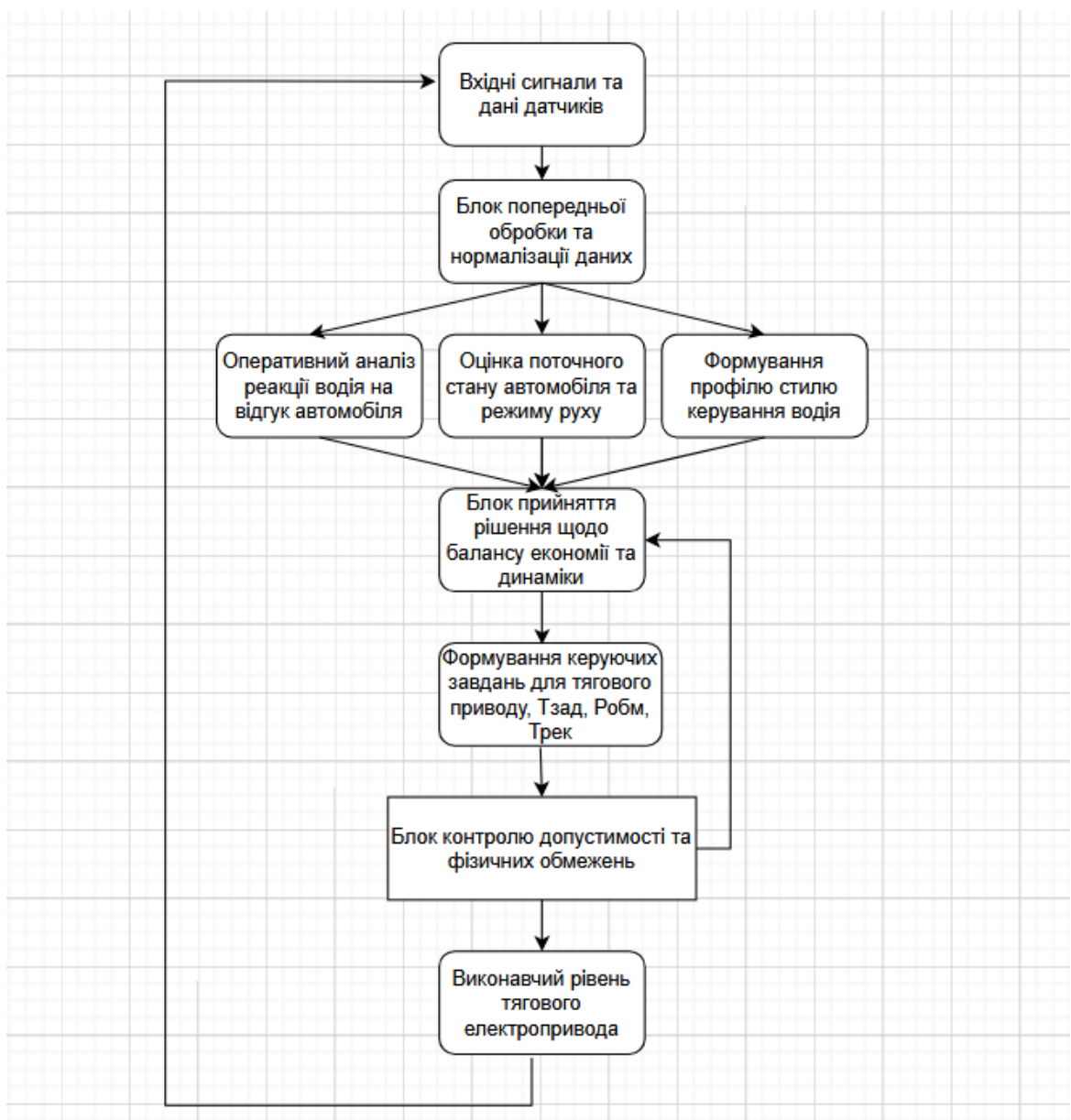


Рисунок 2.1 – Функціональна структура алгоритму енергозберігаючого керування тяговим приводом

Загальна логіка функціональної структури включає збір даних, попередню обробку, визначення режиму руху, аналіз дій водія, оцінку фізичних обмежень, прийняття рішення та формування керуючого завдання. Окремо враховується рекуперативне гальмування, оскільки в міському циклі саме повторювані гальмування і наступні розгони істотно впливають на енергетичний баланс [4].

На рисунку 2.1 показано замкнену структуру взаємодії алгоритму з автомобілем і водієм. Після формування керуючої команди змінюються швидкість, прискорення та навантаження приводу, а водій коригує положення педалей залежно від отриманого відгуку. Саме ця реакція використовується алгоритмом для адаптації рівня економії або динаміки.

Таблиця 2.4 – Основні функціональні блоки запропонованої структури

Функціональний блок	Основне призначення	Результат роботи
Блок збору даних	Отримання сигналів про швидкість, педалі, батарею, привід і параметри руху.	Сукупність вхідних сигналів.
Попередня обробка	Фільтрація та перетворення сигналів у розрахункові величини.	Оцінені v , a , запит на тягу і гальмування.
Визначення режиму руху	Класифікація стану автомобіля.	Розгін, сталий рух, вибіг, гальмування, зупинка.
Короткочасний аналіз водія	Оцінка реакції водія на відгук приводу.	Корекція пріоритету динаміки або економії.
Довготривалий профіль водія	Накопичення інформації про манеру керування.	Базові налаштування чутливості та економії.
Блок фізичних обмежень	Перевірка можливостей двигуна, батареї і рекуперації.	Допустимі межі моменту, потужності і струму.
Блок прийняття рішення	Вибір керуючої дії з урахуванням режиму, водія й обмежень.	Заданий тяговий або рекуперативний момент.
Формування команд	Перетворення рішення в сигнал для виконавчого рівня.	Команди Tзад, Трек, Робм, dT/dt .

Блок фізичних обмежень не дозволяє формувати команди, які виходять за межі можливостей приводу або батареї. До таких обмежень належать максимальний момент, максимальна потужність, допустимий струм розряду, допустимий струм заряду при рекуперації, стан заряду батареї та температурні межі. У прикладних EV-моделях саме BMS або відповідний блок контролера формує динамічні межі заряду і розряду батареї [14].

У режимі розгону алгоритм визначає тяговий момент за поточним запитом водія, режимом руху та допустимими межами. У режимі гальмування він узгоджує рекуперативний і механічний гальмівні моменти. Ефективність рекуперації залежить не лише від електричної машини, а й від стратегії керування, розподілу гальмівного моменту і зовнішніх умов [4].

Отже, функціональна структура поєднує інформаційні, аналітичні та керуючі блоки. Її ключова особливість полягає у використанні не тільки поточних параметрів руху, а й реакції водія та його довготривалої манери керування.

2.4 Розробка структурної та електричної принципової схем

Після визначення функціональної структури доцільно показати технічне середовище, у якому працює алгоритм. Оскільки метою є розробка алгоритму верхнього рівня, структурна та електрична схеми подаються у спрощеному вигляді. Вони показують взаємодію тягової батареї, інвертора, електродвигуна, датчиків, контролера та системи рекуперативного гальмування.

У сучасному електромобілі силова установка складається з високовольтної енергетичної частини та низьковольтної інформаційно-керувальної частини. У тяговому режимі енергія передається від батареї через інвертор до електродвигуна і коліс. У режимі рекуперації напрямок енергетичного потоку змінюється, а частина кінетичної енергії повертається до батареї.

Алгоритм верхнього рівня не формує безпосередньо фазні струми електродвигуна або параметри широтно-імпульсної модуляції інвертора. Він працює з керуючими завданнями: заданим тяговим моментом, обмеженням потужності та допустимим рекуперативним моментом. Подібна ієрархія використовується в модельних середовищах для аналізу електромобілів, зокрема в MATLAB/Simulink [14].

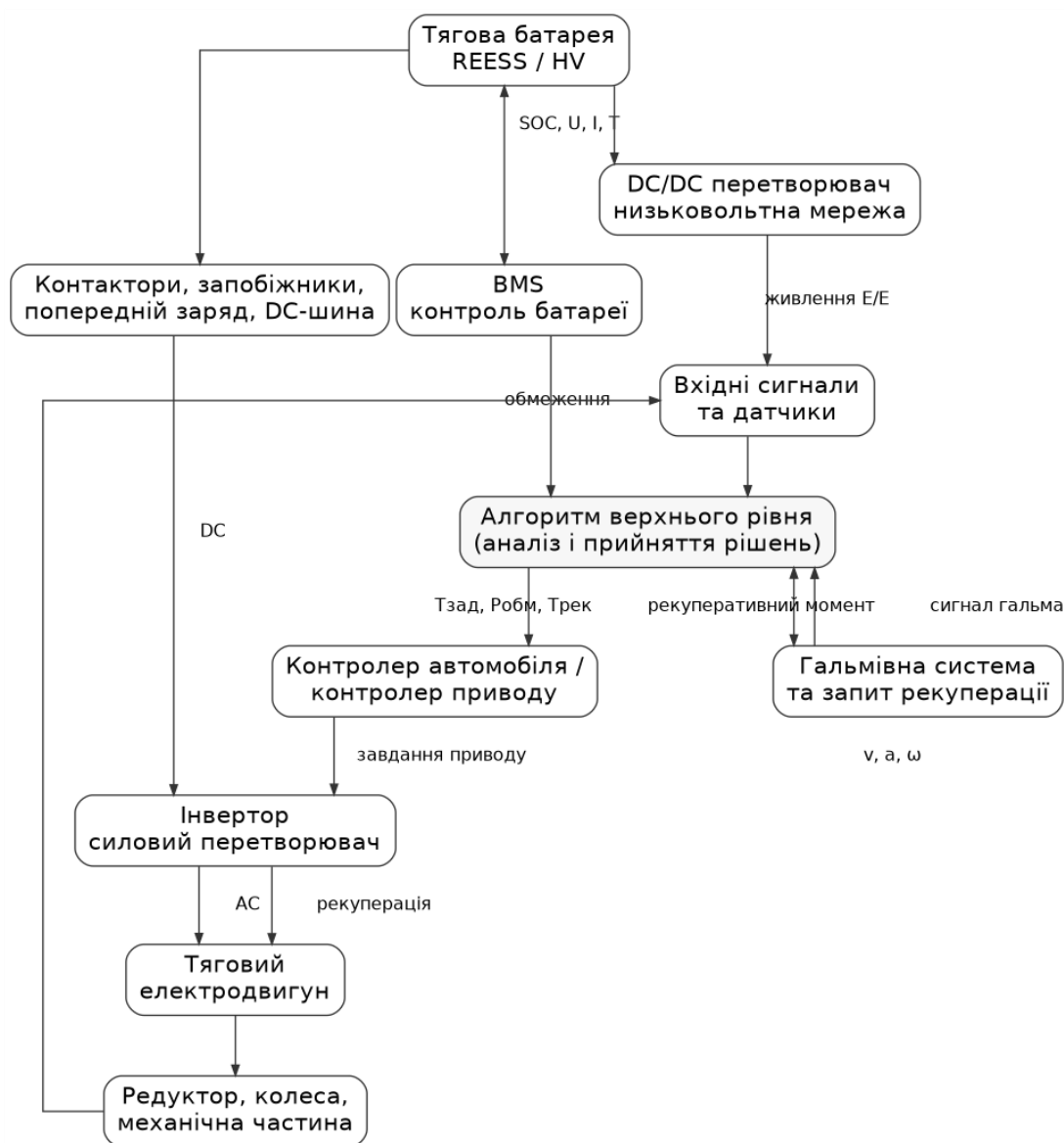


Рисунок 2.2 – Структурна схема взаємодії алгоритму верхнього рівня з тяговою електромеханічною системою

На рисунку 2.2 алгоритм розташований між інформаційною частиною автомобіля та виконавчим рівнем приводу. Такий поділ дозволяє досліджувати логіку формування керуючих завдань без переходу до детального проєктування інвертора або електродвигуна.

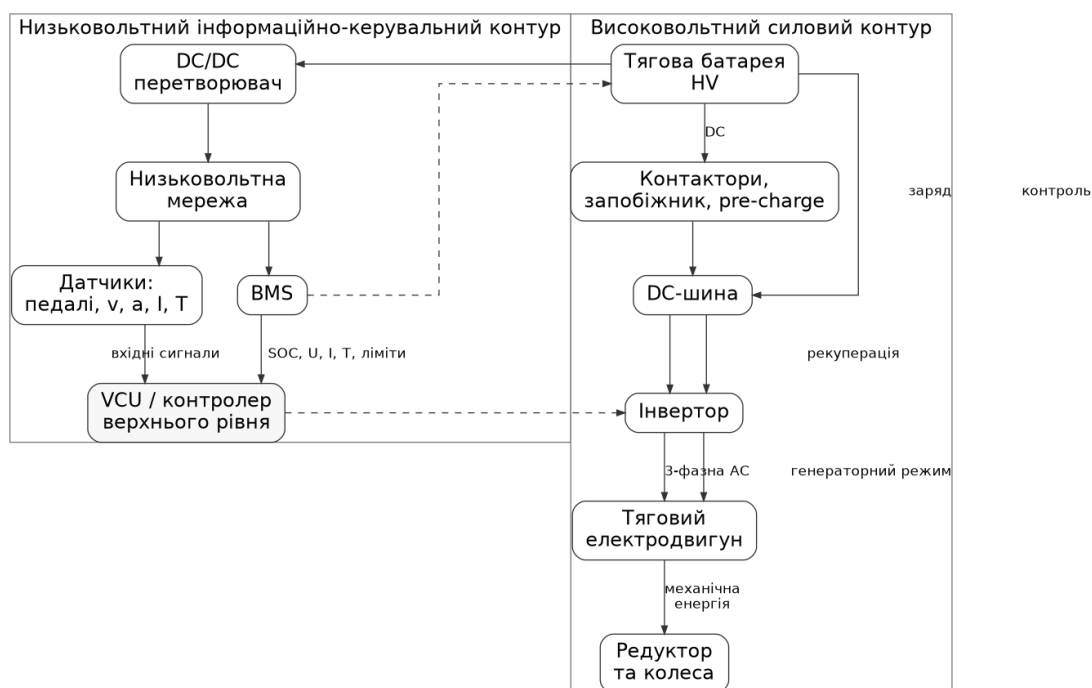


Рисунок 2.3 – Спрощена електрична принципова схема тягової системи електромобіля

На рисунку 2.3 високовольтний контур показує шлях передавання енергії між тяговою батареєю, інвертором і електродвигуном. Низьковольтний контур показує передавання інформаційних і керувальних сигналів між датчиками, BMS, контролером верхнього рівня та контролером інвертора. Вимоги до електричної безпеки високовольтних елементів визначаються, зокрема, UN Regulation No. 100 [12].

