

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 підходу до оптимізації енергоменеджменту PHEV/HEV
на основі критеріїв мінімізації витрат палива й викидів

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи МАз-41
спеціальності 274

«Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

Олександр РУДКОВСЬКИЙ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Іван ГЕВКО
(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 Рудковському Олександру Романовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка підходу до оптимізації енергоменеджменту PHEV/HEV на основі критеріїв мінімізації витрат палива й викидів

Керівник роботи Гевко Іван Богданович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «21» січня 2026 року № 4/9-43

2. Термін подання студентом завершеної роботи 14 червня 2026

3. Вихідні дані до роботи Технічні параметри основних вузлів електромобілів та гібридів, параметри АКБ і системи енергоменеджменту.

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 електрифікованих транспортних засобів у світі – 1А1.

Класифікація електрифікованих транспортних засобів – 1А1.

Архітектури гібридних силових установок PHEV/HEV – 1А1.

Енергетичні потоки у гібридній силовій установці – 1А1.

Розрахункова схема руху та тягової потужності PHEV – 1А1.

Модель витрати палива, викидів і SOC батареї – 1А1.

Структурна схема й алгоритм енергоменеджменту PHEV/HEV – 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	10.05.2026	
2	Технологічний розділ	17.05.2026	
3	Конструкторський розділ	24.05.2026	
4	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	31.05.2026	
5	Оформлення графічної частини	05.06.2026	
6	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	08.06.2026	

Студент

_____ (підпис)

Олександр РУДКОВСЬКИЙ

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Іван ГЕВКО

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної роботи бакалавра на тему: «Розробка підходу до оптимізації енергоменеджменту PHEV/HEV на основі критеріїв мінімізації витрат палива й викидів».

Метою роботи є розробка підходу до оптимізації енергоменеджменту гібридних і плагін-гібридних транспортних засобів, який забезпечує раціональний розподіл енергетичних потоків між двигуном внутрішнього згорання, електричною машиною та тяговою акумуляторною батареєю з урахуванням критеріїв мінімізації витрати палива та шкідливих викидів.

Об'єктом дослідження є процес керування енергетичними потоками у силовій установці гібридного та плагін-гібридного транспортного засобу під час руху в різних експлуатаційних режимах.

Предметом дослідження є математичні моделі, критерії та алгоритмічні принципи оптимізації енергоменеджменту PHEV/HEV, що дозволяють зменшити витрати палива, обмежити рівень викидів шкідливих речовин і забезпечити допустимий режим роботи тягової акумуляторної батареї.

У роботі розглянуто основні архітектури гібридних силових установок, зокрема послідовну, паралельну, послідовно-паралельну та схему з розподілом потужності. Проаналізовано характер енергетичних потоків між двигуном внутрішнього згорання, електродвигуном, генератором, трансмісією та тяговою батареєю. Досліджено сучасні стратегії енергоменеджменту PHEV/HEV, серед яких правило-орієнтовані алгоритми, нечітка логіка, еквівалентна мінімізація витрати палива, динамічне програмування, прогнозне керування та інтелектуальні методи оптимізації. Сформовано розрахункову схему гібридного транспортного засобу, визначено вихідні параметри для математичного моделювання та розглянуто основні сили опору руху автомобіля. Побудовано математичну модель визначення тягової сили та потужності на колесах, описано підхід до розрахунку витрати палива двигуном внутрішнього згорання та оцінювання викидів CO₂ і шкідливих компонентів відпрацьованих газів. Розроблено структурну схему системи оптимізованого енергоменеджменту PHEV/HEV, яка передбачає отримання вхідних даних про режим руху, запит потужності, стан тягової батареї та параметри роботи двигуна внутрішнього згорання.

Пояснювальна записка складається з чотирьох розділів і 68 сторінок формату А4 та 7 аркушів формату А1 графічної частини і 7 сторінок додатків.

Ключові слова: гібридний автомобіль, плагін-гібридний автомобіль, PHEV, HEV, енергоменеджмент, силова установка, двигун внутрішнього згорання, електродвигун, тягова акумуляторна батарея, SOC, витрата палива, викиди, CO₂, оптимізація.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	6
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Сучасний стан розвитку HEV/PHEV та їх роль у декарбонізації автомобільного транспорту	8
1.2 Архітектури гібридних силових установок та особливості потоків енергії	13
1.3 Аналіз сучасних стратегій енергоменеджменту HEV/PHEV	18
1.4 Постановка задач дослідження	23
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	25
2.1 Вибір розрахункової схеми та вихідних параметрів PHEV/HEV	25
2.2 Математична модель руху автомобіля та визначення тягової потужності	29
2.3 Модель витрати палива та викидів ДВЗ у складі гібридної силової установки	36
2.4 Модель тягової батареї та обмеження за SOC	42
2.5 Формування багатокритеріальної цільової функції оптимізації	45
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	49
3.1 Розробка структурної схеми системи оптимізованого енергоменеджменту PHEV/HEV	49
3.2 Розробка алгоритму вибору режимів роботи силової установки	52
3.3 Реалізація критеріального блоку мінімізації витрати палива та викидів	56
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	60
4.1 Основні принципи та функції управління охороною праці під час досліджень електромобіля	60
4.2 Концепція захисту населення і території у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій	62
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	65
БІБЛІОГРАФІЯ	67
ДОДАТКИ	69

ВСТУП

Сучасний етап розвитку автомобільного транспорту характеризується активним упровадженням електрифікованих силових установок, серед яких важливе місце займають гібридні та плагін-гібридні транспортні засоби. Перехід до таких технічних рішень зумовлений необхідністю зменшення споживання нафтового палива, скорочення шкідливих викидів, підвищення енергоефективності автомобілів та зниження негативного впливу транспортної галузі на довкілля. На відміну від традиційних автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння, HEV і PHEV поєднують у собі тепловий та електричний приводи, що створює передумови для більш гнучкого й ефективного використання енергії під час руху.

Актуальність теми полягає у необхідності підвищення ефективності роботи гібридних силових установок шляхом оптимального керування енергетичними потоками між двигуном внутрішнього згоряння, електродвигуном і тяговою акумуляторною батареєю. Гібридний автомобіль має декілька можливих режимів роботи: рух за рахунок ДВЗ, рух на електротязі, комбінований режим, заряджання батареї від двигуна або генератора, а також рекуперативне гальмування. Вибір конкретного режиму безпосередньо впливає на витрату палива, рівень викидів, стан заряду батареї та загальну ефективність транспортного засобу. Тому розробка підходу до оптимізації енергоменеджменту PHEV/HEV є важливим науково-прикладним завданням, що відповідає сучасним вимогам до паливної економічності й екологічної безпеки автомобільного транспорту.

Метою роботи є розробка підходу до оптимізації енергоменеджменту гібридних і плагін-гібридних транспортних засобів, який забезпечує раціональний розподіл енергетичних потоків між двигуном внутрішнього згоряння, електричною машиною та тяговою акумуляторною батареєю з урахуванням критеріїв мінімізації витрати палива та шкідливих викидів.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану розвитку гібридних і плагін-гібридних транспортних засобів.
2. Розглянути основні архітектури гібридних силових установок та особливості формування енергетичних потоків у них.
3. Дослідити сучасні стратегії енергоменеджменту HEV/PHEV та визначити їх переваги й обмеження.
4. Обрати розрахункову схему гібридного транспортного засобу та визначити вихідні параметри для математичного моделювання.
5. Розробити математичну модель руху автомобіля, визначення тягової сили та потужності, необхідної для забезпечення заданого режиму руху.
6. Сформувати модель витрати палива двигуном внутрішнього згоряння та оцінювання викидів шкідливих речовин.

7. Сформувати багатокритеріальну цільову функцію оптимізації енергоменеджменту PHEV/HEV.
8. Розробити структурну схему та алгоритм роботи системи оптимізованого енергоменеджменту.
9. Виконати порівняння запропонованого підходу з базовою стратегією керування та сформувати практичні рекомендації щодо його застосування.

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Сучасний стан розвитку HEV/PHEV та їх роль у декарбонізації автомобільного транспорту

Сучасний розвиток автомобільного транспорту відбувається під впливом двох взаємопов'язаних тенденцій: підвищення вимог до енергетичної ефективності транспортних засобів і посилення екологічних обмежень щодо викидів шкідливих речовин та парникових газів. Транспортний сектор традиційно є одним із значних споживачів нафтового палива, тому скорочення витрати бензину й дизельного палива безпосередньо пов'язане зі зменшенням викидів CO₂, NO_x, CO, HC та твердих частинок. У цьому контексті електрифікація автомобільного транспорту стала одним із головних напрямів технічного розвитку галузі, а гібридні та плагін-гібридні транспортні засоби займають важливе місце між класичними автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння та повністю електричними автомобілями.

Гібридний автомобіль є транспортним засобом, у якому для створення тягового зусилля використовуються два джерела енергії: паливо, що перетворюється в механічну енергію двигуном внутрішнього згоряння, та електрична енергія, яка зберігається в тяговій акумуляторній батареї. Таке поєднання дозволяє зменшити кількість неефективних режимів роботи ДВЗ, використовувати електродвигун під час розгону або руху на низьких швидкостях, а також повертати частину кінетичної енергії автомобіля до батареї під час гальмування. Завдяки цьому HEV забезпечують нижчу витрату палива порівняно з аналогічними автомобілями, оснащеними лише двигуном внутрішнього згоряння, особливо в міських умовах, де часто відбуваються зупинки, прискорення і гальмування.

Плагін-гібридні транспортні засоби є подальшим розвитком гібридної концепції. На відміну від HEV, вони мають акумуляторну батарею більшої ємності та можливість заряджання від зовнішнього джерела електроенергії. Це дозволяє PHEV певну частину маршруту долати у повністю електричному режимі без локальних викидів відпрацьованих газів. У повсякденній експлуатації така особливість є особливо важливою для міських поїздок, коли добовий пробіг часто не перевищує електричний запас ходу автомобіля. За умови регулярного заряджання батареї PHEV може значно скоротити використання двигуна внутрішнього згоряння, зменшити витрату палива та знизити рівень локального забруднення повітря в містах.

Світовий ринок електрифікованих транспортних засобів демонструє стійку тенденцію до зростання, хоча темпи розвитку окремих сегментів відрізняються залежно від регіону, державної політики, вартості енергоносіїв і рівня розвитку зарядної інфраструктури. За даними Міжнародного енергетичного агентства, у 2024 році глобальні продажі електричних автомобілів

перевищили 17 млн одиниць, а Китай залишився найбільшим ринком електрифікованого транспорту. Водночас саме в Китаї прискорення продажів PHEV істотно змінило структуру ринку: частка BEV серед електричних автомобілів зменшилася з приблизно 80% у 2020 році до менш ніж 60% у 2024 році, що свідчить про швидке зростання популярності плагін-гібридних рішень [1].

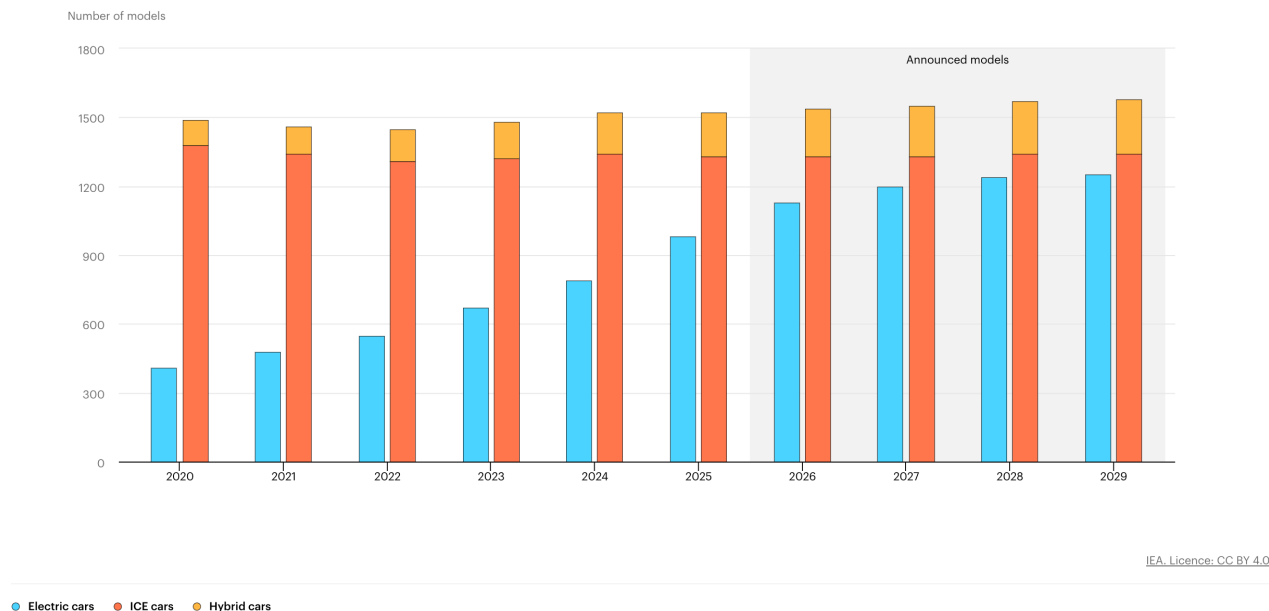


Рисунок 1.1. Динаміка продажів електричних і гібридних рішень у світі

У країнах Європейського Союзу гібридні та плагін-гібридні автомобілі також залишаються важливою частиною ринку нових легкових автомобілів. У 2025 році гібридні автомобілі без зовнішнього заряджання стали одним із найбільших сегментів за часткою реєстрацій, а частка PHEV також зросла порівняно з попереднім роком. За даними АСЕА, плагін-гібридні автомобілі у 2025 році становили 9,4% нових реєстрацій у ЄС, тоді як роком раніше їх частка була 7,2%.

Таблиця 1.1. Порівняльна характеристика основних типів електрифікованих транспортних засобів

Тип ТЗ	Основне джерело енергії	Можливість зовнішнього заряджання	Рух на електротязі	Основна перевага	Основне обмеження
ICEV	Паливо	Ні	Ні	Простота конструкції та розвинена паливна інфраструктура	Висока витрата палива та постійні викиди під час руху
HEV	Паливо та рекуперована	Ні	Обмеженій	Зменшення витрати	Неможливість

	електроенергія			палива міському циклі	у тривалого руху без ДВЗ
PHEV	Паливо та електроенергія з мережі	Так	Значний	Можливість щоденної експлуатації в електричному режимі	Ефективність сильно залежить від регулярності заряджання
EREV	Електроенергія, ДВЗ як генератор	Так	Основний режим	Рух переважно на електротязі зі збільшеним запасом ходу	Складність конструкції та додаткова маса
BEV	Електроенергія з мережі	Так	Основний і єдиний режим	Відсутність локальних викидів під час руху	Залежність від зарядної інфраструктури та запасу ходу

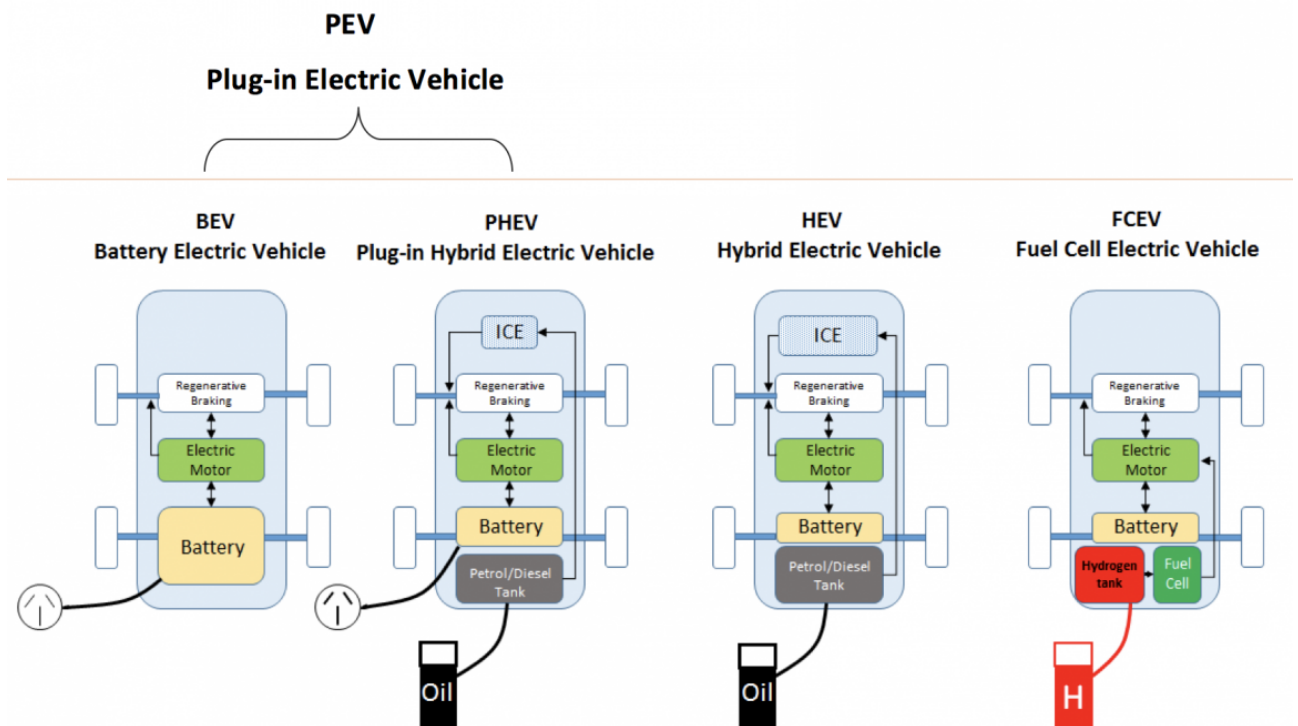


Рисунок 1.2. Класифікація електрифікованих транспортних засобів за типом силової установки

Популярність HEV і PHEV пояснюється тим, що вони дозволяють поступово зменшувати залежність транспорту від викопного палива без повного переходу до акумуляторного електромобіля. Для багатьох країн це має

практичне значення, оскільки зарядна інфраструктура розвивається нерівномірно, а повністю електричні автомобілі залишаються дорожчими для частини споживачів. Гібридні автомобілі не потребують зарядної інфраструктури, тому можуть використовуватися в тих самих умовах, що й традиційні автомобілі, але з нижчими витратами палива. Плагін-гібриди, своєю чергою, дозволяють частково перейти на електричну енергію без ризику обмеження запасу ходу, оскільки за потреби автомобіль може продовжувати рух із використанням двигуна внутрішнього згорання.

З технічної точки зору головна перевага HEV/PHEV полягає не лише в наявності електродвигуна або тягової батареї, а в можливості керувати потоками енергії залежно від режиму руху [2]. У міському циклі електродвигун може забезпечувати рух на малих швидкостях, коли ДВЗ працює з низькою ефективністю. Під час інтенсивного розгону електрична машина може допомагати тепловому двигуну, зменшуючи його навантаження та покращуючи динамічні характеристики автомобіля. Під час гальмування електродвигун переходить у генераторний режим і перетворює частину кінетичної енергії на електричну, яка накопичується в батареї. Завдяки цьому гібридна силова установка здатна використовувати енергію більш раціонально, ніж традиційна силова установка з одним джерелом енергії. Водночас практична ефективність HEV/PHEV не є автоматично гарантованою. Вона залежить від алгоритму енергоменеджменту, який визначає, коли саме необхідно використовувати електродвигун, коли доцільно вмикати ДВЗ, коли варто заряджати батарею, а коли необхідно зберігати її заряд для наступних ділянок маршруту. Якщо система керування побудована за простими правилами, вона може не враховувати майбутню зміну швидкості, дорожній профіль, температуру, завантаження автомобіля або екологічні обмеження. У такому випадку автомобіль може витратити електричну енергію не в тих режимах, де її використання дає найбільший ефект, або надмірно часто запускати двигун внутрішнього згорання, що збільшує витрату палива та викиди.

Особливо гостро ця проблема проявляється у PHEV, оскільки їх екологічна ефективність значною мірою залежить від фактичної частки руху на електротязі. У лабораторних умовах плагін-гібриди часто демонструють низькі значення витрати палива та CO₂, оскільки частина тестового циклу виконується з використанням електричної енергії. Проте в реальних умовах результат може бути суттєво гіршим, якщо автомобіль рідко заряджається від мережі, експлуатується на далеких маршрутах або використовує ДВЗ навіть у тих ситуаціях, де електричний режим є технічно можливим. За оцінками Transport & Environment, реальні викиди CO₂ плагін-гібридів у Європі можуть бути значно вищими за офіційні тестові значення, що вказує на розрив між потенційною та фактичною екологічною ефективністю цього класу автомобілів.

