

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерії машин, споруд та технологій

(назва факультету)

Автотранспорту та логістики

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка алгоритму прогнозування запасу ходу електромобіля з урахуванням дорожніх умов, стилю керування та температурних факторів

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи МА-42
спеціальності 274

«Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

Володимир МАРЧУК
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Дмитро МІРОНОВ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Роман ХОРОШУН
(підпис) (прізвище та ініціали)

Зав. кафедри Олег ЦЬОНЬ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Олена ДМИТРІВ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра Кафедра автотранспорту та логістики
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«21» січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Марчуку Володимирі Костянтиновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка алгоритму прогнозування запасу ходу електромобіля з урахуванням дорожніх умов, стилю керування та температурних факторів

Керівник роботи Міронов Дмитро Вікторович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «21» січня 2026 року № 4/9-44

2. Термін подання студентом завершеної роботи 14 червня 2026

3. Вихідні дані до роботи Технічні параметри основних вузлів, зарядних пристроїв та параметри АКБ для електро- і гібридних автомобілів.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Загально-технічний розділ. 2 Технологічний розділ. 3 Конструкторський розділ.

4 Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Динаміка розвитку електромобільності у світі та Україні, а також основні фактори, що впливають на запас ходу електромобіля – 1А1.

Класифікація сучасних методів прогнозування запасу ходу електромобіля – 1А1.

Енергетичний баланс електромобіля та силова схема руху – 1А1.

Урахування дорожніх умов і стилю керування в алгоритмі прогнозування – 1А1.

Структурна схема розрахунку прогнозованого запасу ходу – 1А1.

Структурна схема алгоритму прогнозування запасу ходу – 1А1.

Сценарний аналіз прогнозованого запасу ходу електромобіля – 1А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці			

7. Дата видачі завдання

21.01.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	01.02.2026	
2	Технологічний розділ	08.02.2026	
3	Конструкторський розділ	15.02.2026	
4	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	07.06.2026	
5	Оформлення графічної частини	14.06.2026	
6	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	15.06.2026	

Студент

_____ (підпис)

Володимир МАРЧУК

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Дмитро МІРОНОВ

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної роботи бакалавра на тему: «Розробка алгоритму прогнозування запасу ходу електромобіля з урахуванням дорожніх умов, стилю керування та температурних факторів».

Метою роботи є підвищення достовірності оцінювання залишкового запасу ходу електромобіля шляхом розробки алгоритму, який враховує не лише поточний рівень заряду тягової акумуляторної батареї, а й реальні умови руху транспортного засобу.

Об'єктом дослідження є процес формування енергоспоживання електромобіля під час руху в реальних експлуатаційних умовах. Предметом дослідження є математичні залежності, розрахункові параметри та алгоритмічні підходи, які дають змогу прогнозувати запас ходу електромобіля з урахуванням змінних дорожніх, кліматичних і поведінкових факторів.

У роботі розглянуто сучасний стан розвитку електромобільності та визначено, що однією з важливих експлуатаційних проблем електромобілів залишається відхилення фактичного запасу ходу від паспортних значень. Сформовано математичну модель розрахунку енергоспоживання електромобіля. В основу моделі покладено визначення сумарної сили опору руху, тягової потужності та питомої витрати енергії на окремих ділянках маршруту. Розроблено структурну схему алгоритму прогнозування запасу ходу електромобіля. Алгоритм передбачає зчитування вихідних даних про стан акумуляторної батареї, параметри руху, дорожній профіль і температуру, подальшу обробку цих даних, розрахунок базового енергоспоживання, внесення коригувальних коефіцієнтів та визначення прогнозованого залишкового пробігу.

Пояснювальна записка складається з чотирьох розділів і 67 сторінок формату А4 та 7 аркушів формату А1 графічної частини і 7 сторінок додатків.

Ключові слова: електромобіль, запас ходу, енергоспоживання, тяговий акумулятор, дорожні умови, стиль керування, температура, рекуперація, математична модель, алгоритм прогнозування.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	6
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Сучасний стан розвитку електромобільності та проблема достовірності запасу ходу	8
1.2 Основні фактори, що впливають на енергоспоживання електромобіля	11
1.3 Аналіз сучасних методів прогнозування запасу ходу	15
1.4 Джерела даних для алгоритму прогнозування	20
1.5 Постановка задач дослідження	21
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	23
2.1 Вибір базових параметрів електромобіля для розрахунку	23
2.2 Математична модель тягового енергоспоживання	25
2.3 Урахування дорожніх умов	29
2.4 Урахування стилю керування	32
2.5 Урахування температурних факторів	36
2.6 Розрахунок прогнозованого запасу ходу	39
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	43
3.1 Розробка структурної схеми алгоритму	43
3.2 Формування набору вхідних і вихідних параметрів	46
3.3 Алгоритм прогнозування для відомого маршруту і без заданого маршруту	49
3.4 Виконання розрахунку та сценарний аналіз	52
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	57
4.1 Основні принципи та функції управління охороною праці під час досліджень електромобіля	57
4.2 Концепція захисту населення і території у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	63
БІБЛІОГРАФІЯ	65
ДОДАТКИ	68

ВСТУП

Сучасний розвиток автомобільного транспорту характеризується активним переходом до електрифікованих силових установок, зростанням частки електромобілів у структурі світового автопарку та підвищенням вимог до енергетичної ефективності транспортних засобів. Електромобілі поступово стають не лише альтернативою автомобілям з двигунами внутрішнього згоряння, а й важливим елементом сталої транспортної системи, оскільки забезпечують зниження локальних викидів, зменшення шумового навантаження у містах та можливість використання електроенергії з відновлюваних джерел.

Водночас експлуатація електромобілів супроводжується низкою технічних та організаційних проблем, однією з яких є достовірне визначення залишкового запасу ходу. На відміну від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, де запас ходу відносно просто оцінюється за кількістю пального в баку та середньою витратою, в електромобілі цей показник має значно складнішу природу. Фактичний пробіг на одному заряді залежить не лише від ємності тягової акумуляторної батареї, а й від швидкості руху, прискорень, дорожнього ухилу, температури навколишнього середовища, стану батареї, роботи системи опалення або кондиціонування, інтенсивності рекуперації та стилю керування водія.

Паспортний запас ходу електромобіля, визначений за стандартизованими випробувальними циклами, часто відрізняється від реального пробігу в повсякденній експлуатації. У міських умовах на енергоспоживання істотно впливають часті зупинки, розгони, робота допоміжних систем і можливість рекуперативного гальмування. Під час руху автомагістраллю головним фактором стає аеродинамічний опір, який швидко зростає зі збільшенням швидкості. На маршрутах зі значними перепадами висот суттєву роль відіграє енергія, необхідна для подолання підйомів, а також ефективність повернення частини енергії під час спусків. У зимовий період запас ходу може помітно зменшуватися через зниження ефективної ємності батареї, збільшення внутрішнього опору акумуляторних елементів і додаткові витрати енергії на обігрів салону та підтримання оптимальної температури батареї.

Недостатня точність прогнозування запасу ходу створює для водія невизначеність під час планування маршруту, особливо за умови руху на далекі відстані, експлуатації в холодну пору року або на дорогах зі складним рельєфом. Це може призводити до надмірного резервування заряду, частіших зупинок для підзаряджання, збільшення часу поїздки та зниження довіри користувача до електромобіля. Тому задача точнішого прогнозування залишкового пробігу є актуальною як з погляду підвищення зручності експлуатації, так і з погляду раціонального використання енергії тягової акумуляторної батареї.

Актуальність теми роботи полягає у необхідності розробки такого підходу до прогнозування запасу ходу електромобіля, який враховує сукупний вплив

дорожніх умов, температурних факторів і поведінки водія. Традиційна оцінка запасу ходу за середнім енергоспоживанням не дає достатньої точності, оскільки не розрізняє режимів руху, не враховує майбутній профіль маршруту та недостатньо швидко адаптується до змін стилю керування. Більш ефективним є використання алгоритму, який поєднує фізико-математичний розрахунок енергоспоживання з коригувальними коефіцієнтами або адаптивними залежностями, що описують реальні умови експлуатації.

Метою роботи є розробка алгоритму прогнозування запасу ходу електромобіля з урахуванням дорожніх умов, стилю керування та температурних факторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан розвитку електромобільності та визначити основні проблеми, пов'язані з оцінюванням реального запасу ходу електромобіля.
2. Розглянути основні технічні, дорожні, кліматичні та поведінкові фактори, які впливають на енергоспоживання електромобіля під час руху.
3. Проаналізувати існуючі підходи до прогнозування запасу ходу, зокрема фізико-математичні, статистичні, машинні та гібридні методи.
4. Сформулювати перелік вхідних параметрів, необхідних для роботи алгоритму прогнозування запасу ходу.
5. Розробити математичну модель розрахунку тягового енергоспоживання електромобіля з урахуванням сил опору руху, ухилу дороги та режиму руху.
6. Запропонувати спосіб урахування стилю керування водія через показники швидкості, прискорення, інтенсивності розгонів і гальмувань.
7. Визначити підхід до врахування температурного впливу на доступну енергію батареї, роботу допоміжних систем і загальне енергоспоживання.
8. Розробити структурну схему алгоритму прогнозування залишкового запасу ходу електромобіля.
9. Перевірити працездатність запропонованого алгоритму на типових сценаріях руху та оцінити вплив окремих факторів на кінцевий прогноз.

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Сучасний стан розвитку електромобільності та проблема достовірності запасу ходу

Електромобільність у світі перейшла з фази демонстрації технологій у фазу масового впровадження, де ключову роль відіграють не лише батарейні електромобілі, а й різні форми гібридизації. Основний драйвер цієї трансформації полягає у прагненні зменшити споживання викопного палива та викиди в міських агломераціях, підвищити енергоефективність транспортної системи та знизити залежність від імпорتنих енергоресурсів. Умовно сучасний ландшафт можна описати як співіснування трьох стратегій: повна електрифікація для сценаріїв із прогнозованими поїздками та доступом до зарядної інфраструктури; підключувана гібридизація як компроміс для користувачів із змінним маршрутом і потребою у дальності; класична гібридизація як спосіб швидко зменшити витрату палива без вимоги до зовнішньої зарядки. Така структура є логічною реакцією на фізичні обмеження батарейної техніки, вимоги до часу поповнення енергії та нерівномірний розвиток інфраструктури.

У 2025 році світові продажі електромобілів перевищили 20 млн одиниць [1], що становить приблизно чверть усіх нових легкових автомобілів. Така динаміка свідчить про перехід електромобільності від етапу демонстраційного впровадження до масового використання. Найбільший внесок у розвиток ринку забезпечує Китай, де електромобілі займають значну частку нових продажів і виробництва. Європейські країни також активно розвивають електричний транспорт завдяки екологічним нормам, підтримці зарядної інфраструктури та поступовому обмеженню використання автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння. У США розвиток електромобільності має більш нерівномірний характер, однак електромобілі залишаються важливим напрямом технологічної конкуренції автомобільних виробників.

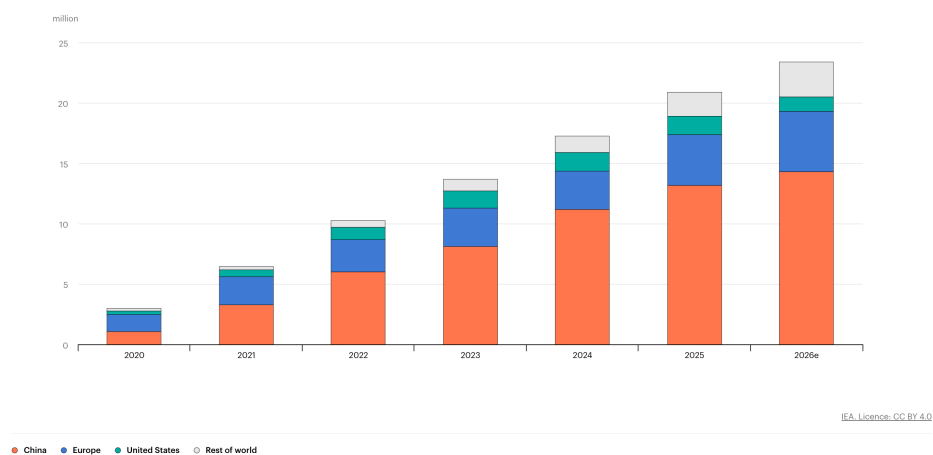


Рисунок 1.1 – Динаміка зростання світових продажів електромобілів за останні роки

Для України електромобільність має особливий контекст. З одного боку, розвиток ринку відбувається на тлі структурних обмежень енергосистеми, нерівномірності розвитку розподільчих мереж, а також неоднакового доступу до сучасних зарядних станцій у різних регіонах. З іншого боку, спостерігається стабільний інтерес користувачів до електротранспорту як до способу зменшити експлуатаційні витрати та підвищити незалежність від коливань цін на паливо. Станом на кінець 2025 року парк акумуляторних електромобілів в Україні наблизився до чверті мільйона одиниць [2]. Таке зростання формує нові вимоги до зарядної інфраструктури, сервісного обслуговування, діагностики тягових батарей та інформаційних систем, які допомагають водієві ефективно планувати рух.

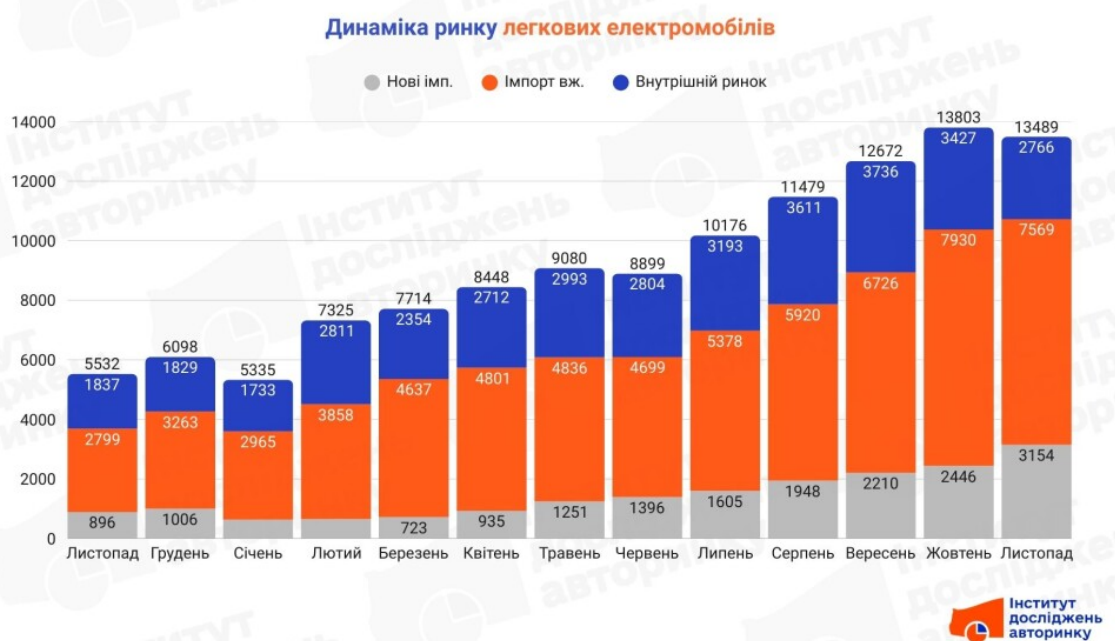


Рисунок 1.2 – Динаміка зростання продажів електромобілів в Україні за останні роки

Попри збільшення ємності тягових акумуляторних батарей та покращення ефективності електроприводів, проблема достовірного прогнозування запасу ходу залишається актуальною. Паспортний запас ходу, який зазначається виробником, визначається за стандартизованими випробувальними циклами. Такі цикли дають змогу порівнювати різні моделі між собою, однак вони не завжди точно відображають реальні умови експлуатації. У повсякденному русі автомобіль працює в умовах змінної швидкості, різного дорожнього покриття, перепадів висот, заторів, низьких або високих температур, а також індивідуальної манери керування водія.

Для електромобіля запас ходу є більш змінним показником, ніж для автомобіля з двигуном внутрішнього згорання [3]. У традиційному автомобілі запас ходу переважно залежить від кількості пального в баку та середньої

витрати пального. В електромобілі доступна енергія батареї та її використання залежать від значно більшої кількості факторів. Наприклад, при русі з високою швидкістю різко зростає аеродинамічний опір, що збільшує витрату енергії на кожен кілометр. При русі в місті часті розгони підвищують миттєве енергоспоживання, однак частина енергії може повертатися до батареї завдяки рекуперативному гальмуванню. На підйомах витрачається додаткова енергія на подолання складової сили тяжіння, тоді як на спусках можливість її повернення обмежується ефективністю рекуперації, рівнем заряду батареї та температурним станом акумулятора.

Температура навколишнього середовища є одним із найважливіших факторів, що впливають на запас ходу. У холодну пору року знижується ефективна віддача тягової батареї, збільшується її внутрішній опір, а значна частина енергії витрачається на обігрів салону та підтримання допустимого температурного режиму батареї. У спекотну погоду додаткове навантаження створює система кондиціонування, а також система охолодження батареї. Через це один і той самий електромобіль на однаковому маршруті може мати суттєво різний фактичний запас ходу влітку, взимку та в міжсезоння.

Важливу роль відіграє також стиль керування. Плавний рух із помірними прискореннями дозволяє зменшити пікові навантаження на електропривод і підвищити ефективність використання енергії. Агресивний стиль керування, який характеризується різкими розгонами, частими гальмуваннями та високою середньою швидкістю, збільшує витрату енергії навіть за однакової довжини маршруту. Тому два водії, які використовують один і той самий електромобіль на однаковій ділянці дороги, можуть отримати різний фактичний пробіг на одному заряді.

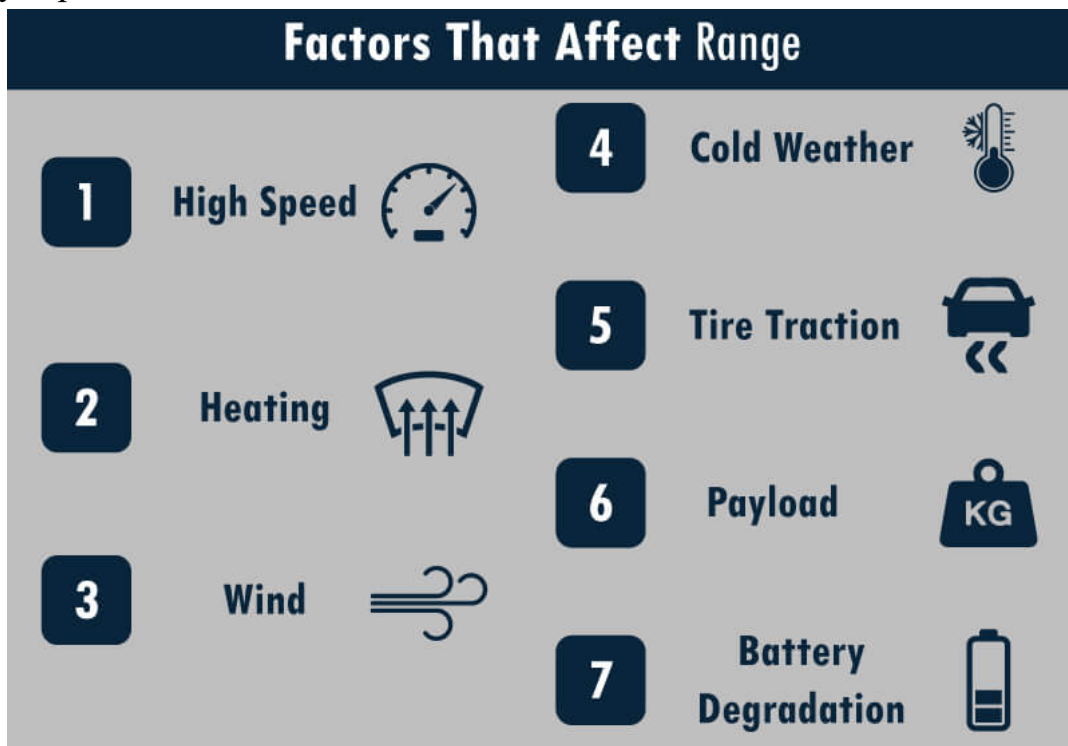


Рисунок 1.3 – Основні групи факторів, що впливають на запас ходу електромобіля

Недостовірність прогнозу запасу ходу має практичні наслідки для водія. Якщо система завищує прогнозований пробіг, виникає ризик, що автомобіль не досягне пункту призначення або найближчої зарядної станції. Якщо система, навпаки, надмірно занижує прогноз, водій змушений планувати зайві зупинки для заряджання, що збільшує час поїздки та знижує зручність експлуатації. Обидві ситуації є небажаними, оскільки зменшують довіру користувача до електромобіля та його інформаційних систем.

Особливо гостро проблема точності прогнозування проявляється під час міжміських поїздок, руху в гірській місцевості, експлуатації взимку та використання автомобілів із частково зношеною батареєю. У таких умовах простий розрахунок за середньою витратою енергії не дає достатньої точності. Наприклад, середня витрата за попередні 50 км може бути непридатною для прогнозу наступних 50 км, якщо попередня ділянка була рівнинною та міською, а наступна проходить автомагістраллю або має значний набір висоти.