Для електромобілів Tesla Model Y виробник окремо виділяє високовольтні компоненти та процедури безпечного вимкнення високовольтної системи в аварійних матеріалах для рятувальників [15]. У даній роботі ці дані використовуються не для проектування конкретної схеми Tesla, а для підтвердження типової архітектури сучасного електромобіля.

Таблиця 2.5 – Основні сигнали та керуючі дії системи

Група сигналів	Приклади параметрів	Призначення у роботі алгоритму
Дії водія	положення педалі акселератора, положення	Оцінка поточного запиту на динаміку або гальмування.

	педалі гальма, швидкість зміни педалей	
Параметри руху	швидкість, прискорення, режим розгону, сталого руху або гальмування	Визначення поточного режиму руху автомобіля.
Стан батареї	SOC, напруга, струм, температура, допустимий зарядний і розрядний струм	Обмеження тягової потужності та рекуперації.
Стан приводу	частота обертання двигуна, тяговий момент, температура інвертора або двигуна	Контроль фізичних меж керування.
Вихідні команди	Тзад, Робм, Трек, dT/dt	Передавання завдань на виконавчий рівень приводу.

Перед передаванням на силову систему команда проходить контроль допустимості. Якщо команда порушує фізичні або режимні обмеження, вона повертається до блоку прийняття рішення для корекції. Такий підхід відповідає загальній логіці функціональної безпеки автомобільних електронних систем [13].

2.5 Обґрунтування вибору параметрів керування

Вибір параметрів керування визначає, які сигнали надходять до алгоритму, які з них використовуються для оцінки стану автомобіля, а які перетворюються у керуючі завдання для тягового електропривода. Для розроблюваного алгоритму недостатньо лише положення педалей, оскільки енергетично доцільне рішення залежить також від швидкості, прискорення, стану батареї, обмежень приводу та режиму руху.

Параметри доцільно поділити на чотири групи: дії водія, механічний стан автомобіля, електричний і тепловий стан тягової системи, а також вихідні параметри алгоритму. Такий підхід відповідає загальній логіці моделей електромобіля, де батарея, інвертор, двигун, трансмісія та контролер розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиної енергетичної системи [14].

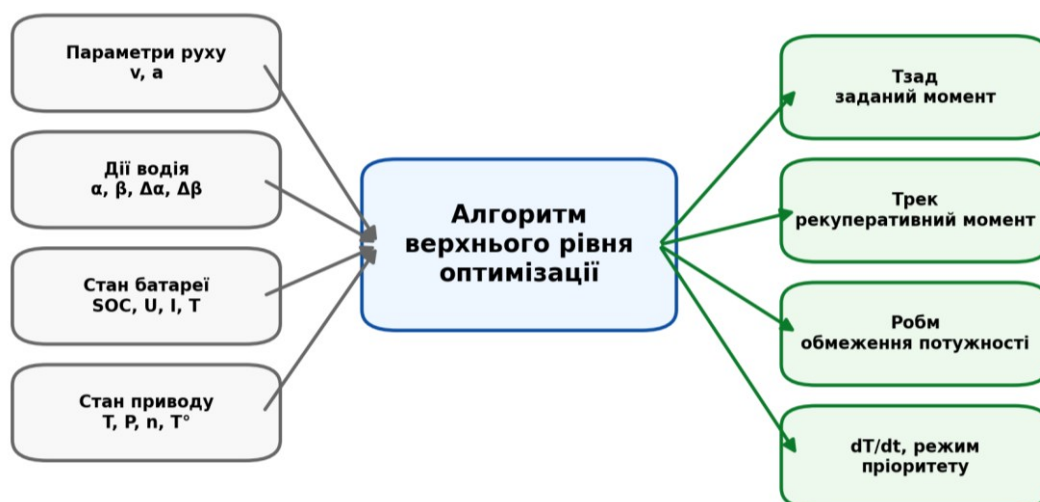


Рисунок 2.4 – Система вхідних і вихідних параметрів алгоритму

Таблиця 2.6 – Основні групи параметрів, що використовуються алгоритмом

Група параметрів	Основні величини	Призначення в алгоритмі
Дії водія	$\alpha, \beta, \Delta\alpha, \Delta\beta, d\alpha/dt, d\beta/dt$	Оцінка запиту на прискорення або уповільнення, аналіз реакції водія.
Механічний стан	v, a , частота обертання коліс, момент на колесах	Визначення режиму руху і потрібного тягового зусилля.
Стан батареї	SOC, U, I, температура, допустима зарядна/розрядна потужність	Обмеження тягового режиму та рекуперації.
Стан приводу	T_{max}, P_{max} , частота обертання, температура двигуна й інвертора	Перевірка фізичної допустимості команди.
Вихідні параметри	$T_{зад}, T_{рек}, R_{обм}, dT/dt$, режим пріоритету	Передавання керуючих завдань на виконавчий рівень.

$$\Delta\alpha = \alpha(t) - \alpha(t - \Delta t) \quad (2.8)$$

$$d\alpha/dt \approx [\alpha(t) - \alpha(t - \Delta t)] / \Delta t \quad (2.9)$$

$$\Delta\beta = \beta(t) - \beta(t - \Delta t) \quad (2.10)$$

$$d\beta/dt \approx [\beta(t) - \beta(t - \Delta t)] / \Delta t \quad (2.11)$$

де α - положення педалі акселератора;

β - положення педалі гальма;

Δt - розрахунковий крок моделі.

Додатне значення $\Delta\alpha$ після початку розгону свідчить про потребу в більшій динаміці, а від'ємне - про можливість зменшити тяговий момент. Для педалі гальма аналогічно аналізується інтенсивність запиту на уповільнення.

Таблиця 2.7 – Зональна інтерпретація положення педалей

Зона	Діапазон положення педалі	Інтерпретація для алгоритму
0	0 %	Педаць не натиснута; можливий вибіг або зупинка.
1–2	1–20 %	Слабкий запит; можливе м'яке енергоощадне керування.
3–5	21–50 %	Середній запит; основна зона адаптивної оптимізації.
6–8	51–80 %	Високий запит; пріоритет динаміки з помірними обмеженнями.
9–10	81–100 %	Максимальний або критичний запит; енергозбереження має нижчий пріоритет.



Рисунок 2.5 – Логіка адаптації алгоритму до дій водія

Зональний аналіз педалей не замінює фізичні обмеження, а лише допомагає інтерпретувати намір водія. Найбільший простір для оптимізації

виникає в середніх зонах, коли водій не вимагає максимальної динаміки або екстреного гальмування. У крайніх зонах пріоритет надається очікуваній реакції автомобіля і безпеці.

2.6 Розробка алгоритму роботи системи

Алгоритм роботи системи оптимізації енергоспоживання має забезпечити послідовне перетворення вхідної інформації у керуюче завдання для тягового електропривода. Він працює циклічно з певним часовим кроком, що відповідає режиму реального часу.

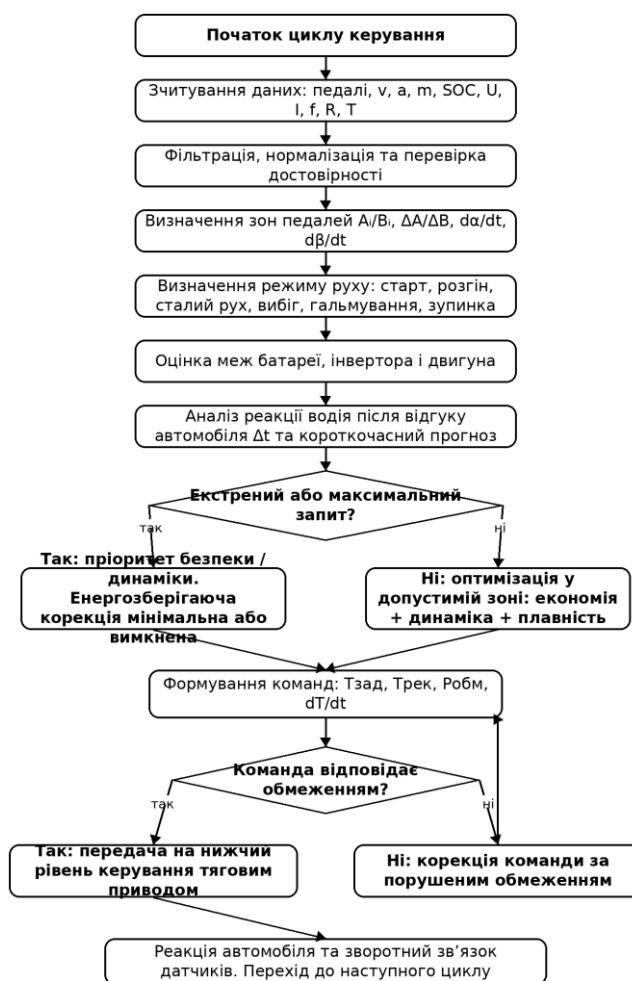


Рисунок 2.6.1 – Блок-схема алгоритму роботи системи оптимізації енергоспоживання

У загальному вигляді алгоритм включає зчитування сигналів, попередню обробку, визначення режиму руху, аналіз педалей, короткочасну і довготривалу адаптацію до водія, перевірку фізичних обмежень, формування команди та контроль її допустимості.

Таблиця 2.8 – Логіка визначення режимів руху

Режим	Ознаки режиму	Дія алгоритму
Розгін	$\alpha > 0, a > 0, \beta = 0$	Формування $T_{зад}$ з урахуванням динаміки та економії.
Сталий рух	$a \approx 0$, швидкість змінюється незначно	Згладжування коливань моменту та обмеження піків.
Вибіг	$\alpha \approx 0, \beta = 0, v > 0$	Мінімізація тягового моменту, підготовка до рекуперації.
Гальмування	$\beta > 0, a < 0$	Вибір Трек з урахуванням запиту водія і стану батареї.
Зупинка	$v \approx 0$	Тяговий момент не формується, враховуються допоміжні споживачі.

$$T_{зад} = T_{вод} \cdot K_{дин} \cdot K_{ек} \quad (2.12)$$

$$T_{зад} = \min(T_{зад}, T_{max}) \quad (2.13)$$

$$P_{зад} = \min(P_{зад}, P_{обм}) \quad (2.14)$$

$$E_{kin} = m \cdot v^2 / 2 \quad (2.15)$$

$$E_{rec} = \eta_{rec} \cdot E_{kin} \quad (2.16)$$

де $T_{вод}$ - момент, що відповідає запиту водія;

$K_{дин}$ - коефіцієнт динаміки;

$K_{ек}$ - коефіцієнт енергозбереження;

T_{max} - максимальний допустимий момент;

$P_{обм}$ - допустима потужність;

η_{rec} - ККД рекуперації.

Значення коефіцієнтів змінюються залежно від режиму руху, положення педалей, реакції водія та стану батареї.

Таблиця 2.9 – Основні обмеження, що враховуються алгоритмом

Обмеження	Умова врахування	Результат для керування
Максимальний момент двигуна	$T_{зад} > T_{max}$	Команда обмежується до T_{max} .
Пікова потужність	$P_{зад} > P_{обм}$	Зменшується момент або швидкість його наростання.
Високий SOC	SOC наближається до верхньої межі	Зменшується рекуперативний момент.
Низький SOC	SOC наближається до нижньої межі	Підвищується пріоритет економії тягової енергії.
Температурні межі	Перегрів батареї, інвертора або двигуна	Обмежується потужність тяги або рекуперації.
Екстремний запит водія	Максимальна зона акселератора або гальма	Енергозбереження має нижчий пріоритет.
Системи безпеки	Активні ABS, ESC або контроль пробуксовки	Алгоритм енергозбереження блокується або обмежується.

У режимі розгону алгоритм спочатку визначає запит водія за положенням акселератора. Якщо після початкового відгуку водій додатково натискає педаль, коефіцієнт динаміки збільшується, а енергоощадне обмеження послаблюється. Якщо положення педалі стабільне або зменшується, алгоритм може зменшити швидкість наростання моменту та обмежити пікову потужність.

У режимі гальмування алгоритм визначає допустимий рекуперативний момент. Якщо батарея може приймати заряд, частина гальмівного моменту формується електродвигуном у генераторному режимі. Якщо SOC високий, температура несприятлива або потрібне інтенсивне гальмування, рекуперація обмежується, а необхідне гальмівне зусилля має забезпечуватися механічною системою.