Цей розрив не означає, що PHEV як технічна концепція є неефективною. Навпаки, він свідчить про те, що плагін-гібридний автомобіль потребує більш досконалої логіки керування енергетичними потоками. Якщо алгоритм енергоменеджменту враховує поточний рівень SOC, прогнозований запит потужності, дорожні умови, режим руху та екологічні критерії, PHEV може ефективно використовувати електричну енергію саме на тих ділянках, де вона забезпечує найбільше зменшення витрати палива й викидів. У міських умовах це дає змогу зменшити локальне забруднення повітря, а на заміських або магістральних ділянках – використовувати ДВЗ у більш стабільних та економічних режимах.

HEV також відіграють важливу роль у декарбонізації, хоча їх потенціал зменшення викидів є нижчим порівняно з PHEV і BEV. Їх перевагою є відсутність залежності від зарядної інфраструктури, що робить такі автомобілі доступним рішенням для широкого кола користувачів. У міських умовах HEV дозволяють зменшити витрату палива завдяки частому використанню рекуперації та електричної підтримки під час розгону. Крім того, система автоматичного вимкнення ДВЗ під час зупинок зменшує втрати на холостому ході, що є важливим фактором у щільному міському трафіку. Таким чином, навіть без зовнішнього заряджання HEV можуть забезпечувати помітне скорочення споживання палива порівняно з традиційними автомобілями.

Таблиця 1.2. Роль HEV/PHEV у зменшенні паливної залежності та екологічного навантаження

Напрямок впливу	HEV	PHEV
Зменшення витрати палива	Досягається за рахунок рекуперації, електричної підтримки та роботи ДВЗ у більш ефективних режимах	Досягається за рахунок поєднання електричного пробігу та оптимізованої роботи ДВЗ
Зниження локальних викидів	Обмежене, оскільки ДВЗ залишається основним джерелом енергії	Значне у разі регулярного заряджання та руху в електричному режимі
Залежність від зарядної інфраструктури	Відсутня	Наявна, але не критична завдяки ДВЗ
Придатність для міської експлуатації	Висока завдяки рекуперації та зменшенню роботи ДВЗ на малих швидкостях	Дуже висока за умови використання електричного режиму
Придатність для далеких поїздок	Висока	Висока завдяки поєднанню електричного приводу та ДВЗ
Потенціал декарбонізації	Середній	Високий за умови ефективного енергоменеджменту та регулярного заряджання

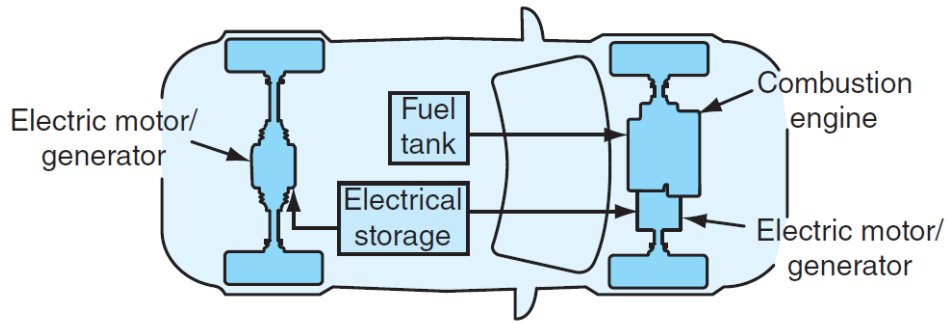


Рисунок 1.3. Загальна схема енергетичних потоків у HEV/PHEV під час руху, рекуперації та заряджання батареї

З позиції технічної експлуатації PHEV/HEV мають ще одну важливу особливість: їх ефективність визначається не лише конструкцією силової установки, а й програмною логікою її роботи. Два автомобілі з подібними технічними параметрами можуть демонструвати різні показники витрати палива та викидів залежно від того, як система керування розподіляє потужність між ДВЗ та електродвигуном. Це робить задачу енергоменеджменту центральною для всієї концепції гібридного транспортного засобу. Саме система керування визначає, чи буде електрична частина використовуватися як допоміжний елемент, чи як повноцінний інструмент зменшення паливної залежності та викидів.

1.2 Архітектури гібридних силових установок та особливості потоків енергії

Класифікація електрифікованих транспортних засобів базується на джерелі енергії, способі її поповнення, наявності та ролі двигуна внутрішнього згорання, а також на характері взаємодії між механічною і електричною гілками силової установки. Практична цінність такої класифікації полягає в тому, що вона дозволяє пов'язати конструктивні відмінності з експлуатаційними характеристиками: дальністю ходу, споживанням енергії, залежністю від інфраструктури, складністю систем керування і вимогами до обслуговування. Для задачі вдосконалення стратегій розподілу енергії в гібридних автомобілях класифікація є критичною, оскільки визначає, які саме режими роботи має забезпечувати алгоритм керування, які обмеження накладають батарея та силова електроніка і які цільові критерії є найбільш доцільними для оптимізації [3].

Серійна гібридна схема характеризується тим, що двигун внутрішнього згорання не має прямого механічного зв'язку з колесами, а працює лише на генератор, виробляючи електроенергію для живлення електроприводу або зарядки батареї. Колеса приводяться виключно електромашиною, тому з точки зору тягових властивостей серійний гібрид подібний до електромобіля, але з додатковим бортовим джерелом електроенергії у вигляді ДВЗ-генератора.

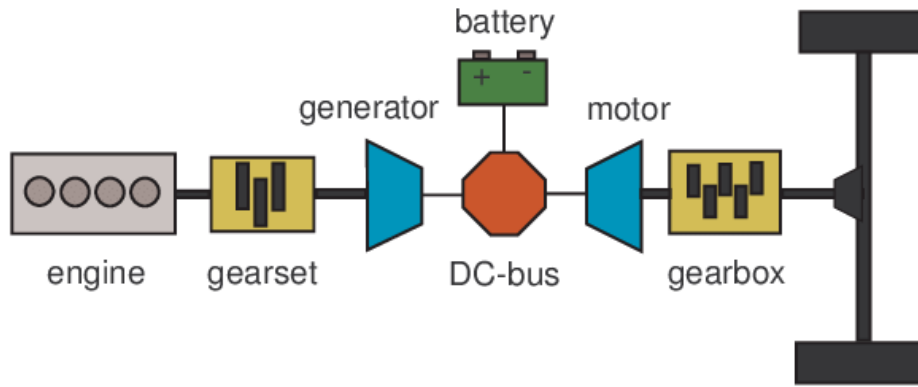


Рисунок 1.4. Структурна схема послідовної гібридної силової установки

Паралельна гібридна схема передбачає механічне сумування моментів ДВЗ і електромашини на одному валу або через трансмісію, що дозволяє обом агрегатам безпосередньо брати участь у формуванні тяги. Конструктивно електромашини може бути розташована між ДВЗ і коробкою передач, інтегрована в трансмісію або виконана як окремий модуль на ведучій осі. Головна перевага паралельної схеми полягає в тому, що за умов сталого руху ДВЗ може передавати енергію до коліс без зайвих перетворень, а електромашини виконує роль підсилювача моменту, рекуператора та, за потреби, тягового двигуна на коротких ділянках. Паралельна архітектура є поширеною завдяки відносній конструктивній простоті та добрій ефективності на середніх і високих швидкостях. Оскільки ДВЗ має механічний зв'язок із колесами, енергія палива може передаватися до трансмісії з меншими втратами, ніж у послідовній схемі. Електродвигун у такому випадку виконує функцію допоміжного джерела тяги, генератора під час рекуперації та елемента, який дозволяє зменшити навантаження на ДВЗ у перехідних режимах. Це дає змогу зменшити витрату палива під час розгону, руху в міському циклі та короткочасних пікових навантажень.

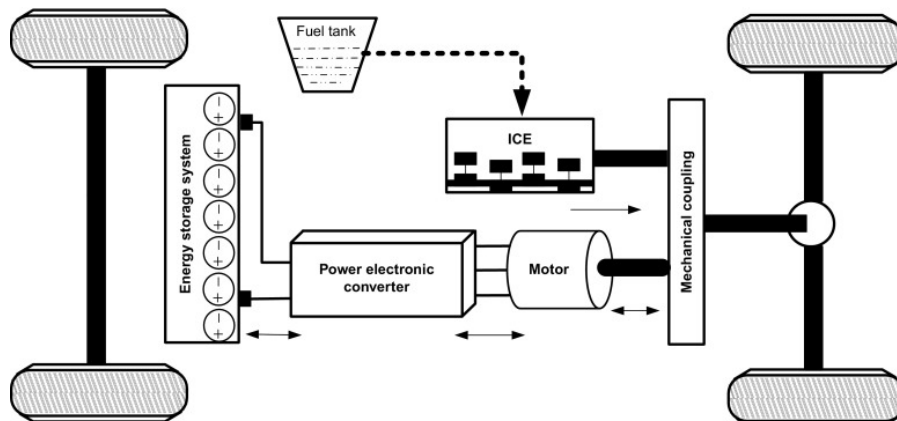


Рисунок 1.5. Структурна схема паралельної гібридної силової установки

Послідовно-паралельна схема, яку часто називають power-split, є конструктивним компромісом між серійною і паралельною архітектурами. Її сутність полягає у тому, що частина потужності ДВЗ може передаватися до коліс

механічним шляхом, а частина – електричним шляхом через генератор, інвертор і електромашину. Реалізація power-split зазвичай базується на планетарному механізмі, який виконує функцію розподілу потужності, дозволяючи гнучко змінювати співвідношення між механічною та електричною гілками без класичного перемикання передач. Така схема забезпечує високу керованість режимами ДВЗ, оскільки електрична гілка може регулювати його оберти і навантаження, а також дає можливість реалізувати широкий спектр режимів, включно з електрорухом, рекуперацією, підзарядкою від ДВЗ і комбінованою тягою. Водночас power-split є конструктивно складнішою, потребує двох електричних машин або електромашини з функцією генератора і окремої тягової машини, а також висуває підвищені вимоги до алгоритмів керування, оскільки енергетичні потоки можуть розгалужуватися і замикатися різними шляхами залежно від режиму.

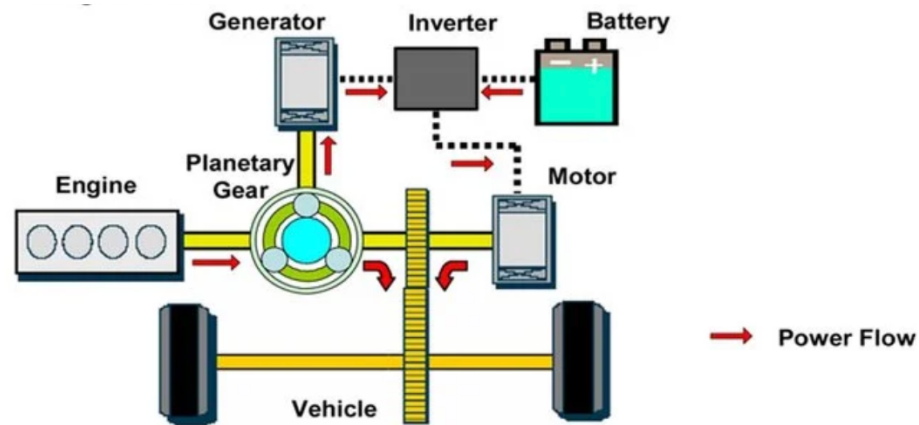


Рисунок 1.6. Структурна схема послідовно-паралельної гібридної силової установки

Порівняння основних архітектур гібридних силових установок наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3. Порівняльна характеристика архітектур гібридних силових установок

Архітектура	Особливість передавання енергії	Основні переваги	Основні недоліки
Послідовна	ДВЗ приводить генератор, а колеса приводяться електродвигуном	Просте механічне компонування, можливість роботи ДВЗ у стабільному режимі, добра ефективність у місті	Втрати через багаторазове перетворення енергії, нижча ефективність на високих швидкостях
Паралельна	ДВЗ і електродвигун передають момент до коліс через спільну трансмісію	Висока ефективність на середніх і високих швидкостях, відносна конструктивна простота	Складність оптимального розподілу моменту,

			обмежена гнучкість режимів
Послідовно-паралельна	Можлива як електрична, так і механічна передача енергії	Висока адаптивність до різних режимів руху, широкий потенціал оптимізації	Складніша конструкція, більша кількість компонентів

Незалежно від архітектури, гібридна силова установка реалізує набір типових режимів роботи, які визначаються напрямком потоків енергії. Електричний рух передбачає, що тяга забезпечується електромашиною за рахунок енергії батареї, і такий режим найбільш ефективний у низькошвидкісних міських умовах. Гібридний рух означає одночасну роботу ДВЗ і електроприводу з сумуванням моментів або потужностей, що використовується для покриття піків навантаження або для утримання ДВЗ у більш ефективній зоні. Режим підзарядки від ДВЗ полягає в тому, що частина потужності двигуна спрямовується на генерацію електроенергії для підвищення SOC, якщо це необхідно для майбутніх ділянок маршруту або для підтримання заряду в HEV. Режим рекуперації дозволяє повернути частину кінетичної енергії в батарею, але він обмежений допустимими струмами, температурою, рівнем SOC і можливостями зчеплення шин з дорогою, тому в реальних умовах потребує координації з фрикційною гальмівною системою. Для PHEV додається специфіка режиму використання зовнішньо зарядженого ресурсу, коли енергоменеджмент має раціонально розподілити електричний запас по маршруту, поєднуючи електрорух і гібридні режими так, щоб знизити сумарну витрату палива та не створювати надмірних навантажень на батарею.

Потік енергії в гібридному режимі може мати різну структуру залежно від архітектури. У паралельній схемі ДВЗ і електродвигун одночасно передають механічну потужність до трансмісії. У послідовно-паралельній схемі частина енергії може передаватися механічно, а частина – через електричний контур. З погляду оптимізації, гібридний режим є одним із найважливіших, оскільки саме в ньому потрібно визначити оптимальний баланс між витратою палива, розрядженням батареї та рівнем викидів.

У режимі роботи від двигуна внутрішнього згоряння основна або вся потужність для руху автомобіля надходить від ДВЗ. Такий режим зазвичай доцільний під час руху з відносно сталою швидкістю, особливо на замських дорогах або автомагістралях, де ДВЗ може працювати у стабільній зоні навантаження. Якщо двигун працює близько до оптимальної області ефективності, використання електричної енергії може бути менш доцільним, оскільки її варто зберегти для майбутніх режимів із нижчою ефективністю ДВЗ. Водночас у випадку низького навантаження, частих змін швидкості або роботи на холостому ході використання лише ДВЗ може призводити до підвищеної витрати палива.

Режим заряджання батареї від двигуна внутрішнього згорання або генератора застосовується тоді, коли рівень SOC наближається до нижньої межі або коли ДВЗ працює в режимі, де частину його потужності доцільно використати для накопичення енергії. У такому випадку частина енергії палива витрачається не лише на рух автомобіля, але й на заряджання батареї. Цей режим може бути корисним, якщо в подальшому очікується ділянка маршруту, де електричний рух буде більш ефективним або необхідним з екологічних міркувань. Проте примусове заряджання батареї від ДВЗ завжди пов'язане з додатковими втратами перетворення енергії, тому його застосування повинно бути обґрунтованим.

Принципи гібридизації тісно пов'язані з поняттям енергетичних потоків у силовій установці [4]. Енергія палива в ДВЗ перетворюється на механічну роботу, яка через трансмісію подається на колеса або через генератор може бути перетворена в електроенергію для зарядки батареї. Електрична енергія з батареї через інвертор подається на електромашину і перетворюється на механічний момент. Під час гальмування електромашини переходить у генераторний режим, а енергія руху повертається в батарею з урахуванням обмежень за потужністю та струмами. Фактично керування енергією в гібриді є керуванням цими потоками, де в кожен момент часу потрібно прийняти рішення про частку потужності, яку забезпечує ДВЗ, і частку, яку забезпечує електропривод, а також про доцільність зарядки батареї від ДВЗ або використання батареї для тяги. Такий розподіл повинен враховувати не лише миттєву ефективність, а й майбутні потреби, оскільки стан заряду накопичувача є ресурсом, який може бути витрачений зараз або збережений для ситуацій, де він дасть більший ефект.

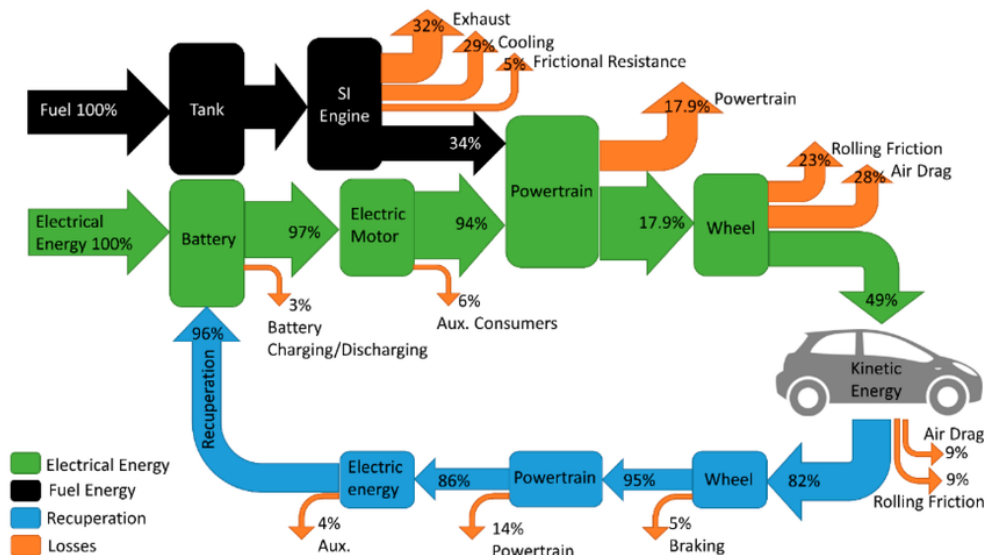


Рисунок 1.7. Напрями енергетичних потоків у HEV/PHEV для основних режимів роботи

Однією з центральних змінних, яка визначає логіку енергоменеджменту, є рівень заряду тягової акумуляторної батареї. SOC характеризує відносну

кількість енергії, доступної для електричного руху або підтримки ДВЗ. Для HEV система зазвичай підтримує SOC у відносно вузькому діапазоні, оскільки батарея має невелику ємність і використовується для короткочасного накопичення та віддачі енергії. Такий режим називають режимом підтримання заряду. Його мета полягає в тому, щоб батарея завжди мала достатній запас для електричної підтримки та достатній резерв для приймання рекуперованої енергії. Для PHEV характерними є два основні режими використання батареї. У режимі розрядження заряду автомобіль активно використовує енергію, накопичену під час зовнішнього заряджання. У цьому режимі частка електричного руху є максимальною, а ДВЗ вмикається лише за потреби. Після досягнення нижньої межі SOC автомобіль переходить у режим підтримання заряду, подібний до звичайного HEV.

Енергетичні потоки в HEV/PHEV тісно пов'язані з утворенням викидів. Двигун внутрішнього згоряння має різний рівень паливної ефективності та різний склад відпрацьованих газів залежно від частоти обертання, навантаження, температурного режиму та перехідних процесів. Часті запуски, робота в неефективних зонах, різкі зміни навантаження та холодний пуск можуть збільшувати викиди навіть тоді, коли середня витрата палива залишається помірною. Тому оптимізація енергоменеджменту не повинна обмежуватися лише мінімізацією миттєвої витрати палива. Вона має враховувати також екологічні наслідки вибору режиму, особливо для міського руху. З технічного погляду кожна архітектура створює різні можливості для зменшення викидів. Послідовна схема дозволяє вмикати ДВЗ у відносно стабільних режимах, що може зменшувати частку неефективної роботи двигуна. Паралельна схема дає можливість електричної підтримки під час пікових навантажень, коли ДВЗ міг би працювати з підвищеною витратою палива. Послідовно-паралельна схема забезпечує найбільшу гнучкість, оскільки дозволяють системі керування обирати найбільш раціональний шлях передавання енергії для конкретних умов руху.