Таблиця 1.1. Основні причини відхилення реального запасу ходу від паспортного

Причина відхилення	Характер впливу	Наслідок для водія
Висока швидкість руху	Збільшується аеродинамічний опір	Зростає питома витрата енергії
Низька температура	Зменшується ефективність батареї та зростають витрати на обігрів	Скорочується фактичний запас ходу
Рух на підйомах	Частина енергії витрачається на подолання сили тяжіння	Прогноз за середньою витратою стає неточним
Агресивний стиль керування	Збільшуються втрати під час різких прискорень і гальмувань	Підвищується енергоспоживання
Робота кліматичної системи	Додаткові споживачі використовують енергію батареї	Менше енергії залишається на рух
Зношення батареї	Зменшується доступна корисна ємність	Паспортні значення стають менш показовими

Сучасний електромобіль має значний потенціал для підвищення точності прогнозування запасу ходу, оскільки в ньому вже наявні численні джерела даних. Система керування батареєю визначає рівень заряду, температуру, напругу, струм і доступну потужність. Бортові системи фіксують швидкість, прискорення, споживання енергії та режим рекуперації. Навігаційна система може надавати інформацію про довжину маршруту, висотний профіль, тип дороги та прогнозований час руху. Зовнішні сервіси можуть доповнювати ці дані інформацією про температуру повітря, вітер, опади та дорожню ситуацію.

1.2 Основні фактори, що впливають на енергоспоживання електромобіля

Енергоспоживання електромобіля є комплексним показником, який формується під впливом технічних характеристик транспортного засобу, умов руху, стану дороги, температурного режиму, поведінки водія та роботи допоміжних систем. На відміну від паспортного запасу ходу, який визначається у стандартизованих умовах випробувального циклу, фактична витрата енергії змінюється майже безперервно. Саме тому для розробки алгоритму прогнозування запасу ходу необхідно не лише визначити середнє енергоспоживання, а й розкласти його на основні складові та зрозуміти, які з них мають найбільший вплив у конкретних умовах експлуатації [4].

Основна частина енергії тягової акумуляторної батареї витрачається на подолання сил опору руху. До них належать опір коченню, аеродинамічний опір, інерційний опір під час розгону та опір, пов'язаний із рухом на підйомі [5]. Крім того, певна частина енергії втрачається у силовій електроніці, електродвигуні, редукторі, системі терморегулювання та допоміжних споживачах. У режимі гальмування частина кінетичної енергії може повертатися до батареї завдяки рекуперації, однак ефективність цього процесу не є сталою і залежить від швидкості, рівня заряду батареї, температури та технічних обмежень системи.

Одним із базових факторів енергоспоживання є маса електромобіля. Чим більша маса транспортного засобу, тим більше енергії потрібно для його розгону та подолання підйомів. Маса також впливає на силу опору коченню, оскільки збільшення навантаження на шини підвищує втрати, пов'язані з їх деформацією під час руху. Для електромобілів цей фактор є особливо важливим, оскільки тягові акумуляторні батареї мають значну масу. Збільшення ємності батареї підвищує потенційний запас енергії, але одночасно збільшує масу автомобіля, що частково компенсує вигоду у запасі ходу.

Опір коченню виникає внаслідок деформації шин і дорожнього покриття, а також внутрішніх втрат у матеріалі шини. Його величина залежить від маси автомобіля, тиску в шинах, типу шин, температури, стану дорожнього покриття та швидкості руху. Недостатній тиск у шинах збільшує площу контакту з дорогою та підвищує втрати енергії. На рівному асфальтовому покритті опір коченню буде меншим, ніж на нерівній, мокрій, засніженій або ґрунтовій дорозі. Для алгоритму прогнозування запасу ходу цей фактор може враховуватися через коефіцієнт опору коченню, який коригується залежно від типу дороги та стану шин.

Аеродинамічний опір є одним із найважливіших факторів під час руху з середніми та високими швидкостями. Він залежить від густини повітря, коефіцієнта аеродинамічного опору, площі лобового перерізу автомобіля та квадрата швидкості руху. Потужність, необхідна для подолання аеродинамічного опору, зростає ще швидше, оскільки вона залежить від добутку

сили опору на швидкість. Тому при русі автомагістраллю навіть невелике збільшення швидкості може призвести до помітного зростання витрати енергії. Наприклад, перехід від помірної швидкості до високої часто зменшує запас ходу значно сильніше, ніж очікує водій, оскільки втрати на подолання опору повітря стають домінуючими.

Інерційні навантаження виникають під час прискорення автомобіля. Для збільшення швидкості необхідно надати транспортному засобу додаткову кінетичну енергію, яка пропорційна масі та квадрату швидкості. У міському русі, де часто чергуються розгони і гальмування, інерційна складова може істотно впливати на енергоспоживання. Частина енергії повертається під час рекуперативного гальмування, однак повернення не є повним через втрати в електродвигуні, інверторі, батареї та обмеження за максимальною потужністю заряджання. Тому плавний рух із мінімальною кількістю різких прискорень є енергетично вигіднішим [6].

Дорожній ухил безпосередньо впливає на витрату енергії. Під час руху на підйом електромобіль витрачає додаткову енергію на збільшення потенціальної енергії транспортного засобу. Чим більша маса автомобіля, кут ухилу та довжина підйому, тим більшими будуть витрати. Під час руху на спуск частина потенціальної енергії може бути повернута до батареї завдяки рекуперації, однак ефективність повернення обмежена. Якщо батарея має високий рівень заряду або низьку температуру, система може зменшити потужність рекуперації, і частина енергії буде розсіяна у вигляді тепла на гальмівних механізмах. Через це маршрути з однаковою довжиною, але різним висотним профілем можуть мати різну фактичну витрату енергії.

Температура навколишнього середовища впливає на електромобіль одразу через кілька механізмів. За низької температури зростає внутрішній опір акумуляторних елементів, зменшується доступна ємність батареї та обмежується здатність батареї приймати енергію під час рекуперації. Крім того, значна частина енергії витрачається на обігрів салону, скла, сидінь і підтримання оптимального температурного режиму батареї. У спекотних умовах основне додаткове навантаження створює система кондиціонування та охолодження тягової батареї. Таким чином, найнижче енергоспоживання зазвичай спостерігається в помірному температурному діапазоні, коли не потрібні значні витрати на обігрів або охолодження [7].

Стан тягової акумуляторної батареї також впливає на реальний запас ходу. З часом батарея деградує, її корисна ємність зменшується, а внутрішній опір зростає. Для батареї критичним є підтримання температури в діапазоні, який мінімізує деградацію та забезпечує допустимі струмові режими. Найпоширенішим рішенням є рідинне охолодження через теплові плити або канали в піддоні батарейного пакета. Альтернативою є пряме охолодження

холодоагентом або двофазні рішення, які забезпечують високу інтенсивність теплообміну, але ускладнюють конструкцію, вимоги до герметичності й сервісу.

Робота допоміжних споживачів енергії є ще одним важливим фактором. До них належать система опалення, кондиціонування, вентиляція, підігрів сидінь і скла, освітлення, мультимедійна система, насоси, вентилятори та електронні блоки керування. У автомобілі з двигуном внутрішнього згоряння частина тепла для обігріву салону є побічним продуктом роботи двигуна. В електромобілі тепло необхідно виробляти за рахунок енергії батареї, тому в холодну пору року обігрів може суттєво скорочувати запас ходу. Особливо помітним цей вплив є під час коротких міських поїздок, коли значна частина енергії витрачається на початковий прогрів салону та батареї.

Стиль керування водія визначає, наскільки ефективно використовується енергія батареї. Економний стиль передбачає плавні прискорення, завчасне зниження швидкості, використання рекуперації та дотримання помірної швидкості. Агресивний стиль характеризується різкими розгонами, частими гальмуваннями, високою середньою швидкістю та нерівномірним рухом. Навіть за однакової довжини маршруту агресивний стиль може значно збільшити витрату енергії, оскільки підвищує пікові навантаження на електропривод і збільшує втрати під час перетворення енергії.

Дорожні умови та трафік також суттєво впливають на енергоспоживання. У заторах електромобіль не витрачає значної енергії на холостий хід, як автомобіль з двигуном внутрішнього згоряння, однак енергія продовжує витрачатися на кліматичну систему та допоміжне обладнання. У щільному потоці з частими зупинками зростає кількість циклів розгін-гальмування, що підвищує втрати, навіть з урахуванням рекуперації. На автомагістралі рух може бути рівномірнішим, але висока швидкість збільшує аеродинамічні втрати. Тому міський, заміський і змішаний режими мають різний характер енергоспоживання [8].

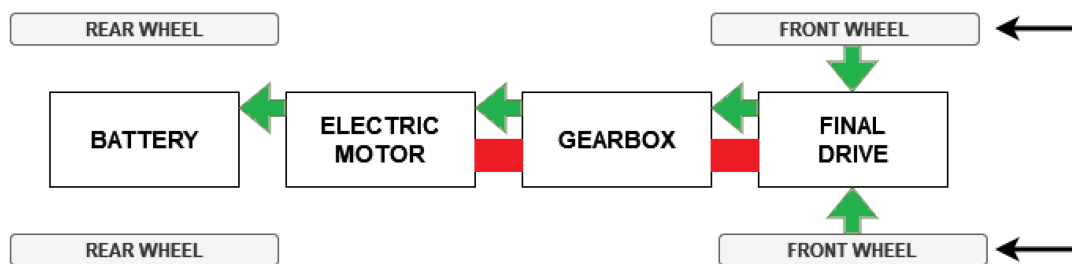


Рисунок 1.4 – Енергетичний баланс електромобіля під час руху

Для алгоритму прогнозування запасу ходу важливо розділяти фактори на такі, що можуть бути відомі заздалегідь, і такі, що змінюються під час руху. До першої групи можна віднести масу автомобіля, ємність батареї, аеродинамічні характеристики, приблизний маршрут, довжину дороги та висотний профіль. До другої групи належать фактична швидкість, прискорення, температура батареї,

поточний трафік, використання кліматичної системи та стиль керування. Такий поділ дає змогу будувати прогноз не як статичне значення, а як адаптивну оцінку, яка уточнюється в процесі руху.

Таблиця 1.2. Поділ факторів за можливістю використання в алгоритмі прогнозування

Тип факторів	Приклади	Спосіб урахування в алгоритмі
Постійні або умовно постійні	Маса автомобіля, C_d , площа лобового перерізу, тип електропривода	Використовуються як базові параметри математичної моделі
Маршрутні	Довжина маршруту, ухил, тип дороги, обмеження швидкості	Застосовуються для розрахунку витрати енергії по ділянках
Динамічні	Поточна швидкість, прискорення, трафік, рекуперація	Оновлюють прогноз у реальному часі
Кліматичні	Температура повітря, потреба в обігріві або кондиціонуванні	Вводяться через температурні поправки та додаткові споживачі
Поведінкові	Агресивність розгонів, частота гальмувань, середня швидкість водія	Формують коефіцієнт стилю керування
Деградаційні	Зменшення корисної ємності батареї, зростання внутрішнього опору	Коригують доступну енергію батареї

1.3 Аналіз сучасних методів прогнозування запасу ходу

Прогнозування запасу ходу електромобіля є складною інженерною задачею, оскільки фактичний пробіг на одному заряді залежить від великої кількості змінних параметрів [9]. Найпростішим підходом є оцінювання залишкового пробігу за поточним рівнем заряду батареї та середньою витратою енергії. Такий метод є зручним для реалізації, не потребує складних обчислень і може працювати навіть за мінімальної кількості вхідних даних. Однак його точність є обмеженою, оскільки середня витрата енергії за попередню ділянку руху не завжди відповідає умовам наступної ділянки маршруту.

Наприклад, якщо електромобіль рухався в міському режимі з невисокою швидкістю, а потім виїхав на автомагістраль, попередня середня витрата може суттєво знизити майбутнє енергоспоживання. Аналогічно, якщо попередня ділянка була рівнинною, а наступна має тривалий підйом, прогноз за середньою витратою буде недостатньо точним. Тому прості емпіричні методи можуть використовуватися лише як базовий рівень оцінювання, але вони не здатні повноцінно враховувати дорожні умови, температуру та стиль керування.

Фізико-математичні методи прогнозування ґрунтуються на розрахунку сил, які діють на автомобіль під час руху. У таких моделях енергоспоживання визначається через опір коченню, аеродинамічний опір, інерційні навантаження, рух на підйомах і спусках, а також втрати в електроприводі. Перевагою цього

підходу є його фізична обґрунтованість. Модель не просто встановлює статистичний зв'язок між параметрами, а пояснює, чому саме змінюється витрата енергії. Наприклад, вона дозволяє окремо оцінити вплив швидкості, маси автомобіля, ухилу дороги або коефіцієнта опору коченню.

Недоліком фізико-математичних моделей є потреба у точних вхідних параметрах. Для якісного прогнозу необхідно знати масу автомобіля з урахуванням пасажирів і вантажу, аеродинамічні характеристики, коефіцієнт опору коченню, ефективність електропривода, температуру батареї та профіль дороги. Частина цих параметрів може бути невідомою або змінюватися під час руху. Крім того, реальні умови експлуатації часто містять фактори, які важко точно описати рівняннями, наприклад поведінку водія, інтенсивність дорожнього потоку або зміну дорожнього покриття [10].

Статистичні методи базуються на аналізі накопичених даних про попередні поїздки. У таких підходах прогноз формується на основі історичних значень витрати енергії, середньої швидкості, температури, довжини маршруту та інших параметрів. Найпростішими прикладами є лінійна регресія, поліноміальна регресія або кореляційні залежності між енергоспоживанням і окремими факторами. Перевагою статистичних методів є простота реалізації та можливість адаптації до конкретного автомобіля. Якщо система накопичує дані про реальну експлуатацію, вона може поступово уточнювати прогноз для типових умов руху.

Водночас статистичні методи мають обмеження, пов'язані з якістю і повнотою даних. Якщо в історії поїздок відсутні умови, подібні до поточної ситуації, прогноз може бути неточним. Наприклад, модель, навчена переважно на літніх міських поїздках, може погано передбачати витрату енергії взимку на трасі. Крім того, прості статистичні залежності не завжди здатні описати нелінійний характер впливу швидкості, температури та прискорень на енергоспоживання.

Методи машинного навчання є одним із найактивніших напрямів сучасного прогнозування запасу ходу. Вони дають змогу обробляти велику кількість параметрів і виявляти складні нелінійні залежності між умовами руху та витратою енергії. Для таких задач можуть застосовуватися дерева рішень, випадковий ліс, градієнтний бустинг, метод опорних векторів, штучні нейронні мережі та інші алгоритми. Їх перевага полягає в тому, що вони можуть одночасно враховувати швидкість, прискорення, температуру, ухил дороги, трафік, роботу кліматичної системи та поведінкові ознаки водія [11].

Машинне навчання особливо корисне тоді, коли електромобіль або інформаційна система має доступ до телематичних даних. Система може аналізувати реальні поїздки, визначати типові режими руху, виявляти індивідуальний стиль керування та коригувати прогноз залежно від поточних умов. Наприклад, якщо водій систематично рухається з високими

прискореннями, алгоритм може збільшити очікувану питому витрату енергії. Якщо ж водій рухається плавно та часто використовує рекуперацію, прогноз може бути скоригований у бік збільшення запасу ходу.

Недоліком методів машинного навчання є залежність від навчальної вибірки. Для якісної роботи модель повинна бути навчена на достатньо різноманітних даних, які охоплюють різні температури, типи доріг, швидкісні режими, стилі керування та стани батареї. Якщо дані неповні, зашумлені або не відповідають реальним умовам експлуатації, модель може давати помилкові результати. Крім того, складні моделі машинного навчання часто мають нижчу інтерпретованість, тобто складніше пояснити, чому саме алгоритм сформував певний прогноз.

Окрему групу становлять методи глибокого навчання, які використовують нейронні мережі для аналізу послідовностей даних. Такі моделі можуть враховувати часову динаміку руху, зміну швидкості, прискорень, температури та енергоспоживання впродовж поїздки. Рекурентні нейронні мережі, LSTM-моделі, згорткові нейронні мережі та комбіновані архітектури можуть бути ефективними для прогнозування енергоспоживання на основі великих масивів телематичних даних. Їх доцільно застосовувати в системах, де доступні значні обсяги даних від багатьох автомобілів або тривала історія експлуатації одного транспортного засобу [12].

Разом з тим глибоке навчання не завжди є оптимальним рішенням для практичної реалізації в бортовій системі електромобіля. Такі моделі потребують значних обчислювальних ресурсів, ретельного навчання, перевірки на різних сценаріях і захисту від перенавчання. Для бакалаврської роботи, метою якої є розробка зрозумілого та інженерно обґрунтованого алгоритму, надмірно складні нейромережеві підходи доцільно розглядати як перспективний напрям розвитку, але не як основний розрахунковий інструмент.

Симуляційні методи використовують програмні моделі автомобіля, дороги, батареї та силової установки. Вони дозволяють досліджувати енергоспоживання в різних умовах без проведення великої кількості реальних випробувань. За допомогою симуляції можна змінювати масу автомобіля, температуру, швидкісний профіль, ухил дороги, режим рекуперації та параметри електропривода. Такий підхід є корисним на етапі проєктування або перевірки алгоритму, оскільки дозволяє порівнювати різні сценарії в контрольованих умовах.

Недоліком симуляційних методів є те, що точність результатів залежить від якості самої моделі. Якщо модель не враховує реальні втрати, обмеження батареї, поведінку водія або зміну дорожніх умов, її результати можуть відрізнятись від фактичної експлуатації. Тому симуляція є ефективною для попереднього аналізу та тестування алгоритму, але для практичного прогнозування її доцільно поєднувати з реальними даними автомобіля.

Гібридні методи поєднують фізико-математичні моделі з адаптивними або статистичними поправками. Такий підхід є найбільш доцільним для задачі прогнозування запасу ходу з урахуванням дорожніх умов, стилю керування та температурних факторів. Фізична модель забезпечує базовий розрахунок енергії, необхідної для руху, а адаптивні коефіцієнти уточнюють результат з урахуванням реальних експлуатаційних умов. Наприклад, базова модель може визначати витрату енергії на подолання опору коченню, аеродинамічного опору та ухилу, а додаткові коефіцієнти враховують температуру, роботу кліматичної системи та агресивність керування.

Перевага гібридного підходу полягає в тому, що він поєднує інтерпретованість фізичних моделей і гнучкість методів обробки даних. Якщо дорожній профіль відомий, алгоритм може розрахувати витрату енергії по окремих ділянках маршруту. Якщо маршрут не заданий, система може використовувати поточні параметри руху та історичні дані водія. Така структура добре підходить для практичного використання, оскільки дозволяє поступово ускладнювати алгоритм без повної заміни його основи.

Таблиця 1.3. Порівняння сучасних методів прогнозування запасу ходу електромобіля

Метод прогнозування	Основний принцип	Переваги	Обмеження
Оцінка за середньою витратою	Запас ходу визначається за залишком енергії та середнім споживанням	Простота, швидка реалізація, мінімум вхідних даних	Низька точність при зміні маршруту, температури або стилю керування
Фізико-математична модель	Розрахунок сил опору руху, потужності та енергії	Інженерна обґрунтованість, зрозуміла структура, можливість аналізу окремих факторів	Потреба в точних параметрах автомобіля, дороги та батареї
Статистична модель	Побудова залежностей на основі історичних даних	Простота адаптації до реальної експлуатації	Обмежена точність для нових або нетипових умов
Машинне навчання	Виявлення нелінійних залежностей між параметрами руху та витратою енергії	Висока гнучкість, можливість персоналізації прогнозу	Потреба у великій і якісній вибірці даних, складність пояснення результатів
Глибоке навчання	Аналіз часових послідовностей телематичних даних	Може враховувати складну динаміку руху	Висока обчислювальна складність, потреба у значних даних

Симуляційна модель	Імітація руху автомобіля в заданих умовах	Зручність перевірки сценаріїв, можливість дослідження без реальних випробувань	Залежність від точності моделі та прийнятих припущень
Гібридний метод	Поєднання фізичної моделі з адаптивними поправками або даними	Баланс точності, зрозумілості та практичності	Потреба у правильному виборі коефіцієнтів і перевірці на сценаріях

Для практичного алгоритму прогнозування запасу ходу важливо не лише вибрати метод, а й визначити, які дані будуть доступні в реальному часі. Бортова система електромобіля може отримувати інформацію про рівень заряду батареї, напругу, струм, температуру батареї, швидкість, прискорення та поточне енергоспоживання. Навігаційна система може надати довжину маршруту, дорожній ухил, обмеження швидкості та очікувану тривалість поїздки. Додаткові сервіси можуть надати температуру повітря, прогноз погоди та інформацію про дорожню ситуацію. Чим ширшим є набір даних, тим точнішим може бути прогноз, однак надмірне ускладнення алгоритму може знизити його надійність і ускладнити практичну реалізацію.