Для уникнення непрогнозованого відгуку алгоритм використовує обмеження швидкості зміни моменту. Це дозволяє зменшити різкі піки потужності, знизити струмові навантаження на батарею та зберегти плавність руху. Водночас при високому запиті водія або критичній дорожній ситуації обмеження економії зменшується.

Таким чином, запропонований алгоритм є комбінованим: він має rule-based основу, але доповнюється адаптивною корекцією за реакцією водія та станом тягової системи. Це робить його простішим за прогнозні або AI-орієнтовані методи, але гнучкішим за звичайний Eсо-режим.

2.7 Вибір методу розрахунку та програмної реалізації

Для перевірки запропонованого алгоритму доцільно застосувати імітаційне моделювання. Натурний експеримент на реальному електромобілі потребує доступу до закритих систем керування та створює додаткові вимоги безпеки, тому для бакалаврської роботи раціональнішим є розрахунковий підхід у MATLAB/Simulink.

Модель повинна містити міський їздовий цикл, модель водія, спрощену модель поздовжньої динаміки електромобіля, батарею, тяговий привід, блок рекуперації та алгоритм верхнього рівня. У базовому режимі команда на привід формується без оптимізаційного блока, а в оптимізованому - з урахуванням режимів руху, зон педалей, реакції водія та фізичних обмежень.

У MATLAB/Simulink можуть бути реалізовані рівняння сил руху, блоки логічного керування, обмеження батареї, розрахунок потужності та інтегрування енергоспоживання. Такий підхід узгоджується з практикою використання цих середовищ для моделювання електромобілів і алгоритмів керування силовою установкою [14].

Таблиця 2.10 – Призначення програмних засобів у моделі

Засіб	Призначення	Результат
MATLAB	Задання параметрів, розрахунок залежностей, обробка результатів.	Числові дані та графіки енергоспоживання.
Simulink	Структурне моделювання системи в часовій області.	Модель руху, приводу і алгоритму.
Simscape / бібліотеки EV	Можливе уточнення моделі батареї, двигуна і трансмісії.	Більш фізично деталізована модель за потреби.
Блоки логіки	Реалізація правил переходу між режимами.	Алгоритм прийняття рішень.
Блоки інтегрування	Розрахунок енергії за цикл.	Еспож, Ерек, Ечист, q.

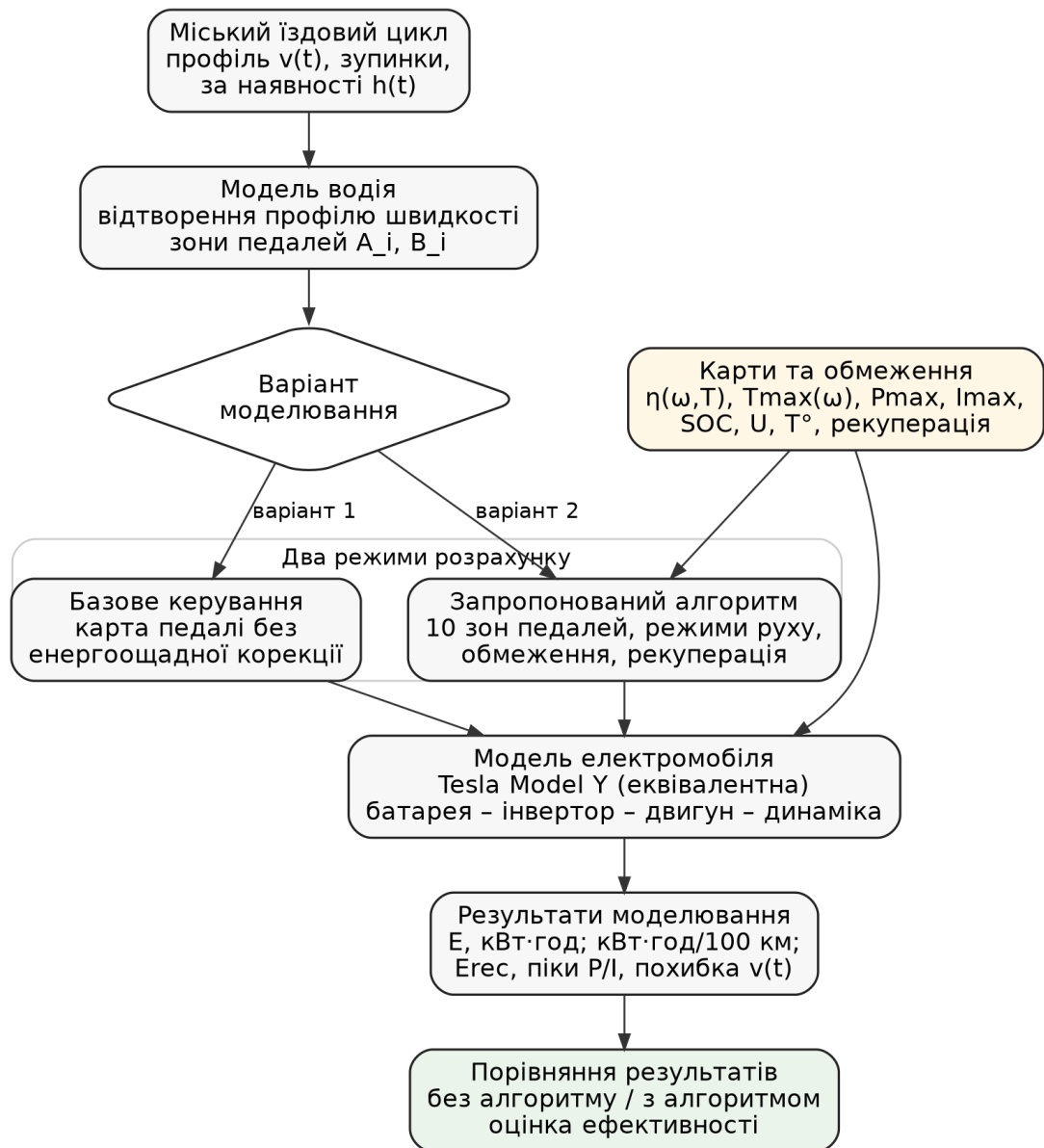


Рисунок 2.7 – Загальна структура імітаційного моделювання

$$E_{cycle} = \int_0^t P_{bat}(t) dt \quad (2.17)$$

$$E_{net} = E_{traction} - E_{rec} + E_{aux} \quad (2.18)$$

$$q = E_{net} / S \cdot 100 \quad (2.19)$$

$$\Delta E = (E_{base} - E_{opt}) / E_{base} \cdot 100 \% \quad (2.20)$$

де E_{cycle} - енергія за цикл;

$P_{\text{bat}}(t)$ - миттєва потужність батареї;

E_{net} - чисті витрати енергії;

E_{traction} - енергія тяги;

E_{rec} - енергія, повернута рекуперацією;

E_{aux} - енергія допоміжних систем;

S - пройдена відстань;

E_{base} і E_{opt} - енергоспоживання у базовому та оптимізованому режимах.

Таблиця 2.11 – Основні показники для оцінки результатів моделювання

Показник	Фізичний зміст
Еспож, кВт·год	Енергія, відібрана з батареї протягом циклу.
Ерек, кВт·год	Енергія, повернута до батареї під час рекуперативного гальмування.
Ечист, кВт·год	Різниця між спожитою та рекуперованою енергією.
q , кВт·год/100 км	Питомий показник енергоспоживання.
P_{max} , I_{max}	Максимальні значення потужності та струму.
$\Delta v(t)$	Похибка відтворення заданого профілю швидкості.

Таблиця 2.12 – Схема порівняльного моделювання

Елемент	Варіант / умова	Зміст
Варіант 1	Базове керування	Стандартна залежність педалі від тягового або гальмівного моменту без оптимізаційного блока.
Варіант 2	Керування із запропонованим алгоритмом	Додавання зонального аналізу педалей, контролю режимів, обмежень і логіки рекуперації.
Умова порівняння	Однаковий їздовий цикл	Профіль швидкості, маса, батарея і параметри приводу не змінюються між розрахунками.
Критерій ефективності	Зменшення $E_{\text{чист}}$ і q	Економія вважається коректною лише за допустимої похибки швидкості та без втрати очікуваної поведінки.

Ключовою умовою коректності порівняння є збереження заданого профілю руху. Якщо в оптимізованому режимі автомобіль рухається значно повільніше або не відтворює необхідні розгони, отримане зниження енергоспоживання не можна вважати коректним результатом оптимізації.

У розрахунковій моделі також необхідно передбачити систему обмежень, що не дозволяє алгоритму формувати фізично або функціонально некоректні

команди. Рекуперативний момент не повинен формуватися під час явного запиту на розгін, а енергоощадне обмеження не повинно зменшувати реакцію автомобіля при максимальному натисканні акселератора або екстремому гальмуванні.

Отже, метод імітаційного моделювання дозволяє без натурального експерименту оцінити роботу алгоритму в часовій області, порівняти базовий та оптимізований режими керування і визначити вплив алгоритму на енергоспоживання, рекуперацію, пікові навантаження та якість відтворення профілю швидкості.

Висновки до розділу

У другому розділі сформовано технічну основу для розробки та подальшого моделювання алгоритму оптимізації енергоспоживання електромобіля в міському циклі. Визначено, що алгоритм є рівнем керування, який формує завдання для тягового електропривода з урахуванням дій водія, режиму руху та фізичних обмежень батареї, інвертора й електродвигуна. Обґрунтовано вибір параметрів електромобіля, близького за характеристиками до Tesla Model Y, розроблено функціональну, структурну та спрощену електричну схеми системи, а також визначено вхідні й вихідні параметри алгоритму. Запропонована логіка передбачає визначення режиму руху, аналіз положення та швидкості зміни педалей, обмеження надмірних піків потужності, формування енергоощадного профілю моменту й використання рекуперативного гальмування. Для перевірки ефективності алгоритму обрано імітаційне моделювання в MATLAB/Simulink із порівнянням базового та оптимізованого режимів за показниками енергоспоживання, рекуперації, пікової потужності та якості відтворення швидкісного профілю.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

3.1 Побудова математичної моделі електромобіля

Математична модель електромобіля використовується як розрахункова основа для оцінки енергоспоживання. У роботі застосовано поздовжню модель руху, яка враховує масу автомобіля, сили опору, тяговий момент, параметри електропривода, стан батареї та енергетичний баланс.

Вхідним сигналом для моделювання є їздовий цикл $v(t)$, сформований за часовим профілем швидкості. За ним визначаються прискорення, пройдений шлях, потрібна сила тяги, потужність на колесах, електрична потужність батареї та зміна SOC. Модель використовується у двох режимах: базовому, без алгоритмічної корекції, та оптимізованому, з алгоритмом енергоощадного керування.

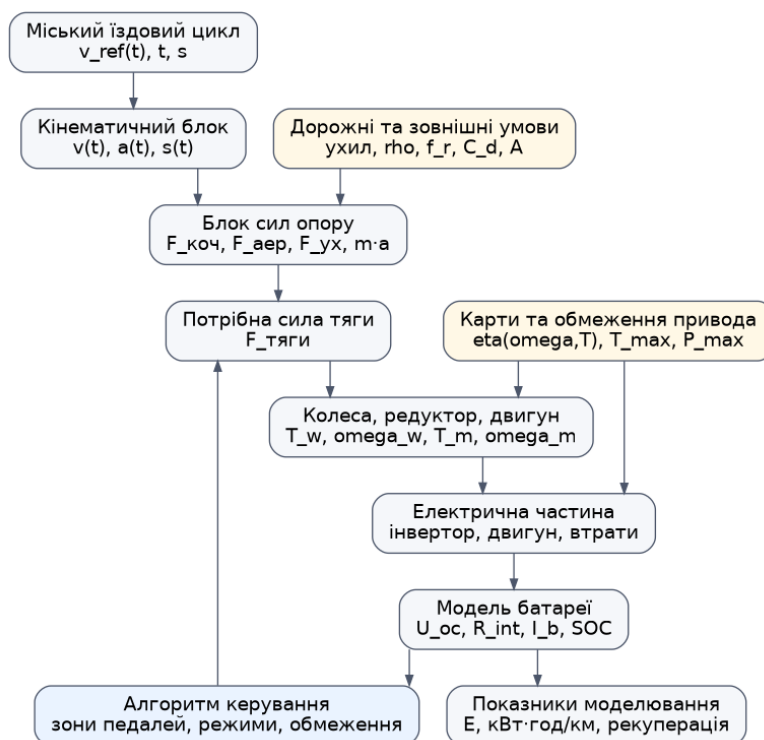


Рисунок 3.1 – Узагальнена структура математичної моделі електромобіля

Таблиця 3.1 – Основні параметри, що використовуються у математичній моделі

Параметр	Позначення	Попередні значення / спосіб задання	Призначення у моделі
Маса автомобіля з водієм і навантаженням	m	близько 2000 кг	визначає інерційність, потрібну силу тяги та енергію розгону
Корисна ємність батареї	E_{bat}	75 кВт·год	обмежує запас енергії та використовується для розрахунку SOC
Номінальна напруга батареї	U_{nom}	близько 360 В	використовується для оцінки струму та електричної потужності
Коефіцієнт опору коченню	f_r	0,010–0,015	визначає втрати на кочення шин
Коефіцієнт аеродинамічного опору	C_d	близько 0,23	впливає на втрати при зростанні швидкості
Площа лобового перерізу	A	приймається за довідковими або розрахунковими даними	використовується у формулі аеродинамічного опору
Радіус колеса	r_w	визначається за типорозміром шин	зв'язує швидкість автомобіля з кутовою швидкістю колеса
Передаточне число редуктора	i_g	приймається за моделлю привода	зв'язує колесо з валом тягового електродвигуна
ККД трансмісії	η_{tr}	0,95–0,98	враховує механічні втрати в редукторі та передачі
Карти ККД двигуна та інвертора	$\eta_{\omega, T}$	таблично або спрощено	використовуються для переходу від механічної потужності до електричної
Внутрішній опір батареї	R_{int}	функція SOC і температури або стала оцінка	враховує падіння напруги та втрати в батареї