1.3 Аналіз сучасних стратегій енергоменеджменту HEV/PHEV

Загальна задача енергоменеджменту HEV/PHEV полягає в оптимальному керуванні потоками енергії між джерелами, накопичувачами та споживачами потужності. Для традиційного автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння керування силовою установкою переважно зводиться до забезпечення потрібного крутного моменту та роботи двигуна в допустимих режимах. У гібридному автомобілі ця задача є складнішою, оскільки система керування повинна одночасно враховувати паливну економічність, рівень викидів, стан заряду батареї, можливість рекуперації, комфорт руху, ресурс компонентів і технічні обмеження електричної частини приводу. Тому енергоменеджмент є

центральним елементом, який перетворює гібридну силову установку з набору технічних компонентів у єдину ефективну систему.

У сучасних HEV/PHEV застосовуються різні стратегії енергоменеджменту, які можна умовно поділити на декілька груп [5]. Найпростішими є правило-орієнтовані стратегії, у яких перемикання режимів відбувається за наперед заданими умовами. Більш гнучкими є стратегії на основі нечіткої логіки, які дозволяють враховувати проміжні стани системи та формувати керуючі дії на основі експертних правил. Окрему групу становлять оптимізаційні методи, серед яких важливе місце займають еквівалентна мінімізація витрати палива, динамічне програмування та прогнозне керування. Останніми роками активно розвиваються також інтелектуальні методи, зокрема алгоритми машинного навчання та навчання з підкріпленням, які можуть адаптувати стратегію керування до складних і змінних умов експлуатації.

Правило-орієнтовані стратегії енергоменеджменту є найбільш поширеними завдяки простоті реалізації, надійності та зрозумілій логіці роботи. У таких системах рішення про вибір режиму приймається на основі набору умов, пов'язаних із рівнем SOC, швидкістю автомобіля, запитом потужності, положенням педалі акселератора, температурою батареї або режимом руху. Наприклад, якщо швидкість автомобіля невелика, рівень заряду батареї достатній, а запит потужності не перевищує певного порогового значення, система може обрати електричний режим. Якщо ж запит потужності зростає або SOC знижується до мінімально допустимого рівня, вмикається двигун внутрішнього згорання.

Різновидом більш гнучкого правило-орієнтованого керування є стратегії на основі нечіткої логіки. Нечітка логіка дозволяє описувати стан системи не лише через жорсткі порогові значення, а й через лінгвістичні змінні, такі як низький SOC, середній SOC, високий запит потужності, помірне прискорення або сприятливі умови для рекуперації. На основі таких змінних формується набір правил, які визначають доцільний режим роботи силової установки. Наприклад, якщо SOC є середнім, запит потужності високим, а швидкість автомобіля невеликою, система може рекомендувати комбіновану роботу ДВЗ та електродвигуна.

Одним із найбільш поширених оптимізаційних підходів до енергоменеджменту HEV/PHEV є метод еквівалентної мінімізації витрати палива. Його основна ідея полягає в тому, що електрична енергія батареї розглядається як еквівалентна певній кількості палива. Завдяки цьому задача розподілу потужності між ДВЗ і електродвигуном зводиться до мінімізації сумарної еквівалентної витрати палива в кожний момент часу. Якщо використання електродвигуна дозволяє зменшити витрату палива ДВЗ, але при цьому швидко розряджає батарею, система оцінює не лише миттєву економію, а й умовну вартість витраченої електричної енергії. Метод еквівалентної

мінімізації витрати палива є важливим тому, що він забезпечує компроміс між використанням електричної енергії та збереженням заряду батареї. Для HEV це дозволяє підтримувати SOC у заданих межах і не допускати надмірного розрядження накопичувача. Для PHEV метод може бути адаптований до роботи в режимі розрядження заряду або підтримання заряду. У першому випадку система допускає поступове використання енергії, накопиченої від зовнішнього заряджання, у другому – прагне стабілізувати SOC поблизу певного рівня. Головним параметром такого підходу є коефіцієнт еквівалентності, який визначає, наскільки дорогою для системи вважається електрична енергія батареї порівняно з паливом.

Динамічне програмування є методом, який дозволяє отримати оптимальне рішення для заданого їздового циклу. У задачі енергоменеджменту HEV/PHEV воно використовується для визначення такого розподілу потужності між ДВЗ та електродвигуном, який мінімізує цільову функцію на всьому маршруті або тестовому циклі. Ця функція може включати витрату палива, викиди, зміну SOC, кількість запусків ДВЗ та інші показники. На кожному кроці розрахунку система оцінює можливі керуючі дії та вибирає таку послідовність рішень, яка забезпечує найкращий результат у кінці циклу.

Прогнозне керування, або Model Predictive Control, є одним із найбільш перспективних підходів до енергоменеджменту HEV/PHEV. Його сутність полягає в тому, що система керування не обмежується лише поточним станом автомобіля, а використовує прогноз на певний часовий або просторовий горизонт. На основі прогнозу швидкості, навантаження, дорожнього профілю, обмежень швидкості або навігаційної інформації система розраховує оптимальну послідовність керуючих дій, але реалізує лише першу з них. Після цього прогноз оновлюється, і задача оптимізації повторюється на наступному кроці.

Окрему групу становлять стратегії енергоменеджменту на основі машинного навчання та навчання з підкріпленням. У таких підходах система керування формує рішення на основі попереднього досвіду, даних про режими руху або результатів навчання у симуляційному середовищі. Навчання з підкріпленням передбачає, що агент керування взаємодіє з моделлю транспортного засобу або середовищем руху, обирає керуючі дії та отримує винагороду або штраф залежно від витрати палива, викидів, зміни SOC та виконання обмежень. З часом агент навчається вибирати такі дії, які забезпечують найкращий результат за заданим критерієм.

Порівняльна характеристика основних стратегій енергоменеджменту HEV/PHEV наведена в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4. Порівняльна характеристика стратегій енергоменеджменту HEV/PHEV

Стратегія енергоменеджменту	Основний принцип роботи	Переваги	Обмеження
Правило-орієнтована стратегія	Вибір режиму за наперед заданими умовами та порогами	Простота, надійність, легкість реалізації	Обмежена оптимальність, залежність від калібрування
Нечітка логіка	Формування керуючих дій на основі експертних правил і нечітких змінних	Гнучкість, плавність перемикання режимів, робота з невизначеністю	Залежність від якості правил і функцій належності
Еквівалентна мінімізація витрати палива	Перетворення електричної енергії в еквівалентну витрату палива	Добрий компроміс між паливом і SOC, придатність до real-time	Висока чутливість до коефіцієнта еквівалентності
Динамічне програмування	Пошук глобально оптимальної послідовності керуючих дій для заданого циклу	Еталонна оптимальність, придатність для аналізу та калібрування	Потреба у відомому циклі, висока обчислювальна складність
Прогнозне керування	Оптимізація на короткому прогностному горизонті з періодичним оновленням рішення	Урахування майбутніх умов руху, висока ефективність для PHEV	Потреба у прогнозі та моделі, вища обчислювальна складність
Машинне навчання та навчання з підкріпленням	Формування стратегії на основі даних, досвіду або винагороди	Адаптивність, здатність враховувати складні нелінійні залежності	Потреба у навчанні, складність валідації та гарантування безпеки

З позиції мінімізації витрати палива найбільш важливим завданням енергоменеджменту є уникнення неефективних режимів роботи ДВЗ. Двигун внутрішнього згоряння має обмежену область, у якій його питома ефективна витрата палива є мінімальною. Якщо автомобіль рухається на малих швидкостях, часто зупиняється або потребує невеликої потужності, ДВЗ може працювати з низьким ККД. У таких режимах доцільним є використання електродвигуна. Навпаки, під час стабільного руху з помірним навантаженням ДВЗ може бути більш ефективним, і тоді електричну енергію краще зберегти для майбутніх режимів. Саме цей баланс є основою більшості оптимізаційних стратегій.

З позиції мінімізації викидів задача стає ще складнішою. Викиди CO₂ безпосередньо пов'язані з кількістю спаленого палива, тому зменшення витрати палива зазвичай сприяє зменшенню CO₂. Однак викиди NO_x, CO та незгорілих вуглеводнів залежать не лише від кількості палива, а й від режиму згоряння, температури, навантаження, частоти запусків двигуна та роботи системи нейтралізації відпрацьованих газів. Наприклад, часті короткочасні запуски ДВЗ

можуть бути небажаними з погляду викидів, навіть якщо вони незначно впливають на середню витрату палива. Тому стратегія енергоменеджменту, орієнтована лише на паливну економічність, не завжди є оптимальною з екологічного погляду.

Для PHEV важливим додатковим фактором є режим використання батареї. У режимі розрядження заряду система може прагнути максимально використовувати електричну енергію, оскільки вона була отримана від зовнішнього джерела. Проте навіть у цьому випадку доцільно враховувати маршрут і характер руху. Якщо весь заряд витрачається на ділянці, де ДВЗ міг би працювати ефективно, загальний результат може бути гіршим, ніж у випадку раціонального розподілу електричного пробігу. У режимі підтримання заряду головним завданням стає стабілізація SOC у допустимому діапазоні, щоб батарея могла як віддавати енергію під час прискорень, так і приймати її під час рекуперації.

Для HEV, які не мають зовнішнього зарядження, ключовим є підтримання енергетичного балансу батареї. Стратегія керування повинна забезпечувати такий режим, за якого SOC не знижується до критичних значень і водночас не залишається постійно надто високим. Надмірно високий SOC обмежує можливість рекуперації, оскільки батарея не може прийняти достатню кількість енергії під час гальмування. Надмірно низький SOC зменшує можливість електричної підтримки ДВЗ і може змусити систему використовувати двигун для примусового зарядження батареї, що збільшує витрату палива. Тому підтримання оптимального діапазону SOC є одним із головних критеріїв ефективного енергоменеджменту.

У сучасних дослідженнях дедалі частіше застосовується багатокритеріальний підхід до формування стратегії керування. Його сутність полягає в тому, що система не оптимізує лише один показник, а враховує сукупність критеріїв. До таких критеріїв належать витрата палива, викиди CO₂, NO_x, CO та HC, відхилення SOC від бажаного рівня, кількість запусків ДВЗ, теплова стабільність батареї, ресурс електричних компонентів і комфортність руху. Такий підхід є більш складним, але він краще відповідає реальній природі гібридного транспортного засобу, де покращення одного показника може супроводжуватися погіршенням іншого.

Порівняння сучасних стратегій показує, що жодна з них не є універсально найкращою для всіх умов експлуатації. Правило-орієнтовані алгоритми є простими та надійними, але мають обмежену оптимальність. Нечітка логіка забезпечує більшу гнучкість, проте залежить від експертного налаштування. Метод еквівалентної мінімізації витрати палива добре підходить для реального часу, але потребує правильного вибору коефіцієнта еквівалентності. Динамічне програмування дає еталонний оптимум, але переважно для відомого циклу та дослідницьких задач. Прогнозне керування дозволяє враховувати майбутні

умови руху, але вимагає якісного прогнозу. Інтелектуальні методи мають високий потенціал адаптації, але потребують надійної валідації та обмежень безпеки. Для цілей цієї роботи найбільш доцільним є підхід, який поєднує зрозумілу структуру правило-орієнтованого керування з елементами багатокритеріальної оптимізації. Такий підхід дозволяє зберегти практичну реалізованість алгоритму й одночасно врахувати не лише поточну витрату палива, а й викиди та стан заряду батареї.

1.4 Постановка задач дослідження

Проведений аналіз сучасних стратегій енергоменеджменту свідчить, що правило-орієнтовані алгоритми є простими й придатними до практичної реалізації, проте не завжди забезпечують оптимальний результат з погляду паливної економічності та екологічності. Методи нечіткої логіки дозволяють гнучкіше враховувати проміжні стани системи, але залежать від якості експертних правил. Оптимізаційні підходи, зокрема еквівалентна мінімізація витрати палива, динамічне програмування та прогнозне керування, мають вищий потенціал зниження витрат палива й викидів, однак відрізняються складністю реалізації, потребою в точних моделях або прогнозних даних. Це створює потребу у формуванні такого підходу, який поєднує достатню математичну обґрунтованість із можливістю практичного застосування. Основною проблемою, що вирішується в роботі, є вибір раціонального режиму роботи силової установки PHEV/HEV у поточних умовах руху з урахуванням декількох критеріїв ефективності. У зв'язку з цим задача дослідження полягає у розробці підходу до оптимізації енергоменеджменту PHEV/HEV, який дозволяє оцінювати можливі режими роботи силової установки за інтегральним критерієм. Такий критерій повинен враховувати витрату палива, рівень викидів і відхилення SOC від бажаного або допустимого значення. Це дасть змогу порівнювати між собою електричний, гібридний, паливний, рекуперативний і зарядний режими та обирати той варіант, який забезпечує найкраще співвідношення між енергетичною ефективністю, екологічністю та збереженням працездатного стану батареї.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі дослідження:

1. Провести аналіз сучасного стану розвитку гібридних і плагін-гібридних транспортних засобів.
2. Розглянути основні архітектури гібридних силових установок та особливості формування енергетичних потоків у них.
3. Дослідити сучасні стратегії енергоменеджменту HEV/PHEV та визначити їх переваги й обмеження.
4. Обрати розрахункову схему гібридного транспортного засобу та визначити вихідні параметри для математичного моделювання.

5. Розробити математичну модель руху автомобіля, визначення тягової сили та потужності, необхідної для забезпечення заданого режиму руху.
6. Сформувати модель витрати палива двигуном внутрішнього згоряння та оцінювання викидів шкідливих речовин.
7. Сформувати багатокритеріальну цільову функцію оптимізації енергоменеджменту PHEV/HEV.
8. Розробити структурну схему та алгоритм роботи системи оптимізованого енергоменеджменту.
9. Виконати порівняння запропонованого підходу з базовою стратегією керування та сформувати практичні рекомендації щодо його застосування.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вибір розрахункової схеми та вихідних параметрів PHEV/HEV

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. Як базовий прототип для розрахунків приймається плагін-гібридний автомобіль Toyota Prius Prime SE 2024 модельного року. Вибір цього автомобіля є обґрунтованим, оскільки він належить до масового класу PHEV, має комбіновану бензиново-електричну силову установку, достатній запас ходу в електричному режимі та характерні для сучасних плагін-гібридів параметри тягової батареї.

Розрахункова схема передбачає, що транспортний засіб може працювати в декількох основних режимах. У режимі електричного руху тягова потужність забезпечується електродвигуном, який отримує енергію від високовольтної акумуляторної батареї через інвертор. У гібридному режимі потужність на колесах формується спільною роботою двигуна внутрішнього згоряння та електричної машини. У режимі руху від ДВЗ основне тягове зусилля створюється бензиновим двигуном, тоді як електрична частина може працювати як допоміжна або залишатися в режимі мінімального навантаження. Під час гальмування електродвигун переходить у генераторний режим, а частина кінетичної енергії автомобіля повертається до тягової батареї у вигляді рекуперованої електроенергії.

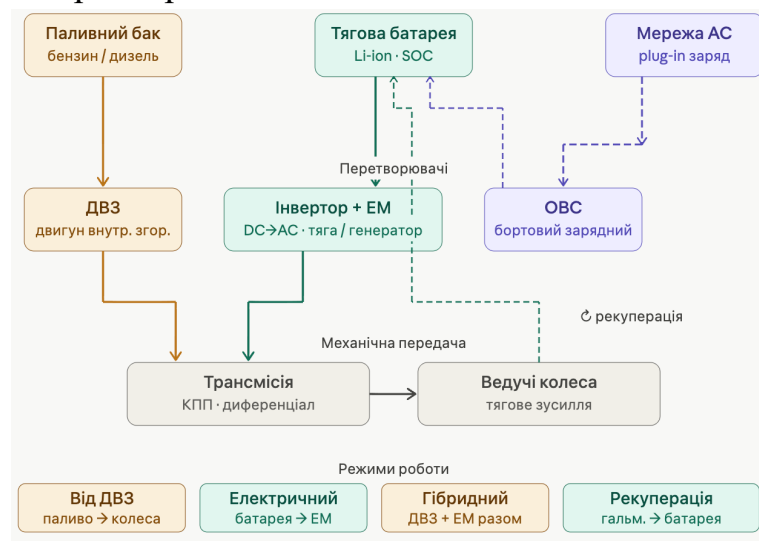


Рисунок 2.1. Розрахункова схема енергетичних потоків у плагін-гібридному автомобілі

У спрощеній розрахунковій моделі силова установка автомобіля подається як сукупність основних енергетичних блоків: двигун внутрішнього згоряння, електродвигун-генератор, тягова акумуляторна батарея, інвертор, трансмісія та ведучі колеса [6]. Двигун внутрішнього згоряння споживає паливо і створює механічну потужність, яка може бути використана для руху автомобіля або частково для підтримання заряду батареї. Електродвигун може працювати як тяговий двигун, віддаючи механічну потужність на колеса, або як генератор під час рекуперативного гальмування. Батарея виконує функцію накопичувача енергії, стан якого характеризується рівнем заряду SOC. Саме SOC є однією з головних змінних, що впливають на вибір режиму роботи силової установки.

У межах цієї роботи приймається, що автомобіль рухається по дорозі з твердим покриттям, а його динаміка описується поздовжньою моделлю руху. Основними силами, які потрібно враховувати при визначенні тягової потужності, є сила опору коченню, сила аеродинамічного опору, сила інерції під час прискорення або уповільнення та складова сили ваги під час руху на підйомі або спуску.

Для уніфікації подальших розрахунків усі параметри автомобіля переводяться в систему SI. Споряджена маса автомобіля приймається рівною 1570 кг. Це значення відповідає масі базової комплектації Toyota Prius Prime SE і використовується як основа для визначення сил інерції, опору коченню та потреби в тяговій потужності. Коефіцієнт аеродинамічного опору автомобіля приймається рівним 0,27. Площа лобового опору для розрахункової моделі приймається рівною 2,20 м². Оскільки цей параметр не завжди наводиться в офіційних технічних характеристиках автомобіля, він задається як розрахункове наближення для легкового автомобіля відповідного класу з урахуванням його ширини, висоти та форми кузова. Добуток коефіцієнта аеродинамічного опору на лобову площу становить 0,594 м². Саме цей добуток визначає фактичну інтенсивність аеродинамічного опору та використовується в рівнянні сили опору повітря.

Коефіцієнт опору коченню приймається рівним 0,010 для рівної асфальтованої дороги та шин із нормальним тиском. Це значення є типовим для легкових автомобілів з енергоефективними шинами. Опір коченню на відміну від аеродинамічного опору слабше залежить від швидкості, але прямо пропорційний масі автомобіля. Тому збільшення маси PHEV через наявність тягової батареї впливає не лише на інерційні втрати під час прискорення, але й на постійні втрати під час руху.

Тягова акумуляторна батарея приймається літій-іонною з повною енергетичною ємністю 13,6 кВт·год. Для практичних розрахунків важливо враховувати, що не вся паспортна ємність батареї використовується в повному діапазоні від 0 до 100%. Система керування залишає енергетичний резерв для захисту батареї від глибокого розряду, обмеження надмірного заряду та

забезпечення довговічності. Тому в розрахунковій моделі приймається допустимий робочий діапазон SOC від 0,20 до 0,90. Для режиму активного використання електричної енергії PHEV початковий SOC приймається рівним 0,85, а перехід до режиму підтримання заряду відбувається поблизу $SOC = 0,25\text{--}0,30$.

Двигун внутрішнього згоряння в розрахунковій моделі приймається бензиновим, чотирициліндровим, з робочим об'ємом 2,0 л. Його максимальна ефективна потужність для розрахунків приймається рівною 112 кВт, що відповідає приблизно 150 к. с. Сумарна системна потужність гібридної силової установки приймається рівною 164 кВт, тобто приблизно 220 к. с.

Для електричної частини силової установки в межах розрахункової моделі приймається максимальна тягова потужність електродвигуна 120 кВт. Це значення використовується як верхня межа електричної підтримки під час розгону або руху в електричному режимі. ККД електроприводу, який охоплює втрати в інверторі, електродвигуні та частково в механічній передачі, приймається рівним 0,90 у тяговому режимі. Для рекуперативного гальмування приймається сумарний коефіцієнт ефективності рекуперації 0,60, оскільки частина енергії втрачається в електричній машині, силовій електроніці, батареї та механічних гальмах, а також через обмеження допустимого зарядного струму.