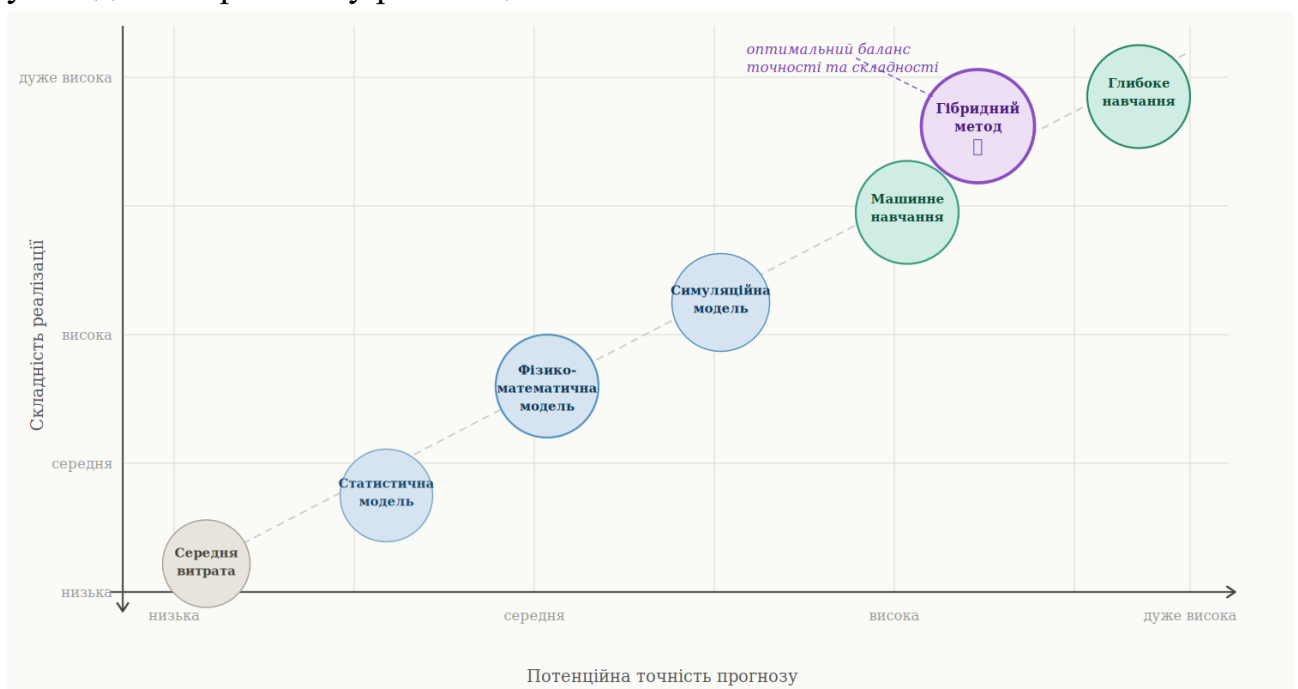


Рисунок 1.5 – Класифікація методів прогнозування запасу ходу

Важливим критерієм оцінювання методів прогнозування є здатність працювати у двох режимах: для відомого маршруту та без заданого маршруту. Якщо маршрут відомий, алгоритм може розбити його на окремі ділянки та розрахувати енергоспоживання з урахуванням довжини, ухилу, очікуваної швидкості й дорожніх умов. Якщо маршрут не заданий, прогноз має базуватися на поточному режимі руху, історичній витраті енергії, температурі та стилі

керування. Тому універсальний алгоритм повинен мати адаптивну структуру і уточнювати результат у процесі руху.

1.4 Джерела даних для алгоритму прогнозування

Для точного прогнозування запасу ходу електромобіля алгоритм повинен використовувати не один окремий показник, а сукупність даних про стан автомобіля, батареї, маршрут, умови руху та зовнішнє середовище. Найпростішим джерелом інформації є поточний рівень заряду тягової акумуляторної батареї, однак сам по собі цей параметр не дає повної картини. Два електромобілі з однаковим рівнем заряду можуть мати різний залишковий пробіг через відмінності у температурі батареї, швидкості руху, дорожньому ухилі, масі, стилі керування та роботі допоміжних систем.

Основним внутрішнім джерелом даних є система керування батареєю. Вона контролює рівень заряду, напругу, струм, температуру акумуляторних модулів, доступну потужність заряджання і розряджання, а також загальний стан батареї [6]. Для алгоритму прогнозування особливо важливими є рівень заряду батареї, її корисна ємність, температура та показник технічного стану. Саме ці параметри визначають, скільки енергії реально доступно для подальшого руху.

Другу групу становлять дані від бортових систем автомобіля. До них належать швидкість руху, прискорення, поточна потужність електродвигуна, витрата енергії, інтенсивність рекуперативного гальмування та стан допоміжних споживачів. Ці дані дають змогу оцінити фактичний режим руху та визначити, чи відповідає він економному, нормальному або агресивному стилю керування. Наприклад, часті різкі прискорення та високі швидкості свідчать про підвищене енергоспоживання, тоді як плавний рух з активним використанням рекуперації зменшує витрати енергії [10].

Важливим джерелом інформації є навігаційні та картографічні дані. Якщо водій задає маршрут, алгоритм може врахувати його довжину, висотний профіль, типи доріг, обмеження швидкості та ймовірний режим руху. Наявність даних про ухил дороги є особливо корисною, оскільки рух на підйомах істотно збільшує витрату енергії, а рух на спусках створює умови для часткового повернення енергії через рекуперацію. Без урахування рельєфу прогноз запасу ходу може бути неточним навіть тоді, коли довжина маршруту визначена правильно [13].

Окрему роль відіграють метеорологічні дані. Температура повітря впливає на доступну ємність батареї, ефективність рекуперації та енерговитрати на обігрів або охолодження салону [14]. Крім температури, доцільно враховувати вітер, опади та стан дорожнього покриття. Сильний зустрічний вітер збільшує аеродинамічний опір, дощ або сніг можуть підвищувати опір коченню, а низька температура збільшує навантаження на систему терморегулювання. Узагальнено джерела даних для алгоритму прогнозування подано в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4. Джерела даних для прогнозування запасу ходу електромобіля

Джерело даних	Основні параметри	Призначення в алгоритмі
Система керування батареєю	Рівень заряду, температура, напруга, струм, стан батареї	Визначення доступної енергії
Бортові системи автомобіля	Швидкість, прискорення, потужність, рекуперация	Оцінювання фактичного режиму руху
Навігаційна система	Довжина маршруту, ухил, тип дороги, обмеження швидкості	Розрахунок витрати енергії по ділянках маршруту
Метеорологічні сервіси	Температура, вітер, опади	Урахування кліматичних поправок
Історія поїздок	Середня витрата, стиль керування, типові маршрути	Адаптація прогнозу до конкретного водія

Для розроблюваного алгоритму доцільно використовувати ієрархічний підхід до даних. Обов'язковими параметрами мають бути рівень заряду батареї, оцінка доступної ємності, швидкість руху, температура та поточна витрата енергії. За наявності маршруту алгоритм повинен додатково враховувати довжину ділянок, ухил і тип дороги. Якщо доступні історичні дані, вони можуть використовуватися для уточнення коефіцієнта стилю керування.

1.5 Постановка задач дослідження

Проведений аналіз показав, що запас ходу електромобіля є змінним експлуатаційним показником, який залежить не лише від ємності тягової акумуляторної батареї та поточного рівня її заряду, а й від сукупності зовнішніх і внутрішніх факторів. Найбільший вплив на фактичне енергоспоживання мають швидкість руху, дорожній ухил, маса автомобіля, температура навколишнього середовища, робота допоміжних систем, стан батареї та стиль керування водія. Через це розрахунок запасу ходу лише за середньою витратою енергії не забезпечує достатньої точності в реальних умовах експлуатації.

Задача дослідження полягає у розробці алгоритму прогнозування запасу ходу електромобіля, який поєднує фізико-математичний розрахунок енергоспоживання з коригуванням результату за основними експлуатаційними факторами. Базова частина алгоритму повинна визначати витрату енергії на подолання опору коченню, аеродинамічного опору, інерційних навантажень і дорожнього ухилу. Коригувальна частина має враховувати температуру навколишнього середовища, роботу кліматичної системи, стан батареї та стиль керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі дослідження:

- Визначити основні фактори, які впливають на енергоспоживання електромобіля в реальних умовах руху.
- Обґрунтувати перелік вхідних параметрів, необхідних для прогнозування запасу ходу.
- Сформулювати математичну модель розрахунку тягового енергоспоживання електромобіля.
- Розробити спосіб урахування дорожнього ухилу, швидкісного режиму та типу маршруту.
- Запропонувати підхід до оцінювання стилю керування водія за параметрами швидкості, прискорення та гальмування.
- Визначити температурні поправки для врахування зміни доступної енергії батареї та роботи допоміжних систем.
- Розробити структурну схему алгоритму прогнозування залишкового запасу ходу.
- Перевірити роботу алгоритму на типових сценаріях руху та оцінити вплив окремих факторів на результат прогнозування.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вибір базових параметрів електромобіля для розрахунку

Побудова математичної моделі гібридного транспортного засобу для задачі оптимізаційного розподілу енергії починається з формування вихідних даних і вимог до об'єкта моделювання. Саме на цьому етапі визначається, яку гібридну архітектуру доцільно розглядати, які режими руху повинні бути відтворені, які параметри є визначальними для точності, а також у якому вигляді модель буде використовуватися: як швидка модель для оптимізації та синтезу керування або як детальніша модель для перевірки рішень у середовищі моделювання.

У межах роботи доцільно розглядати умовний акумуляторний електромобіль, параметри якого відповідають сучасним серійним моделям. Такий підхід дозволяє не прив'язувати алгоритм до конкретної марки автомобіля, але водночас зберегти реалістичність розрахунків. Базовими параметрами є маса автомобіля, ємність тягової батареї, корисна частина енергії батареї, коефіцієнт аеродинамічного опору, площа лобового перерізу, коефіцієнт опору коченню, ККД електропривода та орієнтовне енергоспоживання допоміжних систем.

Маса електромобіля є одним із основних параметрів, оскільки вона безпосередньо впливає на силу опору коченню, енергію розгону та витрати під час руху на підйомі. Для розрахунків приймається споряджена маса автомобіля з урахуванням водія, пасажирів і часткового навантаження. Якщо розглядати типовий електромобіль середнього класу, його розрахункова маса може становити близько 1800 кг. Це значення враховує значну масу тягової акумуляторної батареї та відповідає більшості сучасних легкових BEV [4].

Ємність тягової акумуляторної батареї визначає загальний запас енергії, який може бути використаний для руху. Однак у реальних умовах не вся номінальна ємність доступна водієві. Частина енергії резервується системою керування батареєю для захисту акумуляторних елементів від глибокого розряду або перезаряду. Тому в розрахунках доцільно використовувати не номінальну, а корисну ємність батареї. Для типового електромобіля середнього класу можна прийняти номінальну ємність батареї 60 кВт·год, а корисну ємність 56 кВт·год.

Важливим параметром є початковий і мінімально допустимий рівень заряду батареї. Початковий рівень заряду визначає, скільки енергії доступно на початку розрахунку, а мінімальний рівень задає резерв, який не бажано використовувати під час руху. Наприклад, якщо початковий рівень заряду становить 80%, а мінімально допустимий резерв дорівнює 10%, то для прогнозування може бути використана лише частина корисної ємності батареї, що відповідає різниці між цими значеннями. Такий підхід є практичним, оскільки водій зазвичай не планує маршрут до повного розрядження батареї.

Аеродинамічні параметри визначають витрати енергії під час руху з підвищеними швидкостями. До них належать коефіцієнт аеродинамічного опору та площа лобового перерізу автомобіля. Для сучасних електромобілів коефіцієнт аеродинамічного опору зазвичай є нижчим, ніж у багатьох автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, оскільки виробники приділяють значну увагу зменшенню опору повітря. У розрахунках можна прийняти коефіцієнт аеродинамічного опору 0,25, а площу лобового перерізу 2,3 м². Добуток цих двох параметрів визначає ефективну аеродинамічну площу, яка безпосередньо впливає на силу опору повітря [5].

Коефіцієнт опору коченню враховує втрати, пов'язані з деформацією шин і взаємодією коліс із дорожнім покриттям. Для легкового електромобіля на якісному асфальтовому покритті можна прийняти значення 0,010–0,012. У подальших розрахунках доцільно використовувати базове значення 0,011. Якщо дорога мокра, засніжена або має нерівне покриття, цей коефіцієнт може бути збільшений відповідним поправочним множником.

ККД електропривода визначає, яка частина енергії батареї перетворюється на корисну механічну енергію на колесах [14]. До втрат входять втрати в інверторі, електродвигуні, редукторі та інших елементах силової передачі. Для сучасних електромобілів середній ККД електропривода може становити 0,88–0,94 залежно від режиму роботи. У розрахунках приймається значення 0,90, що є достатньо реалістичним для узагальненої моделі.

Окремо слід врахувати потужність допоміжних споживачів. До них належать система опалення, кондиціонування, освітлення, електронні блоки керування, насоси, вентилятори та мультимедійне обладнання. У помірних умовах допоміжне споживання може бути відносно невеликим, але в холодну або спекотну погоду воно істотно зростає. Для базового розрахунку можна прийняти допоміжну потужність 0,8 кВт у комфортному температурному режимі, 2,0 кВт у холодну погоду та 1,5 кВт у спекотну погоду.

В таблиці 2.1 приведені основні параметри електромобіля, які надалі будуть використовуватись для розрахунку.

Таблиця 2.1. Базові параметри електромобіля для розрахунку

Параметр	Позначення	Прийняте значення	Одиниця вимірювання
Розрахункова маса автомобіля	m	1800	кг
Номінальна ємність батареї	E _{ном}	60	кВт·год
Корисна ємність батареї	E _{кор}	56	кВт·год
Початковий рівень заряду	SoC _{поч}	80	%
Мінімальний резерв заряду	SoC _{мін}	10	%
Коефіцієнт аеродинамічного опору	C _d	0,25	–
Площа лобового перерізу	A	2,3	м ²
Коефіцієнт опору коченню	f	0,011	–

ККД електропривода	$\eta_{пр}$	0,90	–
Густина повітря	ρ	1,225	кг/м ³
Прискорення вільного падіння	g	9,81	м/с ²
Допоміжна потужність у помірних умовах	$P_{доп}$	0,8	кВт

На основі прийнятих параметрів можна визначити доступну для руху енергію батареї з урахуванням початкового рівня заряду та мінімального резерву:

$$E_{дост} = E_{кор} \cdot (S_{оСпoch} - S_{оСмін})/100 \quad (2.1)$$

Підставивши прийняті значення, отримаємо:

$$E_{дост} = 56 \cdot (80 - 10)/100 = 39,2 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (2.2)$$

Отримане значення показує, що за початкового заряду 80% і резерву 10% для прогнозованого руху доступно 39,2 кВт·год енергії. Саме ця величина надалі використовується для визначення можливого запасу ходу залежно від прогнозованої питомої витрати енергії.

Для перевірки впливу умов експлуатації доцільно використовувати декілька типових режимів руху. У міському режимі середня швидкість є нижчою, але частіше відбуваються розгони та гальмування. У заміському режимі швидкість є вищою і стабільнішою, однак зростають аеродинамічні втрати. У змішаному режимі поєднуються обидва типи руху, тому він є найбільш наближеним до повсякденної експлуатації.

Таблиця 2.2. Розрахункові режими руху електромобіля

Режим руху	Середня швидкість	Характеристика режиму
Міський	40 км/год	Часті зупинки, розгони, гальмування, активна рекуперація
Змішаний	70 км/год	Поєднання міських і заміських ділянок
Заміський	90 км/год	Відносно рівномірний рух з помірним аеродинамічним опором
Автомагістральний	110 км/год	Висока швидкість, домінування аеродинамічних втрат

2.2 Математична модель тягового енергоспоживання

Математична модель тягового енергоспоживання є основою для подальшого прогнозування запасу ходу електромобіля. Вона дозволяє визначити, яку кількість енергії транспортний засіб витрачає на подолання сил опору руху за певних дорожніх умов, швидкості, прискорення та ухилу дороги. На відміну від спрощеного підходу, де запас ходу оцінюється лише за середньою витратою енергії, така модель дає змогу окремо врахувати фізичний вплив кожного фактора [15].

Під час руху на електромобіль діє сумарна сила опору, яка складається з опору коченню, аеродинамічного опору, інерційної сили та сили, пов'язаної з ухилом дороги [5]:

$$F_{\Sigma} = F_k + F_a + F_i + F_{\alpha} \quad (2.3)$$

де F_{Σ} – сумарна сила опору руху, Н; F_k – сила опору коченню, Н; F_a – сила аеродинамічного опору, Н; F_i – інерційна сила, Н; F_{α} – сила, що виникає під час руху на підйомі або спуску, Н.

Сила опору коченню виникає внаслідок деформації шин і взаємодії коліс із дорожнім покриттям. Вона залежить від маси автомобіля, коефіцієнта опору коченню та кута нахилу дороги:

$$F_k = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha \quad (2.4)$$

де m – маса електромобіля, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; f – коефіцієнт опору коченню; α – кут ухилу дороги.

Для невеликих ухилів значення $\cos \alpha$ близьке до одиниці, тому в практичних розрахунках можна використовувати спрощену залежність:

$$F_k \approx m \cdot g \cdot f \quad (2.5)$$

Для прийнятих у попередньому підрозділі параметрів $m = 1800$ кг, $g = 9,81$ м/с² і $f = 0,011$ сила опору коченню на рівній дорозі становить:

$$F_k = 1800 \cdot 9,81 \cdot 0,011 = 194,2 \text{ Н} \quad (2.6)$$

Отримане значення показує, що навіть під час рівномірного руху на горизонтальній ділянці дороги електропривод повинен постійно витрачати енергію на подолання втрат у контактні шин із дорогою.

Сила аеродинамічного опору залежить від густини повітря, коефіцієнта аеродинамічного опору, площі лобового перерізу автомобіля та швидкості руху:

$$F_a = 0,5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \quad (2.7)$$

де ρ – густина повітря, кг/м³; C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору; A – площа лобового перерізу, м²; v – швидкість руху, м/с.

Аеродинамічний опір зростає пропорційно квадрату швидкості, тому саме він стає одним із головних факторів збільшення енергоспоживання під час руху автомагістраллю. Для швидкості $V = 90$ км/год, що відповідає $v = 25$ м/с, при $\rho = 1,225$ кг/м³, $C_d = 0,25$ і $A = 2,3$ м² отримаємо:

$$F_a = 0,5 \cdot 1,225 \cdot 0,25 \cdot 2,3 \cdot 25^2 = 220,1 \text{ Н} \quad (2.8)$$

Порівняння цього значення з опором коченню показує, що вже при швидкості 90 км/год аеродинамічна складова стає більшою за опір коченню. Саме тому збільшення швидкості руху суттєво зменшує реальний запас ходу електромобіля.

Інерційна сила виникає під час прискорення або уповільнення автомобіля. Вона визначається за другим законом Ньютона:

$$F_i = m \cdot a \quad (2.9)$$

де a – прискорення автомобіля, м/с².

Під час рівномірного руху $a = 0$, тому інерційна складова не впливає на енергоспоживання. Під час розгону вона збільшує потребу в енергії, а під час гальмування може частково компенсуватися рекуперативним поверненням енергії до батареї. Однак рекуперация не є повністю ефективною, оскільки частина енергії втрачається в електродвигуні, інверторі, акумуляторній батареї та гальмівній системі [4].

Сила, пов'язана з ухилом дороги, визначається складовою сили тяжіння вздовж напрямку руху:

$$F_{\alpha} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2.10)$$

Для практичних розрахунків ухил дороги часто задається у відсотках. За малих кутів нахилу можна прийняти:

$$\sin \alpha \approx \frac{i}{100} \quad (2.11)$$

де i – ухил дороги, %.

Тоді сила, необхідна для подолання підйому, визначається так:

$$F_{\alpha} \approx m \cdot g \cdot \frac{i}{100} \quad (2.12)$$

Для ухилу $i = 5\%$ при масі автомобіля $m = 1800$ кг:

$$F_{\alpha} = 1800 \cdot 9,81 \cdot \frac{5}{100} = 882,9 \text{ Н} \quad (2.13)$$

Це значення значно перевищує як опір коченню, так і аеродинамічний опір при помірній швидкості. Отже, дорожній рельєф є одним із найважливіших факторів, який необхідно враховувати під час прогнозування запасу ходу.

З урахуванням усіх складових сумарна сила опору руху електромобіля записується так:

$$F_{\Sigma} = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha + 0,5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 + m \cdot a + m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2.14)$$

Для невеликих ухилів цю залежність можна подати у спрощеному вигляді:

$$F_{\Sigma} \approx m \cdot g \cdot f + 0,5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 + m \cdot a + m \cdot g \cdot \frac{i}{100} \quad (2.15)$$

Механічна потужність на колесах визначається як добуток сумарної сили опору руху на швидкість:

$$P_k = F_{\Sigma} \cdot v \quad (2.16)$$

де P_k – потужність на колесах, Вт.

Оскільки електропривод має втрати, потужність, яку необхідно отримати від тягової батареї, буде більшою за механічну потужність на колесах [6]. З урахуванням ККД електропривода та допоміжних споживачів вона визначається так:

$$P_b = \frac{P_k}{\eta_{\text{пр}}} + P_{\text{доп}} \quad (2.17)$$

де P_b – потужність, що споживається від батареї, Вт; $\eta_{\text{пр}}$ – ККД електропривода; $P_{\text{доп}}$ – потужність допоміжних споживачів, Вт.

Для рівномірного руху по горизонтальній дорозі зі швидкістю 90 км/год сумарна сила опору без урахування прискорення та ухилу становить:

$$F_{\Sigma} = 194,2 + 220,1 = 414,3 \text{ Н} \quad (2.18)$$

Потужність на колесах при $v = 25 \text{ м/с}$:

$$P_k = 414,3 \cdot 25 = 10357,5 \text{ Вт} = 10,36 \text{ кВт} \quad (2.19)$$

З урахуванням ККД електропривода $\eta_{\text{пр}} = 0,90$ та допоміжної потужності $P_{\text{доп}} = 0,8 \text{ кВт}$:

$$P_b = \frac{10,36}{0,90} + 0,8 = 12,31 \text{ кВт} \quad (2.20)$$

Питома витрата енергії на один кілометр визначається як відношення потужності, що споживається від батареї, до швидкості руху:

$$e = \frac{P_b}{V} \quad (2.21)$$

де e – питома витрата енергії, кВт·год/км; V – швидкість руху, км/год.

Для подання результату у Вт·год/км використовується залежність:

$$e_{Wh} = \frac{1000 \cdot P_b}{V} \quad (2.22)$$

Для швидкості $V = 90 \text{ км/год}$:

$$e_{Wh} = \frac{1000 \cdot 12,31}{90} = 136,8 \text{ Вт·год/км} \quad (2.23)$$

Отримане значення відповідає рівномірному руху в помірних умовах на горизонтальній дорозі. У реальній експлуатації питома витрата може бути вищою через ухил дороги, вітер, нерівномірний рух, низьку температуру, роботу кліматичної системи або агресивний стиль керування.