Поздовжній рух електромобіля описується рівнянням балансу сил.

$$F_{\text{тяги}} = m_{\text{екв}} \cdot a + F_{\text{коч}} + F_{\text{аер}} + F_{\text{ух}} \quad (3.1)$$

$$a(t) = dv(t) / dt \quad (3.2)$$

$$F_{\text{коч}} = m \cdot g \cdot C_{rr} \cdot \cos(\theta) \quad (3.3)$$

$$F_{\text{аер}} = 0,5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \quad (3.4)$$

$$F_{\text{yx}} = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (3.5)$$

Після визначення потрібної сили тяги розраховується момент на колесах, кутова швидкість колеса, кутова швидкість двигуна та момент на валу двигуна.

$$T_w = F_{\text{тяги}} \cdot r_w \quad (3.6)$$

$$\omega_w = v / r_w; \quad \omega_m = i_0 \cdot \omega_w \quad (3.7)$$

$$T_m = T_w / (i_0 \cdot \eta_{tr}) \quad (3.8)$$

$$P_w = F_{\text{тяги}} \cdot v; \quad P_m = T_m \cdot \omega_m \quad (3.9)$$

$$P_{bat} = P_m / (\eta_m \cdot \eta_{inv}) \quad (3.10)$$

У режимі рекуперації напрямок потоку енергії змінюється: електродвигун працює як генератор, а частина кінетичної енергії повертається до акумуляторної батареї. Доступна рекуперативна потужність обмежується SOC, температурою, напругою та допустимим зарядним струмом батареї.

$$U_b = U_{oc}(SOC) - I_b \cdot R_{int} \quad (3.11)$$

$$dSOC/dt = -I_b / Q_{nom} \quad (3.12)$$

$$E_{\text{спож}} = \int P_{bat}^+(t) dt; \quad E_{\text{рек}} = \int P_{bat}^-(t) dt \quad (3.13)$$

$$E_{\text{нетто}} = E_{\text{спож}} - E_{\text{рек}}; e = E_{\text{нетто}} / S \quad (3.14)$$

Таблиця 3.2 – Вихідні показники моделювання

Показник	Фізичний зміст	Використання у порівнянні
$E_{\text{спож}}$	електрична енергія, відібрана з батареї	оцінка загальних витрат енергії
$E_{\text{рек}}$	енергія, повернута в батарею під час рекуперації	оцінка ефективності рекуперативного гальмування
$E_{\text{нетто}}$	різниця між спожитою та повернутою енергією	основний критерій порівняння режимів
$\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{км}$ або $\text{кВт}\cdot\text{год}/100$ км	питома витрата енергії	зручне порівняння різних циклів
P_{max}	максимальна потужність батареї або двигуна	оцінка пікових навантажень
$I_{b,\text{max}}$	максимальний струм батареї	контроль електричних обмежень
$\Delta T_m / \Delta t$	швидкість зміни тягового моменту	оцінка плавності та передбачуваності руху
$SOC(t)$	зміна стану заряду батареї	перевірка енергетичного балансу циклу

Таким чином, сформовано математичну основу для подальшого розрахунку енергоспоживання електромобіля в міському циклі.

Окремо враховано, що батарея не є ідеальним джерелом енергії: її напруга, внутрішній опір, допустимий струм заряду й розряду та SOC впливають на можливість реалізації тягового або рекуперативного режиму. Такий підхід дозволяє використовувати модель як основу для подальшого моделювання в MATLAB/Simulink і для порівняння роботи електромобіля з алгоритмом оптимізації та без нього.

3.2 Розрахунок основних вузлів та параметрів

Для розрахункової частини використано узгоджений набір параметрів електромобіля класу Tesla Model Y. Метою є не точне відтворення заводської

моделі, а формування реалістичних вихідних даних для оцінки енергоспоживання і роботи алгоритму керування.

У розрахунковій моделі приймається споряджена маса близько 1900 кг і розрахункова маса 2000 кг з урахуванням водія та часткового навантаження. Маса є одним із ключових параметрів, оскільки вона визначає кінетичну енергію, потребу в тяговому зусиллі при розгоні, а також потенційний обсяг енергії, доступний для рекуперації під час гальмування.

Таблиця 3.3 - Основні припущення для розрахункової моделі

Параметр	Позначення	Прийняте значення	Пояснення
Споряджена маса автомобіля	m_0	1900 кг	Близьке значення для Model Y Premium / Long Range RWD
Розрахункова маса з водієм	m	2000 кг	Використовується у формулах сил і енергії
Прискорення вільного падіння	g	9,81 м/с ²	Стале значення для розрахунків
Густина повітря	ρ	1,225 кг/м ³	Нормальні атмосферні умови
Коефіцієнт аеродинамічного опору	C_d	0,23	Прийнято для сучасного кросовера з низьким опором
Лобова площа	A	2,6 м ²	Оціночне значення для кузова класу Model Y
Коефіцієнт опору коченню	C_{rr}	0,011	Прийнято для легкового EV на дорожніх шинах
ККД механічної передачі	η_{tr}	0,95	Редуктор, підшипники, механічні втрати
Сумарний ККД тягового каналу	η_{total}	0,90	Оціночне значення для первинних розрахунків

Для коліс типорозміру 255/45R19 геометричний діаметр і радіус визначаються за стандартною залежністю:

$$D = d_{disk} \cdot 25,4 + 2 \cdot b \cdot h / 100 \quad (3.15)$$

$$D = 19 \cdot 25,4 + 2 \cdot 255 \cdot 0,45 = 712,1 \text{ мм}$$

$$r_w = D / 2 = 0,356 \text{ м} \quad (3.16)$$

$$\omega_m = i_0 \cdot v / r_w \quad (3.17)$$

Параметри колеса потрібні для переходу від сили тяги на дорозі до моменту на колесі, а також для зв'язку швидкості автомобіля з кутовою швидкістю електродвигуна. Для Model Y у заводських специфікаціях вказуються шини 255/45R19 та 255/40R20. Для розрахункової моделі обрано типорозмір 255/45R19, оскільки він є поширеним для стандартних коліс і дозволяє отримати реалістичний динамічний радіус.

Таблиця 3.4 - Зв'язок швидкості автомобіля з частотою обертання двигуна

Швидкість, км/год	v, м/с	n_w, об/хв	n_m, об/хв	omega_m, рад/с
30	8.33	224	2034	213
50	13.89	373	3390	355
100	27.78	745	6780	710
201	55.83	1498	13629	1427

З таблиці видно, що навіть у міському циклі електродвигун працює в широкому діапазоні кутових швидкостей. Тому алгоритм не може орієнтуватися на одну фіксовану точку ККД. Він повинен оцінювати поточне поєднання кутової швидкості та моменту і за можливості наближати робочу точку до області підвищеної ефективності.

Розрахунок опорів руху показує, що при сталому міському русі потрібна потужність є відносно невеликою. Основні витрати енергії формуються під час повторюваних розгонів, гальмувань і подолання інерції автомобіля.

Для горизонтальної ділянки дороги рівняння має вигляд:

$$F_{aero} = 0,5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \quad (3.18)$$

Опір коченню визначається як:

$$F_{grade} = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (3.21) \quad (3.19)$$

Аеродинамічний опір визначається як:

$$T_w = F_{tr} \cdot r_w \quad (3.20)$$

Якщо дорога має ухил, додається складова:

$$T_m = T_w / (i_0 \cdot \eta_{tr}) \quad (3.21)$$

Для міського циклу з невеликими швидкостями опір коченню часто є співмірним або навіть більшим за аеродинамічний опір. Проте при збільшенні швидкості аеродинамічна складова зростає пропорційно квадрату швидкості, тому вона суттєво впливає на енергоспоживання на швидкісних ділянках.

Таблиця 3.5 - Опори руху при рівномірному русі горизонтальною дорогою

Швидкість, км/год	F_roll, Н	F_aero, Н	F_res, Н	P_res, кВт
30	216	25	241	2.01
50	216	71	286	3.98
70	216	138	354	6.89
90	216	229	445	11.12

Отримані значення показують, що для підтримання сталої швидкості в міському діапазоні потрібна відносно невелика потужність.

Після визначення необхідної сили тяги можна перейти до моменту на колесах. Момент на ведучому колесі визначається як:

$$P_{mech} = F_{tr} \cdot v \quad (3.22)$$

Момент електродвигуна з урахуванням редуктора і механічного ККД:

$$P_{el} = P_{mech} / \eta_{total} \quad (3.23)$$

Механічна потужність, яка передається на рух автомобіля:

$$\omega_{base} = P_{max} / T_{max} = 220000 / 410 = 537 \text{ рад/с} \approx 5120 \text{ об/хв} \quad (3.24)$$

Електрична потужність, яку потрібно взяти з батареї у тяговому режимі, оцінюється через сумарний ККД тягового каналу:

$$T_{lim}(\omega) = \min(T_{max}; P_{max} / \omega) \quad (3.25)$$

Для рекуперативного гальмування напрямок потоку енергії змінюється. У такому випадку енергія повертається до батареї не повністю, а з урахуванням втрат у двигуні, інверторі, батареї та механічній передачі. Тому в моделі рекуперативна потужність додатково обмежується станом батареї, допустимим зарядним струмом, температурою та умовами зчеплення.

Таблиця 3.6 - Приклад розрахунку тяги при швидкості 50 км/год

a, м/с ²	F _{tr} , Н	T _w , Н·м	T _m , Н·м	P _{mech} , кВт	P _{el} , кВт
0.0	286	102	12	4.0	4.4
0.5	1286	458	53	17.9	19.9
1.0	2286	814	94	31.8	35.3
2.0	4286	1526	177	59.5	66.1

З наведеного прикладу видно, що при рівномірному русі момент електродвигуна є невеликим, тоді як при помірному та інтенсивному розгоні він швидко зростає.

Для моделі приймається електропривод із максимальною потужністю близько 220 кВт і максимальним моментом близько 410-420 Н·м. Такі значення відповідають рівню серійних модифікацій Tesla Model Y, але в роботі вони використовуються як розрахункові параметри, а не як точне відтворення закритої заводської моделі.

Для електродвигуна приймається максимальна потужність 220 кВт і максимальний момент 410 Н·м. Базова кутова швидкість переходу від області сталого моменту до області сталої потужності визначається як:

$$F_{tr} = m \cdot a + F_{roll} + F_{aero} \quad (3.18) \quad (3.26)$$

$$F_{roll} = C_{rr} \cdot m \cdot g \quad (3.27)$$

У межах цієї роботи p розглядається як параметр моделі. Сам алгоритм верхнього рівня не керує безпосередньо фазними струмами, але повинен враховувати електричну частоту, струм, напругу та температурний стан як ознаки фактичного режиму роботи електропривода.

Таблиця 3.7 - Прийняті параметри електродвигуна та інвертора

Параметр	Позначення	Значення	Призначення
Максимальна потужність двигуна	P_max	220 кВт	Використовується для обмеження тяги
Максимальний момент двигуна	T_max	410-420 Н·м	Ділянка сталого моменту
Базова кутова швидкість	omega_base	≈ 537 рад/с	Перехід до зони сталої потужності
Базова частота обертання	n_base	≈ 5120 об/хв	Оціночне значення
Максимальна швидкість автомобіля	v_max	≈ 201 км/год	Для оцінки верхньої частоти обертання
Оцінка максимальної частоти двигуна	n_m,max	≈ 13600 об/хв	За v_max, r_w та i0
Передавальне число редуктора	i0	9,1	Одноступенева редукторна передача
ККД інвертора	eta_inv	0,95-0,98	Приймається як параметр моделі

Кінетична енергія автомобіля визначає потенціал рекуперації. Для маси 2000 кг при швидкості 50 км/год вона становить приблизно 0,054 кВт·год. Окремий розгін здається незначним, але в міському циклі такі процеси повторюються багато разів, тому плавність моменту і корисна рекуперація істотно впливають на загальний результат.

У спрощеній моделі внутрішній опір батареї задається як параметр R_int. Для первинних розрахунків може бути прийняте значення 0,03 Ом для всієї

батареї, яке надалі може уточнюватися. Тоді напруга на клеммах батареї в режимі розряду може бути описана як:

$$U_{bat} = U_{oc}(SOC) - I_{bat} \cdot R_{int} \quad (3.28)$$

У режимі рекуперації знак струму змінюється, а напруга батареї зростає. Тому блок обмежень повинен контролювати не тільки максимальний зарядний струм, але й граничну напругу та стан заряду. Якщо SOC наближений до верхньої межі або батарея має низьку температуру, допустима рекуперативна потужність зменшується.