Таблиця 2.1. Вихідні параметри розрахункової моделі PHEV

Параметр	Позначення	Значення	Од. вим.
Тип автомобіля	–	PHEV	–
Базовий прототип	–	Toyota Prius Prime SE 2024	–
Споряджена маса	m	1570	кг
Коефіцієнт аеродинамічного опору	Cd	0,27	–
Площа лобового опору	A	2,20	м ²
Добуток CdA	CdA	0,594	м ²
Коефіцієнт опору коченню	f	0,010	–
Густина повітря	ρ	1,225	кг/м ³
Прискорення вільного падіння	g	9,81	м/с ²
Повна ємність тягової батареї	Ebat	13,6	кВт·год
Мінімальний допустимий SOC	SOCmin	0,20	–
Максимальний допустимий SOC	SOCmax	0,90	–
Початковий SOC для PHEV-режиму	SOC0	0,85	–
SOC переходу до підтримання заряду	SOCcs	0,25–0,30	–
Максимальна потужність ДВЗ	PICE,max	112	кВт
Сумарна системна потужність	Psys,max	164	кВт
Максимальна потужність електроприводу	PEM,max	120	кВт
ККД електроприводу в тяговому режимі	η_{EM}	0,90	–
Ефективність рекуперації	η_{rec}	0,60	–
ККД механічної трансмісії	η_{tr}	0,95	–

Об'єм паливного бака	V _{fuel}	40,1	л
Радіус кочення колеса	r _w	0,333	м

Для подальшого розрахунку витрати палива необхідно також задати паливні параметри. У роботі приймається, що автомобіль використовує бензин. Густина бензину приймається рівною 0,745 кг/л, нижча теплота згоряння – 43 МДж/кг, а питомий коефіцієнт утворення CO₂ – 2,31 кг CO₂ на 1 л спаленого бензину. Ці параметри дозволяють перейти від розрахованої масової або об'ємної витрати палива до оцінки викидів CO₂. Для шкідливих компонентів відпрацьованих газів, таких як NO_x, CO та HC, у подальших розрахунках доцільно використовувати нормовані або апроксимаційні залежності, оскільки їх утворення залежить не лише від кількості палива, але й від режиму згоряння, температури двигуна та роботи системи нейтралізації.

Розрахункова схема передбачає, що на кожному часовому кроці руху автомобіля спочатку визначається необхідна тягова потужність на колесах. Вона залежить від швидкості, прискорення, маси автомобіля, дорожнього ухилу, опору коченню та аеродинамічного опору. Після цього система енергоменеджменту повинна визначити, яким способом цю потужність доцільно забезпечити: за рахунок електродвигуна, двигуна внутрішнього згоряння або їх спільної роботи. Якщо автомобіль гальмує, розраховується потенційна рекупераційна потужність і можливість її приймання тяговою батареєю з урахуванням поточного SOC.

Для PHEV доцільно розділяти два основні енергетичні стани автомобіля. Перший стан відповідає режиму розрядження заряду, коли SOC є достатньо високим, а автомобіль може активно використовувати електричний режим. У цьому випадку система керування повинна надавати перевагу електричній тязі в тих умовах, де робота ДВЗ є найменш ефективною або найбільш небажаною з погляду локальних викидів. Другий стан відповідає режиму підтримання заряду, коли SOC наближається до нижньої межі, а автомобіль працює подібно до звичайного HEV [7]. У такому режимі головним завданням є не максимальне використання електричної енергії, а підтримання балансу між розрядженням і зарядженням батареї.

Для забезпечення порівнянності результатів у подальших розрахунках приймаються три типові режими руху: міський, змішаний і магістральний. Міський режим характеризується невисокими швидкостями, частими прискореннями, гальмуваннями та зупинками. У ньому найбільше значення мають електричний рух і рекуперація. Змішаний режим поєднує міські та заміські ділянки, тому потребує більш збалансованого використання ДВЗ і електродвигуна. Магістральний режим характеризується вищою та стабільнішою швидкістю, через що зростає роль аеродинамічного опору, а двигун внутрішнього згоряння може працювати у більш ефективній зоні навантаження.

2.2 Математична модель руху автомобіля та визначення тягової потужності

Математична модель руху автомобіля є основою для подальшого визначення енергетичних потреб PHEV/HEV та формування алгоритму енергоменеджменту. Щоб система керування могла раціонально розподіляти потужність між двигуном внутрішнього згорання та електричною частиною силової установки, насамперед необхідно визначити, яка тягова сила та яка потужність потрібні автомобілю в конкретний момент руху. Ці величини залежать від швидкості, прискорення, маси транспортного засобу, дорожніх умов, аеродинамічних характеристик і коефіцієнта опору коченню [6].

Для визначення тягової сили використовується баланс сил, що діють на автомобіль під час руху. У загальному випадку тягова сила на ведучих колесах повинна компенсувати силу опору коченню, силу аеродинамічного опору, складову сили ваги під час руху на підйомі або спуску, а також силу інерції, яка виникає під час прискорення або уповільнення автомобіля. Тому сумарна сила, яку повинна забезпечити силова установка на колесах, визначається за залежністю:

$$F_{tr} = F_{roll} + F_{air} + F_{grade} + F_{acc}, \quad (2.1)$$

де F_{tr} – необхідна тягова сила на колесах, Н; F_{roll} – сила опору коченню, Н; F_{air} – сила аеродинамічного опору, Н; F_{grade} – складова сили ваги під час руху на ухилі, Н; F_{acc} – сила інерції під час прискорення або уповільнення, Н.

Сила опору коченню виникає внаслідок деформації шин, мікродеформації дорожнього покриття та внутрішніх втрат у контактні колеса з дорогою. Для легкового автомобіля на рівній асфальтованій дорозі ця сила може бути визначена за формулою:

$$F_{roll} = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha, \quad (2.2)$$

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

Для невеликих дорожніх ухилів значення $\cos \alpha$ близьке до одиниці, тому в розрахунках для рівної дороги силу опору коченню можна визначати спрощено:

$$F_{roll} = m \cdot g \cdot f. \quad (2.3)$$

Для прийнятої розрахункової маси автомобіля $m = 1700$ кг, коефіцієнта опору коченню $f = 0,010$ та $g = 9,81$ м/с² сила опору коченню становить:

$$F_{roll} = 1700 \cdot 9,81 \cdot 0,010 = 166,77 \text{ Н.}$$

Отримане значення показує, що навіть під час рівномірного руху по горизонтальній дорозі автомобіль повинен постійно витратити частину тягової потужності на подолання опору коченню. Для PHEV це особливо важливо, оскільки збільшена маса через наявність тягової батареї безпосередньо впливає на силу опору коченню та інерційні втрати під час прискорення.

Сила аеродинамічного опору виникає внаслідок взаємодії кузова автомобіля з повітряним потоком. Вона залежить від густини повітря, коефіцієнта аеродинамічного опору, площі лобового опору та квадрата швидкості руху. Для розрахунку використовується залежність:

$$F_{air} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2, \quad (2.4)$$

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

Для розрахункової моделі прийнято $\rho = 1,225$ кг/м³, $C_d = 0,27$, $A = 2,20$ м². Добуток $C_d A$ становить 0,594 м². Тоді сила аеродинамічного опору може бути записана у вигляді:

$$F_{air} = 0,5 \cdot 1,225 \cdot 0,594 \cdot v^2 = 0,3638 v^2.$$

Ця залежність показує, що аеродинамічний опір зростає пропорційно квадрату швидкості. Наприклад, при швидкості 50 км/год, що відповідає 13,89 м/с, сила аеродинамічного опору становить:

$$F_{air} = 0,3638 \cdot 13,89^2 = 70,2 \text{ Н.}$$

При швидкості 90 км/год, тобто 25 м/с, вона зростає до:

$$F_{air} = 0,3638 \cdot 25^2 = 227,4 \text{ Н.}$$

При швидкості 120 км/год, тобто 33,33 м/с, сила аеродинамічного опору становить:

$$F_{air} = 0,3638 \cdot 33,33^2 = 404,2 \text{ Н.}$$

Отже, зі збільшенням швидкості роль аеродинамічного опору різко зростає. Це має безпосереднє значення для енергоменеджменту PHEV/HEV, оскільки на магістральних швидкостях потреба в потужності значно збільшується, а використання електричного режиму може швидко розряджати батарею. У таких умовах доцільним може бути використання ДВЗ у зоні високої ефективності, тоді як електричну енергію варто зберігати для режимів міського руху, прискорень або короткочасної підтримки.

Складова сили ваги під час руху на підйомі або спуску визначається за формулою:

$$F_{grade} = m \cdot g \cdot \sin \alpha. \quad (2.5)$$

Для малих кутів ухилу можна використовувати наближення $\sin \alpha \approx i$, де i – поздовжній ухил дороги у відносних одиницях. Тоді:

$$F_{grade} = m \cdot g \cdot i. \quad (2.6)$$

Якщо автомобіль рухається на підйомі з ухилом 5%, тобто $i = 0,05$, сила опору підйому для розрахункової маси 1700 кг становить:

$$F_{grade} = 1700 \cdot 9,81 \cdot 0,05 = 833,85 \text{ Н.}$$

Це значення значно перевищує як силу опору коченню, так і аеродинамічний опір при міських швидкостях. Тому рух на підйомі суттєво збільшує потребу в тяговій потужності та може вимагати спільної роботи ДВЗ і електродвигуна. Під час руху на спуску ця складова має протилежний знак і

може сприяти руху автомобіля. У такому випадку надлишкова енергія може частково повертатися до батареї через рекуперативне гальмування.

Сила інерції визначає додаткову тягову силу, необхідну для прискорення автомобіля, або силу, що вивільняється під час уповільнення. Вона розраховується за залежністю:

$$F_{acc} = m \cdot a, \quad (2.7)$$

де a – прискорення автомобіля, м/с².

Якщо автомобіль масою 1700 кг прискорюється з прискоренням 1 м/с², інерційна складова становить:

$$F_{acc} = 1700 \cdot 1 = 1700 \text{ Н.}$$

Це найбільша складова серед основних опорів руху в режимі інтенсивного прискорення. Саме тому під час розгонів гібридна силова установка часто використовує електродвигун як додаткове джерело крутного моменту. Електродвигун здатний швидко розвивати високий момент на низьких швидкостях, що дозволяє зменшити навантаження на ДВЗ, покращити динаміку автомобіля та знизити витрату палива в перехідних режимах.

Після визначення сумарної тягової сили необхідна потужність на колесах визначається як добуток сили на швидкість руху:

$$P_{wheel} = F_{tr} \cdot v, \quad (2.8)$$

де P_{wheel} – потужність на колесах, Вт; F_{tr} – тягова сила, Н; v – швидкість руху, м/с.

Якщо автомобіль рухається рівномірно горизонтальною дорогою, сила інерції та сила опору підйому дорівнюють нулю. У такому випадку сумарна тягова сила дорівнює сумі сили опору коченню та аеродинамічного опору:

$$F_{tr} = F_{roll} + F_{air}. \quad (2.9)$$

Для швидкості 50 км/год, тобто 13,89 м/с, сумарна сила опору становить:

$$F_{tr} = 166,77 + 70,2 = 236,97 \text{ Н.}$$

Відповідна потужність на колесах дорівнює:

$$P_{wheel} = 236,97 \cdot 13,89 = 3292 \text{ Вт} = 3,29 \text{ кВт.}$$

Для швидкості 90 км/год, тобто 25 м/с, сумарна сила опору становить:

$$F_{tr} = 166,77 + 227,4 = 394,17 \text{ Н,}$$

а потужність на колесах:

$$P_{wheel} = 394,17 \cdot 25 = 9854 \text{ Вт} = 9,85 \text{ кВт.}$$

Для швидкості 120 км/год, тобто 33,33 м/с, сумарна сила опору дорівнює:

$$F_{tr} = 166,77 + 404,2 = 570,97 \text{ Н,}$$

а потужність на колесах:

$$P_{wheel} = 570,97 \cdot 33,33 = 19031 \text{ Вт} = 19,03 \text{ кВт.}$$

Отримані значення показують, що під час рівномірного руху по горизонтальній дорозі потреба в потужності є відносно невеликою порівняно з максимальною потужністю силової установки. Однак зі збільшенням швидкості

необхідна потужність зростає дуже швидко, що пов'язано насамперед з аеродинамічним опором. Для системи енергоменеджменту це означає, що на високих сталих швидкостях електричний режим не завжди є найраціональнішим, оскільки він може призвести до швидкого зниження SOC без суттєвого виграшу в загальній ефективності маршруту.

Таблиця 2.2. Розрахунок сил опору та потужності на колесах під час рівномірного руху горизонтальною дорогою

Швидкість, км/год	Швидкість, м/с	Сила опору коченню, Н	Сила аеродинамічного опору, Н	Сумарна сила опору, Н	Потужність на колесах, кВт
50	13,89	166,77	70,20	236,97	3,29
90	25,00	166,77	227,40	394,17	9,85
120	33,33	166,77	404,20	570,97	19,03

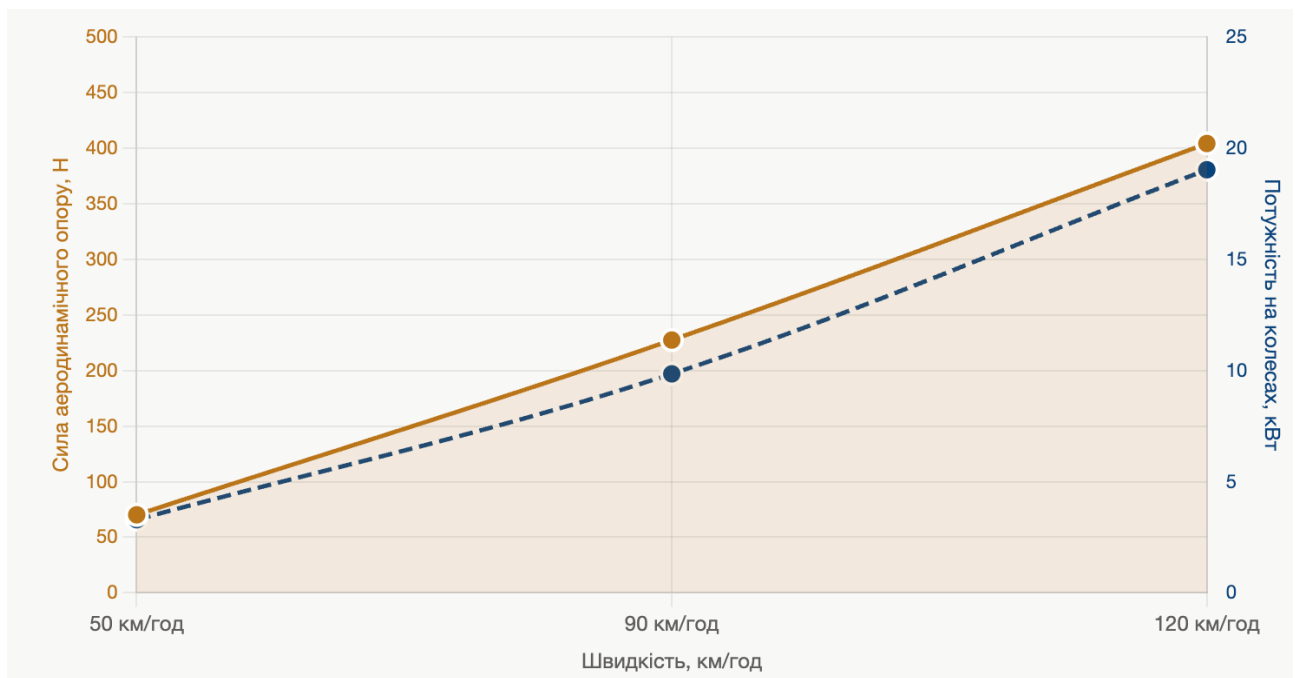


Рисунок 2.2. Залежність сили аеродинамічного опору та потужності на колесах від швидкості руху автомобіля

Під час прискорення потреба в тяговій потужності істотно зростає. Наприклад, для швидкості 50 км/год і прискорення 1 м/с² сумарна тягова сила з урахуванням інерційної складової становить:

$$F_{tr} = 166,77 + 70,2 + 1700 = 1936,97 \text{ Н.}$$

Відповідна потужність на колесах:

$$P_{wheel} = 1936,97 \cdot 13,89 = 26901 \text{ Вт} = 26,90 \text{ кВт.}$$

Порівняно з рівномірним рухом при тій самій швидкості потреба в потужності збільшується більш ніж у вісім разів. Це пояснює, чому режими прискорення є критичними для енергоменеджменту. У таких умовах

використання лише ДВЗ може призвести до його роботи в неефективній зоні, тоді як підключення електродвигуна дозволяє покрити пікову потужність без різкого збільшення витрати палива.

Для швидкості 90 км/год і прискорення 0,5 м/с² сила інерції становить:

$$F_{acc} = 1700 \cdot 0,5 = 850 \text{ Н.}$$

Тоді сумарна тягова сила:

$$F_{tr} = 166,77 + 227,4 + 850 = 1244,17 \text{ Н,}$$

а потужність на колесах:

$$P_{wheel} = 1244,17 \cdot 25 = 31104 \text{ Вт} = 31,10 \text{ кВт.}$$

Цей приклад показує, що навіть помірно прискорення на середній швидкості значно збільшує потребу в потужності. Для PHEV це може бути режимом, у якому електричний привід використовується як допоміжне джерело тяги, а ДВЗ працює в більш сприятливій зоні навантаження. Такий розподіл потужності дає можливість зменшити миттєву витрату палива та обмежити викиди, пов'язані з різким підвищенням навантаження на ДВЗ.

Таблиця 2.3. Розрахунок тягової потужності під час прискорення автомобіля

Умова руху	Швидкість, км/год	Прискорення, м/с ²	Сила опору коченню, Н	Сила аеродинамічного опору, Н	Сила інерції, Н	Сумарна тягова сила, Н	Потужність на колесах, кВт
Помірний міський розгін	50	1,0	166,77	70,20	1700	1936,97	26,90
Розгін у змішаному циклі	90	0,5	166,77	227,40	850	1244,17	31,10
Інтенсивний розгін на малій швидкості	30	1,5	166,77	25,27	2550	2742,04	22,85

Окремо необхідно враховувати рух на підйомі, оскільки дорожній ухил суттєво змінює енергетичну потребу автомобіля. Для швидкості 60 км/год, що відповідає 16,67 м/с, та ухилу 5% сила опору підйому становить 833,85 Н. Сила аеродинамічного опору при цій швидкості дорівнює:

$$F_{air} = 0,3638 \cdot 16,67^2 = 101,1 \text{ Н.}$$

Сумарна сила опору без прискорення:

$$F_{tr} = 166,77 + 101,1 + 833,85 = 1101,72 \text{ Н.}$$

Потужність на колесах:

$$P_{wheel} = 1101,72 \cdot 16,67 = 18363 \text{ Вт} = 18,36 \text{ кВт.}$$

Для порівняння, при тій самій швидкості на горизонтальній дорозі потужність була б значно меншою. Це означає, що навіть без прискорення рух на підйомі може створювати потребу в потужності, близьку до потужності

рівномірного руху на значно вищій швидкості. У таких режимах алгоритм енергоменеджменту повинен враховувати не лише поточний SOC, але й тривалість підйому, допустиму потужність електродвигуна та ефективність роботи ДВЗ.

Для переходу від потужності на колесах до потужності, яку повинна забезпечити силова установка, необхідно враховувати втрати в трансмісії. Якщо механічний ККД трансмісії приймається рівним $\eta_{tr} = 0,95$, то потужність на виході силової установки у тяговому режимі визначається як:

$$P_{drive} = \frac{P_{wheel}}{\eta_{tr}}. \quad (2.10)$$

Для прикладу рівномірного руху при 90 км/год, де $P_{wheel} = 9,85$ кВт, потужність, яку повинна забезпечити силова установка, становить:

$$P_{drive} = \frac{9,85}{0,95} = 10,37 \text{ кВт.}$$

Для режиму прискорення при 50 км/год із прискоренням 1 м/с^2 , де $P_{wheel} = 26,90$ кВт, відповідна потужність на виході силової установки дорівнює:

$$P_{drive} = \frac{26,90}{0,95} = 28,32 \text{ кВт.}$$

Якщо тягова потужність забезпечується електродвигуном, потрібно додатково враховувати ККД електроприводу. При $\eta_{EM} = 0,90$ електрична потужність, яка відбирається від батареї, визначається як:

$$P_{bat} = \frac{P_{drive}}{\eta_{EM}}. \quad (2.11)$$

Для рівномірного руху при 50 км/год, де $P_{wheel} = 3,29$ кВт, потужність на виході силової установки з урахуванням трансмісії становить:

$$P_{drive} = \frac{3,29}{0,95} = 3,46 \text{ кВт.}$$

Тоді електрична потужність, яка відбирається від батареї, дорівнює:

$$P_{bat} = \frac{3,46}{0,90} = 3,84 \text{ кВт.}$$

Це означає, що для підтримання рівномірного руху на швидкості 50 км/год в електричному режимі батарея повинна віддавати приблизно 3,84 кВт електричної потужності. Якщо такий режим триває 10 хвилин, тобто 0,167 год, витрата енергії батареї становитиме:

$$E_{bat} = 3,84 \cdot 0,167 = 0,64 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Для батареї ємністю 13,6 кВт·год це відповідає приблизно 4,7% повної ємності. Однак у реальних умовах додатково враховуються допоміжні споживачі, робота кліматичної системи, зміна швидкості та втрати в батареї, тому фактичне зниження SOC може бути більшим.