Якщо маршрут складається з кількох ділянок, енергоспоживання доцільно розраховувати окремо для кожної з них [16]. Для окремої ділянки маршруту витрата енергії визначається за формулою:

$$E_j = e_j \cdot L_j \quad (2.24)$$

де E_j – енергія, витрачена на j -й ділянці, кВт·год; e_j – питома витрата енергії на цій ділянці, кВт·год/км; L_j – довжина ділянки, км.

Сумарна витрата енергії на маршруті дорівнює сумі витрат на всіх ділянках:

$$E_{\text{марш}} = \sum E_j = \sum (e_j \cdot L_j) \quad (2.25)$$

Під час руху на спуску або при гальмуванні частина енергії може бути повернена до батареї завдяки рекуперації. У спрощеному вигляді енергію рекуперації можна визначити так:

$$E_{\text{рек}} = \eta_{\text{рек}} \cdot E_{\text{дост.рек}} \quad (2.26)$$

де $E_{\text{рек}}$ – енергія, повернена до батареї, кВт·год; $\eta_{\text{рек}}$ – ефективність рекуперації; $E_{\text{дост.рек}}$ – енергія, доступна для рекуперації під час спуску або гальмування, кВт·год.

Тоді загальна витрата енергії з урахуванням рекуперації визначається так:

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{тяга}} + E_{\text{доп}} - E_{\text{рек}} \quad (2.27)$$

де $E_{\text{заг}}$ – загальна витрата енергії, кВт·год; $E_{\text{тяга}}$ – енергія, витрачена безпосередньо на рух, кВт·год; $E_{\text{доп}}$ – енергія, витрачена допоміжними системами, кВт·год; $E_{\text{рек}}$ – енергія, повернена до батареї, кВт·год.

Таблиця 2.3. Основні складові математичної моделі тягового енергоспоживання

Складова моделі	Розрахункова залежність	Фізичний зміст
Опір коченню	$F_k = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha$	Втрати на деформацію шин і контакт із дорогою
Аеродинамічний опір	$F_a = 0,5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$	Опір повітря під час руху
Інерційна сила	$F_i = m \cdot a$	Додаткова сила під час розгону
Сила ухилу	$F_\alpha = m \cdot g \cdot \sin \alpha$	Вплив підйому або спуску
Потужність на колесах	$P_k = F_\Sigma \cdot v$	Механічна потужність, необхідна для руху
Потужність від батареї	$P_b = \frac{P_k}{\eta_{\text{пр}}} + P_{\text{доп}}$	Електрична потужність з урахуванням втрат
Питома витрата енергії	$e_{wh} = \frac{1000 \cdot P_b}{V}$	Витрата енергії на 1 км пробігу

2.3 Урахування дорожніх умов

Дорожні умови є одним із ключових чинників, які визначають фактичне енергоспоживання електромобіля. Навіть за однакової довжини маршруту витрата енергії може суттєво відрізнятися залежно від ухилу дороги, типу покриття, швидкісного режиму, кількості зупинок, інтенсивності руху та можливості використання рекуперативного гальмування. Тому в алгоритмі прогнозування запасу ходу дорожні умови повинні враховуватися не як другорядна поправка, а як окрема група параметрів, що безпосередньо впливають на розрахунок енергії для проходження маршруту [12].

Найбільш важливим дорожнім параметром є ухил дороги. Під час руху на підйом електромобіль витрачає додаткову енергію на збільшення потенціальної енергії транспортного засобу. Під час руху на спуск частина цієї енергії може бути повернена до батареї завдяки рекуперації. Проте повернення енергії не є повним, оскільки рекуперативна система має обмежений ККД, а її робота залежить від рівня заряду батареї, температури та максимально допустимої потужності заряджання.

Для врахування ухилу дороги доцільно поділяти на окремі ділянки, для кожної з яких задаються довжина, середня швидкість і середній ухил. Тоді енергоспоживання визначається не для всього маршруту одразу, а як сума витрат на окремих сегментах. Такий підхід дозволяє точніше оцінити різницю між рівнинною дорогою, маршрутом із тривалим підйомом і маршрутом зі змінним профілем.

Енергія, необхідна для подолання підйому на окремій ділянці, може бути визначена через зміну потенціальної енергії автомобіля:

$$E_{\alpha} = \frac{m \cdot g \cdot h}{\eta_{\text{пр}} \cdot 3,6 \cdot 10^6} \quad (2.28)$$

де E_{α} – енергія на подолання підйому, кВт·год; m – маса електромобіля, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; h – набір висоти, м; $\eta_{\text{пр}}$ – ККД електропривода.

Якщо ділянка має довжину L та ухил i , набір висоти можна наближено визначити так:

$$h = L \cdot 1000 \cdot \frac{i}{100} \quad (2.29)$$

де L – довжина ділянки, км; i – ухил дороги, %.

Наприклад, для електромобіля масою $m = 1800$ кг, ділянки довжиною $L = 5$ км та ухилу $i = 4\%$ набір висоти становитиме:

$$h = 5 \cdot 1000 \cdot \frac{4}{100} = 200 \text{ м} \quad (2.30)$$

Тоді енергія, необхідна лише для подолання підйому, дорівнює:

$$E_{\alpha} = \frac{1800 \cdot 9,81 \cdot 200}{0,90 \cdot 3,6 \cdot 10^6} = 1,09 \text{ кВт·год} \quad (2.31)$$

Отримане значення показує, що навіть відносно короткий підйом може істотно вплинути на запас ходу. Якщо не враховувати рельєф дороги, алгоритм може занижити майбутню витрату енергії та завищити прогнозований пробіг.

Під час руху на спуску потенціальна енергія може частково повернутися до батареї [6]. Енергію, доступну для рекуперації на спуску, можна визначити аналогічно до енергії підйому, але з урахуванням ефективності рекуперації:

$$E_{\text{рек}} = \frac{m \cdot g \cdot h \cdot \eta_{\text{рек}}}{3,6 \cdot 10^6} \quad (2.32)$$

де $E_{\text{рек}}$ – енергія, повернена до батареї, кВт·год; $\eta_{\text{рек}}$ – ефективність рекуперації.

Якщо прийняти $\eta_{\text{рек}} = 0,60$, то при спуску з висоти 200 м теоретично повернена енергія становитиме:

$$E_{\text{рек}} = \frac{1800 \cdot 9,81 \cdot 200 \cdot 0,60}{3,6 \cdot 10^6} = 0,59 \text{ кВт·год} \quad (2.33)$$

Це менше за енергію, витрачену на аналогічний підйом, оскільки рекуперація має обмежену ефективність. Крім того, фактичне повернення енергії може бути ще меншим, якщо батарея холодна, має високий рівень заряду або система керування обмежує зарядний струм.

Другим важливим дорожнім фактором є тип і стан покриття. На сухому рівному асфальті коефіцієнт опору коченню є мінімальним. На мокрій, засніженій, нерівній або ґрунтовій дорозі він зростає, що призводить до підвищення витрати енергії. Для спрощеного врахування цього впливу можна вводити дорожній коефіцієнт $K_{\text{дор}}$, який коригує базову силу опору коченню:

$$F_{k,\text{дор}} = K_{\text{дор}} \cdot F_k \quad (2.34)$$

де $F_{k,дор}$ – сила опору коченню з урахуванням дорожніх умов, Н; $K_{дор}$ – коефіцієнт дорожніх умов.

Таблиця 2.4. Орієнтовні значення коефіцієнта дорожніх умов

Тип дорожнього покриття	Характеристика умов	Коефіцієнт $K_{дор}$
Сухий рівний асфальт	Базові умови руху	1,00
Мокрий асфальт	Підвищений опір і втрати в контакті шини з дорогою	1,05
Нерівне покриття	Додаткові втрати через коливання та деформації	1,10
Засніжена дорога	Значне збільшення опору коченню	1,20
Ґрунтова дорога	Високі втрати через деформацію покриття	1,25

Швидкісний режим дороги також повинен враховуватися в алгоритмі. Для міської дороги характерні часті зупинки, невисока середня швидкість і значна роль рекуперації [16]. Для заміського режиму рух більш рівномірний, але зростає вплив аеродинамічного опору. Для автомагістралі характерною є висока швидкість, за якої аеродинамічні втрати стають домінуючими. Тому однакова довжина маршруту в місті та на автомагістралі не означає однакову витрату енергії.

Для врахування типу дороги можна вводити коефіцієнт режиму руху $K_{реж}$, який коригує питому витрату енергії залежно від характеру маршруту:

$$e_{дор} = e_{баз} \cdot K_{дор} \cdot K_{реж} \quad (2.35)$$

де $e_{дор}$ – питома витрата енергії з урахуванням дорожніх умов, кВт·год/км; $e_{баз}$ – базова питома витрата енергії, кВт·год/км; $K_{дор}$ – коефіцієнт дорожнього покриття; $K_{реж}$ – коефіцієнт режиму руху.

Таблиця 2.5. Орієнтовні коефіцієнти режиму руху

Режим руху	Характеристика	Коефіцієнт $K_{реж}$
Міський спокійний	Низька швидкість, плавний рух, активна рекуперація	0,95
Міський інтенсивний	Часті зупинки, розгони, затори	1,10
Змішаний	Поєднання міських і заміських ділянок	1,00
Заміський	Рівномірний рух зі швидкістю 80–90 км/год	1,05
Автомагістральний	Швидкість понад 100 км/год, високі аеродинамічні втрати	1,20

Якщо маршрут відомий, найдоцільніше використовувати сегментний розрахунок. У такому випадку загальна витрата енергії визначається як сума витрат по всіх ділянках маршруту:

$$E_{марш} = \sum_{j=1}^n E_j \quad (2.36)$$

де $E_{\text{марш}}$ – загальна витрата енергії на маршрут, кВт·год; E_j – витрата енергії на j -й ділянці, кВт·год; n – кількість ділянок маршруту.

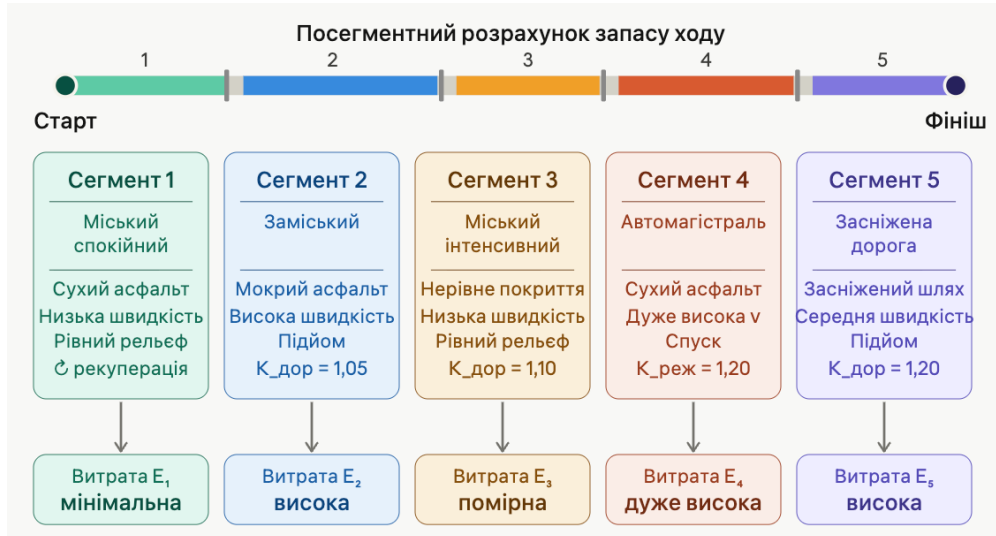


Рисунок 2.1 – Посегментний розрахунок запасу ходу електромобіля

Для кожної ділянки витрата енергії може бути визначена з урахуванням базової питомої витрати, дорожніх коефіцієнтів та складової ухилу:

$$E_j = e_{\text{баз},j} \cdot K_{\text{дор},j} \cdot K_{\text{реж},j} \cdot L_j + E_{\alpha,j} - E_{\text{рек},j} \quad (2.37)$$

де L_j – довжина ділянки, км; $E_{\alpha,j}$ – додаткова енергія на підйомі, кВт·год; $E_{\text{рек},j}$ – енергія, повернена рекуперацією на спуску, кВт·год.

2.4 Урахування стилю керування

Стиль керування є одним із найбільш змінних факторів, що впливають на енергоспоживання електромобіля. Навіть за однакових дорожніх умов, температури, маси автомобіля та маршруту різні водії можуть отримати різний фактичний запас ходу. Це пояснюється відмінностями у швидкості руху, інтенсивності прискорень, частоті гальмувань, використанні рекуперації та здатності підтримувати рівномірний режим руху [17].

З енергетичної точки зору найбільш вигідним є плавний стиль керування [6], за якого автомобіль розганяється без різких пікових навантажень, завчасно знижує швидкість і максимально використовує рекуперативне гальмування. Агресивний стиль, навпаки, супроводжується різкими прискореннями, високими швидкостями, частими гальмуваннями та підвищеним споживанням потужності. Хоча електромобіль здатний частково повертати енергію під час гальмування, рекуперація не компенсує повністю енергію, витрачену на розгін, тому нерівномірний рух завжди призводить до додаткових втрат [18].

Для кількісного врахування стилю керування доцільно використовувати коефіцієнт стилю керування $K_{\text{ст}}$. Він коригує базову питому витрату енергії, розраховану за фізико-математичною моделлю, залежно від поведінки водія:

$$e_{\text{ст}} = e_{\text{баз}} \cdot K_{\text{ст}} \quad (2.38)$$

де $e_{ст}$ – питома витрата енергії з урахуванням стилю керування, кВт·год/км; $e_{баз}$ – базова питома витрата енергії, кВт·год/км; $K_{ст}$ – коефіцієнт стилю керування.

Коефіцієнт $K_{ст}$ може визначатися на основі кількох показників руху: середньої швидкості, середнього прискорення, кількості різких прискорень, кількості різких гальмувань, частки руху з високою швидкістю та ефективності використання рекуперації. У спрощеному вигляді стиль керування можна поділити на три основні групи: економний, нормальний та агресивний.

Таблиця 2.6. Орієнтовні значення коефіцієнта стилю керування

Стиль керування	Характеристика руху	Коефіцієнт $K_{ст}$
Економний	Плавні розгони, завчасне гальмування, помірна швидкість, активна рекуперація	0,90–0,95
Нормальний	Збалансований режим руху без частих різких маневрів	1,00
Динамічний	Періодичні інтенсивні прискорення, вища середня швидкість	1,10–1,15
Агресивний	Різкі розгони, часті гальмування, висока швидкість, низька плавність руху	1,20–1,30

Більш точне оцінювання стилю керування може виконуватися за допомогою індексу агресивності. Для цього аналізуються прискорення та гальмування автомобіля протягом певного проміжку часу або на певній ділянці маршруту. Одним із простих показників є середнє абсолютне прискорення:

$$a_{сер} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |a_j| \quad (2.39)$$

де $a_{сер}$ – середнє абсолютне прискорення, м/с²; a_j – прискорення на j -му інтервалі вимірювання, м/с²; n – кількість вимірювань.

Чим більшим є значення $a_{сер}$, тим менш рівномірним є рух і тим вищими є додаткові втрати енергії. Для економного стилю характерні невеликі значення прискорень, тоді як агресивний стиль має більшу кількість пікових прискорень і гальмувань.

Додатково можна враховувати кількість різких прискорень. Якщо прискорення перевищує певне граничне значення $a_{гр}$, така подія може вважатися інтенсивним розгоном. Частка різких прискорень визначається за формулою:

$$S_{acc} = \frac{N_{acc}}{N} \quad (2.40)$$

де S_{acc} – частка різких прискорень; N_{acc} – кількість інтервалів або подій, у яких прискорення перевищує граничне значення; N – загальна кількість інтервалів аналізу.

Аналогічно можна визначити частку різких гальмувань:

$$S_{br} = \frac{N_{br}}{N} \quad (2.41)$$

де S_{br} – частка різких гальмувань; N_{br} – кількість інтервалів або подій із різким гальмуванням.

Для загальної оцінки стилю керування можна ввести інтегральний коефіцієнт агресивності:

$$A_{drv} = w_1 \cdot \frac{a_{cep}}{a_{норм}} + w_2 \cdot S_{acc} + w_3 \cdot S_{br} + w_4 \cdot S_v \quad (2.42)$$

де A_{drv} – індекс агресивності керування; $a_{норм}$ – нормалізоване значення прискорення для звичайного стилю; S_v – частка руху з високою швидкістю; w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти, які визначають вплив кожного показника.

Для спрощеної інженерної моделі можна прийняти, що сума вагових коефіцієнтів дорівнює одиниці:

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1 \quad (2.43)$$

Після визначення індексу агресивності коефіцієнт стилю керування можна подати у вигляді:

$$K_{ст} = 1 + k_{drv} \cdot (A_{drv} - 1) \quad (2.44)$$

де k_{drv} – коефіцієнт чутливості енергоспоживання до стилю керування.

Якщо $A_{drv} < 1$, стиль керування можна вважати економним, і коефіцієнт $K_{ст}$ буде меншим за одиницю. Якщо $A_{drv} = 1$, режим руху відповідає нормальному стилю. Якщо $A_{drv} > 1$, стиль є більш динамічним або агресивним, що збільшує прогнозовану питому витрату енергії.

Окремо слід враховувати вплив максимальної та середньої швидкості. Висока швидкість не лише збільшує аеродинамічний опір, а й часто є ознакою менш економного стилю керування. Для цього можна використовувати показник частки руху з підвищеною швидкістю:

$$S_v = \frac{t_{v>v_{гр}}}{t_{зар}} \quad (2.45)$$

де S_v – частка часу руху з підвищеною швидкістю; $t_{v>v_{гр}}$ – час руху зі швидкістю, більшою за граничне значення; $t_{зар}$ – загальний час руху.

Наприклад, якщо на автомагістралі автомобіль значну частину часу рухається зі швидкістю понад 110 км/год, алгоритм повинен збільшувати прогнозовану витрату енергії. Це збільшення пов'язане не лише з поведінкою водія, а й з фізичним зростанням аеродинамічного опору.

Для практичного застосування в алгоритмі можна використовувати поетапне визначення стилю керування. Спочатку система аналізує поточні параметри руху протягом певного інтервалу часу, наприклад 5–10 хвилин. Потім визначаються середнє прискорення, частка різких розгонів, частка різких гальмувань і частка руху з високою швидкістю. На основі цих показників обчислюється індекс агресивності та відповідний коефіцієнт $K_{ст}$. Надалі цей коефіцієнт використовується для корекції питомої витрати енергії.

Таблиця 2.7. Показники для оцінювання стилю керування

Показник	Позначення	Вплив на енергоспоживання
Середнє абсолютне прискорення	$a_{сер}$	Зростання показника свідчить про нерівномірний рух
Частка різких прискорень	S_{acc}	Підвищує витрати енергії на розгін
Частка різких гальмувань	S_{br}	Збільшує втрати, які не повністю компенсуються рекуперацією
Частка руху з високою швидкістю	S_v	Підвищує аеродинамічні втрати
Ефективність рекуперації	$\eta_{рек}$	Зменшує загальну витрату енергії
Коефіцієнт стилю керування	$K_{ст}$	Коригує прогнозовану питому витрату

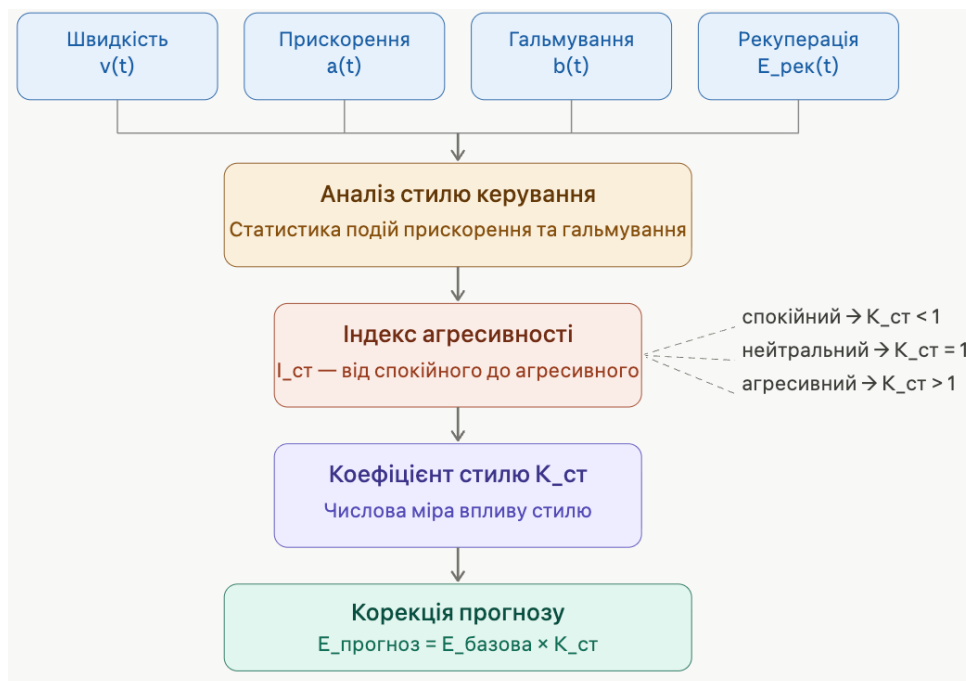


Рисунок 2.2 – Оцінювання стилю керування електромобілем

Для прикладу можна розглянути базову питому витрату енергії $e_{баз} = 0,160$ кВт·год/км. Якщо водій рухається в економному стилі з коефіцієнтом $K_{ст} = 0,95$, то скоригована витрата становитиме:

$$e_{ст} = 0,160 \cdot 0,95 = 0,152 \text{ кВт·год/км}$$

Якщо стиль керування агресивний і $K_{ст} = 1,25$, то:

$$e_{ст} = 0,160 \cdot 1,25 = 0,200 \text{ кВт·год/км}$$

За однакової доступної енергії батареї різниця між цими режимами суттєво впливатиме на запас ходу. Якщо доступна енергія становить $E_{дост} = 39,2$ кВт·год, то для економного стилю орієнтовний запас ходу дорівнюватиме:

$$R = \frac{39,2}{0,152} = 257,9 \text{ км}$$

Для агресивного стилю:

$$R = \frac{39,2}{0,200} = 196,0 \text{ км}$$

Отже, лише зміна стилю керування за однакових інших умов може зменшити прогнозований запас ходу приблизно на 60 км. Це підтверджує необхідність включення поведінкових параметрів водія до алгоритму прогнозування.