Таблиця 3.8 - Параметри акумуляторної батареї для моделювання

Параметр	Позначення	Значення	Призначення
Номінальна енергія батареї	E_nom	78,1-78,4 кВт·год	Довідкове значення для Model Y
Корисна енергія	E_use	75 кВт·год	Енергія, доступна для руху у моделі
Номінальна напруга	U_nom	360 В	Округлене розрахункове значення
Еквівалентна корисна ємність	Q_use	≈ 208 А·год	За E_use / U_nom
Внутрішній опір батареї	R_int	0,03 Ом	Початкове параметричне припущення
Початковий SOC	SOC0	80 %	Початкова умова симуляції
Мінімальний робочий SOC	SOC_min	10 %	Нижня межа використання батареї
Обмеження рекуперації	P_reg,max	70 кВт	Початкове обмеження для міського циклу

Кінетична енергія автомобіля визначається як:

$$E_k = m \cdot v^2 / 2 \quad (3.29)$$

Для розрахункової маси 2000 кг при швидкості 50 км/год:

$$E_k = 2000 \cdot 13,89^2 / 2 = 193000 \text{ Дж} \approx 0,054 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

На перший погляд це невелика енергія порівняно з ємністю батареї. Проте в міському циклі розгін і гальмування повторюються багато разів. Саме тому навіть невелике зменшення зайвих розгонів, плавніше формування моменту та ефективніше використання рекуперації можуть дати помітний ефект на довгому маршруті.

Маса також визначає додаткове зусилля на підйомі. Наприклад, при ухилі 5 % додаткова сила становить приблизно:

$$F_{grade} \approx m \cdot g \cdot 0,05 = 2000 \cdot 9,81 \cdot 0,05 \approx 981 \text{ Н} \quad (3.30)$$

Це більше, ніж сумарні опори руху при сталому русі на швидкості 50 км/год. Отже, ухили та маса мають істотний вплив на тягову потребу, особливо у міських умовах з підйомами, спусками та частими зупинками.

Підсумковий набір параметрів для MATLAB/Simulink

Для подальшої реалізації моделі доцільно винести основні параметри в окремий MATLAB-скрипт ініціалізації.

Таблиця 3.9 - Параметри для скрипта ініціалізації моделі

Змінна	Значення	Одиниця	Зміст
m	2000	кг	Розрахункова маса
g	9.81	м/с ²	Прискорення вільного падіння
rho	1.225	кг/м ³	Густина повітря
Cd	0.23	-	Коефіцієнт аеродинамічного опору
A	2.6	м ²	Лобова площа
Crr	0.011	-	Коефіцієнт опору коченню
rw	0.356	м	Радіус колеса
i0	9.1	-	Передавальне число редуктора
eta_tr	0.95	-	ККД механічної передачі
eta_total	0.90	-	Сумарний ККД тягового каналу
Pmax	220e3	Вт	Максимальна потужність двигуна
Tmax	410	Н·м	Максимальний момент двигуна
Euse	75e3	Вт·год	Корисна енергія батареї

Змінна	Значення	Одиниця	Зміст
U _{nom}	360	В	Номінальна напруга батареї
R _{int}	0.03	Ом	Внутрішній опір батареї
SOC ₀	0.80	-	Початковий стан заряду
SOC _{min}	0.10	-	Нижня межа стану заряду
P _{reg max}	70e3	Вт	Початкове обмеження рекуперації

Початковий варіант MATLAB-скрипта може мати такий вигляд:

Початковий варіант MATLAB-скрипта може мати такий вигляд:

$$m = 2000; \% \text{ kg}$$

$$g = 9.81; \% \text{ m/s}^2$$

$$r_{ho} = 1.225; \% \text{ kg/m}^3$$

$$C_d = 0.23;$$

$$A = 2.6; \% \text{ m}^2$$

$$C_{rr} = 0.011;$$

$$r_w = 0.356; \% \text{ m}$$

$$i_0 = 9.1;$$

$$\text{eta}_{tr} = 0.95;$$

$$\text{eta}_{total} = 0.90;$$

$$P_{max} = 220e3; \% \text{ W}$$

$$T_{max} = 410; \% \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$E_{use} = 75e3; \% \text{ W}_h$$

$$U_{nom} = 360; \% \text{ V}$$

$$R_{int} = 0.03; \% \text{ O}_{hm}$$

$$\text{SOC}_0 = 0.80;$$

$$\text{SOC}_{min} = 0.10;$$

$$P_{reg_{max}} = 70e3; \% \text{ W}$$

Таким чином, числові параметри, необхідні для подальшого моделювання електромобіля у міському циклі.

Отриманий набір параметрів формує основу для побудови Simulink-моделі. На наступному етапі необхідно сформулювати модель міського їздового циклу на основі реального профілю руху, після чого можна буде порівняти

енергоспоживання базового режиму та режиму із запропонованим алгоритмом оптимізації.

3.3 Формування моделі міського циклу

Для перевірки ефективності запропонованого алгоритму керування необхідно сформувавши їздовий цикл, який відображає реальні умови міського руху. Оскільки проведення експерименту на реальному електромобілі в межах роботи не передбачається, як основу для моделювання використано запис руху реального автобуса маршруту №83 у місті Харків на ділянці від зупинки 626 м/р-н до зупинки Академіка Барабашова.

При цьому в моделі використовується не динаміка автобуса як транспортного засобу, а лише його часовий профіль руху. Параметри маси, тягового електропривода, батареї та опорів руху залишаються параметрами електромобіля Tesla Model Y, визначеними у попередньому підрозділі. Отже, автобусний трек у роботі виконує роль реального міського їздового циклу, який подається на математичну модель електромобіля як зовнішній режим руху.

Вихідні дані для формування циклу

Первинним джерелом даних є GPX-файл, отриманий за допомогою застосування GeoTracker для Android.

Кожна точка треку містить географічні координати, абсолютний час запису та висоту над рівнем моря. На основі цих даних формуються похідні величини: відносний час від початку руху, відстань між сусідніми точками, накопичена довжина маршруту, миттєва швидкість та прискорення. Саме ці величини надалі використовуються для побудови їздового циклу у середовищі MATLAB/Simulink.

Таблиця 3.10 - Основні характеристики вихідного міського треку

Параметр	Значення
Джерело даних	GPX-трек застосунку GeoTracker та його таблицна розшифровка в Excel
Маршрут	автобус №83, м. Харків, 626 м/р-н - Академіка Барабашова
Кількість точок треку	472
Тривалість запису	1100 с, або 18.3 хв
Розрахована довжина маршруту	6.55 км
Середня швидкість з урахуванням зупинок і повільних ділянок	21.4 км/год
Максимальна швидкість за згладженим профілем	54.8 км/год
Діапазон висот за GPS	126.4...193.7 м
Перепад висоти старт-фініш	-12.9 м

За результатами попередньої обробки трек має тривалість близько 18,3 хв і довжину приблизно 6,55 км. Середня швидкість із урахуванням зупинок та ділянок повільного руху становить близько 21,4 км/год, що відповідає характеру міського маршруту з частими змінами швидкості. Максимальна швидкість за згладженим профілем становить приблизно 54,8 км/год. Запис також містить зміну висоти, однак цей параметр необхідно використовувати обережно через природний шум GPS-вимірювань.

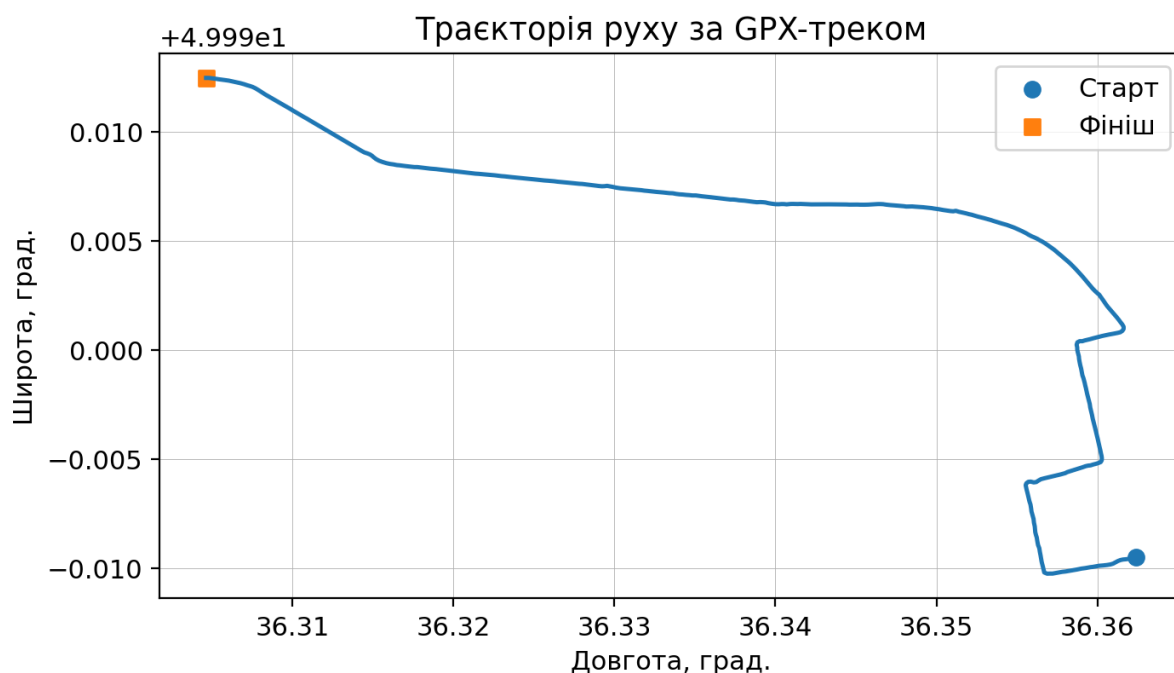


Рисунок 3.2 - Траєкторія руху автобуса за GPX-координатами

Методика перетворення GPX-треку на їздовий цикл

Для використання реального треку у розрахунковій моделі його необхідно перетворити з набору географічних точок у часовий ряд швидкості та прискорення. Спочатку абсолютні часові мітки перетворюються у відносний час від початку руху. Це дозволяє не залежати від часового поясу та фактичної дати запису. Далі для кожної пари сусідніх точок визначається відстань на поверхні Землі. У роботі для цього використовується геометричний розрахунок за координатами широти і довготи.

$$t_i = T_i - T_0 \quad (3.31)$$

де T_i - абсолютна часова мітка i -ї точки,

T_0 - час початку запису,

t_i - відносний час, який використовується у моделі.

$$v_i = \frac{\Delta s_i}{\Delta t_i} \quad (3.32)$$

де Δs_i - відстань між сусідніми точками треку,

Δt_i - різниця часу між ними,

v_i - розрахована швидкість на відповідному інтервалі.

Після цього виконується перехід від м/с до км/год для аналізу профілю, а для моделювання у Simulink швидкість зберігається у м/с.

$$v_i = \frac{\Delta s_i}{\Delta t_i} \quad (3.33)$$

$$a_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (3.34)$$

Прискорення визначається як похідна швидкості за часом. Оскільки GPS-дані мають дискретний характер і містять випадкові похибки координат,

безпосереднє диференціювання сирого сигналу швидкості може давати штучні піки прискорення. Тому перед визначенням прискорення швидкість доцільно згладжувати коротким ковзним вікном. Таке згладжування не змінює загальний характер циклу, але зменшує вплив одиничних стрибків координат.

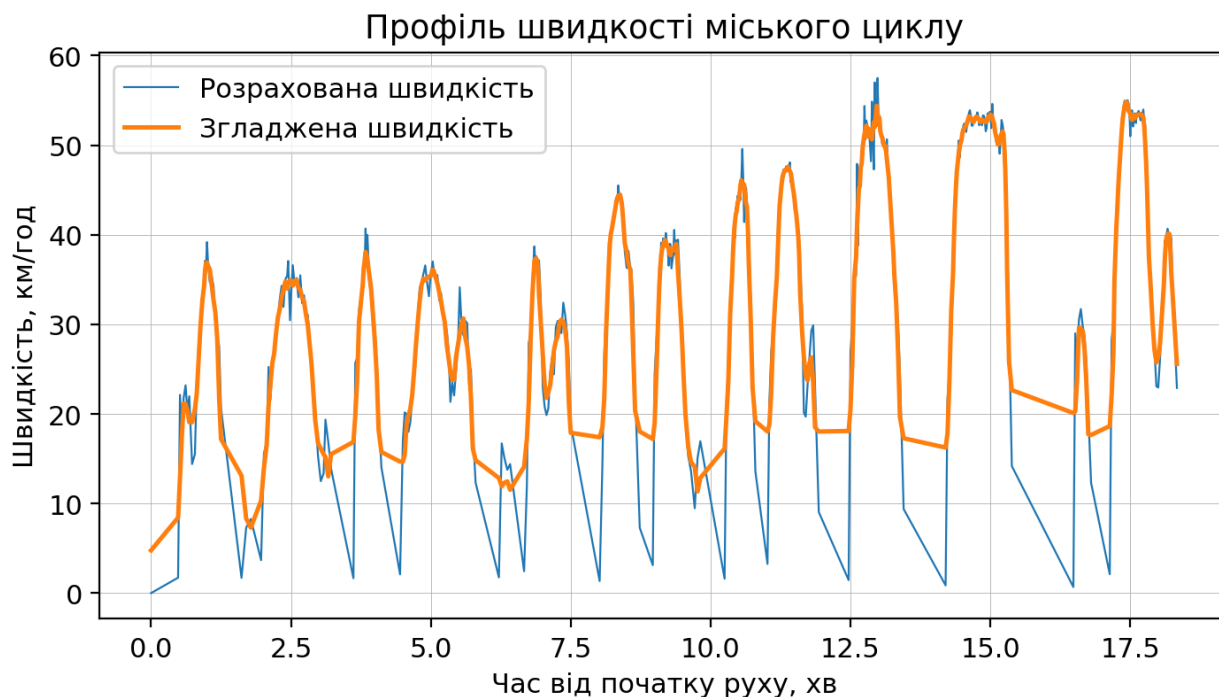


Рисунок 3.3 - Профіль швидкості, сформований за реальним міським треком

На рисунку 3.3 показано профіль швидкості, розрахований за GPX-координатами. Видно, що рух має нерівномірний міський характер: швидкість постійно змінюється, присутні розгони, уповільнення та ділянки повільного руху. Саме така структура циклу є корисною для перевірки алгоритму оптимізації енергоспоживання, оскільки в умовах міста значна частина втрат пов'язана не з рухом на сталій високій швидкості, а з повторюваними розгонами та гальмуваннями.