У режимі рекуперативного гальмування потужність на колесах має від'ємне значення. Частина цієї потужності може бути повернута до батареї.

Якщо прийняти сумарну ефективність рекуперації $\eta_{rec} = 0,60$, то потужність, яка надходить до батареї, визначається як:

$$P_{rec} = |P_{wheel}| \cdot \eta_{rec}. \quad (2.12)$$

Наприклад, якщо під час гальмування на колесах доступна потужність 20 кВт, то потужність, яка може бути накопичена в батареї, становить:

$$P_{rec} = 20 \cdot 0,60 = 12 \text{ кВт.}$$

У загальному вигляді розрахунок тягової потужності для кожного моменту часу можна подати як послідовність операцій. Спочатку за швидкістю автомобіля визначається аеродинамічний опір. Далі за масою та коефіцієнтом опору коченню розраховується сила опору коченню. Якщо дорога має ухил, додається або віднімається складова сили ваги. Якщо автомобіль прискорюється або уповільнюється, враховується інерційна сила. Після цього сумарна сила множиться на швидкість, що дає потужність на колесах. З урахуванням знаку цієї потужності система визначає, чи автомобіль перебуває в режимі тяги, вибігу або рекуперативного гальмування.

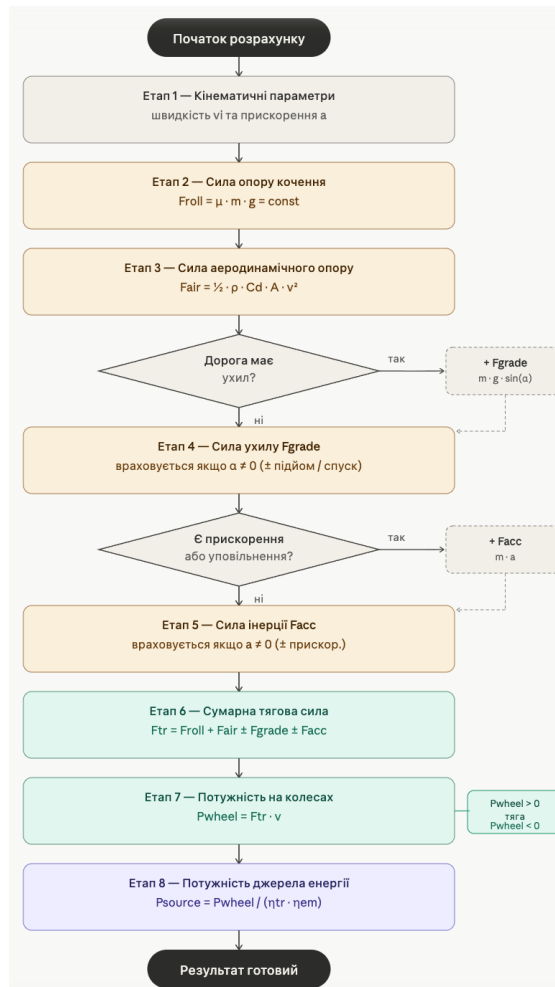


Рисунок 2.3. Блок-схема визначення тягової потужності автомобіля за параметрами руху

Отримана математична модель дозволяє встановити зв'язок між умовами руху автомобіля та потребою в потужності. Для енергоменеджменту PHEV/HEV

це має принципове значення, оскільки вибір режиму роботи силової установки повинен здійснюватися не довільно, а відповідно до поточної енергетичної потреби. Якщо потрібна потужність є невеликою, а SOC достатній, доцільним може бути електричний режим. Якщо потрібна потужність середня і автомобіль рухається зі стабільною швидкістю, двигун внутрішнього згоряння може працювати в ефективній зоні. Якщо потужність висока, наприклад під час розгону або руху на підйомі, раціональним є комбінований режим із використанням електричної підтримки.

2.3 Модель витрати палива та викидів ДВЗ у складі гібридної силової установки

Двигун внутрішнього згоряння у складі гібридної силової установки є основним джерелом хімічної енергії, яка надходить до автомобіля разом із паливом. У PHEV/HEV ДВЗ не завжди працює безперервно, як у традиційному автомобілі, а вмикається залежно від режиму руху, рівня заряду тягової батареї, запиту потужності та стратегії енергоменеджменту. Саме тому модель витрати палива для гібридного автомобіля повинна враховувати не лише потужність двигуна, а й режим його залучення до роботи силової установки [7].

У межах цієї роботи двигун внутрішнього згоряння розглядається як бензиновий тепловий двигун, який перетворює хімічну енергію палива в ефективну механічну потужність. Для розрахункової моделі прийнято, що автомобіль має бензиновий двигун робочим об'ємом 2,0 л з максимальною потужністю $P_{ICE,max} = 112\text{кВт}$. Такий ДВЗ відповідає параметрам обраного базового плагін-гібридного автомобіля та використовується як джерело механічної потужності у режимах руху від ДВЗ, гібридного руху та підтримання заряду тягової батареї.

Для опису витрати палива двигуном внутрішнього згоряння доцільно використовувати підхід на основі питомої ефективної витрати палива. Питома ефективна витрата палива показує, яку масу палива двигун витрачає для вироблення одиниці ефективної механічної енергії. Вона залежить від частоти обертання колінчастого вала, навантаження, температурного стану двигуна, режиму згоряння та ефективності системи керування. У повній моделі ДВЗ ця величина визначається за паливною картою двигуна. Однак для розрахункового підходу, орієнтованого на формування алгоритму енергоменеджменту, достатньо використати узагальнену залежність між потужністю ДВЗ і питомою витратою палива.

Масова витрата палива може бути визначена за формулою:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{P_{ICE} \cdot b_e}{3600}, \quad (2.13)$$

де \dot{m}_{fuel} – масова витрата палива, г/с; P_{ICE} – ефективна потужність двигуна внутрішнього згорання, кВт; b_e – питома ефективна витрата палива, г/(кВт·год); 3600 – коефіцієнт переходу від годин до секунд.

Якщо необхідно отримати витрату палива в кілограмах за певний проміжок часу, використовується залежність:

$$m_{fuel} = \frac{P_{ICE} \cdot b_e \cdot t}{3600 \cdot 1000}, \quad (2.14)$$

де m_{fuel} – маса витраченого палива, кг; t – тривалість роботи двигуна, с.

Об'ємна витрата палива визначається через густину бензину:

$$V_{fuel} = \frac{m_{fuel}}{\rho_{fuel}}, \quad (2.15)$$

де V_{fuel} – об'єм витраченого палива, л; ρ_{fuel} – густина бензину, кг/л.

У розрахунках приймається густина бензину $\rho_{fuel} = 0,745$ кг/л.

Питома ефективна витрата палива двигуна не є сталою величиною. Найменші значення досягаються тоді, коли двигун працює в зоні оптимального навантаження та частоти обертання. Для сучасного бензинового двигуна в економічній зоні можна прийняти $b_{e,opt} = 230\text{--}250$ г/(кВт·год). У режимах низького навантаження, частих перехідних процесів або роботи поза економічною зоною питома витрата палива зростає. Для таких режимів у розрахунковій моделі приймається $b_{e,high} = 280\text{--}340$ г/(кВт·год).

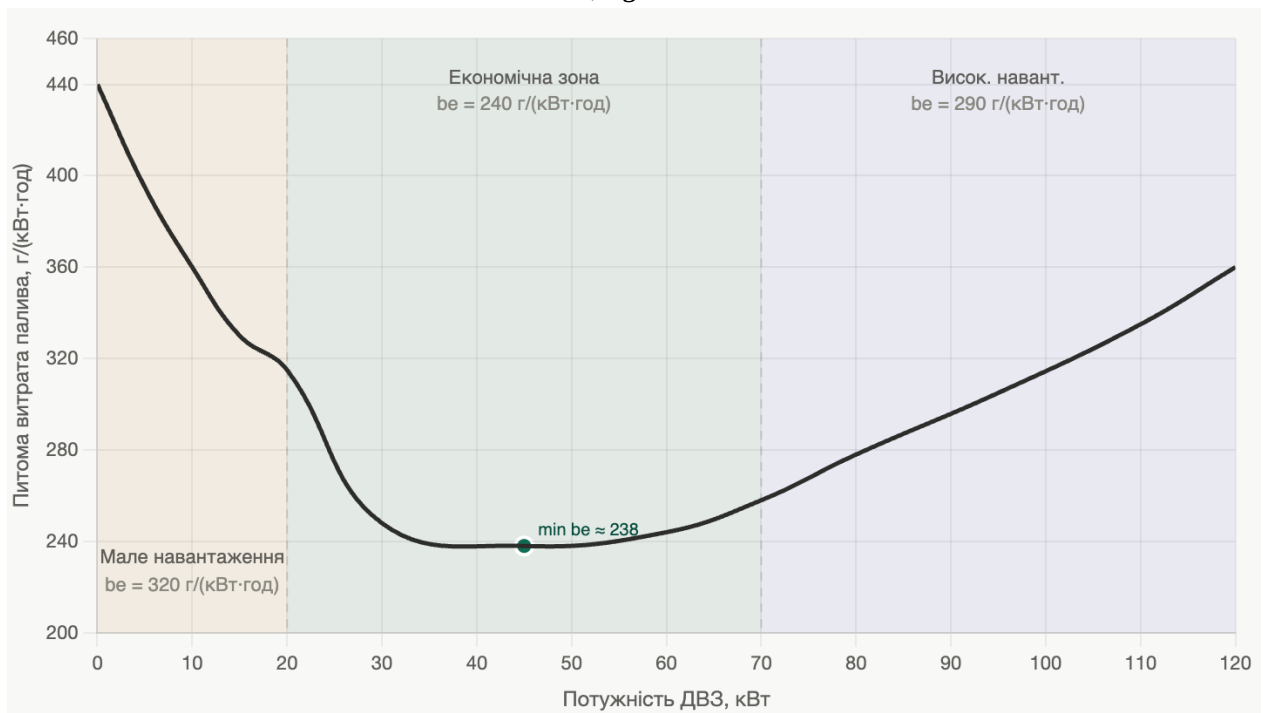


Рисунок 2.4. Узагальнена залежність питомої ефективної витрати палива від потужності ДВЗ

Для спрощення подальших розрахунків доцільно використати три характерні зони роботи ДВЗ. Перша зона відповідає малому навантаженню, коли двигун працює неефективно через високі відносні механічні втрати та низький

коефіцієнт корисної дії. Друга зона відповідає економічному діапазону, у якому двигун працює з найменшою питомою витратою палива. Третя зона відповідає високому навантаженню, коли витрата палива зростає через збагачення суміші, збільшення теплових втрат і відхід від оптимального режиму. Прийнята залежність (рис. 2.4) дозволяє оцінювати витрату палива залежно від того, у якій зоні працює двигун.

Для прикладу розглянемо роботу двигуна внутрішнього згоряння з ефективною потужністю $P_{ICE} = 30 \text{ кВт}$ протягом 60 секунд. Оскільки ця потужність відповідає економічній зоні, приймається $b_e = 240 \text{ г/(кВт·год)}$. Масова витрата палива за секунду становить:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{30 \cdot 240}{3600} = 2,0 \text{ г/с.}$$

За 60 секунд двигун витратить:

$$m_{fuel} = 2,0 \cdot 60 = 120 \text{ г} = 0,12 \text{ кг.}$$

Об'ємна витрата палива становитиме:

$$V_{fuel} = \frac{0,12}{0,745} = 0,161 \text{ л.}$$

Якщо ж двигун працює з потужністю лише $P_{ICE} = 10 \text{ кВт}$ у зоні малого навантаження, де $b_e = 320 \text{ г/(кВт·год)}$, миттєва масова витрата палива буде:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{10 \cdot 320}{3600} = 0,889 \text{ г/с.}$$

На перший погляд ця витрата менша, ніж у режимі 30 кВт, однак на одиницю виробленої механічної енергії двигун працює значно менш ефективно. Саме тому система енергоменеджменту повинна уникати тривалої роботи ДВЗ на малому навантаженні, якщо такий режим може бути замінений електричним рухом або короткочасною роботою двигуна в економічнішій зоні.

Для високого навантаження, наприклад $P_{ICE} = 80 \text{ кВт}$ і $b_e = 290 \text{ г/(кВт·год)}$, масова витрата палива становитиме:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{80 \cdot 290}{3600} = 6,44 \text{ г/с.}$$

Якщо такий режим триває 30 секунд, маса витраченого палива дорівнює:

$$m_{fuel} = 6,44 \cdot 30 = 193,2 \text{ г} = 0,193 \text{ кг.}$$

Об'ємна витрата палива:

$$V_{fuel} = \frac{0,193}{0,745} = 0,259 \text{ л.}$$

У такому режимі доцільним може бути використання електродвигуна для часткового покриття пікового навантаження. Якщо електрична машина забезпечить частину тягової потужності, ДВЗ може залишитися в економічнішому діапазоні, а загальна витрата палива зменшиться. Це є одним із базових принципів оптимального енергоменеджменту гібридного автомобіля.

Оцінювання викидів двигуна внутрішнього згорання у складі PHEV/HEV також є необхідним елементом моделі, оскільки мета енергоменеджменту полягає не лише у зменшенні витрати палива, а й у зниженні екологічного навантаження. Викиди можна умовно поділити на дві групи. До першої групи належить CO_2 , який безпосередньо пов'язаний із кількістю спаленого палива. До другої групи належать шкідливі компоненти відпрацьованих газів, зокрема NO_x , CO та HC , утворення яких залежить не тільки від кількості палива, а й від режиму згорання, температури двигуна, складу паливоповітряної суміші та ефективності каталітичного нейтралізатора.

Викиди CO_2 можна визначати за об'ємною витратою бензину. Для розрахунків приймається коефіцієнт утворення CO_2 :

$$k_{\text{CO}_2} = 2,31 \text{ кг } \text{CO}_2/\text{л}.$$

Тоді маса викидів CO_2 визначається як:

$$m_{\text{CO}_2} = V_{\text{fuel}} \cdot k_{\text{CO}_2}, \quad (2.16)$$

де m_{CO_2} – маса викидів CO_2 , кг; V_{fuel} – об'єм витраченого бензину, л.

Для попереднього прикладу з потужністю ДВЗ $P_{\text{ICE}} = 30 \text{ кВт}$, де витрата палива за 60 секунд становить $V_{\text{fuel}} = 0,161 \text{ л}$, викиди CO_2 дорівнюють:

$$m_{\text{CO}_2} = 0,161 \cdot 2,31 = 0,372 \text{ кг}.$$

Для режиму високого навантаження $P_{\text{ICE}} = 80 \text{ кВт}$ і витрати палива $V_{\text{fuel}} = 0,259 \text{ л}$ за 30 секунд:

$$m_{\text{CO}_2} = 0,259 \cdot 2,31 = 0,598 \text{ кг}.$$

Ці розрахунки показують, що зменшення витрати палива безпосередньо знижує викиди CO_2 . Тому критерій CO_2 у багатокритеріальній оптимізації тісно пов'язаний із паливною економічністю. Однак його доцільно залишати окремим показником, оскільки екологічна оцінка роботи автомобіля зазвичай подається саме у вигляді маси CO_2 на одиницю пробігу.

Для оцінювання викидів CO_2 на одиницю пробігу використовується залежність:

$$e_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{S}, \quad (2.17)$$

де e_{CO_2} – питомі викиди CO_2 , кг/км або г/км; S – пройдений шлях, км.

Якщо автомобіль за певний розрахунковий інтервал пройшов 1 км і витратив 0,04 л бензину, то маса CO_2 становить:

$$m_{\text{CO}_2} = 0,04 \cdot 2,31 = 0,0924 \text{ кг}.$$

Тоді питомі викиди:

$$e_{\text{CO}_2} = 0,0924 \text{ кг/км} = 92,4 \text{ г/км}.$$

Цей показник може використовуватися для порівняння базової та оптимізованої стратегій енергоменеджменту. Якщо оптимізований алгоритм зменшує витрату палива на певному циклі, відповідно зменшуються і питомі викиди CO_2 .

Таблиця 2.4. Розрахунок викидів CO₂ для характерних режимів роботи ДВЗ

Потужність ДВЗ, кВт	Об'єм палива, л	Коефіцієнт k_{CO_2} , кг/л	Викиди CO ₂ , кг
10	0,071	2,31	0,164
30	0,161	2,31	0,372
80	0,259	2,31	0,598

Для викидів NO_x, CO та HC доцільно використати нормовану розрахункову модель, оскільки точні значення цих компонентів потребують детальних карт двигуна, даних про температуру, склад суміші, режими роботи системи нейтралізації та умови сертифікаційного циклу. У межах цієї роботи можна прийняти, що шкідливі викиди визначаються за базовим питомим коефіцієнтом, який коригується залежно від режиму роботи ДВЗ. Такий підхід дозволяє врахувати те, що мале навантаження, високі навантаження та часті перехідні режими є менш сприятливими з погляду екологічності.

У загальному вигляді маса шкідливого компонента може бути описана залежністю:

$$m_i = e_i \cdot S \cdot K_{mode}, \quad (2.18)$$

де m_i – маса відповідного шкідливого компонента, г; e_i – базовий питомий коефіцієнт викидів, г/км; S – пройдений шлях, км; K_{mode} – коефіцієнт, який враховує режим роботи ДВЗ.

Для врахування режиму роботи ДВЗ вводиться коефіцієнт K_{mode} . У зоні економічної роботи двигуна приймається $K_{mode} = 1,0$. У зоні малого навантаження, де зростає відносна частка втрат і можливі нестабільні режими згоряння, приймається $K_{mode} = 1,2$. У зоні високого навантаження, де зростають температура згоряння та інтенсивність утворення NO_x, приймається $K_{mode} = 1,3$. Для перехідних режимів, пов'язаних із частими запусками та різкою зміною навантаження, коефіцієнт може бути збільшений до $K_{mode} = 1,4$.

Наприклад, якщо автомобіль проходить ділянку довжиною 5 км із роботою ДВЗ переважно в економічній зоні, то для $K_{mode} = 1,0$ викиди NO_x становитимуть:

$$m_{NO_x} = 0,030 \cdot 5 \cdot 1,0 = 0,150 \text{ г.}$$

Викиди CO:

$$m_{CO} = 0,500 \cdot 5 \cdot 1,0 = 2,500 \text{ г.}$$

Викиди HC:

$$m_{HC} = 0,050 \cdot 5 \cdot 1,0 = 0,250 \text{ г.}$$

Якщо та сама ділянка проходиться з частими перехідними режимами ДВЗ, для яких $K_{mode} = 1,4$, тоді викиди NO_x становитимуть:

$$m_{NO_x} = 0,030 \cdot 5 \cdot 1,4 = 0,210 \text{ г.}$$

Викиди CO:

$$m_{CO} = 0,500 \cdot 5 \cdot 1,4 = 3,500 \text{ г.}$$

Викиди HC:

$$m_{HC} = 0,050 \cdot 5 \cdot 1,4 = 0,350 \text{ г.}$$

Цей приклад показує, що навіть за однакової довжини ділянки екологічний результат може відрізнятись залежно від характеру роботи ДВЗ. Тому алгоритм енергоменеджменту повинен мінімізувати не лише сумарний час роботи двигуна, але й уникати частих короткочасних запусків, різких переходів між режимами та роботи ДВЗ у несприятливих зонах.

У складі гібридної силової установки ДВЗ може працювати в декількох характерних режимах. Перший режим відповідає прямому забезпеченню тягової потужності, коли двигун передає механічну енергію до трансмісії та ведучих коліс. Другий режим відповідає спільній роботі з електродвигуном, коли частина потужності покривається електричною машиною. У цьому випадку ДВЗ може працювати з нижчим або більш стабільним навантаженням. Третій режим відповідає заряджанню батареї від двигуна або генератора, коли частина потужності ДВЗ використовується не для руху, а для поповнення запасу електричної енергії. Кожен із цих режимів має різний вплив на витрату палива та викиди.