2.5 Урахування температурних факторів

Температурні фактори суттєво впливають на фактичний запас ходу електромобіля, оскільки вони змінюють умови роботи тягової акумуляторної батареї, електропривода та допоміжних систем [19]. Найбільші відхилення енергоспоживання від базових значень спостерігаються за низьких температур, коли зменшується доступна ємність батареї, зростає її внутрішній опір і значна частина енергії витрачається на обігрів салону. У спекотну погоду запас ходу також може зменшуватися через роботу кондиціонера та системи охолодження батареї.

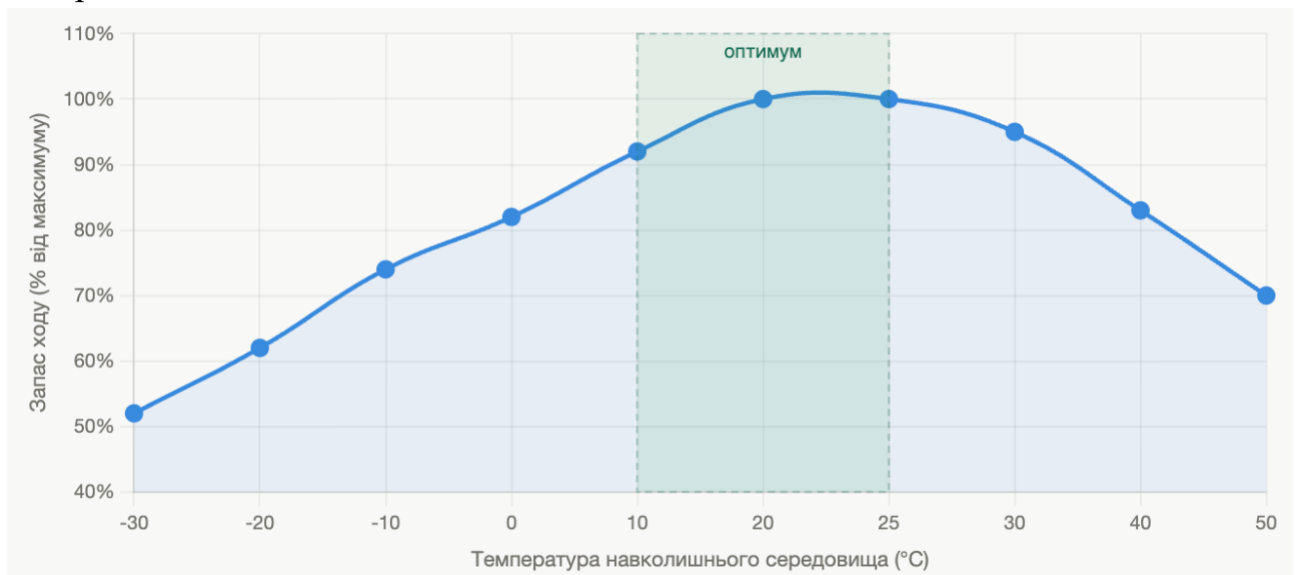


Рисунок 2.3 – Залежність прогнозованого запасу ходу від температури навколишнього середовища

У базовій математичній моделі енергоспоживання зазвичай приймається, що електромобіль працює в помірному температурному діапазоні. Для більшості літій-іонних тягових батарей таким діапазоном можна вважати приблизно від 15 до 25 °C [20]. У цих умовах батарея має близьку до номінальної доступну ємність, не потребує інтенсивного обігріву або охолодження, а допоміжні споживачі не створюють значного додаткового навантаження.

Для врахування температури доцільно вводити температурний коефіцієнт K_t , який коригує базову питому витрату енергії:

$$e_t = e_{\text{баз}} \cdot K_t \quad (2.46)$$

де e_t – питома витрата енергії з урахуванням температури, кВт·год/км;
 $e_{\text{баз}}$ – базова питома витрата енергії за нормальних температурних умов,
 кВт·год/км; K_t – температурний коефіцієнт.

Якщо температура є близькою до оптимальної, то $K_t = 1,00$. За низьких або високих температур значення цього коефіцієнта збільшується, оскільки зростає витрата енергії на один кілометр пробігу.

Таблиця 2.8. Орієнтовні значення температурного коефіцієнта

Температура повітря	Характеристика умов	Коефіцієнт K_t
Від 15 до 25 °С	Оптимальні умови роботи батареї	1,00
Від 5 до 15 °С	Помірне охолодження, незначні додаткові витрати	1,05
Від -5 до 5 °С	Зростання витрат на обігрів і зниження ефективності батареї	1,15
Нижче -5 °С	Значне зменшення доступної енергії та інтенсивний обігрів	1,25–1,35
Від 25 до 35 °С	Робота кондиціонера та системи охолодження	1,05–1,10
Понад 35 °С	Інтенсивне охолодження салону і батареї	1,10–1,15

Температура впливає не лише на поточну витрату енергії, а й на доступну корисну ємність батареї. За низьких температур частина енергії стає менш доступною через сповільнення електрохімічних процесів і збільшення внутрішнього опору акумуляторних елементів [6]. Це означає, що навіть за однакового рівня заряду фактично доступна для руху енергія взимку може бути меншою, ніж у теплу погоду.

Доступну енергію батареї з урахуванням температури можна подати так:

$$E_{\text{дост.}t} = E_{\text{кор}} \cdot \frac{SoC_{\text{поч}} - SoC_{\text{мін}}}{100} \cdot K_{\text{бат.}t} \quad (2.47)$$

де $E_{\text{дост.}t}$ – доступна енергія батареї з урахуванням температури, кВт·год;
 $E_{\text{кор}}$ – корисна ємність батареї, кВт·год; $SoC_{\text{поч}}$ – початковий рівень заряду, %;
 $SoC_{\text{мін}}$ – мінімальний резерв заряду, %; $K_{\text{бат.}t}$ – коефіцієнт доступності енергії батареї за температурою.

За нормальної температури можна прийняти $K_{\text{бат.}t} = 1,00$. За низьких температур цей коефіцієнт зменшується. Наприклад, при температурі близько -10 °С для спрощеного розрахунку можна прийняти $K_{\text{бат.}t} = 0,90$, а при сильному морозі – 0,80–0,85.

Якщо корисна ємність батареї становить $E_{\text{кор}} = 56$ кВт·год, початковий рівень заряду $SoC_{\text{поч}} = 80\%$, мінімальний резерв $SoC_{\text{мін}} = 10\%$, а температурний коефіцієнт доступності батареї $K_{\text{бат.}t} = 0,90$, то:

$$E_{\text{дост.}t} = 56 \cdot \frac{80-10}{100} \cdot 0,90 = 35,28 \text{ кВт·год}$$

Для порівняння, без урахування температурного зменшення доступна енергія становила 39,2 кВт·год. Отже, лише через температурне обмеження батареї доступний запас енергії може зменшитися на 3,92 кВт·год.

Окремо потрібно враховувати енергію, яка витрачається на допоміжні системи. У холодну погоду найбільшим споживачем є система обігріву салону та батареї. У спекотну погоду основне навантаження створюють кондиціонер і система охолодження акумуляторної батареї. Енергія допоміжних систем визначається через їх потужність і тривалість роботи:

$$E_{\text{доп}} = P_{\text{доп}} \cdot t \quad (2.48)$$

де $E_{\text{доп}}$ – енергія, витрачена допоміжними системами, кВт·год; $P_{\text{доп}}$ – потужність допоміжних споживачів, кВт; t – тривалість поїздки, год.

Якщо в холодну погоду система обігріву споживає $P_{\text{доп}} = 2,0$ кВт, а тривалість поїздки становить $t = 1,5$ год, то:

$$E_{\text{доп}} = 2,0 \cdot 1,5 = 3,0 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Це значення є суттєвим, особливо для міських поїздок з невеликою середньою швидкістю. Якщо автомобіль рухається повільно, допоміжні системи працюють довше на кожен кілометр пробігу, тому їхній вплив на питому витрату енергії зростає.

Для врахування допоміжних систем у питомій витраті можна використати залежність:

$$e_{\text{доп}} = \frac{P_{\text{доп}}}{V} \quad (2.49)$$

де $e_{\text{доп}}$ – додаткова питома витрата енергії, кВт·год/км; $P_{\text{доп}}$ – потужність допоміжних систем, кВт; V – середня швидкість руху, км/год.

Якщо $P_{\text{доп}} = 2,0$ кВт, а середня швидкість у міському режимі становить $V = 40$ км/год, то:

$$e_{\text{доп}} = \frac{2,0}{40} = 0,050 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{км}$$

Це відповідає додатковим 50 Вт·год/км. Для електромобіля, базова витрата якого становить 160 Вт·год/км, така добавка є дуже значною. Якщо ж та сама потужність обігріву використовується на трасі при швидкості 90 км/год, додаткова питома витрата буде меншою:

$$e_{\text{доп}} = \frac{2,0}{90} = 0,022 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{км}$$

Отже, температурний вплив особливо сильно проявляється в міському русі та коротких поїздках, коли багато енергії витрачається на прогрів салону і батареї, а середня швидкість залишається низькою.

Загальну питому витрату енергії з урахуванням температури можна подати так:

$$e_{\text{заг.т}} = e_{\text{тяги}} \cdot K_t + e_{\text{доп}} \quad (2.50)$$

де $e_{\text{заг.т}}$ – загальна питома витрата енергії з урахуванням температурних факторів, кВт·год/км; $e_{\text{тяги}}$ – питома витрата енергії на тягу, кВт·год/км; K_t – температурний коефіцієнт; $e_{\text{доп}}$ – додаткова питома витрата допоміжних систем, кВт·год/км.

Таблиця 2.9. Орієнтовна потужність допоміжних систем залежно від температурних умов

Умови експлуатації	Основні споживачі	Потужність $P_{\text{доп}}$, кВт
Помірна температура	Електроніка, освітлення, вентиляція	0,5–0,8
Прохолодна погода	Вентиляція, частковий обігрів	1,0–1,5
Морозна погода	Обігрів салону, скла, батареї	2,0–4,0
Спеютна погода	Кондиціонер, охолодження батареї	1,5–3,0

Для прикладу можна порівняти прогнозований запас ходу за нормальної температури та за морозної погоди. Нехай базова питома витрата становить $e_{\text{тяги}} = 0,160$ кВт·год/км, доступна енергія за нормальної температури $E_{\text{дост}} = 39,2$ кВт·год, а запас ходу визначається за формулою:

$$R = \frac{E_{\text{дост}}}{e_{\text{заг}}} \quad (2.51)$$

За нормальної температури, якщо $e_{\text{заг}} = 0,160$ кВт·год/км:

$$R = \frac{39,2}{0,160} = 245 \text{ км}$$

За температури близько -10 °С приймаємо $E_{\text{дост.т}} = 35,28$ кВт·год, $K_t = 1,20$, а додаткову питому витрату на обігрів $e_{\text{доп}} = 0,030$ кВт·год/км. Тоді:

$$e_{\text{заг.т}} = 0,160 \cdot 1,20 + 0,030 = 0,222 \text{ кВт·год/км}$$

Прогнозований запас ходу становитиме:

$$R_t = \frac{35,28}{0,222} = 158,9 \text{ км}$$

Цей приклад показує, що низька температура може зменшити запас ходу не через один окремий фактор, а через сумарний вплив трьох процесів: зниження доступної енергії батареї, збільшення витрати на тягу та додаткове споживання систем обігріву.

2.6 Розрахунок прогнозованого запасу ходу

Розрахунок прогнозованого запасу ходу є підсумковим етапом, оскільки саме він поєднує параметри батареї, математичну модель тягового енергоспоживання, дорожні умови, стиль керування та температурні фактори [6]. Основна ідея розрахунку полягає у визначенні доступної енергії тягової батареї та порівнянні її з прогнозованою питомою витратою енергії на один кілометр пробігу.

У загальному вигляді запас ходу електромобіля визначається як відношення доступної енергії батареї до питомої витрати енергії:

$$R_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{дост}}}{e_{\text{пр}}} \quad (2.52)$$

де $R_{\text{пр}}$ – прогнозований запас ходу, км; $E_{\text{дост}}$ – доступна енергія батареї, кВт·год; $e_{\text{пр}}$ – прогнозована питома витрата енергії, кВт·год/км.

Доступна енергія батареї визначається з урахуванням корисної ємності, початкового рівня заряду, мінімального резерву та температурного коефіцієнта доступності батареї:

$$E_{\text{дост}} = E_{\text{кор}} \cdot \frac{SoC_{\text{поч}} - SoC_{\text{мін}}}{100} \cdot K_{\text{бат.т}} \quad (2.53)$$

де $E_{\text{кор}}$ – корисна ємність батареї, кВт·год; $SoC_{\text{поч}}$ – початковий рівень заряду, %; $SoC_{\text{мін}}$ – мінімально допустимий резерв заряду, %; $K_{\text{бат.т}}$ – коефіцієнт доступності енергії батареї залежно від температури.

Для базових умов, прийнятих у роботі, $E_{\text{кор}} = 56$ кВт·год, $SoC_{\text{поч}} = 80\%$, $SoC_{\text{мін}} = 10\%$, $K_{\text{бат.т}} = 1,00$. Тоді:

$$E_{\text{дост}} = 56 \cdot \frac{80-10}{100} \cdot 1,00 = 39,2 \text{ кВт·год} \quad (2.54)$$

Прогнозована питома витрата енергії формується шляхом послідовного врахування базової витрати, дорожніх умов, стилю керування, температурного впливу та допоміжних споживачів [16]. У спрощеному вигляді її можна подати так:

$$e_{\text{пр}} = e_{\text{баз}} \cdot K_{\text{дор}} \cdot K_{\text{реж}} \cdot K_{\text{ст}} \cdot K_t + e_{\text{доп}} \quad (2.55)$$

де $e_{\text{баз}}$ – базова питома витрата енергії, кВт·год/км; $K_{\text{дор}}$ – коефіцієнт дорожнього покриття; $K_{\text{реж}}$ – коефіцієнт режиму руху; $K_{\text{ст}}$ – коефіцієнт стилю керування; K_t – температурний коефіцієнт; $e_{\text{доп}}$ – додаткова питома витрата допоміжних систем, кВт·год/км.

Якщо маршрут має складний профіль, доцільно використовувати сегментний розрахунок. У цьому випадку маршрут поділяється на окремі ділянки, для кожної з яких визначаються довжина, середня швидкість, ухил, тип дороги та режим руху [12]. Енергія, необхідна для проходження окремої ділянки, визначається так:

$$E_j = e_{\text{пр,}j} \cdot L_j + E_{\alpha,j} - E_{\text{рек,}j} \quad (2.56)$$

де E_j – витрата енергії на j -й ділянці, кВт·год; $e_{\text{пр,}j}$ – прогнозована питома витрата на цій ділянці, кВт·год/км; L_j – довжина ділянки, км; $E_{\alpha,j}$ – додаткова енергія на подолання підйому, кВт·год; $E_{\text{рек,}j}$ – енергія, повернена рекуперацією, кВт·год.

Загальна витрата енергії на маршрут визначається як сума витрат на всіх ділянках:

$$E_{\text{марш}} = \sum_{j=1}^n E_j \quad (2.57)$$

де $E_{\text{марш}}$ – прогнозована витрата енергії на весь маршрут, кВт·год; n – кількість ділянок маршруту.

Якщо необхідно визначити не лише запас ходу, а й можливість проходження заданого маршруту, порівнюють доступну енергію батареї з прогнозованою витратою на маршрут:

$$\Delta E = E_{\text{дост}} - E_{\text{марш}} \quad (2.58)$$

де ΔE – залишок енергії після проходження маршруту, кВт·год.

Якщо $\Delta E > 0$, автомобіль може пройти маршрут із заданими умовами. Якщо $\Delta E \leq 0$, доступної енергії недостатньо, і алгоритм повинен рекомендувати заряджання або зміну маршруту. Для практичної експлуатації доцільно також уводити резерв безпеки, щоб водій не планував рух до повного вичерпання доступної енергії.

Резерв енергії можна визначити так:

$$E_{\text{рез}} = E_{\text{кор}} \cdot \frac{SoC_{\text{рез}}}{100} \quad (2.59)$$

де $E_{\text{рез}}$ – резерв енергії, кВт·год; $SoC_{\text{рез}}$ – заданий резерв заряду, %.

Тоді запас ходу з урахуванням резерву безпеки визначається за формулою:

$$R_{\text{безп}} = \frac{E_{\text{дост}} - E_{\text{рез}}}{e_{\text{пр}}} \quad (2.60)$$

де $R_{\text{безп}}$ – прогнозований запас ходу з урахуванням резерву, км.

Для прикладу розглянемо базовий сценарій. Приймаємо доступну енергію $E_{\text{дост}} = 39,2$ кВт·год, базову питому витрату $e_{\text{баз}} = 0,160$ кВт·год/км, нормальні дорожні умови $K_{\text{дор}} = 1,00$, змішаний режим руху $K_{\text{реж}} = 1,00$, нормальний стиль керування $K_{\text{ст}} = 1,00$, оптимальну температуру $K_t = 1,00$, а додаткову питому витрату допоміжних систем $e_{\text{доп}} = 0,005$ кВт·год/км. Тоді:

$$e_{\text{пр}} = 0,160 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,00 + 0,005 = 0,165 \text{ кВт·год/км}$$

Прогнозований запас ходу становитиме:

$$R_{\text{пр}} = \frac{39,2}{0,165} = 237,6 \text{ км}$$

Якщо умови погіршуються, наприклад автомобіль рухається взимку, частина дороги проходить у міському інтенсивному режимі, а стиль керування є динамічним, прогноз змінюється. Прийемо $K_{\text{дор}} = 1,05$, $K_{\text{реж}} = 1,10$, $K_{\text{ст}} = 1,15$, $K_t = 1,20$, $e_{\text{доп}} = 0,030$ кВт·год/км, а доступну енергію з урахуванням температурного впливу $E_{\text{дост}} = 35,28$ кВт·год. Тоді:

$$e_{\text{пр}} = 0,160 \cdot 1,05 \cdot 1,10 \cdot 1,15 \cdot 1,20 + 0,030 = 0,285 \text{ кВт·год/км}$$

Запас ходу в таких умовах дорівнюватиме:

$$R_{\text{пр}} = \frac{35,28}{0,285} = 123,8 \text{ км}$$

Порівняння двох прикладів показує, що реальний запас ходу може суттєво зменшуватися не через один окремий фактор, а через їх сукупний вплив. Низька температура зменшує доступну енергію батареї, допоміжні системи збільшують витрату, дорожні умови підвищують опір руху, а динамічний стиль керування створює додаткові втрати.

Таблиця 2.10. Приклад розрахунку прогнозованого запасу ходу для різних умов

Сценарій	Доступна енергія, кВт·год	Прогнозована питома витрата, кВт·год/км	Прогнозований запас ходу, км
Помірна температура, нормальний стиль, змішаний режим	39,2	0,165	237,6
Економний стиль, сприятливі дорожні умови	39,2	0,150	261,3
Автомобільний рух	39,2	0,210	186,7
Зимові умови, інтенсивний міський режим	35,28	0,285	123,8
Горбистий маршрут із частковою рекуперацією	39,2	0,195	201,0



Рисунок 2.4 – Блок-схема розрахунку прогнозованого запасу ходу

Для алгоритмічної реалізації доцільно передбачити два режими розрахунку. У першому режимі маршрут відомий, тому прогноз виконується по окремих ділянках з урахуванням їх довжини, ухилу, швидкісного режиму та типу дороги. У другому режимі маршрут не заданий, тому запас ходу визначається на основі поточних параметрів руху, історичної витрати енергії, температури та стилю керування. Перший режим є точнішим для планування поїздки, а другий корисний для постійного оновлення прогнозу під час повсякденної експлуатації.

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Розробка структурної схеми алгоритму

Структурна схема алгоритму прогнозування запасу ходу електромобіля повинна відображати послідовність обробки даних від моменту отримання вхідних параметрів до формування кінцевого прогнозу. Оскільки запас ходу залежить від багатьох факторів, алгоритм доцільно будувати не як один окремий розрахунок, а як систему взаємопов'язаних блоків. Кожен блок відповідає за певний етап: зчитування даних, перевірку їх достовірності, визначення доступної енергії батареї, розрахунок базового енергоспоживання, урахування дорожніх умов, стилю керування, температури та формування остаточного значення запасу ходу.

Основною вимогою до структурної схеми є можливість роботи алгоритму у двох режимах. Перший режим передбачає, що маршрут руху заданий заздалегідь. У такому випадку алгоритм може використовувати довжину маршруту, дорожній ухил, тип дороги, очікувану швидкість і прогнозовані умови руху. Другий режим застосовується тоді, коли маршрут не заданий. У цьому випадку прогноз формується на основі поточних параметрів руху, історичної витрати енергії, температури та стилю керування водія. Поєднання цих режимів робить алгоритм придатним як для планування поїздки, так і для постійного оновлення запасу ходу під час руху.