За згладженим профілем швидкості прискорення змінюється приблизно в межах від -1.62 до 1.52 m/s^2 .



Рисунок 3.4 - Оцінка прискорення за згладженим профілем швидкості

Урахування профілю висоти та ухилу

Окрім координат і часу, GPX-файл містить висоту кожної точки. Цей параметр може використовуватися для врахування дорожнього ухилу, який впливає на потрібну силу тяги.

$$F_{yx} = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (3.35)$$

де m - розрахункова маса електромобіля,

g - прискорення вільного падіння,

θ - кут ухилу дороги.

Для малих кутів ухил можна оцінювати через відношення зміни висоти до зміни пройденої відстані. Разом з тим GPS-висота має більшу похибку, ніж горизонтальні координати, тому її необхідно згладжувати і використовувати переважно для оцінки загального профілю маршруту, а не для жорсткого розрахунку локальних ухилів між кожними двома сусідніми точками.

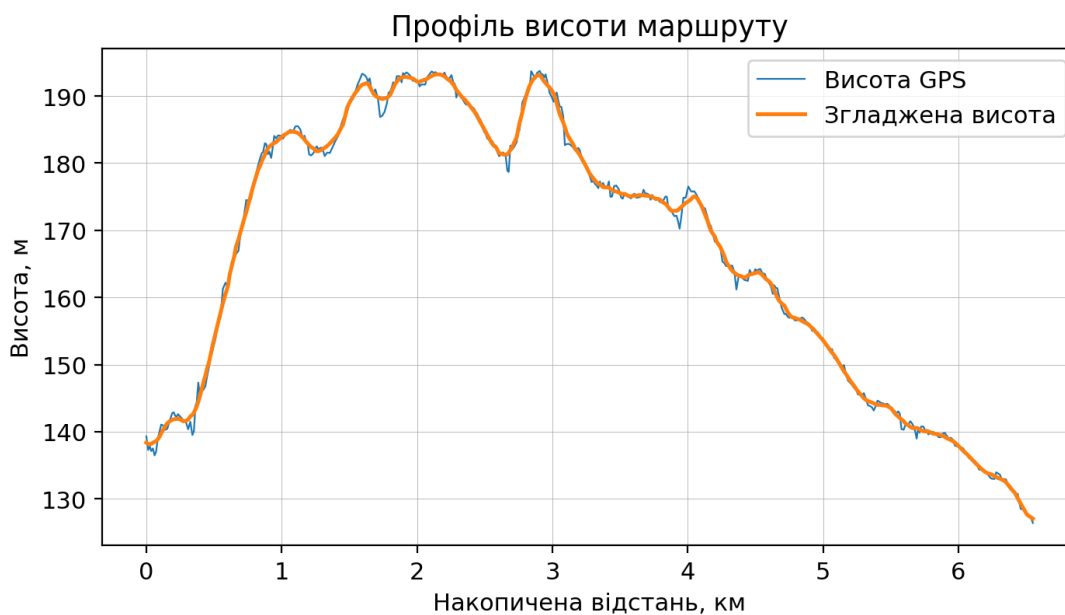


Рисунок 3.5 - Профіль висоти маршруту за GPS-даними

Початкова висота маршруту становить близько 139.3 м, кінцева - близько 126.4 м. Загальний перепад між початком і кінцем маршруту складає приблизно -12.9 м. За сирими GPS-даними максимальна висота сягає близько 193.7 м, однак локальні коливання висоти можуть бути зумовлені похибками позиціювання. Тому в подальших розрахунках доцільно використовувати згладжений профіль висоти або, за потреби, спростити модель і розглядати маршрут як горизонтальний, а вплив ухилу враховувати окремим параметром чутливості.

Формування вхідного сигналу для MATLAB/Simulink

Для подальшого моделювання отриманий міський цикл необхідно подати у вигляді набору часових рядів. Основним сигналом є швидкість $v(t)$, яка використовується як заданий профіль руху. Додатково можуть використовуватися прискорення $a(t)$, накопичена відстань $s(t)$, висота $h(t)$ та оцінка ухилу дороги. Такий набір сигналів дозволяє перевірити роботу моделі електромобіля у реальному міському режимі.

Таблиця 3.11 - Основні змінні міського циклу для моделювання

Позначення	Одиниця	Призначення
t_{cycle}	с	відносний час від початку запису
v_{cycle}	м/с	згладжений профіль швидкості для подачі у модель
a_{cycle}	м/с ²	прискорення, розраховане за профілем швидкості

Позначення	Одиниця	Призначення
s_{cycle}	м	накопичена відстань маршруту
h_{cycle}	м	згладжений профіль висоти
$grade_{cycle}$	-	оцінка ухилу дороги, якщо висота використовується у моделі

У Simulink такий цикл може бути реалізований через блоки From Workspace, Signal Editor або Signal Builder. Найзручнішим для розрахункової частини є підхід, за якого у робочу область MATLAB попередньо завантажуються масиви часу та швидкості, після чого вони подаються в модель як вхідний часовий сигнал. Це дозволяє запускати один і той самий маршрут у двох режимах: базовому, без застосування алгоритму оптимізації, та оптимізованому, з використанням розробленого алгоритму керування.

Логіка використання циклу для оцінки алгоритму

Сформований міський цикл використовується як однаковий зовнішній сценарій руху для двох варіантів моделювання. У першому варіанті електромобіль відпрацьовує заданий профіль швидкості без енергозберігаючої корекції. У другому варіанті той самий профіль подається на модель із розробленим алгоритмом, який коригує тяговий момент, обмежує зайві піки потужності, використовує рекуперацію та враховує стан батареї. Порівняння результатів виконується за витратою енергії, піковою потужністю, енергією рекуперації та плавністю зміни тягового моменту.

Важливо, що в обох випадках використовується однаковий маршрут і однакова часова структура руху. Це дає змогу оцінювати саме вплив алгоритму керування, а не вплив різних умов руху.

Таблиця 3.12 - Використання міського циклу для порівняння режимів моделювання

Елемент порівняння	Зміст
Базовий режим	Модель електромобіля відпрацьовує міський цикл без додаткової енергозберігаючої логіки. Витрата енергії використовується як початковий рівень для порівняння.
Оптимізований режим	До моделі додається розроблений алгоритм керування, який у допустимих межах змінює профіль тягового та рекуперативного моменту.

Елемент порівняння	Зміст
Порівняльні показники	Повна витрата енергії, середня витрата на 100 км, пікова потужність, відновлена енергія рекуперації, характер зміни моменту.

Таким чином, у результаті обробки реального GPX-треку автобуса маршруту №83 сформовано основу міського їздового циклу для подальшого моделювання електромобіля. Отримано часовий профіль швидкості, накопичену відстань, оцінку прискорення та висотний профіль маршруту.

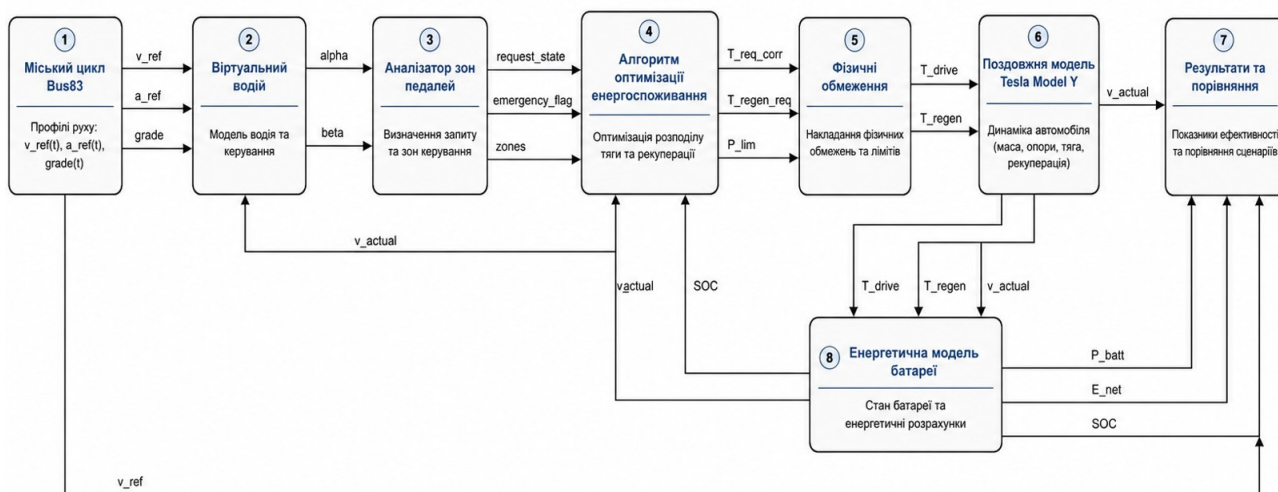


Рисунок 3.6 – Загальна структура імітаційної моделі оптимізації енергоспоживання електромобіля

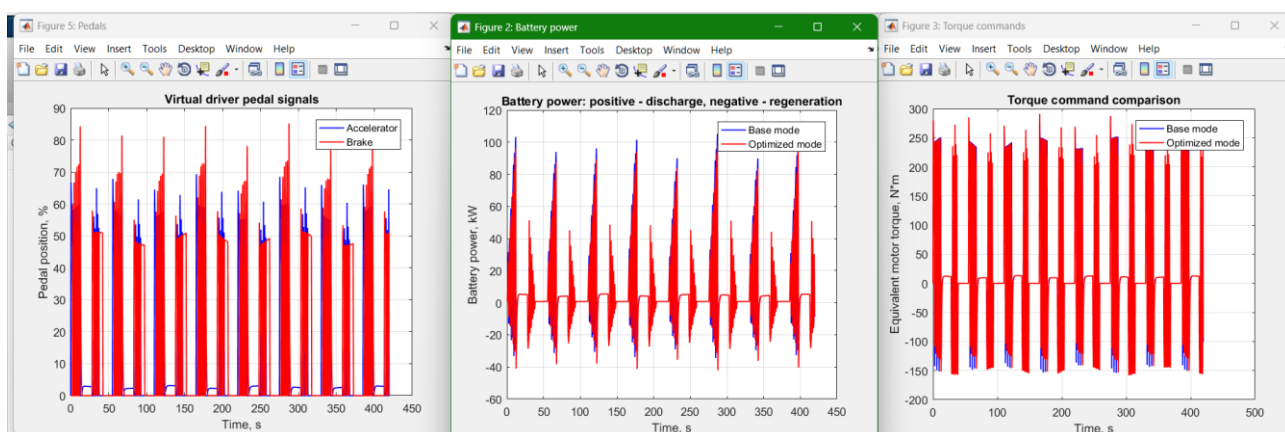


Рисунок 3.7 – Результати моделювання керування електромобілем у міському циклі: а) сигнали педалей віртуального водія; б) потужність акумуляторної батареї; в) порівняння заданого моменту тягового електродвигуна

На рисунку 3.7 наведено результати моделювання керуючих сигналів і режимів роботи тягового електропривода. Графік сигналів педалей характеризує роботу віртуального водія, графік потужності батареї відображає чергування тягового та рекуперативного режимів, а графік моменту показує вплив алгоритму оптимізації на формування керуючого завдання для електродвигуна.

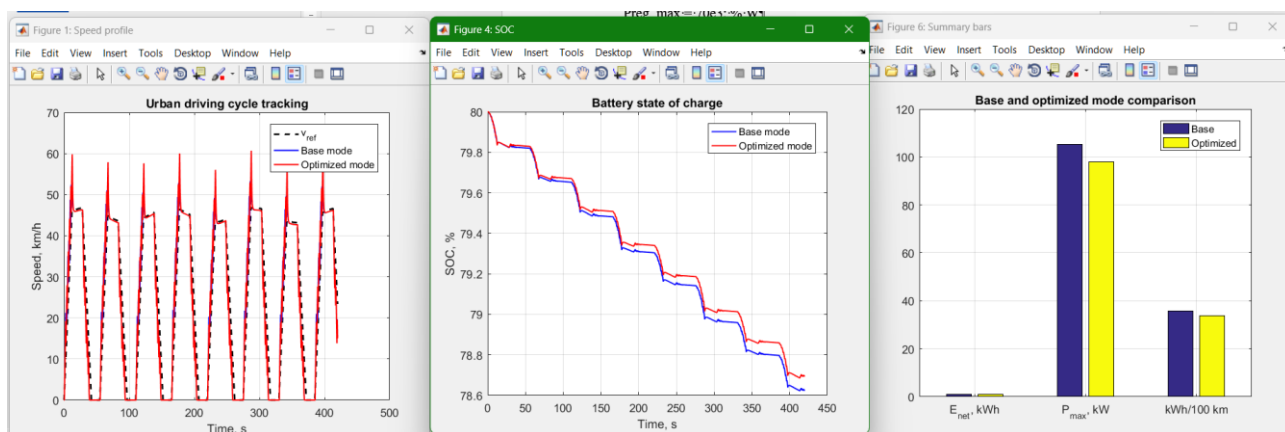


Рисунок 3.8 – Енергетичні результати моделювання базового та оптимізованого режимів: а) відстеження швидкісного профілю міського циклу; б) зміна стану заряду акумуляторної батареї; в) порівняння узагальнених показників енергоспоживання

На рисунку 3.8 наведено енергетичні результати моделювання електромобіля в базовому та оптимізованому режимах. Графік відстеження швидкісного профілю демонструє збереження заданої динаміки руху, графік зміни стану заряду акумуляторної батареї відображає характер витрати енергії, а стовпчикове порівняння узагальнює основні показники ефективності запропонованого алгоритму.