Для режиму, у якому ДВЗ забезпечує всю необхідну потужність на колесах, ефективна потужність двигуна з урахуванням ККД трансмісії може бути визначена як:

$$P_{ICE} = \frac{P_{wheel}}{\eta_{tr}}. \quad (2.19)$$

Якщо ж частина тягової потужності забезпечується електродвигуном, то потужність ДВЗ визначається як:

$$P_{ICE} = \frac{P_{wheel} - P_{EM,wheel}}{\eta_{tr}}, \quad (2.20)$$

де $P_{EM,wheel}$ – частина потужності на колесах, яка забезпечується електродвигуном, кВт.

У випадку, коли двигун внутрішнього згоряння одночасно забезпечує рух і заряджає тягову батарею, його потужність можна подати як:

$$P_{ICE} = \frac{P_{wheel}}{\eta_{tr}} + \frac{P_{chg}}{\eta_{gen}}, \quad (2.21)$$

де P_{chg} – потужність, що спрямовується на заряджання батареї, кВт; η_{gen} – ефективність перетворення механічної енергії ДВЗ в електричну енергію для заряджання батареї.

У розрахунках можна прийняти:

$$\eta_{gen} = 0,88.$$

Наприклад, якщо для руху автомобіля необхідно $P_{wheel} = 10$ кВт, а система одночасно заряджає батарею з потужністю $P_{chg} = 5$ кВт, тоді при $\eta_{tr} = 0,95$ і $\eta_{gen} = 0,88$:

$$P_{ICE} = \frac{10}{0,95} + \frac{5}{0,88} = 10,53 + 5,68 = 16,21 \text{ кВт.}$$

Цей приклад показує, що примусове зарядження батареї збільшує навантаження на ДВЗ. Якщо таке збільшення переводить двигун із неефективної зони малого навантаження до економічної зони, режим може бути доцільним. Якщо ж двигун уже працює з високим навантаженням, додаткове зарядження може підвищити витрату палива та викиди. Тому рішення про зарядження батареї від ДВЗ повинно прийматися з урахуванням не лише поточного SOC, але й ефективності двигуна в новій робочій точці.

2.4 Модель тягової батареї та обмеження за SOC

Тягова акумуляторна батарея у складі PHEV/HEV виконує функцію накопичувача електричної енергії, яка використовується для живлення електродвигуна, підтримки двигуна внутрішнього згорання під час пікових навантажень, руху в електричному режимі та приймання енергії під час рекуперативного гальмування [8]. На відміну від паливного бака, у якому запас енергії зменшується практично односторонньо, батарея в гібридному автомобілі працює у циклічному режимі: вона може як віддавати, так і приймати енергію залежно від режиму руху. Тому для енергоменеджменту важливим є не лише поточна потужність електроприводу, а й рівень заряду батареї, який визначає можливість подальшого використання електричної тяги.

Основним параметром, що характеризує енергетичний стан тягової батареї, є SOC. Цей показник визначає відносну кількість енергії, доступної в акумуляторній батареї, порівняно з її повною або робочою ємністю. У розрахунковій моделі SOC змінюється в межах від 0 до 1, де 0 відповідає повністю розрядженому стану, а 1 – повністю зарядженому. Проте в реальному автомобілі повний діапазон SOC не використовується, оскільки глибокий розряд і надмірний заряд прискорюють деградацію батареї, зменшують її ресурс і можуть створювати небезпечні режими роботи.

Для прийнятої моделі PHEV на основі Toyota Prius Prime SE 2024 повна ємність тягової батареї становить:

$$E_{bat} = 13,6 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

У розрахунках приймається допустимий робочий діапазон SOC:

$$SOC_{min} = 0,20,$$

$$SOC_{max} = 0,90.$$

Початковий рівень заряду для режиму руху після зовнішнього зарядження приймається:

$$SOC_0 = 0,85.$$

Перехід до режиму підтримання заряду в PHEV приймається при:

$$SOC_{cs} = 0,25\text{--}0,30.$$

Такий підхід дозволяє врахувати реальну логіку роботи плагін-гібридного автомобіля. На початку маршруту, коли SOC є достатньо високим, система може активно використовувати електричний режим. Після зниження SOC до нижнього

робочого діапазону автомобіль переходить до режиму, подібного до HEV, у якому основним завданням є підтримання заряду батареї в допустимих межах і забезпечення можливості рекуперації.

Зміна SOC під час розрядження батареї визначається енергією, яку батарея віддає електроприводу. Якщо електрична потужність, що відбирається від батареї, дорівнює P_{bat} , то зміна SOC за малий проміжок часу Δt може бути визначена за залежністю:

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) - \frac{P_{bat} \cdot \Delta t}{E_{bat}}, \quad (2.22)$$

де $SOC(t)$ – поточний рівень заряду батареї; $SOC(t + \Delta t)$ – рівень заряду після розрахункового кроку; P_{bat} – потужність, що відбирається від батареї, кВт; Δt – тривалість розрахункового кроку, год; E_{bat} – повна ємність батареї, кВт·год.

Якщо враховувати ККД батареї та електричного тракту, залежність можна уточнити:

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) - \frac{P_{EM} \cdot \Delta t}{E_{bat} \cdot \eta_{EM}}, \quad (2.23)$$

де P_{EM} – механічна потужність, яку повинен забезпечити електродвигун, кВт; η_{EM} – ККД електроприводу. У попередньому підрозділі для електричного тракту прийнято $\eta_{EM} = 0,90$, тому при однаковій механічній потужності фактична потужність, що відбирається від батареї, є більшою через втрати в інверторі, електродвигуні та передачі.

Під час рекуперативного гальмування батарея не віддає, а приймає енергію. У такому випадку SOC збільшується:

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) + \frac{P_{rec} \cdot \Delta t}{E_{bat}}, \quad (2.24)$$

де P_{rec} – потужність, яка фактично надходить до батареї під час рекуперації, кВт. З урахуванням ефективності рекуперації:

$$P_{rec} = |P_{wheel}| \cdot \eta_{rec}, \quad (2.25)$$

де $|P_{wheel}|$ – доступна гальмівна потужність на колесах, кВт; η_{rec} – сумарна ефективність рекуперації. У розрахунковій моделі прийнято:

$$\eta_{rec} = 0,60.$$

Наприклад, якщо автомобіль рухається в електричному режимі зі швидкістю 50 км/год, а потужність, що відбирається від батареї, становить $P_{bat} = 3,84$ кВт, то за 10 хвилин руху, тобто за $\Delta t = 0,167$ год, зміна SOC буде:

$$\Delta SOC = \frac{3,84 \cdot 0,167}{13,6} = 0,047.$$

Отже, рівень заряду батареї зменшиться приблизно на 4,7% повної ємності. Якщо початковий рівень заряду становив $SOC_0 = 0,85$, то після такого режиму:

$$SOC = 0,85 - 0,047 = 0,803.$$

Цей приклад показує, що за рівномірного міського руху споживання енергії батареї є помірним. Проте під час прискорень або руху на підйомі

електрична потужність може зростати у декілька разів, що призводить до значно швидшого зниження SOC.

Якщо під час гальмування доступна гальмівна потужність на колесах становить 20 кВт, а ефективність рекуперації дорівнює 0,60, то потужність, яка надходить до батареї, становить:

$$P_{rec} = 20 \cdot 0,60 = 12 \text{ кВт.}$$

Якщо така рекуперація триває 20 секунд, тобто $\Delta t = 0,00556$ год, приріст SOC дорівнює:

$$\Delta SOC = \frac{12 \cdot 0,00556}{13,6} = 0,0049.$$

Отже, за короткий епізод гальмування SOC збільшується приблизно на 0,49%. Це значення може здаватися невеликим, однак у міському циклі з частими гальмуваннями сумарний ефект рекуперації стає суттєвим і дозволяє зменшити загальне споживання палива.

Обмеження за SOC є важливою частиною алгоритму енергоменеджменту [9]. Якщо SOC наближається до верхньої межі, система повинна обмежувати заряджання батареї та рекуперацію, щоб уникнути перевищення допустимого рівня заряду. У такому випадку частина енергії гальмування може розсіюватися механічними гальмами. Якщо SOC наближається до нижньої межі, система повинна обмежувати електричний режим і електричну підтримку, щоб не допустити глибокого розряду батареї. За таких умов ДВЗ бере на себе більшу частину тягового навантаження, а за потреби може працювати в режимі підтримання заряду. Для алгоритму керування ці обмеження можна записати у вигляді:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}. \quad (2.26)$$

Крім обмеження за рівнем заряду, необхідно враховувати обмеження за потужністю батареї:

$$P_{bat,min} \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat,max}, \quad (2.27)$$

де $P_{bat,max}$ – максимально допустима потужність розряджання батареї; $P_{bat,min}$ – максимально допустима потужність заряджання, яка має від'ємний знак у прийнятій системі координат. У спрощеній моделі ці межі можна не деталізувати чисельно, оскільки вони залежать від температури батареї, її стану здоров'я, поточного SOC і налаштувань системи керування. Водночас їх наявність повинна враховуватися при виборі допустимих режимів роботи силової установки.

З позиції оптимізації енергоменеджменту SOC не можна розглядати лише як технічне обмеження. Він є одним із критеріїв керування, оскільки неправильне використання запасу електричної енергії може погіршити загальну ефективність маршруту. Надто швидке розряджання батареї на початку руху може змусити автомобіль надалі працювати переважно від ДВЗ. Надто обережне

використання батареї, навпаки, зменшує частку електричного руху й не дозволяє повністю реалізувати потенціал PHEV. Тому оптимальна стратегія повинна підтримувати баланс між поточним використанням електричної енергії та збереженням достатнього заряду для наступних режимів.

Для врахування цього фактора в цільовій функції доцільно використовувати штраф за відхилення SOC від бажаного значення:

$$J_{SOC} = w_{SOC} \cdot |SOC(t) - SOC_{ref}|, \quad (2.28)$$

де J_{SOC} – складова цільової функції, пов'язана зі станом батареї; w_{SOC} – ваговий коефіцієнт; SOC_{ref} – бажаний або опорний рівень заряду. Для HEV значення SOC_{ref} зазвичай вибирається в середній частині робочого діапазону, щоб батарея могла як віддавати, так і приймати енергію. Для PHEV SOC_{ref} може змінюватися залежно від режиму: у режимі розрядження заряду допускається поступове зменшення SOC, а в режимі підтримання заряду система прагне стабілізувати його поблизу нижнього робочого рівня.

2.5 Формування багатокритеріальної цільової функції оптимізації

Оптимізація енергоменеджменту PHEV/HEV не може зводитися лише до вибору режиму з найменшою миттєвою витратою палива. Гібридна силова установка має декілька взаємопов'язаних джерел і накопичувачів енергії, тому рішення, яке є вигідним у поточний момент часу, може призвести до погіршення ефективності на наступних ділянках руху [7]. З іншого боку, надмірне збереження заряду батареї також не є оптимальним. Якщо система керування занадто часто використовує ДВЗ навіть тоді, коли електричний режим є технічно можливим і енергетично доцільним, потенціал PHEV/HEV не реалізується повною мірою. У такому випадку збільшується тривалість роботи двигуна внутрішнього згорання, зростають витрати палива та локальні викиди. Тому задача оптимізації полягає у пошуку такого режиму роботи силової установки, який забезпечує компроміс між паливною економічністю, екологічністю та підтриманням допустимого стану тягової батареї.

Для цього в роботі формується багатокритеріальна цільова функція, яка об'єднує основні показники ефективності роботи PHEV/HEV. До таких показників належать витрата палива, викиди CO₂, умовний рівень шкідливих компонентів відпрацьованих газів та відхилення SOC від бажаного рівня. У загальному вигляді цільову функцію для одного розрахункового інтервалу можна записати як:

$$J(t) = w_f \cdot F_{fuel}(t) + w_{CO_2} \cdot E_{CO_2}(t) + w_{em} \cdot E_{em}(t) + w_{SOC} \cdot \Delta SOC(t), \quad (2.29)$$

де $J(t)$ – значення інтегрального критерію ефективності на розрахунковому кроці; $F_{fuel}(t)$ – нормований показник витрати палива; $E_{CO_2}(t)$ – нормований показник викидів CO₂; $E_{em}(t)$ – нормований показник шкідливих викидів NO_x,

CO та HC; $\Delta SOC(t)$ – нормоване відхилення рівня заряду батареї від бажаного значення; w_f , w_{CO_2} , w_{em} , w_{SOC} – вагові коефіцієнти відповідних критеріїв.

Для усього їздового циклу або маршруту цільова функція визначається як сума значень критерію на всіх розрахункових кроках:

$$J_{\Sigma} = \sum_{t=1}^N J(t), \quad (2.30)$$

або в розгорнутому вигляді:

$$J_{\Sigma} = \sum_{t=1}^N (w_f \cdot F_{fuel}(t) + w_{CO_2} \cdot E_{CO_2}(t) + w_{em} \cdot E_{em}(t) + w_{SOC} \cdot \Delta SOC(t)), \quad (2.31)$$

де N – кількість розрахункових кроків на маршруті або в їздовому циклі. Оптимальним вважається такий режим або така послідовність режимів роботи силової установки, для яких значення J_{Σ} є мінімальним:

$$J_{\Sigma} \rightarrow \min. \quad (2.32)$$

Оскільки окремі складові цільової функції мають різні одиниці вимірювання, перед об'єднанням їх необхідно нормувати. Витрата палива може вимірюватися в літрах, викиди CO₂ – у кілограмах або грамах, шкідливі компоненти – у грамах, а відхилення SOC є безрозмірною величиною. Без нормування показники з більшими числовими значеннями штучно домінували б у цільовій функції. Тому кожний критерій доцільно подати у відносному вигляді.

Нормований показник витрати палива визначається як:

$$F_{fuel}(t) = \frac{V_{fuel}(t)}{V_{fuel,ref}}, \quad (2.33)$$

де $V_{fuel}(t)$ – витрата палива на поточному розрахунковому кроці; $V_{fuel,ref}$ – базове або максимально допустиме значення витрати палива для порівняння.

Нормований показник викидів CO₂ визначається за залежністю:

$$E_{CO_2}(t) = \frac{m_{CO_2}(t)}{m_{CO_2,ref}}, \quad (2.34)$$

де $m_{CO_2}(t)$ – маса викидів CO₂ на поточному кроці; $m_{CO_2,ref}$ – базове значення викидів CO₂.

Шкідливі компоненти відпрацьованих газів доцільно об'єднати в один узагальнений екологічний показник:

$$E_{em}(t) = k_{NO_x} \cdot \frac{m_{NO_x}(t)}{m_{NO_x,ref}} + k_{CO} \cdot \frac{m_{CO}(t)}{m_{CO,ref}} + k_{HC} \cdot \frac{m_{HC}(t)}{m_{HC,ref}}, \quad (2.35)$$

де $m_{NO_x}(t)$, $m_{CO}(t)$, $m_{HC}(t)$ – маси відповідних шкідливих компонентів на поточному кроці; $m_{NO_x,ref}$, $m_{CO,ref}$, $m_{HC,ref}$ – базові значення для нормування; k_{NO_x} , k_{CO} , k_{HC} – коефіцієнти важливості окремих компонентів в екологічному критерії.

Для спрощення розрахункової моделі можна прийняти однакову важливість компонентів:

$$k_{NO_x} = k_{CO} = k_{HC} = \frac{1}{3}.$$

У такому випадку екологічний показник відображає середнє нормоване значення шкідливих викидів.

Складова, пов'язана зі станом батареї, визначається через відхилення поточного SOC від бажаного рівня:

$$\Delta SOC(t) = \frac{|SOC(t) - SOC_{ref}|}{SOC_{max} - SOC_{min}}, \quad (2.36)$$

де $SOC(t)$ – поточний рівень заряду батареї; SOC_{ref} – бажаний або опорний рівень SOC; SOC_{max} і SOC_{min} – верхня та нижня межі допустимого робочого діапазону.

Для PHEV значення SOC_{ref} може залежати від режиму роботи. У режимі розряджання заряду бажаним є поступове зменшення SOC протягом маршруту, тому надто жорстке утримання SOC біля початкового значення не є доцільним. У режимі підтримання заряду, навпаки, система повинна стабілізувати SOC поблизу нижнього робочого рівня. У спрощеній розрахунковій моделі для режиму підтримання заряду можна прийняти:

$$SOC_{ref} = 0,30.$$

Окрім основних складових цільової функції, необхідно враховувати технічні обмеження силової установки. Вони не обов'язково входять до цільової функції як окремі доданки, але визначають допустимість того чи іншого режиму. До таких обмежень належать межі SOC, максимальна потужність ДВЗ, максимальна потужність електродвигуна, допустима потужність заряджання та розряджання батареї, а також умови рекуперативного гальмування. Основні обмеження можна записати так:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max},$$

$$0 \leq P_{ICE}(t) \leq P_{ICE,max},$$

$$0 \leq P_{EM}(t) \leq P_{EM,max},$$

$$P_{bat,min} \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat,max}.$$

Якщо певний режим порушує хоча б одне з цих обмежень, він не повинен розглядатися як допустимий, навіть якщо його інтегральний критерій має низьке значення.

Вибір вагових коефіцієнтів визначає пріоритети стратегії енергоменеджменту. Якщо головним завданням є мінімізація витрати палива, найбільше значення надається коефіцієнту w_f . Якщо потрібно підсилити екологічну спрямованість алгоритму, збільшуються коефіцієнти w_{CO_2} та w_{em} . Якщо важливо підтримувати заряд батареї в заданому діапазоні, збільшується w_{SOC} . Для базового варіанта оптимізації в роботі доцільно прийняти такі значення ваг:

$$w_f = 0,40,$$

$$w_{CO_2} = 0,25,$$

$$w_{em} = 0,20,$$

$$w_{SOC} = 0,15.$$

Сума вагових коефіцієнтів повинна дорівнювати одиниці:

$$w_f + w_{CO_2} + w_{em} + w_{SOC} = 1.$$

Прийнятий набір коефіцієнтів відображає те, що основним критерієм для PHEV/HEV залишається паливна економічність, однак екологічні показники також мають суттєву вагу. Складова SOC має дещо меншу вагу, але вона є необхідною для запобігання нераціональному розряджанню батареї та забезпечення стабільної роботи силової установки.

Для практичного використання цільової функції алгоритм енергоменеджменту повинен виконувати порівняння декількох допустимих режимів роботи силової установки. Наприклад, для поточного запиту тягової потужності можуть бути доступні три варіанти: рух на електротязі, рух від ДВЗ або гібридний режим. Для кожного варіанта розраховуються витрата палива, викиди, зміна SOC і відповідне значення $J(t)$. Після цього система обирає режим із найменшим значенням інтегрального критерію.

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Розробка структурної схеми системи оптимізованого енергоменеджменту PHEV/HEV

Оптимізована система енергоменеджменту PHEV/HEV повинна забезпечувати узгоджену роботу двигуна внутрішнього згорання, електродвигуна, тягової батареї, інвертора, генератора та трансмісії. Її основним завданням є не просте перемикання між електричним і паливним режимами, а вибір такого варіанта розподілу потужності, за якого забезпечується мінімальне значення інтегрального критерію ефективності. Цей критерій враховує витрату палива, викиди CO₂, умовний рівень шкідливих компонентів відпрацьованих газів і стан заряду батареї.

У загальному вигляді структурна схема системи оптимізованого енергоменеджменту складається з декількох взаємопов'язаних блоків [10]. Першим є блок вхідних даних, який отримує інформацію про швидкість автомобіля, прискорення, положення педалі акселератора, поточний запит потужності, рівень SOC, температуру батареї, режим роботи ДВЗ і доступну потужність електроприводу. Другим елементом є блок визначення тягової потреби. Він використовує математичну модель руху автомобіля і розраховує необхідну силу тяги та потужність на колесах. На цьому етапі враховуються опір коченню, аеродинамічний опір, сила інерції та, за потреби, опір підйому. Результатом роботи цього блоку є значення P_{wheel} , яке показує, яку потужність необхідно забезпечити на колесах для виконання поточного режиму руху.