На першому етапі алгоритм отримує вхідні дані з кількох джерел. До них належать система керування батареєю, бортові датчики автомобіля, навігаційна система, цифрові карти, метеорологічні дані та історія попередніх поїздок [21]. Система керування батареєю надає інформацію про рівень заряду, температуру батареї, доступну ємність і технічний стан акумуляторної системи. Бортові датчики передають швидкість, прискорення, поточну потужність електропривода та енергію рекуперації. Навігаційний блок надає дані про маршрут, довжину ділянок, ухил і тип дороги. Метеорологічний блок використовується для врахування температури, а історичні дані потрібні для адаптації прогнозу до конкретного стилю керування.

Після отримання даних виконується їх попередня обробка. На цьому етапі перевіряється повнота інформації, усуваються очевидні помилки вимірювання, виконується приведення одиниць вимірювання та вибирається режим роботи алгоритму. Наприклад, швидкість може надходити в км/год, а для фізичних розрахунків її необхідно перевести в м/с. Дані про ухил можуть бути задані у відсотках або через висотний профіль маршруту. Якщо частина даних недоступна, алгоритм повинен використовувати резервні значення або спрощений режим розрахунку.

Наступним етапом є визначення доступної енергії тягової батареї. Для цього використовується корисна ємність батареї, поточний рівень заряду,

мінімально допустимий резерв і температурний коефіцієнт доступності енергії [22]. Цей блок є критично важливим, оскільки саме доступна енергія визначає верхню межу можливого пробігу. Якщо батарея холодна або має знижену корисну ємність через деградацію, алгоритм повинен зменшити доступну енергію ще до розрахунку витрати на рух.

Базове тягове енергоспоживання розраховується на основі фізико-математичної моделі. У цьому блоці визначаються сили опору руху: опір коченню, аеродинамічний опір, інерційна складова та складова ухилу дороги. Після цього обчислюється потужність на колесах, потужність, що споживається від батареї, та базова питома витрата енергії. Якщо маршрут заданий, розрахунок виконується для кожної ділянки окремо. Якщо маршрут не заданий, використовується поточний режим руху або усереднені історичні значення.

Окремим блоком у структурній схемі є урахування дорожніх умов. У цьому блоці враховуються тип покриття, дорожній ухил, швидкісний режим і можливість рекуперації. Якщо маршрут поділений на сегменти, кожен сегмент отримує власні параметри: довжину, середню швидкість, ухил і коефіцієнт дорожніх умов. Такий підхід дозволяє враховувати, що витрата енергії на рівнинній ділянці, підйомі та спуску буде різною навіть за однакової довжини дороги.

Далі виконується оцінювання стилю керування. Алгоритм аналізує середню швидкість, прискорення, частку різких розгонів, частку різких гальмувань і частку руху з високою швидкістю. На основі цих показників формується коефіцієнт стилю керування. Якщо водій рухається плавно, коефіцієнт може бути меншим або близьким до одиниці. Якщо стиль керування агресивний, коефіцієнт збільшує прогнозовану питому витрату енергії. Цей блок забезпечує персоналізацію прогнозу і дозволяє врахувати індивідуальні особливості водія.

Температурний блок враховує температуру навколишнього середовища та батареї. Він виконує дві функції: коригує доступну енергію батареї та визначає додаткові витрати на роботу системи клімат-контролю. У холодну погоду алгоритм зменшує доступну енергію батареї та збільшує питому витрату через обігрів салону і батареї. У спекотну погоду враховується робота кондиціонера та системи охолодження батареї. Завдяки цьому прогноз краще відповідає реальним умовам експлуатації.

Після обробки всіх факторів формується прогнозована питома витрата енергії. Вона об'єднує базове тягове енергоспоживання, дорожні коефіцієнти, коефіцієнт стилю керування, температурні поправки та допоміжне споживання. Далі алгоритм визначає прогнозований запас ходу як відношення доступної енергії батареї до прогнозованої питомої витрати. Якщо маршрут заданий, додатково розраховується очікуваний залишок енергії після проходження маршруту.

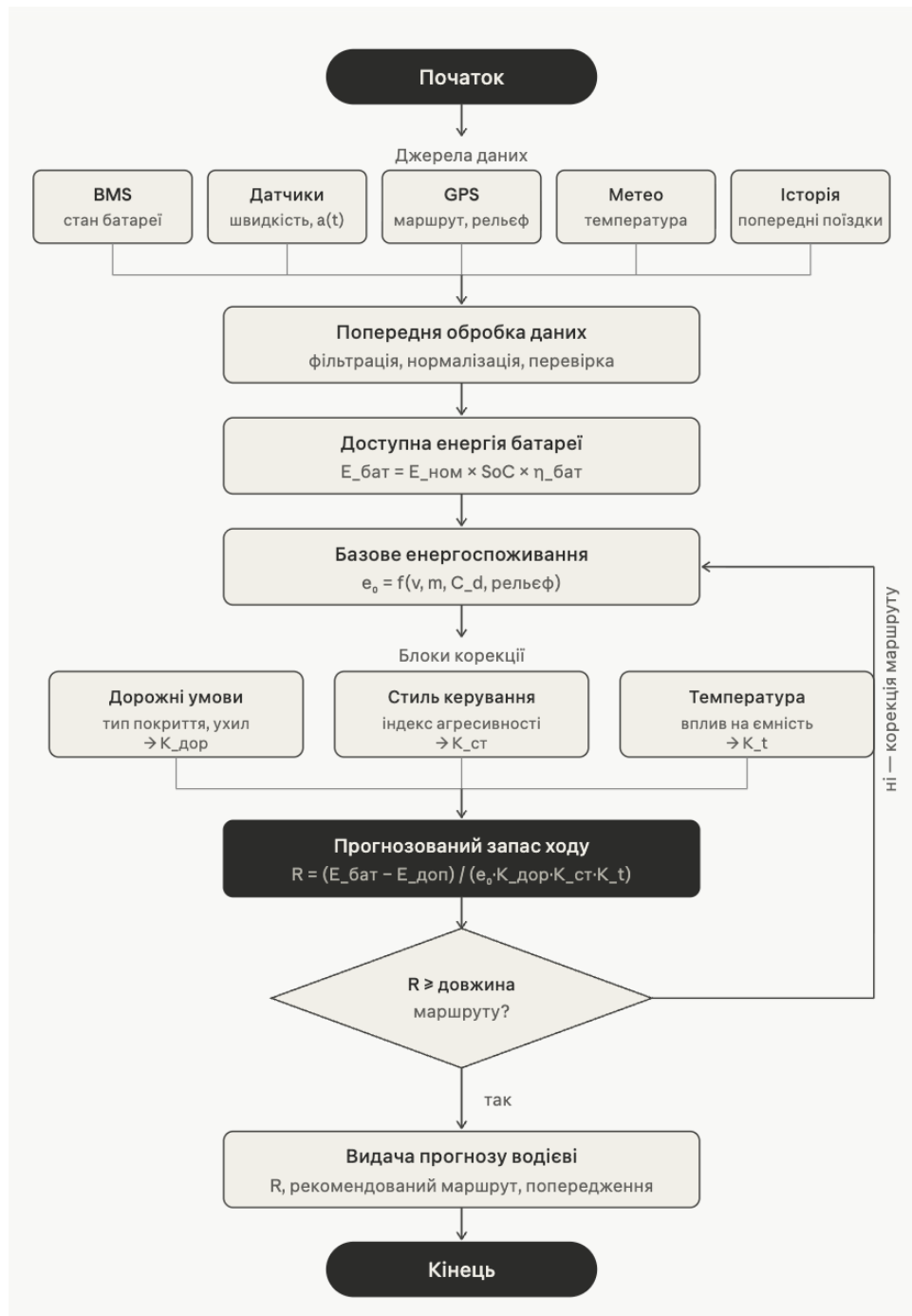


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму прогнозування запасу ходу

У загальному вигляді логіку роботи алгоритму можна подати так:

$$E_{\text{дост}} = f(E_{\text{кор}}, SoC, SoH, T_{\text{бат}})$$

$$e_{\text{пр}} = f(e_{\text{баз}}, K_{\text{дор}}, K_{\text{реж}}, K_{\text{ст}}, K_t, e_{\text{доп}})$$

$$R_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{дост}}}{e_{\text{пр}}}$$

де $E_{\text{дост}}$ – доступна енергія батареї, кВт·год; $E_{\text{кор}}$ – корисна ємність батареї, кВт·год; SoC – рівень заряду батареї, %; SoH – стан технічного здоров'я батареї, %; $T_{\text{бат}}$ – температура батареї, °C; $e_{\text{пр}}$ – прогнозована питома витрата енергії, кВт·год/км; $R_{\text{пр}}$ – прогнозований запас ходу, км.

Таблиця 3.1. Основні блоки структурної схеми алгоритму

Блок алгоритму	Вхідні дані	Результат роботи
Збір даних	BMS, датчики руху, GPS, карти, метеодані	Повний набір початкових параметрів
Попередня обробка	Вхідні параметри різних форматів	Перевірені та узгоджені дані
Визначення доступної енергії	SoC, SoH, ємність батареї, температура	Доступна енергія батареї
Розрахунок базової витрати	Маса, швидкість, прискорення, Cd, A, f	Базова питома витрата енергії
Урахування дорожніх умов	Ухил, тип дороги, режим руху	Скоригована витрата за дорожніми параметрами
Урахування стилю керування	Прискорення, гальмування, швидкість	Коефіцієнт стилю керування
Урахування температури	Температура повітря і батареї, кліматична система	Температурні поправки
Розрахунок запасу ходу	Доступна енергія, прогнозована витрата	Прогнозований запас ходу
Перевірка маршруту	Доступна енергія, витрата на маршрут	Висновок про можливість досягнення пункту призначення

Для підвищення практичної цінності алгоритм повинен працювати циклічно. Після певного інтервалу часу або після проходження чергової ділянки маршруту він повторно зчитує дані, уточнює коефіцієнти та оновлює прогноз. Такий принцип дозволяє враховувати зміну температури, трафіку, швидкості або стилю керування під час поїздки. Якщо прогнозований залишок енергії стає нижчим за заданий резерв, система повинна сформулювати попередження для водія.

3.2 Формування набору вхідних і вихідних параметрів

Для практичної реалізації алгоритму прогнозування запасу ходу необхідно чітко визначити, які параметри подаються на вхід алгоритму та які результати повинні формуватися на його виході. Вхідні параметри описують стан електромобіля, батареї, умови руху, маршрут, температуру та поведінку водія. Вихідні параметри відображають прогнозований запас ходу, очікувану витрату енергії та достатність заряду для проходження маршруту.

Набір вхідних параметрів доцільно поділити на кілька груп. Перша група містить параметри тягової акумуляторної батареї. До них належать рівень заряду, корисна ємність, стан технічного здоров'я батареї, температура батареї та мінімальний резерв заряду. Саме ці дані визначають, скільки енергії реально доступно для подальшого руху. Якщо не враховувати температуру або деградацію батареї, алгоритм може завищити прогнозований запас ходу.

Друга група параметрів описує технічні характеристики електромобіля. До неї належать маса, коефіцієнт аеродинамічного опору, площа лобового перерізу,

коефіцієнт опору коченню та ККД електропривода. Ці параметри використовуються у фізико-математичній моделі для визначення базової витрати енергії на рух. У більшості випадків вони є сталими для конкретної моделі автомобіля, але маса може змінюватися залежно від кількості пасажирів і вантажу.

Третя група охоплює динамічні параметри руху. До них належать поточна швидкість, середня швидкість, прискорення, інтенсивність гальмувань, потужність електропривода та енергія рекуперації. Ці параметри потрібні для оцінювання фактичного режиму руху та стилю керування. Вони можуть надходити від бортових датчиків або системи керування електроприводом.

Четверта група пов'язана з маршрутом і дорожніми умовами. Якщо маршрут заданий, алгоритм повинен отримувати довжину маршруту, довжину окремих сегментів, ухил дороги, тип покриття, обмеження швидкості та очікуваний режим руху. Ці дані дозволяють перейти від загальної оцінки запасу ходу до розрахунку витрати енергії по окремих ділянках маршруту.

П'ята група містить температурні та кліматичні параметри. До них належать температура навколишнього середовища, температура батареї, режим роботи системи опалення або кондиціонування та орієнтовна потужність допоміжних споживачів. Ця група є особливо важливою для зимових і літніх умов, коли відхилення фактичного запасу ходу від базового значення може бути значним.

Для забезпечення стабільної роботи алгоритму всі вхідні параметри доцільно поділити на обов'язкові та додаткові. Обов'язковими є ті параметри, без яких неможливо сформулювати навіть базовий прогноз. До них належать рівень заряду батареї, корисна ємність, мінімальний резерв, поточна або середня витрата енергії, швидкість руху та температура. Додаткові параметри підвищують точність прогнозу, але за їх відсутності алгоритм може працювати у спрощеному режимі. До таких параметрів належать точний ухил дороги, тип покриття, історичний стиль керування, прогноз погоди та дані про трафік.

Таблиця 3.2. Поділ параметрів за важливістю для алгоритму

Категорія	Параметри	Роль у прогнозуванні
Обов'язкові	SoC , $E_{кор}$, $SoC_{мін}$, швидкість, базова витрата, температура	Забезпечують мінімальний розрахунок запасу ходу
Бажані	Ухил, тип дороги, стиль керування, допоміжне споживання	Підвищують точність прогнозу
Додаткові	Трафік, вітер, опади, історія поїздок, маса вантажу	Дозволяють адаптувати прогноз до реальних умов
Діагностичні	SoH , температура батареї, обмеження рекуперації	Уточнюють доступну енергію та можливість батареї

На виході алгоритм повинен формувати кілька результатів. Основним вихідним параметром є прогнозований запас ходу $R_{пр}$, який показує, яку відстань

електромобіль може подолати за поточних умов. Другим важливим результатом є прогнозована питома витрата енергії $e_{\text{пр}}$, оскільки вона пояснює, чому запас ходу збільшується або зменшується. Якщо маршрут заданий, алгоритм також повинен визначати прогнозовану витрату енергії на маршрут $E_{\text{марш}}$ і очікуваний залишок заряду після прибуття.

Окремо доцільно формувати діагностичні вихідні параметри. До них належать коефіцієнт стилю керування, температурний коефіцієнт, дорожній коефіцієнт і попередження про недостатній запас енергії. Такі параметри допомагають не лише отримати числовий результат, а й пояснити причину зміни прогнозу. Наприклад, система може показати, що запас ходу зменшився через низьку температуру або високий коефіцієнт агресивності керування.

Таблиця 3.3. Вихідні параметри алгоритму прогнозування

Вихідний параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Призначення
Прогнозований запас ходу	$R_{\text{пр}}$	км	Основний результат алгоритму
Прогнозована питома витрата	$e_{\text{пр}}$	кВт·год/км	Оцінка очікуваного енергоспоживання
Витрата енергії на маршрут	$E_{\text{марш}}$	кВт·год	Перевірка заданого маршруту
Очікуваний залишок енергії	ΔE	кВт·год	Визначення енергетичного резерву
Очікуваний залишок заряду	$SoC_{\text{кін}}$	%	Оцінка заряду після прибуття
Коефіцієнт стилю керування	$K_{\text{ст}}$	–	Пояснення впливу поведінки водія
Температурний коефіцієнт	K_t	–	Пояснення впливу температури
Попередження про ризик	–	–	Інформування про недостатній запас енергії

Очікуваний залишок заряду після проходження маршруту може бути визначений за формулою:

$$SoC_{\text{кін}} = SoC_{\text{поч}} - \frac{E_{\text{марш}}}{E_{\text{кор}}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

де $SoC_{\text{кін}}$ – очікуваний рівень заряду після проходження маршруту, %; $SoC_{\text{поч}}$ – початковий рівень заряду, %; $E_{\text{марш}}$ – прогнозована витрата енергії на маршрут, кВт·год; $E_{\text{кор}}$ – корисна ємність батареї, кВт·год.

Якщо необхідно врахувати мінімальний резерв, алгоритм повинен перевіряти умову:

$$SoC_{\text{кін}} > SoC_{\text{мін}} \quad (3.2)$$

Якщо ця умова виконується, маршрут можна вважати енергетично допустимим. Якщо $SoC_{кін} \leq SoC_{мін}$, алгоритм повинен повідомити про ризик недостатнього запасу ходу або рекомендувати проміжне зарядження.

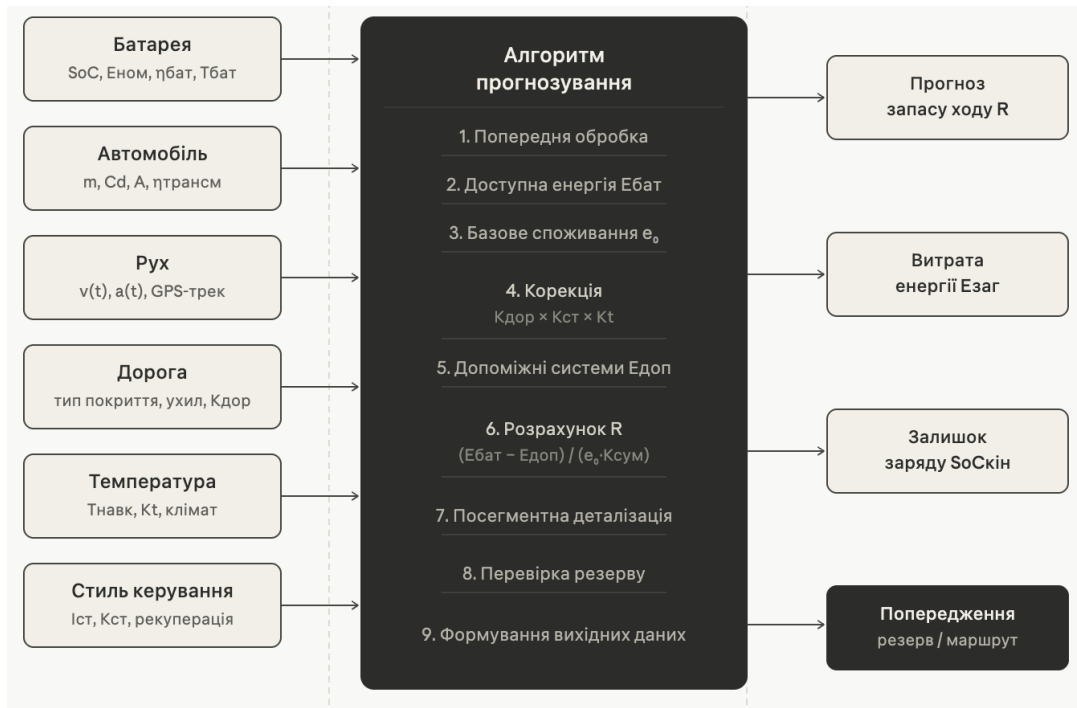


Рисунок 3.2 – Схема інформаційних потоків алгоритму

3.3 Алгоритм прогнозування для відомого маршруту і без заданого маршруту

Алгоритм прогнозування запасу ходу електромобіля повинен працювати у двох основних режимах: для відомого маршруту та без заданого маршруту. Такий підхід є необхідним, оскільки в реальній експлуатації водій не завжди користується навігацією. Якщо маршрут відомий, алгоритм може врахувати його довжину, дорожній ухил, тип дороги, обмеження швидкості та прогнозовані умови руху. Якщо маршрут не заданий, система повинна оцінювати запас ходу на основі поточного режиму руху, історичної витрати енергії, температури та стилю керування.

У режимі відомого маршруту прогнозування є більш точним, оскільки алгоритм отримує інформацію про майбутні умови руху. Маршрут поділяється на окремі сегменти, для кожного з яких визначаються довжина, середня швидкість, ухил, тип дороги та коефіцієнти корекції. Такий сегментний підхід дозволяє врахувати, що рух на рівнинній міській ділянці, автомагістралі та підйомі має різну витрату енергії.

Для кожного сегмента маршруту розраховується прогнозована питома витрата енергії:

$$e_{пр,j} = e_{баз,j} \cdot K_{дор,j} \cdot K_{реж,j} \cdot K_{ст} \cdot K_t + e_{доп,j} \quad (3.3)$$

де $e_{пр,j}$ – прогнозована питома витрата енергії на j -му сегменті, кВт·год/км; $e_{баз,j}$ – базова питома витрата на сегменті; $K_{дор,j}$ – коефіцієнт

дорожніх умов; $K_{\text{реж},j}$ – коефіцієнт режиму руху; $K_{\text{ст}}$ – коефіцієнт стилю керування; K_t – температурний коефіцієнт; $e_{\text{доп},j}$ – додаткова питома витрата допоміжних систем.

Енергія, необхідна для проходження окремого сегмента, визначається так:

$$E_j = e_{\text{пр},j} \cdot L_j + E_{\alpha,j} - E_{\text{рек},j} \quad (3.4)$$

де E_j – витрата енергії на j -му сегменті, кВт·год; L_j – довжина сегмента, км; $E_{\alpha,j}$ – додаткова енергія на подолання підйому; $E_{\text{рек},j}$ – енергія, повернена рекуперацією на спуску або під час гальмування.

Сумарна витрата енергії на весь маршрут дорівнює сумі витрат на всіх сегментах:

$$E_{\text{марш}} = \sum_{j=1}^n E_j \quad (3.5)$$

де n – кількість сегментів маршруту.