Висновки до розділу

Запропонований алгоритм має найбільший сенс у міському русі, де часто чергуються розгони, гальмування, вибіг і зупинки. Його перевага полягає в тому,

що енергоощадна корекція виконується без зміни основної логіки керування автомобілем водієм. За результатами моделювання алгоритм забезпечив зниження питомої витрати енергії приблизно на 4,94 % при збереженні здатності автомобіля відстежувати заданий міський цикл.

Разом із тим алгоритм має природні межі застосування. Він не повинен обмежувати максимальний запит на розгін, аварійне гальмування або роботу штатних систем безпеки. Тому його практичне використання потребує якісних вхідних даних, калібрування під конкретний електромобіль і перевірки у розширеній моделі або на випробувальному стенді. У такому вигляді алгоритм можна розглядати як перспективний верхньорівневий інструмент зменшення енергоспоживання електромобіля в міському циклі.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

4.1 Вступ

Охорона праці є важливою складовою безпечної експлуатації електричного транспортного засобу, оскільки його робота пов'язана з дією електричних, механічних, теплових, пожежонебезпечних та психофізіологічних факторів. У міському циклі ці фактори посилюються через інтенсивний транспортний потік, часті розгони й гальмування, зупинки, зміну дорожньої обстановки та необхідність постійного контролю з боку водія.

Законодавча база охорони праці в Україні визначається Законом України «Про охорону праці», Кодексом законів про працю України, нормативно-правовими актами з охорони праці, правилами безпечної експлуатації електроустановок та галузевими вимогами до міського електричного транспорту. Закон України «Про охорону праці» встановлює основні положення щодо реалізації права працівників на безпечні й здорові умови праці, а також визначає обов'язки роботодавця щодо їх створення [16].

У даній бакалаврській роботі розглядається розробка алгоритму оптимізації енергоспоживання електричного транспортного засобу в міському циклі. Об'єкт дослідження пов'язаний з роботою тягового електропривода, акумуляторної батареї, силової електроніки, системи рекуперативного гальмування та допоміжних електричних систем. Тому в розділі особливу увагу приділено електробезпеці, контролю технічного стану високовольтного обладнання та попередженню аварійних режимів.

Основними джерелами потенційної небезпеки є підвищена напруга в електричних колах, можливість пошкодження ізоляції, перегрів акумуляторної батареї або силових елементів, рух транспортного засобу в умовах міського потоку, вплив шуму й вібрації, а також напруженість праці водія. Під час заряджання, діагностики або технічного обслуговування додатково виникає

необхідність дотримання вимог електробезпеки, застосування захисних пристроїв і справного заземлення [17–21].

Метою цього розділу є аналіз небезпечних і шкідливих факторів, які можуть виникати при експлуатації електричного транспортного засобу в міському циклі, та розробка організаційно-технічних заходів для забезпечення безпеки водія, обслуговуючого персоналу і пасажирів. Запропонований алгоритм оптимізації енергоспоживання розглядається як додатковий технічний засіб підвищення надійності роботи електропривода за рахунок контролю струму, напруги, температури та режимів навантаження.

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів

Експлуатація електричного транспортного засобу в міському циклі супроводжується дією комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Аналіз виконується виходячи з того, що фактори поділяються на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні. Для даного об'єкта найбільш суттєвими є фізичні, електричні, пожежонебезпечні та психофізіологічні фактори [22].

До фізичних небезпечних факторів належить рух транспортного засобу в міському потоці. Водій постійно взаємодіє з іншими учасниками дорожнього руху, пішоходами, світлофорами, зупинками та дорожніми перешкодами. Часті зміни швидкості, контроль дистанції та виконання маневрів підвищують імовірність небезпечних ситуацій, особливо у разі несправності гальмівної системи, рульового керування або систем електронного контролю тяги.

Окрему групу фізичних факторів становлять шум, вібрація, мікроклімат та освітлення. Під час руху виникають шум від кочення шин, робота редуктора, вентиляційних систем і допоміжного обладнання. Вібрація передається на робоче місце водія через кузов, підвіску та сидіння. Підвищена або знижена температура, недостатня вентиляція, запотівання скла, засліплення або

відблиски на панелі приладів можуть спричиняти втому, зниження уваги та погіршення швидкості реакції.

Найбільш характерним небезпечним фактором для електричного транспортного засобу є підвищена напруга в електричних колах. Джерелами електричної небезпеки є акумуляторна батарея, інвертор, тяговий електродвигун, високовольтні кабелі, зарядний роз'єм, зарядна станція та діагностичне обладнання. Небезпека ураження електричним струмом може виникати при пошкодженні ізоляції, порушенні герметичності з'єднань, аварії або недотриманні правил роботи з електроустановками [17–21].

Під час заряджання транспортного засобу додатково виникають ризики, пов'язані з підключенням до зовнішньої електричної мережі: пошкодження зарядного кабелю, несправність захисного заземлення, перегрів контактів, коротке замикання або використання несправного зарядного обладнання. Саме тому заряджання і технічне обслуговування мають виконуватися з дотриманням вимог електробезпеки.

Пожежонебезпечні фактори пов'язані з можливим перегрівом акумуляторної батареї, силових кабелів, інвертора або зарядного обладнання. Причинами перегріву можуть бути перевантаження електричних кіл, порушення режимів заряджання, несправність системи охолодження, механічне пошкодження батареї або коротке замикання. У таких ситуаціях можливе задимлення, займання ізоляційних матеріалів або пошкодження електронних компонентів.

Хімічні фактори для нормальної експлуатації електричного транспортного засобу менш виражені, ніж для транспорту з двигуном внутрішнього згорання. Проте вони можуть виникати в аварійних ситуаціях, зокрема при пошкодженні акумуляторної батареї, витіканні електроліту або виділенні продуктів термічного розкладання матеріалів батареї та ізоляції. Біологічні фактори не є основними, однак можуть проявлятися при масових пасажирських перевезеннях через контакт водія з великою кількістю людей і забруднення поверхонь у кабіні.

Психофізіологічні фактори мають суттєве значення для міського циклу. Робота водія пов'язана з постійною увагою, швидким прийняттям рішень, контролем дорожньої обстановки, пасажирів, сигналів світлофорів і показників транспортного засобу. Часті розгони, гальмування та рух у щільному потоці підвищують нервово-емоційне навантаження. Алгоритм оптимізації енергоспоживання не повинен створювати додаткову небезпеку: економічний режим не може обмежувати необхідний розгін, гальмування або маневр у критичній ситуації.

Таблиця 4.1 – Небезпечні та шкідливі фактори при експлуатації електричного транспортного засобу в міському циклі

Група факторів	Джерело виникнення	Можливі наслідки
Фізичні	Рух транспортного засобу, шум, вібрація, мікроклімат, освітлення	ДТП, втома водія, зниження уваги, погіршення огляду
Електричні	Акумуляторна батарея, інвертор, електродвигун, зарядне обладнання, високовольтні кабелі	Ураження електричним струмом, коротке замикання, пошкодження обладнання
Пожежонебезпечні	Перегрів батареї, силової електроніки, кабелів, зарядних контактів	Задимлення, займання, пошкодження транспортного засобу
Хімічні	Пошкодження акумуляторної батареї або ізоляційних матеріалів	Подразнення органів дихання, шкіри, слизових оболонок
Біологічні	Контакт із пасажирями, забруднення поверхонь у салоні та кабіні	Ризик поширення інфекційних захворювань
Психофізіологічні	Інтенсивний міський рух, часті зупинки, відповідальність за пасажирів	Перевтома, зниження концентрації, нервово-емоційне напруження

Таким чином, основними небезпечними факторами є електрична небезпека, аварійні режими високовольтного обладнання, пожежонебезпека, вплив міського транспортного середовища та психофізіологічне навантаження на водія. Подальші заходи повинні бути спрямовані на забезпечення електробезпеки, контроль технічного стану транспортного засобу і зменшення напруженості праці водія.

4.3 Організаційно-технічні заходи по забезпеченню безпеки

На основі проведеного аналізу основними напрямками забезпечення безпеки є організація безпечної роботи водія, контроль технічного стану електрообладнання, забезпечення електробезпеки під час заряджання та технічного обслуговування, попередження пожежонебезпечних режимів і зменшення психофізіологічного навантаження.

Організаційні заходи передбачають допуск до експлуатації транспортного засобу лише працівників, які пройшли навчання, інструктаж і перевірку знань з питань охорони праці [23]. Водій повинен знати порядок безпечної експлуатації, дії у разі несправностей, порядок аварійної зупинки, вимоги пожежної безпеки та особливості роботи електропривода й акумуляторної батареї. Працівники, які виконують заряджання, діагностику або обслуговування високовольтного обладнання, повинні мати відповідний допуск до робіт з електроустановками.

Перед виїздом на лінію необхідно проводити передрейсовий контроль технічного стану. Перевіряють справність гальмівної системи, рульового керування, освітлювальних приладів, шин, сигналізації, органів керування та відсутність аварійних повідомлень. Для електричного транспортного засобу додатково контролюють стан заряду акумуляторної батареї, температуру батареї і силових елементів, справність системи охолодження, відсутність пошкоджень зарядного роз'єму та кабельних з'єднань.

Особливу увагу слід приділяти електробезпеці [17 - 21]. Доступ до струмоведучих частин має бути обмежений конструктивними кожухами, ізоляцією, блокуваннями та попереджувальними знаками. Забороняється експлуатація транспортного засобу за наявності пошкодження ізоляції, відкритих високовольтних з'єднань, перегріву кабельних ліній, слідів оплавлення або запаху горілої ізоляції. Під час обслуговування високовольтної системи необхідно передбачати знеструмлення відповідних кіл, перевірку відсутності напруги, застосування ізольованого інструменту та засобів індивідуального захисту.

Під час заряджання необхідно перевіряти справність зарядного кабелю, роз'єму, корпусу зарядного пристрою та захисного заземлення. Заряджання не допускається при пошкодженій ізоляції кабелю, наявності вологи в роз'ємі, перегріві контактів, нестабільній роботі зарядного обладнання або появи аварійних сигналів. Зарядна зона повинна бути сухою, освітленою, вільною від сторонніх предметів і мати достатній доступ для безпечного підключення та відключення транспортного засобу (рис. 4.1).

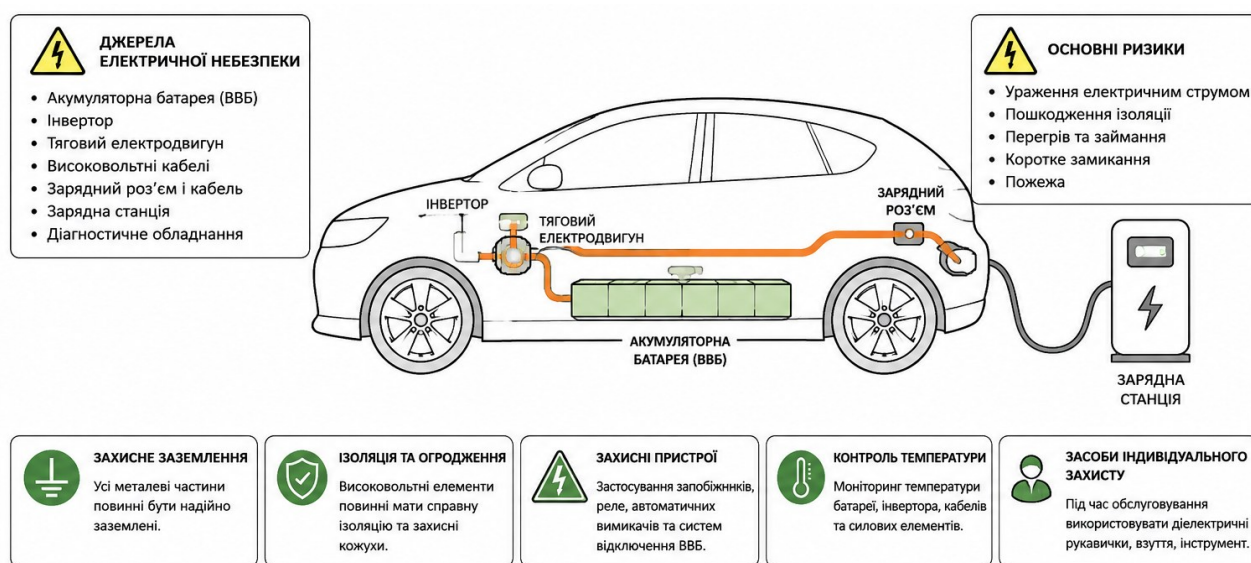


Рисунок 4.1 – Електробезпека при експлуатації електромобільного транспорту

Для зменшення ризику ураження електричним струмом зарядне та діагностичне обладнання повинно мати справне захисне заземлення і пристрої автоматичного захисного відключення. Захисне заземлення призначене для зниження напруги дотику у разі пошкодження ізоляції та появи напруги на металевих частинах обладнання. Орієнтовний розрахунок захисного заземлення для зарядного поста виконуємо за допустимим опором заземлювального пристрою не більше 4 Ом.