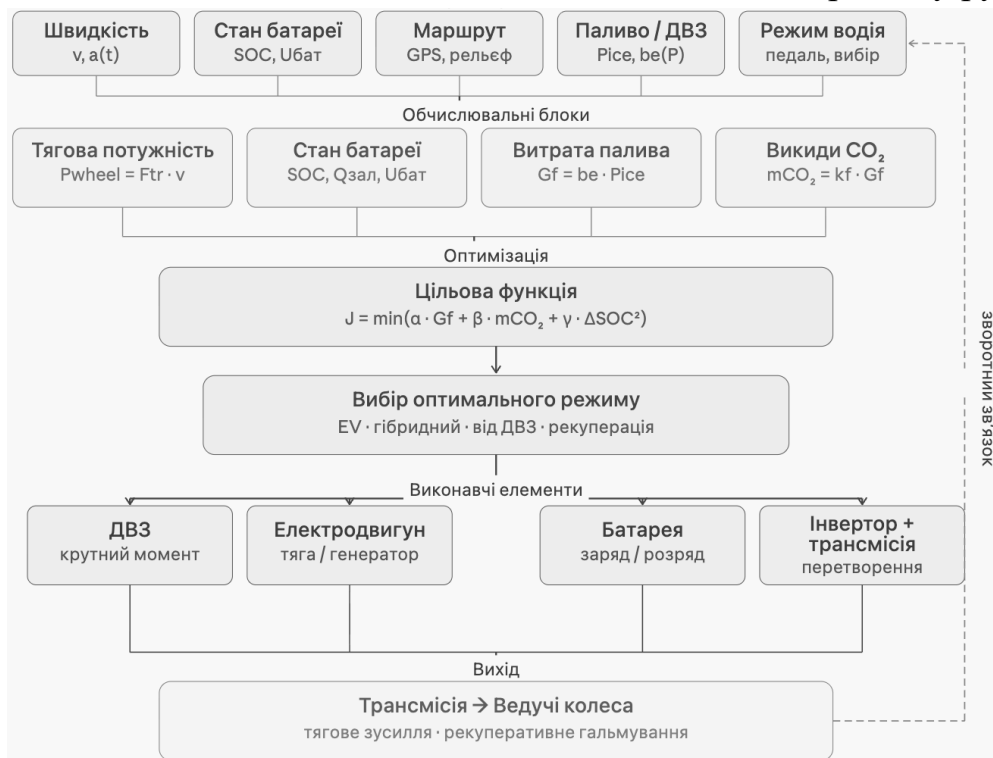


Рисунок 3.1. Структурна схема системи оптимізованого енергоменеджменту PHEV/HEV

Наступним елементом структурної схеми є блок оцінки стану тягової батареї. Його основним вхідним параметром є поточний рівень SOC. Крім того, у реальній системі враховуються температура батареї, допустимі струми заряду й розряду, стан батареї та обмеження системи керування. Головним показником є SOC, який визначає доступність електричного режиму, можливість електричної підтримки ДВЗ і здатність батареї приймати енергію під час рекуперації. Якщо SOC знаходиться поблизу верхньої межі, система повинна обмежувати рекуперацію та заряджання. Якщо SOC наближається до нижньої межі, система повинна зменшувати або забороняти електричний режим і переходити до роботи з активнішим використанням ДВЗ.

Важливим блоком системи є блок формування допустимих режимів роботи силової установки. На основі поточного значення P_{wheel} , рівня SOC і технічних обмежень силової установки він визначає, які режими можуть бути реалізовані в поточний момент. До таких режимів належать електричний рух, рух від ДВЗ, гібридний режим, заряджання батареї від ДВЗ, рекуперативне гальмування та режим захисту за низького SOC. Якщо певний режим порушує технічні обмеження, він вилучається з подальшого порівняння.

Після визначення допустимих режимів працює розрахунково-оцінювальний блок. Для кожного можливого режиму він визначає очікувану потужність ДВЗ, потужність електродвигуна, зміну SOC, витрату палива та викиди. Якщо розглядається електричний режим, потужність ДВЗ дорівнює нулю, а основним наслідком є зниження SOC. Якщо розглядається режим руху від ДВЗ, витрата палива та викиди визначаються відповідно до потужності двигуна і прийнятої питомої витрати палива. У гібридному режимі частина потужності забезпечується електродвигуном, тому навантаження на ДВЗ може зменшуватися або переводитися в більш ефективну зону.

Центральним елементом структурної схеми є блок багатокритеріальної цільової функції [10]. Його завдання полягає у кількісному порівнянні всіх допустимих режимів. Для кожного режиму обчислюється інтегральний критерій за виразом (2.29). Режим, для якого значення $J(t)$ є мінімальним, вважається оптимальним для поточних умов руху. Такий підхід дозволяє уникнути жорсткого перемикавання режимів лише за одним параметром, наприклад за SOC або швидкістю автомобіля. Натомість система враховує комплексний вплив кожного рішення на паливну економічність, екологічність і стан батареї.

Після вибору оптимального режиму команда передається до блоку керування виконавчими елементами. Цей блок формує керуючі сигнали для двигуна внутрішнього згорання, електродвигуна, інвертора, генератора, батареї та трансмісії. Для ДВЗ визначається необхідна потужність або момент, для електродвигуна – тягова або генераторна потужність, для батареї – режим заряду чи розряду. У реальному автомобілі ці команди додатково проходять через

низькорівневі контури керування, які забезпечують стабілізацію моменту, обмеження струмів, температурний захист і безпечну роботу високовольтної системи.

Окреме місце в структурній схемі займає зворотний зв'язок. Після реалізації обраного режиму змінюються швидкість автомобіля, потужність на колесах, стан батареї, витрата палива та режим роботи ДВЗ. Ці нові значення знову надходять до блоку вхідних даних, і цикл прийняття рішення повторюється. Таким чином, система енергоменеджменту працює дискретно або квазібезперервно, постійно оновлюючи керуюче рішення відповідно до поточного стану автомобіля.

Особливістю запропонованої структурної схеми є те, що вона не прив'язана до одного жорсткого правила перемикання режимів. У традиційних правило-орієнтованих системах електричний режим може вмикатися, наприклад, лише за умови, що швидкість нижча за певне значення, а SOC вищий за встановлений поріг. Така логіка є простою, але вона не завжди забезпечує найкращий результат. У запропонованій схемі кожний допустимий режим оцінюється кількісно. Це дозволяє, наприклад, обрати гібридний режим замість повністю електричного, якщо збереження частини заряду батареї є вигіднішим для подальшого руху. Так само система може обрати роботу ДВЗ у певному діапазоні потужності, якщо це дозволяє уникнути неефективної роботи двигуна на малому навантаженні.

Запропонована структурна схема також дозволяє врахувати різницю між режимами PHEV і HEV. Якщо батарея має високий рівень заряду після зовнішнього заряджання, система може частіше обирати електричний режим, особливо за низької або середньої потреби в потужності. Якщо SOC знижується до рівня підтримання заряду, логіка роботи наближається до HEV: електродвигун використовується переважно для короткочасної підтримки ДВЗ, рекуперації та згладжування перехідних режимів. Таким чином, одна й та сама структура може застосовуватися для PHEV у режимі розряджання заряду, PHEV у режимі підтримання заряду та звичайного HEV.

З погляду конструктивної реалізації система оптимізованого енергоменеджменту може бути реалізована як програмний модуль у складі електронного блоку керування силовою установкою [11]. Цей модуль не замінює базові системи керування двигуном, інвертором або батареєю, а працює на вищому рівні. Він визначає бажаний режим роботи та необхідний розподіл потужності, після чого низькорівневі контролери забезпечують виконання команд з урахуванням швидкодії, безпеки та фізичних обмежень компонентів.

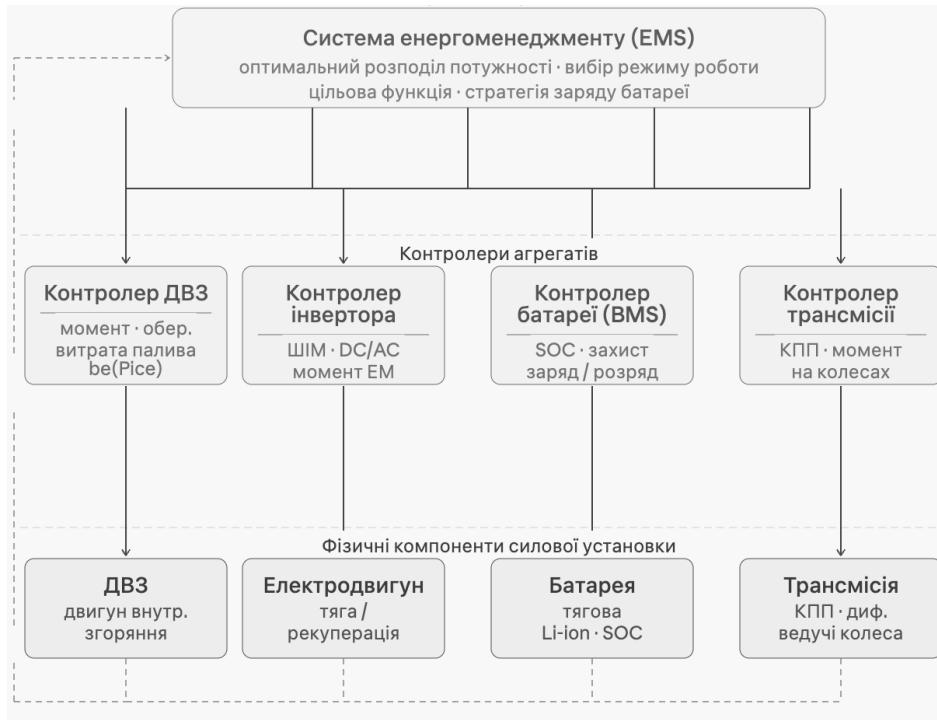


Рисунок 3.2. Ієрархія керування силовою установкою PHEV/HEV.

Для забезпечення коректної роботи запропонованої системи необхідно, щоб усі вхідні параметри надходили з достатньою точністю та оновлювалися з потрібною частотою. Швидкість автомобіля та прискорення можуть визначатися за даними датчиків руху або системи ABS/ESP. Рівень SOC і допустимі потужності заряду та розряду надаються системою керування батареєю. Поточний режим ДВЗ, його доступна потужність і температурний стан визначаються блоком керування двигуном. Запит тягової потужності формується на основі положення педалі акселератора, швидкості та динамічних умов руху.

У практичній реалізації важливо також передбачити захисні умови, які мають вищий пріоритет за оптимізацію. Якщо температура батареї перевищує допустимий рівень, система повинна обмежити потужність електричного приводу незалежно від значення цільової функції. Якщо SOC досягає нижньої межі, електричний режим повинен бути заборонений. Якщо запитана потужність перевищує можливості електродвигуна, система повинна залучити ДВЗ. Отже, оптимізаційний блок працює тільки в межах допустимої області, визначеної технічними та безпековими обмеженнями.

3.2 Розробка алгоритму вибору режимів роботи силової установки

Алгоритм вибору режимів роботи силової установки PHEV/HEV є практичною реалізацією структурної схеми енергоменеджменту, сформованої у попередньому підрозділі. Його завдання полягає у тому, щоб на основі поточного стану автомобіля, запиту тягової потужності, рівня заряду тягової батареї та обмежень силової установки визначити найбільш доцільний режим роботи [12]. На відміну від простої порогової логіки, запропонований алгоритм

повинен не лише перевіряти умови вмикання ДВЗ або електродвигуна, а й порівнювати можливі режими за інтегральним критерієм ефективності.

Вхідними параметрами алгоритму є швидкість автомобіля v , прискорення a , необхідна потужність на колесах P_{wheel} , поточний рівень заряду батареї SOC , межі допустимого заряду SOC_{min} і SOC_{max} , максимальна потужність ДВЗ $P_{ICE,max}$, максимальна потужність електродвигуна $P_{EM,max}$, а також ознака режиму руху автомобіля. На основі цих параметрів система спочатку визначає, чи автомобіль потребує тягової потужності, чи перебуває в режимі гальмування. Якщо $P_{wheel} > 0$, автомобілю необхідно забезпечити тягу. Якщо $P_{wheel} < 0$, доступна енергія гальмування, яку доцільно частково повернути до батареї через рекуперацію.

Першим етапом роботи алгоритму є перевірка стану тягової батареї. Якщо рівень SOC нижчий або близький до мінімально допустимого значення, електричний режим обмежується або повністю забороняється. У такому випадку автомобіль переходить до режиму підтримання заряду, де основну роль відіграє двигун внутрішнього згорання, а електрична машина використовується лише для короткочасної підтримки або рекуперації. Якщо SOC знаходиться в робочому діапазоні, система може розглядати електричний, гібридний і паливний режими як потенційно допустимі. Якщо SOC близький до верхньої межі, алгоритм обмежує заряджання батареї та рекуперацію.

Другим етапом є формування набору допустимих режимів. Для прийнятої розрахункової схеми доцільно розглядати шість основних режимів: електричний рух, рух від ДВЗ, гібридний рух, заряджання батареї від ДВЗ, рекуперативне гальмування та режим захисту за низького SOC . Електричний режим є ефективним за низької або помірної потужності та достатнього SOC . Рух від ДВЗ доцільний за сталої швидкості та середнього навантаження, коли двигун може працювати в економічній зоні. Гібридний режим використовується під час прискорення, руху на підйомі або за потреби обмежити пікове навантаження на ДВЗ. Заряджання батареї від ДВЗ застосовується переважно тоді, коли SOC наближається до нижньої межі або коли ДВЗ може працювати в ефективній зоні з резервом потужності. Рекуперація активується під час гальмування, якщо батарея здатна приймати енергію.

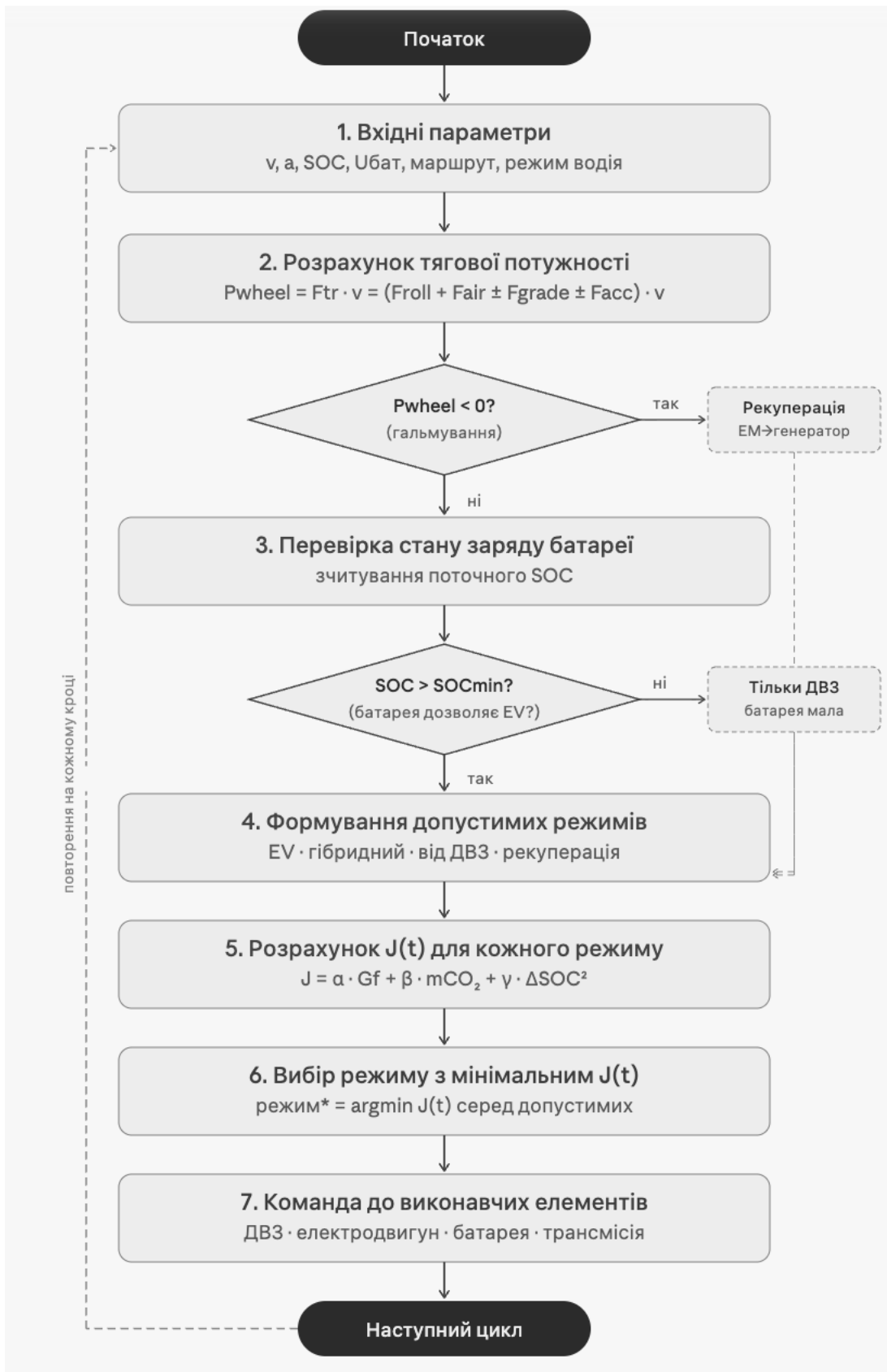


Рисунок 3.3. Блок-схема алгоритму вибору режиму роботи силової установки PHEV/NEV

У режимі електричного руху двигун внутрішнього згорання вимкнений, а вся необхідна тягова потужність забезпечується електродвигуном. Такий режим може бути обраний, якщо виконуються умови:

$$\begin{aligned} P_{wheel} &> 0, \\ P_{wheel} &\leq P_{EM,max}, \\ SOC &> SOC_{min}. \end{aligned}$$

Для PHEV цей режим є найбільш бажаним у міському циклі, за невеликих швидкостей і помірного навантаження. Його перевагою є відсутність локальної витрати палива та локальних викидів. Водночас електричний режим не повинен використовуватися неконтрольовано, оскільки надмірне розрядження батареї може погіршити ефективність на наступних ділянках маршруту.

У режимі руху від ДВЗ тягова потужність забезпечується бензиновим двигуном. Цей режим доцільний тоді, коли потрібна потужність перебуває в зоні ефективної роботи двигуна, а використання батареї не дає значної переваги. У спрощеному вигляді умову доцільності цього режиму можна записати так:

$$20 \leq P_{ICE} \leq 70 \text{ кВт.}$$

Саме цей діапазон у попередніх розрахунках прийнято як економічну зону роботи ДВЗ. Якщо потрібна потужність є дуже малою, робота ДВЗ стає менш ефективною, тому за достатнього SOC перевагу слід надавати електричному режиму. Якщо ж потрібна потужність висока, доцільним може бути гібридний режим із залученням електродвигуна.

Гібридний режим передбачає спільну роботу ДВЗ і електродвигуна. У цьому випадку сумарна потужність на колесах формується двома джерелами:

$$P_{wheel} = P_{ICE,wheel} + P_{EM,wheel}. \quad (3.1)$$

Завдання алгоритму полягає у виборі такого співвідношення між цими складовими, за якого ДВЗ не переходить у неефективну зону, а батарея не розряджається надмірно. У спрощеній реалізації можна прийняти, що електродвигун покриває частину пікового навантаження, коли потрібна потужність перевищує економічний діапазон ДВЗ. Наприклад, якщо необхідна потужність на виході силової установки становить 85 кВт, система може обмежити потужність ДВЗ на рівні 60–70 кВт, а решту забезпечити електродвигуном.

Режим заряджання батареї від ДВЗ використовується обмежено, оскільки він пов'язаний із додатковою витратою палива [13]. Його доцільність виникає тоді, коли рівень SOC низький, а двигун може працювати в економічному діапазоні з частковим резервом потужності. У такому випадку частина потужності ДВЗ спрямовується на рух автомобіля, а частина – на заряджання батареї:

$$P_{ICE} = \frac{P_{wheel}}{\eta_{tr}} + \frac{P_{chg}}{\eta_{gen}}. \quad (3.2)$$

Цей режим не повинен використовуватися, якщо SOC близький до верхньої межі або якщо додаткове заряджання переводить ДВЗ у зону високої питомої витрати палива. Тому алгоритм повинен перевіряти не лише потребу в заряджанні, а й наслідки цього режиму для інтегрального критерію.

Рекуперативне гальмування активується тоді, коли потужність на колесах має від'ємне значення:

$$P_{wheel} < 0.$$

У такому випадку електродвигун переходить у генераторний режим, а частина енергії гальмування надходить до батареї:

$$P_{rec} = |P_{wheel}| \cdot \eta_{rec}. \quad (3.3)$$

Рекуперація можлива лише тоді, коли $SOC < SOC_{max}$. Якщо батарея майже повністю заряджена, система обмежує рекуперативну потужність, а частина гальмування реалізується механічною гальмівною системою. Для алгоритму енергоменеджменту це означає, що батарея повинна мати певний резерв ємності для приймання енергії, особливо в міському циклі з частими гальмуваннями.