Після цього визначається очікуваний залишок енергії після проходження маршруту:

$$\Delta E = E_{\text{дост}} - E_{\text{марш}} \quad (3.6)$$

Якщо $\Delta E > 0$, маршрут може бути пройдений без додаткового заряджання. Якщо $\Delta E \leq 0$, алгоритм повинен сформулювати попередження про недостатній запас енергії. Для практичного використання доцільно порівнювати залишок не з нулем, а з резервом безпеки:

$$\Delta E_{\text{рез}} = E_{\text{дост}} - E_{\text{марш}} - E_{\text{рез}} \quad (3.7)$$

де $E_{\text{рез}}$ – резерв енергії, який не повинен використовуватися під час планування маршруту.

Якщо $\Delta E_{\text{рез}} > 0$, поїздка є допустимою з урахуванням резерву. Якщо $\Delta E_{\text{рез}} \leq 0$, система повинна рекомендувати заряджання або зміну маршруту.

У практичному вигляді послідовність роботи алгоритму для відомого маршруту складається з таких етапів:

- отримання даних про поточний стан батареї, рівень заряду, температуру та доступну ємність.
- завантаження маршруту з навігаційної системи.
- поділ маршруту на окремі сегменти за довжиною, ухилом, типом дороги та швидкісним режимом.
- розрахунок базового енергоспоживання для кожного сегмента.
- урахування дорожніх коефіцієнтів, температури та стилю керування.
- розрахунок витрати енергії на кожному сегменті.
- сумування витрат на всіх сегментах маршруту.
- порівняння прогнозованої витрати з доступною енергією батареї.
- формування прогнозу залишкового запасу ходу та попередження для водія.

Таблиця 3.4. Приклад сегментного представлення маршруту

Сегмент	Довжина, км	Режим руху	Ухил, %	Коефіцієнт дороги	Прогнозована витрата, кВт·год
1	5	Міський	0	1,00	0,85
2	12	Заміський	1	1,00	2,10
3	4	Підйом	5	1,05	1,35
4	6	Спуск	-4	1,00	0,55
5	18	Автомагістраль	0	1,00	3,80
Разом	45	Змішаний маршрут	–	–	8,65

Якщо доступна енергія батареї становить $E_{\text{дост}} = 39,2$ кВт·год, а витрата на маршрут $E_{\text{марш}} = 8,65$ кВт·год, то залишок енергії після проходження маршруту дорівнює:

$$\Delta E = 39,2 - 8,65 = 30,55 \text{ кВт·год}$$

Це означає, що маршрут може бути пройдений із достатнім запасом. Якщо додатково врахувати резерв енергії, наприклад $E_{\text{рез}} = 5,6$ кВт·год, то:

$$\Delta E_{\text{рез}} = 39,2 - 8,65 - 5,6 = 24,95 \text{ кВт·год}$$

Отже, навіть з урахуванням резерву поїздка залишається енергетично допустимою.

У режимі без заданого маршруту алгоритм не має інформації про майбутній дорожній профіль і довжину поїздки. У такому випадку прогноз формується за поточними та історичними даними. Основою є поточна або усереднена питома витрата енергії, скоригована за температурою та стилем керування. Такий режим менш точний, але він необхідний для повсякденного використання, коли водій рухається без активної навігації.

У найпростішому вигляді запас ходу без заданого маршруту визначається так:

$$R_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{дост}}}{e_{\text{адапт}}} \quad (3.8)$$

де $R_{\text{пр}}$ – прогнозований запас ходу, км; $E_{\text{дост}}$ – доступна енергія батареї, кВт·год; $e_{\text{адапт}}$ – адаптована питома витрата енергії, кВт·год/км.

Адаптована питома витрата може визначатися як поєднання поточної та історичної витрати:

$$e_{\text{адапт}} = \lambda \cdot e_{\text{поточ}} + (1 - \lambda) \cdot e_{\text{іст}} \quad (3.9)$$

де $e_{\text{поточ}}$ – питома витрата енергії за останній інтервал руху; $e_{\text{іст}}$ – історична середня витрата; λ – коефіцієнт ваги поточних умов.

Якщо λ має велике значення, алгоритм швидко реагує на зміну умов руху, але прогноз може стати нестабільним. Якщо λ мале, прогноз буде плавнішим, але повільніше реагуватиме на зміну швидкості, температури або стилю керування. Для практичного застосування можна прийняти $\lambda = 0,4 - 0,6$.

Наприклад, якщо поточна витрата за останні 10 км становить $e_{\text{поточ}} = 0,190$ кВт·год/км, історична середня витрата $e_{\text{іст}} = 0,160$ кВт·год/км, а $\lambda = 0,5$, тоді:

$$e_{\text{адапт}} = 0,5 \cdot 0,190 + (1 - 0,5) \cdot 0,160 = 0,175 \text{ кВт·год/км}$$

При доступній енергії $E_{\text{дост}} = 39,2$ кВт·год запас ходу становитиме:

$$R_{\text{пр}} = \frac{39,2}{0,175} = 224 \text{ км}$$

Для режиму без заданого маршруту алгоритм повинен періодично оновлювати прогноз. Наприклад, після кожних 1–5 км або через певний часовий інтервал система повторно аналізує поточну витрату, швидкість, температуру та стиль керування. Це дозволяє прогнозу поступово адаптуватися до реальних умов руху.

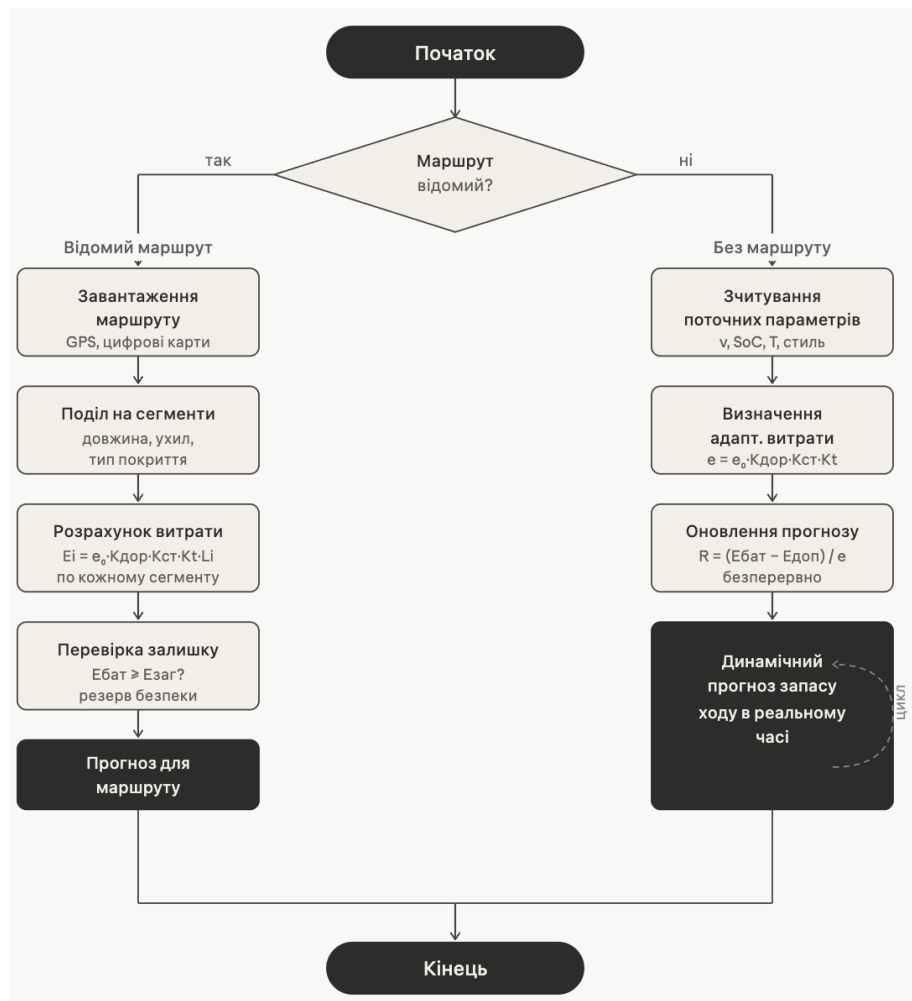


Рисунок 3.3 – Реалізація алгоритму прогнозування для відомого маршруту і без заданого маршруту

3.4 Виконання розрахунку та сценарний аналіз

Для перевірки роботи запропонованого алгоритму доцільно виконати приклад розрахунку прогнозованого запасу ходу для кількох типових сценаріїв експлуатації електромобіля. Такий підхід дозволяє оцінити, як змінюється результат залежно від температури, дорожніх умов, швидкісного режиму та

стилю керування. Усі сценарії розраховуються для одного й того самого електромобіля, що дає змогу порівняти вплив окремих факторів без зміни базових технічних параметрів.

Для розрахунку приймаються такі вихідні дані: корисна ємність тягової батареї $E_{\text{кор}} = 56$ кВт·год, початковий рівень заряду $SoC_{\text{поч}} = 80\%$, мінімальний резерв заряду $SoC_{\text{мін}} = 10\%$, базова питома витрата енергії $e_{\text{баз}} = 0,160$ кВт·год/км. За нормальної температури доступна енергія батареї становить:

$$E_{\text{дост}} = 56 \cdot \frac{80 - 10}{100} = 39,2 \text{ кВт·год}$$

Прогнозована питома витрата енергії для кожного сценарію визначається за залежністю:

$$e_{\text{пр}} = e_{\text{баз}} \cdot K_{\text{дор}} \cdot K_{\text{реж}} \cdot K_{\text{ст}} \cdot K_t + e_{\text{доп}} \quad (3.10)$$

де $K_{\text{дор}}$ – коефіцієнт дорожніх умов; $K_{\text{реж}}$ – коефіцієнт режиму руху; $K_{\text{ст}}$ – коефіцієнт стилю керування; K_t – температурний коефіцієнт; $e_{\text{доп}}$ – додаткова питома витрата допоміжних систем.

Прогнозований запас ходу визначається за формулою:

$$R_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{дост}}}{e_{\text{пр}}} \quad (3.11)$$

У першому сценарії розглядається рух у сприятливих умовах: температура навколишнього середовища перебуває в оптимальному діапазоні, дорога суха та рівна, режим руху змішаний, стиль керування нормальний. Для цього випадку приймаємо $K_{\text{дор}} = 1,00$, $K_{\text{реж}} = 1,00$, $K_{\text{ст}} = 1,00$, $K_t = 1,00$, $e_{\text{доп}} = 0,005$ кВт·год/км. Тоді:

$$e_{\text{пр}} = 0,160 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,00 + 0,005 = 0,165 \text{ кВт·год/км}$$

$$R_{\text{пр}} = \frac{39,2}{0,165} = 237,6 \text{ км}$$

Цей сценарій можна вважати базовим, оскільки він відповідає помірним умовам експлуатації без істотних додаткових навантажень.

У другому сценарії розглядається економний стиль керування. Водій рухається плавно, уникає різких прискорень, завчасно знижує швидкість і ефективно використовує рекуперативне гальмування. Приймаємо $K_{\text{дор}} = 1,00$, $K_{\text{реж}} = 1,00$, $K_{\text{ст}} = 0,95$, $K_t = 1,00$, $e_{\text{доп}} = 0,005$ кВт·год/км. Тоді:

$$e_{\text{пр}} = 0,160 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 0,95 \cdot 1,00 + 0,005 = 0,157 \text{ кВт·год/км}$$

$$R_{\text{пр}} = \frac{39,2}{0,157} = 249,7 \text{ км}$$

Порівняно з базовим сценарієм запас ходу збільшується приблизно на 12 км. Це підтверджує, що навіть помірна зміна стилю керування може позитивно впливати на енергетичну ефективність.

У третьому сценарії розглядається автомагістральний рух. Для нього характерна висока швидкість, при якій істотно зростає аеродинамічний опір.

Приймаємо $K_{дор} = 1,00$, $K_{реж} = 1,20$, $K_{ст} = 1,00$, $K_t = 1,00$, $e_{доп} = 0,005$ кВт·год/км. Тоді:

$$e_{пр} = 0,160 \cdot 1,00 \cdot 1,20 \cdot 1,00 \cdot 1,00 + 0,005 = 0,197 \text{ кВт·год/км}$$

$$R_{пр} = \frac{39,2}{0,197} = 199,0 \text{ км}$$

Отриманий результат показує, що високошвидкісний рух суттєво знижує запас ходу навіть за нормальної температури та доброго дорожнього покриття.

У четвертому сценарії розглядаються зимові умови. Приймається, що температура повітря становить близько -10 °С, доступна енергія батареї знижується через температурний вплив, а витрата зростає через обігрів салону і батареї. Для цього випадку приймаємо коефіцієнт доступності батареї $K_{бат.t} = 0,90$, тому:

$$E_{дост.t} = 56 \cdot \frac{80 - 10}{100} \cdot 0,90 = 35,28 \text{ кВт·год}$$

Для витрати приймаємо $K_{дор} = 1,05$, $K_{реж} = 1,10$, $K_{ст} = 1,00$, $K_t = 1,20$, $e_{доп} = 0,030$ кВт·год/км. Тоді:

$$e_{пр} = 0,160 \cdot 1,05 \cdot 1,10 \cdot 1,00 \cdot 1,20 + 0,030 = 0,252 \text{ кВт·год/км}$$

$$R_{пр} = \frac{35,28}{0,252} = 140,0 \text{ км}$$

У цьому випадку запас ходу зменшується майже на 98 км порівняно з базовим сценарієм. Це пояснюється одночасним впливом низької температури, зменшенням доступної енергії батареї та додатковими витратами на обігрів.

У п'ятому сценарії розглядається агресивний стиль керування. Приймається, що водій часто використовує різкі прискорення, підтримує вищу середню швидкість і частіше гальмує. Для такого сценарію приймаємо $K_{дор} = 1,00$, $K_{реж} = 1,05$, $K_{ст} = 1,25$, $K_t = 1,00$, $e_{доп} = 0,005$ кВт·год/км. Тоді:

$$e_{пр} = 0,160 \cdot 1,00 \cdot 1,05 \cdot 1,25 \cdot 1,00 + 0,005 = 0,215 \text{ кВт·год/км}$$

$$R_{пр} = \frac{39,2}{0,215} = 182,3 \text{ км}$$

Порівняно з базовим сценарієм запас ходу зменшується приблизно на 55 км. Це підтверджує необхідність врахування поведінкових параметрів водія в алгоритмі прогнозування.

У шостому сценарії розглядається горбистий маршрут. Припустимо, що базова витрата з урахуванням дорожніх умов і режиму руху становить $e_{пр} = 0,180$ кВт·год/км, довжина маршруту – 100 км, додаткова енергія на підйоми – 2,2 кВт·год, а енергія, повернена рекуперацією на спусках, – 0,9 кВт·год. Тоді загальна витрата на маршрут визначається так:

$$E_{марш} = 0,180 \cdot 100 + 2,2 - 0,9 = 19,3 \text{ кВт·год}$$

Еквівалентна питома витрата становить:

$$e_{\text{екв}} = \frac{19,3}{100} = 0,193 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{км}$$

Прогнозований запас ходу:

$$R_{\text{пр}} = \frac{39,2}{0,193} = 203,1 \text{ км}$$

Цей приклад показує, що рекуперація частково компенсує витрати на підйомах, але не повертає всю витрачену енергію. Тому горбистий маршрут зазвичай має більшу витрату, ніж рівнинний маршрут такої самої довжини.

Таблиця 3.7. Результати сценарного аналізу прогнозованого запасу ходу

Сценарій	Доступна енергія, кВт·год	Прогнозована питома витрата, кВт·год/км	Прогнозований запас ходу, км
Базовий змішаний режим	39,2	0,165	237,6
Економний стиль керування	39,2	0,157	249,7
Автомагістральний рух	39,2	0,197	199,0
Зимові умови	35,28	0,252	140,0
Агресивний стиль керування	39,2	0,215	182,3
Горбистий маршрут	39,2	0,193	203,1

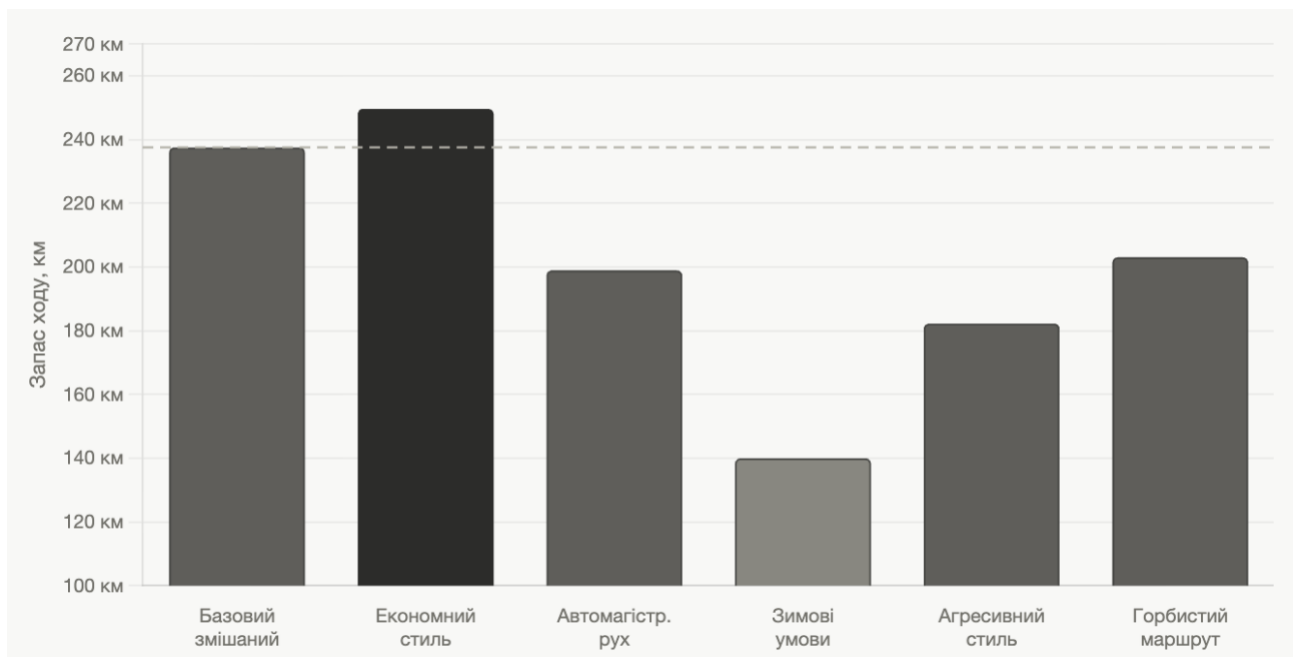


Рисунок 3.4 – Порівняння прогнозованого запасу ходу для різних сценаріїв руху

Для більш повного аналізу доцільно оцінити відносну зміну запасу ходу порівняно з базовим сценарієм. Відносна зміна визначається за формулою:

$$\Delta R_{\text{відн}} = \frac{R_{\text{сц}} - R_{\text{баз}}}{R_{\text{баз}}} \cdot 100\% \quad (3.12)$$

де $R_{\text{сц}}$ – запас ходу для окремого сценарію, км; $R_{\text{баз}}$ – запас ходу в базовому сценарії, км.

Таблиця 3.8. Відносна зміна запасу ходу порівняно з базовим сценарієм

Сценарій	Прогнозований запас ходу, км	Відносна зміна, %
Базовий змішаний режим	237,6	0
Економний стиль керування	249,7	+5,1
Автомагістральний рух	199,0	-16,2
Зимові умови	140,0	-41,1
Агресивний стиль керування	182,3	-23,3
Горбистий маршрут	203,1	-14,5

Результати сценарного аналізу показують, що найбільший негативний вплив на запас ходу мають зимові умови експлуатації. У цьому випадку одночасно зменшується доступна енергія батареї та збільшується питома витрата через обігрів і погіршення дорожніх умов. Другим за значущістю фактором є агресивний стиль керування, який підвищує витрати через різкі прискорення, часті гальмування та вищу середню швидкість. Автомагістральний рух також суттєво скорочує запас ходу через зростання аеродинамічного опору.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Основні принципи та функції управління охороною праці під час досліджень електромобіля

Охорона праці під час виконання досліджень, пов'язаних з електромобілями, має особливе значення, оскільки такі транспортні засоби містять високовольтні електричні системи, тягові акумуляторні батареї, силову електроніку та елементи автоматизованого керування [23]. Навіть якщо робота має переважно розрахунково-аналітичний характер, під час практичної перевірки, збирання даних або діагностики автомобіля можуть виникати небезпечні та шкідливі виробничі фактори.

Основним принципом охорони праці є пріоритет життя і здоров'я людини над будь-якими виробничими або дослідницькими результатами. Це означає, що отримання експериментальних даних, перевірка алгоритму, підключення діагностичного обладнання або проведення дорожніх випробувань не можуть виконуватися за умов, які створюють небезпеку для водія, оператора, дослідника або інших учасників дорожнього руху. Усі роботи повинні проводитися лише після оцінювання ризиків, перевірки справності обладнання та визначення безпечного порядку дій.

Під час дослідження електромобіля основними джерелами небезпеки є високовольтна батарея, інвертор, електродвигун, зарядний порт, кабелі високої напруги, система терморегулювання батареї та діагностичні інтерфейси. У сучасних електромобілях напруга тягової системи може становити сотні вольт, тому випадкове пошкодження ізоляції, неправильне підключення обладнання або втручання в силові кола може призвести до ураження електричним струмом, короткого замикання, перегріву або займання.

Управління охороною праці повинно мати системний характер. Це означає, що безпечність робіт забезпечується не окремим заходом, а сукупністю організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та навчальних дій [24]. До організаційних заходів належать допуск до роботи лише підготовлених осіб, проведення інструктажів, визначення відповідального за безпеку, оформлення порядку виконання робіт і заборона самовільного втручання у високовольтні системи. До технічних заходів належать використання справного діагностичного обладнання, ізольованого інструменту, засобів індивідуального захисту та контроль відсутності пошкоджень кабелів і роз'ємів.