Для розрахунку приймаємо: питомий опір ґрунту $\rho = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, коефіцієнт сезонності $\psi = 1,1$, довжину вертикального заземлювача $l = 3 \text{ м}$, діаметр $d = 0,05 \text{ м}$, відстань від поверхні землі до середини заземлювача $H = 3,2 \text{ м}$, коефіцієнт використання групового заземлювача $\eta = 0,75$.

Розрахунковий питомий опір ґрунту визначається за формулою:

$$\rho_{\text{розр}} = \psi \cdot \rho = 1,1 \cdot 150 = 165 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (4.1)$$

За прийнятими параметрами опір розтікання струму одиночного вертикального заземлювача становить:

$$R_0 \approx 44,9 \text{ Ом} \quad (4.2)$$

Необхідна кількість вертикальних заземлювачів визначається за формулою:

$$n = R_0 / (R_{\text{доп}} \cdot \eta) \quad (4.3)$$

де $R_{\text{доп}}$ – допустимий опір заземлювального пристрою, Ом;

η – коефіцієнт використання групового заземлювача.

$$n = 44,9 / (4 \cdot 0,75) = 14,96 \approx 15 \text{ шт.} \quad (4.4)$$

Якщо відстань між вертикальними заземлювачами $a = 3$ м, довжина горизонтальної з'єднувальної смуги становить:

$$L = a \cdot (n - 1) = 3 \cdot (15 - 1) = 42 \text{ м} \quad (4.5)$$

Із урахуванням горизонтальної з'єднувальної смуги результуючий опір заземлювального пристрою становить:

$$R_3 = 3,36 \text{ Ом} < R_{\text{доп}} = 4 \text{ Ом} \quad (4.6)$$

Отже, прийнята схема заземлення забезпечує необхідний рівень електробезпеки для зарядного або діагностичного обладнання.

Крім заземлення, важливим технічним заходом є застосування захисного відключення. При виникненні струму витоку, пошкодженні ізоляції або появи небезпечної напруги на металевих частинах обладнання захисний пристрій повинен автоматично відключати живлення, що зменшує ризик ураження людини електричним струмом.

Для попередження пожежонебезпечних ситуацій необхідно забезпечити контроль температури акумуляторної батареї, інвертора, електродвигуна, зарядних контактів і силових кабелів. Система керування повинна обмежувати режими роботи при перегріві або перевантаженні, а у разі критичних значень переводити транспортний засіб у безпечний режим або забороняти подальшу експлуатацію. У місцях заряджання й технічного обслуговування повинні бути первинні засоби пожежогасіння, а персонал має знати порядок дій при задимленні чи ознаках займання [24, 25].

Робоче місце водія повинно забезпечувати нормальні умови праці протягом перебування на маршруті. Кабіна має бути обладнана справним сидінням, системою вентиляції та опалення, засобами обігріву й очищення скла, достатнім освітленням панелі приладів та органів керування. Оглядовість не повинна обмежуватися сторонніми предметами, забрудненням скла або несправністю дзеркал і камер огляду.

Для зменшення впливу шуму й вібрації необхідно підтримувати справний стан підвіски, шин, колісних вузлів, редуктора, кріплень електродвигуна та елементів кузова. Водійське сидіння повинно мати справне регулювання та амортизацію. Психофізіологічне навантаження зменшується за рахунок раціонального режиму праці й відпочинку, недопущення перевтоми, зручного розташування інформаційних індикаторів і прогнозованої реакції транспортного засобу на дії водія.

Запропонований у роботі алгоритм оптимізації енергоспоживання повинен працювати з пріоритетом безпеки. Економія енергії не може бути причиною обмеження необхідного прискорення, гальмування або маневрування в небезпечній ситуації. У разі різкого натискання на педаль акселератора або

гальма алгоритм повинен розпізнавати пріоритет дії водія та забезпечувати необхідну динаміку транспортного засобу.

Додатковим позитивним ефектом алгоритму є контроль режимів роботи електропривода. Обмеження надмірних струмів, контроль температури силових елементів, плавніше формування тягового зусилля та раціональне використання рекуперативного гальмування зменшують навантаження на електричні компоненти. Це сприяє не тільки зниженню енергоспоживання, але й підвищенню надійності та безпечності експлуатації електричного транспортного засобу.

Висновки по розділу

У цьому розділі було розглянуто питання охорони праці та електробезпеки при експлуатації електричного транспортного засобу в умовах міського циклу. Основну увагу приділено факторам, які можуть впливати на водія, обслуговуючий персонал і пасажирів під час руху, заряджання, діагностики та технічного обслуговування.

Встановлено, що найбільш суттєвими небезпечними факторами є підвищена напруга у високовольтних колах, пошкодження ізоляції, коротке замикання, перегрів акумуляторної батареї, силової електроніки та зарядного обладнання. Також враховано фізичні фактори, пов'язані з рухом транспортного засобу, шумом, вібрацією, мікрокліматом і освітленістю робочого місця водія, а також психофізіологічне навантаження в інтенсивному міському потоці.

Для зниження рівня ризику запропоновано комплекс організаційно-технічних заходів: навчання й інструктаж персоналу, передрейсовий контроль технічного стану, контроль високовольтної батареї, силових кабелів, інвертора, електродвигуна, зарядного обладнання та системи охолодження. Особливе значення має електробезпека, що забезпечується справною ізоляцією,

конструктивним закриттям струмоведучих частин, захисним заземленням, пристроями захисного відключення та попереджувальним маркуванням.

Виконано орієнтовний розрахунок захисного заземлення для зарядного або діагностичного обладнання. За результатами розрахунку прийнята схема забезпечує допустиме значення опору заземлювального пристрою. Окремо розглянуто заходи пожежної безпеки, пов'язані з контролем температури акумуляторної батареї, силових елементів і зарядних контактів.

Запропонований алгоритм оптимізації енергоспоживання може мати додатковий позитивний вплив на безпечність експлуатації. Контроль струму, напруги, температури та режимів роботи електропривода сприяє зменшенню перевантажень електричних компонентів і підвищенню стабільності роботи системи. При цьому робота алгоритму повинна підпорядковуватися вимогам безпеки руху, а економія енергії не повинна обмежувати необхідні дії водія в критичних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто задачу оптимізації енергоспоживання електромобіля в міському циклі руху. У результаті аналізу встановлено, що основний вплив на витрати енергії мають маса транспортного засобу, сили опору руху, режим розгону й гальмування, можливості рекуперації, стан акумуляторної батареї та характер дій водія.

Проаналізовано існуючі підходи до зменшення енергоспоживання електромобілів, зокрема енергоощадне керування, алгоритми на основі правил, адаптивні стратегії, прогнозне керування та керування рекуперативним гальмуванням. Обґрунтовано доцільність застосування алгоритму верхнього рівня на основі правил з адаптивною корекцією, який не втручається в низькорівневе керування електродвигуном та інвертором, а формує енергоощадні керуючі завдання для тягового приводу.

Розроблено структуру алгоритму енергоощадного керування, визначено його вхідні та вихідні параметри, а також логіку роботи в режимах розгону, сталого руху, вибігу, гальмування та зупинки. Алгоритм враховує положення педалей, швидкість їх зміни, поточну швидкість, прискорення, обмеження тягового електропривода, стан батареї та можливості рекуперативного гальмування.

Для перевірки роботи алгоритму побудовано математичну модель електромобіля, близького за параметрами до Tesla Model Y. У моделі враховано поздовжню динаміку руху, опір коченню, аеродинамічний опір, тягову потужність, енергетичний баланс батареї та рекуперативне гальмування. Міський цикл сформовано на основі реального GPX-треку руху автобуса маршруту №83 у місті Харків, що дозволило використати реальний профіль швидкості з розгонами, уповільненнями та зупинками.

За результатами моделювання встановлено, що застосування запропонованого алгоритму дозволяє зменшити чисті витрати енергії з 936,4 до 890,1 Вт·год на маршруті довжиною близько 6,55 км. Питоме енергоспоживання

зменшилося з 14,30 до 13,60 кВт·год/100 км, що відповідає економії 4,94 %. При цьому якість відтворення швидкісного профілю не погіршилася, а розрахунковий запас ходу збільшився приблизно на 27 км.

Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованого алгоритму для зменшення енергоспоживання електромобіля в міському циклі. Найбільший ефект очікується в умовах руху з частими розгонами, гальмуваннями та зупинками, де є можливість зменшувати пікові навантаження тягового приводу та ефективніше використовувати рекуперацію.

У розділі охорони праці проаналізовано небезпечні та шкідливі фактори, пов'язані з експлуатацією електричного транспортного засобу, зокрема електричну небезпеку, пожежонебезпечні режими, вплив шуму, вібрації та психофізіологічне навантаження на водія. Запропоновано організаційно-технічні заходи для забезпечення безпечної експлуатації електромобіля та виконано розрахунок захисного заземлення.

Таким чином, мету бакалаврської кваліфікаційної роботи досягнуто: розроблено та перевірено алгоритм оптимізації енергоспоживання електромобіля в міському циклі. Результати моделювання показали, що алгоритмічне керування тяговим моментом і рекуперацією може забезпечити помітне зниження витрат енергії без зміни конструкції електромобіля та без погіршення очікуваної поведінки транспортного засобу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. United Nations Economic Commission for Europe. UN Regulation No. 154: Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP). URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-08/R154e.pdf>
2. Fuel Economy and EV Range Testing / U.S. Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov/greenvehicles/fuel-economy-and-ev-range-testing>
3. Aslan E., Yasa Y., Meseci Y., Keskin Arabul F., Arabul A. Y. Comprehensive Multidisciplinary Electric Vehicle Modeling: Investigating the Effect of Vehicle Design on Energy Consumption and Efficiency. Sustainability. 2024. Vol. 16, No. 12. Article 4928. DOI: 10.3390/su16124928 .
4. Szumska E. M. Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Design, Control Strategies, and Efficiency Challenges. Energies. 2025. Vol. 18, No. 10. Article 2422. DOI: 10.3390/en18102422.
5. Chen Y., Wu G., Sun R., Dubey A., Laszka A., Pugliese P. A Review and Outlook of Energy Consumption Estimation Models for Electric Vehicles. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2021. Vol. 94. Article 102809. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102809. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1824218>
6. Saly G., Szauter F., Kocsis Szürke S. Comprehensive Analysis of the Factors Affecting the Energy Efficiency of Electric Vehicles and Methods to Reduce Consumption: A Review. Engineering Proceedings. 2024. Vol. 79, No. 1. Article 79. DOI: 10.3390/engproc2024079079. URL: <https://www.mdpi.com/2673-4591/79/1/79>
7. Impact of Cold Ambient Temperature on BEV Performance / U.S. Department of Energy. 2024. URL: https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-10/Impact_of_Cold_Ambient_Temperature_on_BEV_Performance_v15_TechEditFinal_12Sep2024_0.pdf
8. Tarout H., Zaki H., Chahbouni A., Ennajih E., Louragli E. M. Optimizing Energy Consumption in Electric Vehicles: A Systematic and Bibliometric Review of

Recent Advances. World Electric Vehicle Journal. 2025. Vol. 16, No. 10. Article 577. DOI: 10.3390/wevj16100577. URL: <https://www.mdpi.com/2032-6653/16/10/577>

9. Lu Z., Zhang T., Li R., Ni X. Driving-Cycle-Adaptive Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage Electric Vehicles. World Electric Vehicle Journal. 2025. Vol. 16, No. 6. Article 313. DOI: 10.3390/wevj16060313. URL: <https://www.mdpi.com/2032-6653/16/6/313>

10. Lot R., Fleming J., Chen B., Evangelou S. Eco-driving optimal control for electric vehicles with driver preferences. Transportation Engineering. 2025. Vol. 19. Article 100302. DOI: 10.1016/j.treng.2025.100302. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666691X25000028>

11. Brady J., O'Mahony M. Development of a driving cycle to evaluate the energy economy of electric vehicles in urban areas. Applied Energy. 2016. Vol. 177. P. 165–178. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.05.094. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916306924>

12. UN Regulation No. 100. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train. United Nations Economic Commission for Europe. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2024-01/R0100r3e.pdf>

13. ISO 26262-1:2018. Road vehicles – Functional safety – Part 1: Vocabulary. International Organization for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/68383.html>

14. EV Reference Application. MATLAB & Simulink Documentation. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/autoblks/ug/electric-vehicle-reference-application.html>

15. Tesla Model Y Long Range RWD (Juniper) (2025) price and specifications. EV Database. URL: <https://ev-database.org/car/3120/Tesla-Model-Y-Long-Range-RWD>

16. Закон України «Про охорону праці» : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>

17. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації

електроустановок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0011-98>

18. НПАОП 40.1-1.07-01. Правила експлуатації електрозахисних засобів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1237-01>

19. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98>

20. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=27607

21. ДСТУ EN 50110-1:2014. Експлуатація електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=73372

22. Методичні вказівки до виконання розділу до виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» в дипломних проєктах та магістерських роботах бакалаврів, спеціалістів й магістрів усіх форм навчання спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2026. - 19 с.

23. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05>

24. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60541

25. НАПБ Б.01.008-2018 Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82176

26. Гагарін Д.В. , Антосик А.О. ДОЦІЛЬНІСТЬ ТА ПРОБЛЕМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ДО МЕРЕЖІ НА РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ // [Матеріали XIX Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «Сталий розвиток міст: поствоєнний період» \(91-ї науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова\) : в 5-и ч. / Ч. 2. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. С. 7-9](#)