Особливої уваги потребує робота з тяговою акумуляторною батареєю. Батарея є джерелом значної електричної енергії, а її пошкодження може спричинити перегрів, виділення токсичних продуктів розкладу, загоряння або термічний розгін. Тому під час досліджень не допускається механічне пошкодження батарейного блока, самовільне розбирання акумуляторних модулів, підключення сторонніх навантажень без технічного обґрунтування та

експлуатація автомобіля з ознаками несправності батареї. До таких ознак належать повідомлення системи BMS про помилку, перегрів, запах електроліту, дим, незвичні шуми або різке обмеження потужності.

Під час підключення діагностичного обладнання необхідно дотримуватися правил електробезпеки. Перед початком роботи слід переконаватися, що обладнання сумісне з конкретним автомобілем, має справні кабелі та не створює ризику короткого замикання. Підключення до діагностичного порту або телематичного інтерфейсу повинно виконуватися без втручання у високовольтні кола. Якщо для дослідження достатньо зчитування параметрів через штатні інтерфейси, не допускається відкривати батарейний блок або силові компоненти електропривода.

Дорожні випробування електромобіля повинні проводитися з урахуванням вимог безпеки дорожнього руху. Водій не повинен відволікатися на спостереження за даними, запис параметрів або керування вимірювальним обладнанням. Якщо під час руху необхідно контролювати показники, це має виконувати окремий оператор або автоматична система реєстрації даних. Маршрут випробування повинен бути обраний таким чином, щоб не створювати небезпеки для інших учасників руху. Не допускається виконання різких прискорень, гальмувань або маневрів у місцях, де це може призвести до аварійної ситуації.

До шкідливих факторів під час досліджень можна віднести тривалу роботу з комп'ютерною технікою, психоемоційне навантаження оператора, недостатнє освітлення робочого місця, незручну робочу позу, шум у виробничому приміщенні та вплив метеорологічних умов під час дорожніх випробувань. Тому робоче місце дослідника повинно бути організоване відповідно до ергономічних вимог: монітор розміщується на зручній висоті, робоча поверхня має достатню площу, освітлення повинно бути рівномірним, а тривала робота за комп'ютером має чергуватися з перервами.

Таблиця 4.1. Основні небезпечні та шкідливі фактори під час досліджень електромобіля

Фактор	Можлива небезпека	Заходи запобігання
Високовольтна батарея	Ураження електричним струмом, коротке замикання, займання	Заборона втручання без допуску, використання ізольованого інструменту, контроль стану батареї
Силова електроніка	Перегрів, електричний пробій, пошкодження обладнання	Робота лише зі справними системами, діагностика без розбирання високовольтних вузлів
Діагностичне обладнання	Помилки підключення, пошкодження інтерфейсів	Перевірка сумісності, справності кабелів і правильності підключення

Дорожні випробування	ДТП, відволікання водія, небезпечні маневри	Вибір безпечного маршруту, автоматичний запис даних, участь окремого оператора
Акумуляторна батарея при несправності	Перегрів, дим, токсичні продукти, термічний розгін	Припинення робіт, відведення автомобіля в безпечну зону, виклик спеціалізованих служб
Робота з комп'ютером	Втома зору, статичне навантаження, зниження уваги	Ергономічне робоче місце, перерви, достатнє освітлення

Система управління охороною праці під час таких досліджень повинна виконувати кілька основних функцій. Першою функцією є планування безпечного виконання робіт. На цьому етапі визначаються обсяг дослідження, необхідне обладнання, потенційні небезпеки, порядок дій і відповідальні особи. Другою функцією є організація робіт, яка передбачає підготовку робочого місця, перевірку обладнання, допуск виконавців і забезпечення засобами захисту. Третьою функцією є контроль, тобто перевірка дотримання вимог безпеки під час виконання робіт. Четвертою функцією є аналіз результатів і коригування заходів безпеки у разі виявлення недоліків.

Таблиця 4.2. Функції управління охороною праці під час досліджень електромобіля

Функція	Зміст функції	Практична реалізація
Планування	Визначення ризиків і порядку безпечного виконання робіт	Підготовка програми випробувань, вибір маршруту, перевірка умов
Організація	Забезпечення умов для безпечної роботи	Інструктаж, підготовка обладнання, визначення відповідальних осіб
Контроль	Перевірка виконання вимог безпеки	Огляд автомобіля, контроль підключення, моніторинг стану батареї
Навчання	Формування знань і навичок безпечної роботи	Первинний і повторний інструктаж, ознайомлення з аварійними діями
Аналіз	Оцінювання порушень, ризиків і результатів	Розбір небезпечних ситуацій, коригування методики випробувань
Документування	Фіксація умов і результатів робіт	Журнал інструктажів, протокол випробувань, реєстрація несправностей

Важливим елементом охорони праці є використання засобів індивідуального захисту. Під час звичайного зчитування даних через штатні інтерфейси достатньо дотримання загальних правил безпеки та використання справного обладнання. Якщо ж робота передбачає наближення до високовольтних компонентів, необхідно застосовувати діелектричні рукавички, захисні окуляри, ізольований інструмент і попереджувальні знаки. Усі засоби захисту повинні бути справними та відповідати характеру виконуваних робіт.

Окремо слід враховувати інформаційну безпеку, оскільки алгоритм прогнозування запасу ходу може використовувати телематичні дані, історію поїздок, координати GPS і параметри поведінки водія. Такі дані можуть містити персональну інформацію, тому їх потрібно зберігати та обробляти з дотриманням конфіденційності. У дослідницьких цілях доцільно використовувати знеособлені дані, які не дозволяють ідентифікувати конкретну особу або її маршрути.

Під час виникнення ознак небезпечної ситуації роботи повинні бути негайно припинені. До таких ознак належать повідомлення про несправність високовольтної системи, перегрів батареї, запах горілої ізоляції, дим, іскріння, пошкодження кабелів або відмова електронних систем керування. У такому випадку автомобіль необхідно зупинити в безпечному місці, вимкнути живлення відповідно до інструкції виробника, не торкатися високовольтних елементів і повідомити відповідальні служби.

4.2 Концепція захисту населення і території у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій

Указ Президента України від 26 березня 1999 року № 284/99 затвердив концепцію захисту населення та території у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій.

Концепція описує загальні цілі та завдання захисту громадян, які проживають на території України, земельного, водного та повітряного простору в межах держави, об'єктів виробничого та соціального призначення, а також довкілля від надзвичайних ситуацій [25].

Виникнення надзвичайної ситуації та її класифікація Щодня в світі фіксуються тисячі подій, які порушують нормальне життя та діяльність людей. Ці події можуть призвести до смерті або значних матеріальних втрат. Такі ситуації називають надзвичайними.

Загальні характеристики НС

- наявність або загроза смерті людей або значне погіршення умов життєдіяльності людей
- загострення економічних проблем
- значне погіршення навколишнього середовища.
- аварії, катастрофи, стихійні лиха та інші події, такі як епідемії, терористичні акти, збройні конфлікти тощо, є типовими причинами надзвичайних ситуацій.

Аварії поділяються на дві групи:

- 1) До I категорії належать аварії, внаслідок яких загинуло 5 або травмовано 10 і більше осіб; відбувся викид отруйних, радіоактивних або біологічно

небезпечних речовин у санітарно-захисну зону підприємства; концентрація забруднюючих речовин у навколишньому середовищі зросла більш як у 10 разів; зруйновано будівлі, споруди чи основні конструкції об'єкта, що поставило життя і здоров'я значної кількості працівників.

2) До II категорії належать аварії, які призвели до: загибелі або травмування від 5 до 10 осіб; руйнування будівлі, споруди чи основних конструкцій об'єкта, що поставило життя чи здоров'я працівників цеху, дільниці (враховуються цехи, дільниці з більш ніж 100 працівниками).

До категорії аварій не належать порушення технологічних процесів, робота устаткування, тимчасові зупинки виробництва через спрацювання автоматичних захисних блокувань або інші локальні порушення роботи цехів, дільниць або окремих об'єктів, падіння опор і обрив дротів ліній електропередач.

Як правило, більша площа охоплюється більшою кількістю людей, які тікають від надзвичайної ситуації. І навпаки, більше людей страждають від катастрофи чи стихійного лиха на більшій території. З цієї причини класифікації надзвичайних ситуацій за масштабом зазвичай базуються на територіальному принципі. За цим принципом надзвичайні ситуації поділяються на локальні, об'єктові, місцеві, регіональні, загальнодержавні (національні), континентальні та глобальні.

Надзвичайні ситуації соціально-політичного характеру – це ситуації, пов'язані з діями, які є терористичними або антиконституційними, наприклад, здійснення або реальна загроза терористичного акту (збройний напад, захоплення і затримання важливих об'єктів, ядерних установок і матеріалів, систем зв'язку та телекомунікацій, напад чи замах на екіпаж повітряного чи морського судна), викрадення (спроба викрадення) чи знищення суден [26].

Надзвичайні ситуації воєнного характеру – це ситуації, у яких застосування зброї масового ураження або звичайних засобів ураження призводить до вторинних факторів ураження населення. Ці фактори включають руйнування транспортних і інженерних комунікацій, атомних і гідроелектричних станцій, складів і сховищ радіоактивних і токсичних речовин і відходів, нафтопродуктів, вибухівки, сильнодіючих отруйних речовин, токсичних відход

Захист населення, об'єктів економіки та національного надбання від надзвичайних природних, техногенних або інших надзвичайних ситуацій має бути забезпечено на національному рівні.

Зовнішні та внутрішні загрози для життєво важливих інтересів громадян, держав і суспільств поділяються на зовнішні та внутрішні. Ці загрози виникають під час надзвичайних ситуацій техногенного та природного походження, а також воєнних конфліктів.

Основними завданнями під час надзвичайних ситуацій є захист населення та територій:

- розробка та впровадження законодавства, дотримання державних технічних правил і стандартів щодо захисту населення та територій від надзвичайних ситуацій;
- забезпечити готовність органів управління, сил і засобів реагування на надзвичайні ситуації;
- розробка та забезпечення планів реагування на надзвичайні ситуації;
- збирання та обробка даних про надзвичайні ситуації;
- передбачення та оцінка наслідків надзвичайної ситуації;
- оповіщення людей про загрозу або надзвичайну ситуацію;
- забезпечення персонального захисту та безкоштовної медичної допомоги;
- рятувальні та інші невідкладні операції, щоб зменшити наслідки надзвичайної ситуації та допомогти постраждалим;
- забезпечення соціального захисту населення;
- розробка та підтримка цільових і науково-технічних програм, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям і забезпечення сталого функціонування підприємств, установ, організацій незалежно від форм власності та підпорядкування, а також підвідомчих їм об'єктів виробничого та соціального захисту;
- міжнародна співпраця щодо захисту населення від надзвичайних ситуацій.

У разі надзвичайної ситуації необхідно вжити спеціальних заходів, щоб захистити населення та зменшити втрати та шкоду економіці. Він складається з повідомлень і інформування, спостереження та контролю, укриття в захисних спорудах, евакуації та інженерного, медичного, біологічного та радіаційного захисту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто задачу розробки алгоритму прогнозування запасу ходу електромобіля з урахуванням дорожніх умов, стилю керування та температурних факторів. Актуальність роботи зумовлена тим, що фактичний запас ходу електромобіля часто відрізняється від паспортного значення, а традиційна оцінка лише за середньою витратою енергії не забезпечує достатньої точності в реальних умовах експлуатації.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан розвитку електромобільності та визначено основні фактори, які впливають на енергоспоживання електромобіля. Встановлено, що найбільший вплив на реальний запас ходу мають швидкість руху, дорожній ухил, маса автомобіля, температура навколишнього середовища, робота допоміжних систем, стан тягової батареї та стиль керування водія. Також розглянуто сучасні методи прогнозування запасу ходу, серед яких найбільш доцільним для поставленої задачі є гібридний підхід, що поєднує фізико-математичну модель руху з коригувальними коефіцієнтами.

У другому розділі сформовано розрахункову основу алгоритму. Для типового електромобіля середнього класу прийнято корисну ємність тягової батареї 56 кВт·год, розрахункову масу 1800 кг, коефіцієнт аеродинамічного опору 0,25, площу лобового перерізу 2,3 м², коефіцієнт опору коченню 0,011 та ККД електропривода 0,90. За початкового рівня заряду 80% і мінімального резерву 10% доступна для руху енергія становить 39,2 кВт·год. Розроблено математичну модель тягового енергоспоживання електромобіля, яка враховує опір коченню, аеродинамічний опір, інерційну складову, дорожній ухил, ККД електропривода та допоміжне споживання. Показано, що дорожній ухил і висока швидкість руху можуть суттєво змінювати витрату енергії. Зокрема, при русі на підйом додаткові витрати можуть перевищувати втрати на кочення й аеродинамічний опір, а при русі автомагістраллю домінуючим фактором стає опір повітря. Для врахування дорожніх умов запропоновано використовувати поділ маршруту на окремі сегменти. Для кожного сегмента визначаються довжина, ухил, тип дороги, швидкісний режим і можливість рекуперації. Такий підхід дає змогу точніше розраховувати витрату енергії на маршрутах зі змінним профілем, підйомами, спусками та різними режимами руху. У роботі запропоновано враховувати стиль керування за допомогою коефіцієнта $K_{ст}$, який формується на основі показників швидкості, прискорення, частки різких розгонів, частки різких гальмувань і частки руху з високою швидкістю. Показано, що економний стиль може збільшити прогнозований запас ходу, тоді як агресивний стиль керування істотно його зменшує через додаткові втрати енергії під час розгонів і гальмувань. Температурні фактори враховано через два основні механізми: зміну доступної енергії батареї та збільшення питомої витрати енергії через роботу допоміжних систем. За низьких температур зменшується ефективна доступна ємність батареї, обмежується

рекуперация та зростають витрати на обігрів салону і батареї. У спекотних умовах додаткове навантаження створюють кондиціонер і система охолодження акумулятора.

У третьому розділі розроблено структурну схему алгоритму прогнозування запасу ходу. Алгоритм передбачає збирання даних від BMS, бортових датчиків, GPS, цифрових карт, метеорологічних сервісів та історії поїздок. Після попередньої обробки даних визначається доступна енергія батареї, розраховується базове тягове енергоспоживання, вносяться поправки на дорожні умови, стиль керування та температуру, після чого формується прогнозований запас ходу. Передбачено два режими роботи алгоритму: для відомого маршруту та без заданого маршруту. У першому випадку використовується сегментний розрахунок з урахуванням довжини, ухилу й типу дороги. У другому випадку прогноз формується на основі поточної та історичної питомої витрати енергії з адаптацією до температури і стилю керування. Такий підхід дозволяє використовувати алгоритм як для планування поїздки, так і для поточного оновлення запасу ходу під час руху. Виконаний сценарний аналіз показав, що за однакової початкової енергії батареї прогнозований запас ходу може суттєво змінюватися залежно від умов експлуатації. У базовому змішаному режимі отримано запас ходу 237,6 км, за економного стилю керування – 249,7 км, під час автомагістрального руху – 199,0 км, за агресивного стилю – 182,3 км, на горбистому маршруті – 203,1 км, а в зимових умовах – 140,0 км. Це підтверджує, що використання фіксованої середньої витрати енергії є недостатнім для достовірного прогнозування реального запасу ходу.

У четвертому розділі розглянуто питання безпеки життєдіяльності та охорони праці під час досліджень електромобіля. Визначено основні небезпечні фактори, серед яких високовольтна батарея, силова електроніка, діагностичне обладнання, дорожні випробування та можливі аварійні ситуації. Запропоновано організаційні й технічні заходи для зниження ризиків, зокрема використання справного обладнання, заборону самовільного втручання у високовольтні кола, контроль стану батареї та дотримання правил безпеки під час дорожніх випробувань. Також розглянуто дії у разі надзвичайних ситуацій, пов'язаних з електромобілями. Особливу увагу приділено ризикам пошкодження тягової батареї, термічного розгону, пожежі, затоплення автомобіля та несправного заряджання. Визначено, що головними заходами захисту є евакуація людей на безпечну відстань, обмеження доступу до пошкодженого транспортного засобу, заборона контакту з високовольтними елементами та залучення спеціалізованих служб.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. International Energy Agency. (2026). Global EV Outlook 2026. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026>
2. –Інститут досліджень авторинку. (2026, 9 січня). Ринок електромобілів в Україні: підсумки 2025 року. <https://eauto.org.ua/news/975-rinok-elektromobiliv-v-ukrajini-pidsumki-2025-roku>
3. Lyashuk, O., Mironov, D., Maruschak, P., Dzyura, V., & Shevchuk, V. (2026). Mathematical Modeling and Comparative Evaluation of PI and PID Speed Controllers for Electric Vehicle Traction Systems. *Modelling*, 7(3), 100. <https://doi.org/10.3390/modelling7030100>
4. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles* (3rd ed.). CRC Press.
5. Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. SAE International.
6. Wang, J., Besselink, I., & Nijmeijer, H. (2018). Battery electric vehicle energy consumption prediction for a trip based on route information. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 232(11), 1528-1542. <https://doi.org/10.1177/0954407017729938>
7. Castillo-Calderon, J., & Larrode-Pellicer, E. (2026). Energy consumption prediction in battery electric vehicles: A systematic literature review. *Energies*, 19(2), 371. <https://doi.org/10.3390/en19020371>
8. Szumska, E. M. (2025). Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Design, Control Strategies, and Efficiency Challenges. *Energies*, 18(10), 2422. <https://doi.org/10.3390/en18102422>
9. Al Amin, M. S., Amin, M. S., Park, H., & Lee, D. (2025). Electric vehicle range prediction models: A systematic review of machine learning, mathematical, and simulation approaches. *World Electric Vehicle Journal*, 16(11), 607. <https://doi.org/10.3390/wevj16110607>
10. Kim, D., Shim, H. G., & Eo, J. S. (2022). A machine learning method for EV range prediction with updates on route information and traffic conditions. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 36(11), 12545-12551. <https://doi.org/10.1609/aaai.v36i11.21525>
11. Zhao, L., Yao, W., Wang, Y., & Hu, J. (2020). Machine learning-based method for remaining range prediction of electric vehicles. *IEEE Access*, 8, 212423-212441. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039815>
12. De Cauwer, C., Verbeke, W., Van Mierlo, J., & Coosemans, T. (2020). A model for range estimation and energy-efficient routing of electric vehicles in real-world conditions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(7), 2787-2800. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2918019>

13. De Cauwer, C., Verbeke, W., Coosemans, T., Faid, S., & Van Mierlo, J. (2017). A data-driven method for energy consumption prediction and energy-efficient routing of electric vehicles in real-world conditions. *Energies*, 10(5), 608. <https://doi.org/10.3390/en10050608>
14. Plett, G. L. (2015). *Battery management systems, Volume I: Battery modeling*. Artech House.
15. Ahmed, M., Mao, Z., Zheng, Y., Chen, T., & Chen, Z. (2022). Electric vehicle range estimation using regression techniques. *World Electric Vehicle Journal*, 13(6), 105. <https://doi.org/10.3390/wevj13060105>
16. Shamma, Z. S., Jones, B., Clark, M., Bailey, C., & Harper, M. (2022). Electric vehicle range prediction estimator (EVPRE). *Software Impacts*, 13, 100369. <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2022.100369>
17. Vaz, W., Nandi, A. K. R., Landers, R. G., & Koylu, U. O. (2015). Electric vehicle range prediction for constant speed trip using multi-objective optimization. *Journal of Power Sources*, 275, 435-446. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.043>
18. Mao, L., Fotouhi, A., Shateri, N., & Ewin, N. (2022). A multi-mode electric vehicle range estimator based on driving pattern recognition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(5), 2677-2697. <https://doi.org/10.1177/09544062211032994>
19. U.S. Department of Energy, Vehicle Technologies Office. (2024). Impact of cold ambient temperature on BEV performance. https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-10/Impact_of_Cold_Ambient_Temperature_on_BEV_Performance_v15_TechEditFinal_12Sep2024__0.pdf
20. Armenta-Deu, C., & Boucheix, B. (2023). Evaluation of lithium-ion battery performance under variable climatic conditions: Influence on the driving range of electric vehicles. *Future Transportation*, 3(2), 535-551. <https://doi.org/10.3390/futuretransp3020031>
21. National Highway Traffic Safety Administration. (n.d.). Electric and hybrid vehicles: Batteries, charging & safety. Retrieved May 30, 2026, from <https://www.nhtsa.gov/vehicle-safety/electric-and-hybrid-vehicles>
22. National Highway Traffic Safety Administration. (2012). *Interim guidance for electric and hybrid-electric vehicles equipped with high-voltage batteries*. U.S. Department of Transportation. <https://www.nhtsa.gov/document/interim-guidance-electric-and-hybrid-electric-vehicles-equipped-high-voltage-batteries-law>
23. Охорона праці на автомобільному транспорті : навчальний посібник / Пістун І. П., Хом'як Й. В., Хом'як В. В. - 2-ге вид., стер. - Суми : Університетська книга, 2015. - 374 с.

24. Охорона праці в галузі та цивільний захист: навчальний посібник / Ю. А. Гасило, О. А. Крюковська, К. О. Левчук, Р. Я. Романюк. – Кам’янське : ДДТУ, 2017. – 369 с.

25. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»: навч. посібник / В.С. Стручок – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.

26. Безпека в надзвичайних ситуаціях : навч. посібник для студентів ЗВО України : у 2 ч. Ч. 1: Надзвичайні ситуації / М. Л. Лисиченко, В. В. Вамболь, С. О. Вамболь, М. М. Кірієнко, І. А. Черепньов, В. М. Власовець ; за ред. М. Л. Лисиченка ; ХНТУСГ. – Харків : ТОВ “ПромАрт”, 2021. – 202 с.