Окремим захисним режимом є режим низького SOC. Він активується, коли рівень заряду батареї досягає нижньої межі $SOC \leq SOC_{min}$. У цьому режимі електричний рух забороняється, а електродвигун використовується лише в обмежених випадках, наприклад для короткочасної підтримки або стабілізації роботи силової установки. Основне навантаження бере на себе ДВЗ. Якщо умови руху дозволяють, система може перейти до підтримання або поступового відновлення SOC.

Після формування допустимих режимів алгоритм виконує їх оцінювання за цільовою функцією. Для кожного режиму визначаються нормовані значення витрати палива, викидів CO₂, шкідливих викидів і відхилення SOC. Далі розраховується інтегральний критерій (2.29). Оптимальним обирається режим, для якого $J(t) = \min$. Якщо два режими мають близькі значення критерію, перевагу доцільно надавати режиму з меншою кількістю перемикань ДВЗ. Це дозволяє уникати частого запуску та зупинки двигуна, зменшувати перехідні викиди й покращувати комфорт руху. Для цього в алгоритм може бути введена додаткова умова гістерезису або штраф за перемикання режиму. У межах цієї роботи цей елемент можна враховувати якісно, не ускладнюючи основну цільову функцію.

У спрощеному вигляді послідовність роботи алгоритму можна подати так: система отримує вхідні параметри руху, розраховує P_{wheel} , перевіряє знак потужності, визначає стан SOC, формує перелік допустимих режимів, розраховує для них значення цільової функції, обирає режим із найменшим критерієм і передає команди виконавчим елементам. Після реалізації режиму параметри автомобіля оновлюються, і цикл повторюється.

3.3 Реалізація критеріального блоку мінімізації витрати палива та викидів

Критеріальний блок є центральною частиною запропонованої системи оптимізованого енергоменеджменту PHEV/HEV. Його призначення полягає в

тому, щоб для кожного допустимого режиму роботи силової установки виконати кількісне оцінювання паливних, екологічних та енергетичних наслідків, а потім обрати режим із найменшим значенням інтегрального критерію.

У загальному випадку на кожному розрахунковому кроці система може розглядати декілька допустимих режимів: електричний рух, рух від двигуна внутрішнього згорання, гібридний режим, заряджання батареї від ДВЗ або рекуперативне гальмування. Для кожного з цих режимів визначається прогнозоване значення витрати палива, викидів CO_2 , умовного показника шкідливих викидів і зміни рівня заряду батареї. Далі ці показники нормуються та підставляються у багатокритеріальну функцію (2.29). Тут $J(t)$ є інтегральним показником ефективності режиму на поточному кроці. Чим менше значення цього показника, тим раціональнішим є відповідний режим з точки зору прийнятих критеріїв. Вагові коефіцієнти w_f , w_{CO_2} , w_{em} та w_{SOC} визначають відносну важливість паливної економічності, парникових викидів, токсичних компонентів відпрацьованих газів і стану тягової батареї.

Першим етапом роботи критеріального блоку є визначення допустимих режимів. Якщо потужність на колесах є додатною, система аналізує тягові режими: електричний, паливний і гібридний. Якщо $P_{\text{wheel}} < 0$, основним режимом стає рекуперативне гальмування. Якщо SOC наближається до нижньої межі, електричний режим вилучається з переліку допустимих. Якщо SOC близький до верхньої межі, обмежується режим заряджання та рекуперація. Такий попередній відбір потрібний для того, щоб у цільову функцію не потрапляли фізично або технічно недопустимі варіанти.

Другим етапом є розрахунок показників для кожного допустимого режиму. Для електричного режиму витрата палива та локальні викиди дорівнюють нулю, але зростає складова, пов'язана зі зменшенням SOC. Для руху від ДВЗ розраховується потужність двигуна, питома витрата палива, об'єм спаленого бензину та відповідні викиди. Для гібридного режиму потужність розподіляється між ДВЗ і електродвигуном, тому витрата палива зменшується порівняно з режимом руху лише від ДВЗ, але одночасно відбувається часткове розряджання батареї. Для режиму заряджання батареї від ДВЗ витрата палива може збільшуватися, проте SOC зростає або стабілізується.

Третім етапом є нормування критеріїв. Оскільки витрата палива, маса CO_2 , шкідливі викиди та SOC мають різну фізичну природу, їх неможливо безпосередньо додавати в одній функції без приведення до безрозмірного вигляду. Для цього кожний показник ділиться на базове або максимальне допустиме значення. Таке нормування дозволяє привести всі складові до порівнюваного масштабу. Після цього вагові коефіцієнти визначають, який із критеріїв має більший вплив на остаточне рішення алгоритму.

Для демонстрації роботи критеріального блоку розглянемо умовну ситуацію, коли автомобілю необхідно забезпечити помірну тягову потужність, а рівень SOC становить 0,55. У такому випадку технічно допустимими можуть бути три режими: електричний рух, рух від ДВЗ і гібридний режим. Після розрахунку та нормування показників за виразами (2.33-2.36) отримуємо значення, наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.1. Приклад роботи критеріального блоку за $SOC = 0,55$

Режим	F_{fuel}	E_{CO_2}	E_{em}	ΔSOC	$J(t)$
Електричний рух	0,00	0,00	0,00	0,45	0,068
Рух від ДВЗ	0,65	0,65	0,60	0,15	0,565
Гібридний рух	0,38	0,38	0,34	0,25	0,352

У цьому прикладі найменше значення інтегрального критерію має електричний режим. Це пояснюється тим, що при достатньому SOC він не створює локальних витрат палива та викидів. Проте такий вибір буде доцільним лише в тому випадку, якщо потужність електродвигуна достатня, а подальше зменшення SOC не створює загрози для наступних режимів руху.

Якщо аналогічний запит потужності виникає при нижчому рівні SOC, наприклад $SOC = 0,27$, електричний режим може стати менш бажаним або бути обмеженим. У такому випадку складова ΔSOC зростає, а алгоритм може обрати гібридний режим або рух від ДВЗ.

Таблиця 3.2. Приклад роботи критеріального блоку за $SOC = 0,27$

Режим	F_{fuel}	E_{CO_2}	E_{em}	ΔSOC	$J(t)$
Електричний рух	0,00	0,00	0,00	0,95	0,143
Рух від ДВЗ	0,65	0,65	0,60	0,10	0,558
Гібридний рух	0,38	0,38	0,34	0,45	0,382

Формально електричний режим у таблиці 3.2 все ще має менше значення $J(t)$, однак при $SOC = 0,27$ він перебуває близько до межі переходу в режим підтримання заряду. Тому в алгоритмі повинна діяти додаткова умова допустимості: якщо SOC нижчий за SOC_{CS} або наближається до SOC_{min} , електричний режим не розглядається як повноцінно допустимий. У цьому випадку оптимальним серед дозволених режимів може стати гібридний режим, оскільки він забезпечує меншу витрату палива та викиди порівняно з рухом лише від ДВЗ, але не викликає такого інтенсивного розрядження батареї, як повністю електричний рух. Цей приклад показує, що критеріальний блок повинен працювати разом із блоком технічних обмежень. Цільова функція визначає найкращий режим серед допустимих, але не повинна дозволяти вибір режиму, який порушує безпечні або експлуатаційні межі роботи батареї, ДВЗ чи електроприводу.

Практична реалізація критеріального блоку може бути подана у вигляді послідовності обчислень. Спочатку система отримує перелік допустимих режимів. Далі для кожного режиму розраховуються V_{fuel} , m_{CO_2} , m_{NO_x} , m_{CO} , m_{HC} і ΔSOC . Після нормування цих величин обчислюється значення $J(t)$. Режим із найменшим значенням інтегрального критерію передається до блоку керування виконавчими елементами.

Таблиця 3.3. Послідовність реалізації критеріального блоку

Етап	Дія	Результат
1	Отримання допустимих режимів	Формується перелік варіантів керування
2	Розрахунок потужності ДВЗ та електродвигуна	Визначається енергетичний розподіл
3	Розрахунок витрати палива	Отримується V_{fuel}
4	Розрахунок CO_2	Отримується m_{CO_2}
5	Розрахунок NO_x , CO , HC	Отримується E_{em}
6	Розрахунок зміни SOC	Оцінюється вплив на батарею
7	Нормування критеріїв	Усі показники приводяться до безрозмірного вигляду
8	Обчислення $J(t)$	Кількісна оцінка кожного режиму
9	Вибір мінімального $J(t)$	Визначається оптимальний режим

Для зменшення кількості перемикачів між режимами доцільно передбачити додатковий стабілізаційний елемент. Якщо два режими мають близькі значення $J(t)$, система може залишити попередній режим роботи, щоб уникнути частих запусків і зупинок ДВЗ. Це можна реалізувати через поріг чутливості:

$$|J_1 - J_2| < \varepsilon, \quad (3.4)$$

де ε – мале порогове значення. Якщо різниця між двома режимами менша за цей поріг, алгоритм не виконує перемикачів без додаткової потреби. Такий підхід покращує плавність роботи силової установки та зменшує перехідні втрати.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

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

Проведення досліджень електромобілів, гібридних і плагін-гібридних транспортних засобів пов'язане з необхідністю дотримання вимог охорони праці, оскільки такі автомобілі містять високовольтні електричні системи, тягові акумуляторні батареї, силову електроніку, електродвигуни та допоміжне обладнання. На відміну від традиційних автомобілів із двигуном внутрішнього згоряння, електрифіковані транспортні засоби мають додаткові небезпеки, пов'язані з ураженням електричним струмом, коротким замиканням, перегріванням батареї, виникненням електричної дуги, пошкодженням ізоляції та можливим займанням високовольтних компонентів. Тому організація дослідницьких, діагностичних і експериментальних робіт з такими автомобілями повинна базуватися на системному управлінні охороною праці.

Основною метою управління охороною праці під час досліджень електромобіля є створення безпечних умов роботи для персоналу, запобігання виробничому травматизму, недопущення аварійних ситуацій та забезпечення контролю за технічним станом високовольтної системи. У процесі досліджень можуть виконуватися вимірювання електричних параметрів, аналіз роботи тягової батареї, перевірка алгоритмів енергоменеджменту, дослідження режимів заряду і розряду, діагностика електроприводу та силової електроніки. Кожен із цих видів робіт повинен проводитися з урахуванням потенційних небезпек і відповідних профілактичних заходів.

До основних принципів управління охороною праці належать пріоритет збереження життя і здоров'я працівників, попередження небезпек до початку виконання робіт, систематичний контроль технічного стану обладнання, навчання персоналу безпечним методам роботи та відповідальність виконавців за дотримання встановлених вимог [14]. Під час роботи з електромобілем особливе значення має принцип попередньої ідентифікації ризиків. Перед початком дослідження необхідно визначити, які вузли автомобіля перебувають під високою напругою, які операції можуть спричинити контакт із струмопровідними частинами, чи є ознаки пошкодження батареї, кабелів, роз'ємів або корпусів силової електроніки.

Високовольтна система електрифікованого транспортного засобу може працювати з напругою в сотні вольт, тому будь-яке втручання в її роботу потребує спеціальної підготовки. До виконання таких робіт повинні допускатися лише працівники, які пройшли відповідне навчання, інструктаж з охорони праці та мають навички безпечного поводження з електричними установками. Особи, які не мають необхідної кваліфікації, не повинні виконувати операції з

від'єднання високовольтних кабелів, перевірки батарейних модулів, роботи з інвертором або електродвигуном.

Перед проведенням досліджень необхідно організувати робоче місце. Воно повинно бути сухим, добре освітленим, обладнаним засобами пожежогасіння, попереджувальними знаками та ізолювальними засобами захисту. Не допускається виконання робіт у вологому середовищі, поблизу легкозаймистих речовин або за наявності механічних пошкоджень високовольтних компонентів. Робоча зона має бути обмежена від доступу сторонніх осіб, а транспортний засіб повинен бути надійно зафіксований від самовільного руху.

Важливою вимогою є знеструмлення високовольтної системи перед виконанням будь-яких робіт, пов'язаних із доступом до електричних компонентів. Перед початком діагностики або демонтажу необхідно вимкнути запалювання, від'єднати сервісний розмикач високовольтної батареї, дочекатися розрядження конденсаторів силової електроніки та перевірити відсутність небезпечної напруги за допомогою справного вимірювального приладу. Лише після цього дозволяється виконувати роботи з високовольтними елементами. Недотримання цієї послідовності може призвести до ураження електричним струмом або виникнення короткого замикання.

Під час досліджень електромобіля персонал повинен використовувати засоби індивідуального захисту. До них належать діелектричні рукавички, захисні окуляри, ізолюваний інструмент, спецодяг, діелектричне взуття або ізолювальний килимок. Інструмент, який використовується для роботи з високовольтними системами, повинен мати відповідну ізоляцію та бути справним. Забороняється використовувати пошкоджені рукавички, інструмент із тріщинами ізоляції або саморобні пристрої для вимірювання електричних параметрів.

Окрему увагу необхідно приділяти безпеці тягової акумуляторної батареї. Батарея є одним із найбільш відповідальних і потенційно небезпечних елементів електромобіля. Її пошкодження, перегрівання, перезарядження або глибокий розряд можуть призвести до зниження ресурсу, виділення газів, короткого замикання або теплового розгону. Під час досліджень не допускається механічне пошкодження батарейного корпусу, порушення герметичності модулів, перевищення допустимих струмів заряду і розряду, а також експлуатація батареї за температур, що виходять за межі встановленого діапазону. Усі режими роботи батареї повинні контролюватися системою BMS або додатковими вимірювальними засобами.

Під час проведення експериментів з алгоритмами енергоменеджменту необхідно контролювати не лише електричні параметри, а й тепловий стан компонентів. Інвертор, електродвигун, кабелі, контактні з'єднання та батарея можуть нагріватися під час тривалої роботи або високих навантажень.

Перевищення допустимої температури може спричинити деградацію ізоляції, зниження ефективності системи та аварійне вимкнення. Тому експериментальні режими повинні задаватися поступово, з контролем температури та можливістю швидкого припинення випробування.

Функції управління охороною праці під час досліджень електромобіля включають планування безпечного виконання робіт, організацію робочого місця, навчання і допуск персоналу, контроль технічного стану обладнання, моніторинг небезпечних параметрів, забезпечення засобами індивідуального захисту та підготовку до дій у разі аварійної ситуації [15]. Планування передбачає визначення мети експерименту, переліку операцій, необхідного обладнання та можливих ризиків. Організація робочого місця забезпечує фізичне розмежування небезпечної зони, наявність інструментів і засобів захисту. Контроль передбачає перевірку стану високовольтної системи до, під час і після виконання робіт.

У разі виникнення аварійної ситуації, появи запаху гару, диму, іскріння, перегрівання батареї або спрацювання аварійних повідомлень роботи необхідно негайно припинити. Персонал повинен відійти на безпечну відстань, знеструмити систему, якщо це можливо без ризику, повідомити відповідальних осіб і діяти відповідно до інструкції з аварійної безпеки. Забороняється самостійно відкривати пошкоджену тягову батарею або торкатися високовольтних компонентів після аварійного спрацювання системи.

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

Указ Президента України від 26 березня 1999 року No 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 [16].

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 [17].

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

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 результаті виконання кваліфікаційної роботи було послідовно розглянуто комплекс питань, пов'язаних із розробкою підходу до оптимізації енергоменеджменту гібридних і плагін-гібридних транспортних засобів на основі критеріїв мінімізації витрати палива та викидів.

У загально-технічному розділі проаналізовано сучасний стан розвитку HEV/PHEV, визначено їх роль у підвищенні енергоефективності автомобільного транспорту та зменшенні екологічного навантаження. Встановлено, що гібридні та плагін-гібридні автомобілі є важливим перехідним технічним рішенням між традиційними автомобілями з ДВЗ і повністю електричними транспортними засобами, оскільки поєднують можливість використання електричної тяги з автономністю паливної силової установки. Розглянуто основні архітектури гібридних силових установок, зокрема послідовну, паралельну, послідовно-паралельну та схему з розподілом потужності. Встановлено, що ефективність HEV/PHEV значною мірою залежить не лише від параметрів окремих компонентів, а й від способу керування енергетичними потоками між двигуном внутрішнього згоряння, електродвигуном, генератором, трансмісією та тяговою акумуляторною батареєю.

У технологічному розділі обрано розрахункову схему плагін-гібридного автомобіля на основі параметрів реального серійного PHEV. Для подальших розрахунків прийнято базові параметри автомобіля, зокрема масу, коефіцієнт аеродинамічного опору, площу лобового опору, коефіцієнт опору коченню, ємність тягової батареї, допустимий діапазон SOC, потужність ДВЗ та електроприводу. Сформовано математичну модель поздовжнього руху автомобіля, яка враховує силу опору коченню, аеродинамічний опір, силу інерції та складову сили ваги під час руху на ухилі. На основі цієї моделі визначено тягову силу та потужність на колесах для характерних режимів руху, що дозволило оцінити енергетичну потребу автомобіля в міському, змішаному та магістральному режимах. Також у роботі сформовано модель витрати палива та викидів двигуна внутрішнього згоряння у складі гібридної силової установки. Визначено, що робота двигуна на малому навантаженні є менш ефективною, тоді як середній діапазон потужності відповідає економічнішому режиму. Викиди CO₂ розраховано як величину, прямо пов'язану з об'ємом спаленого бензину, а для оцінювання шкідливих компонентів відпрацьованих газів запропоновано використання нормованого екологічного показника з урахуванням NO_x, CO та HC. Такий підхід дозволяє порівнювати різні режими роботи силової установки не лише за витратою палива, а й за екологічними наслідками. На основі моделей руху автомобіля, витрати палива, викидів і SOC сформовано багатокритеріальну цільову функцію оптимізації енергоменеджменту. До її складу включено нормовані показники витрати палива, викидів CO₂, шкідливих компонентів відпрацьованих газів і

відхилення SOC від бажаного рівня. Для кожного критерію визначено вагові коефіцієнти, що дозволяють змінювати пріоритети стратегії керування залежно від поставленої задачі. Запропонована цільова функція дає змогу кількісно порівнювати електричний, паливний, гібридний, зарядний і рекупераційний режими та обирати той варіант, який забезпечує найкраще співвідношення між паливною економічністю, екологічністю та збереженням працездатного стану батареї.

У конструкторському розділі розроблено структурну схему системи оптимізованого енергоменеджменту PHEV/HEV. Вона включає блок вхідних даних, блок визначення тягової потреби, блок оцінки стану батареї, блок формування допустимих режимів, розрахунково-оцінювальний блок, блок цільової функції, блок вибору оптимального режиму та блок керування виконавчими елементами. Розроблено алгоритм вибору режимів роботи силової установки, який спочатку перевіряє технічні обмеження, а потім виконує порівняння допустимих режимів за інтегральним критерієм. Реалізація критеріального блоку дозволяє уникнути нераціональних режимів роботи ДВЗ, обмежити надмірне розрядження батареї, підвищити ефективність рекуперації та зменшити паливно-екологічні втрати.

У розділі з безпеки життєдіяльності та охорони праці розглянуто основні принципи безпечної організації досліджень електрифікованого транспортного засобу. Визначено небезпечні фактори, пов'язані з високовольтною системою, тяговою акумуляторною батареєю, силовою електронікою, електродвигуном і можливими аварійними режимами. Обґрунтовано необхідність попереднього знеструмлення високовольтної системи, використання діелектричних засобів захисту, контролю температури батареї, перевірки стану ізоляції та обмеження доступу сторонніх осіб до робочої зони. Це забезпечує безпечні умови проведення досліджень і знижує ризик ураження електричним струмом, короткого замикання, перегрівання або займання компонентів електрифікованого автомобіля.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. International Energy Agency. (2026). Global EV Outlook 2026. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026>.
2. Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704–718. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.892489>.
3. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429504884>.
4. Graba, Mariusz & Mamala, Jarosław & Bieniek, Andrzej & Augustynowicz, Andrzej & Czernek, Krystian & Krupińska, Andżelika & Włodarczak, Sylwia & Ochowiak, Marek. (2023). Assessment of Energy Demand for PHEVs in Year-Round Operating Conditions. *Energies*. 16. 5571. 10.3390/en16145571.
5. Mi, C., & Masrur, M. A. (2017). *Hybrid electric vehicles: Principles and applications with practical perspectives* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118970560>.
6. Guzzella, L., & Sciarretta, A. (2013). *Vehicle propulsion systems: Introduction to modeling and optimization* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35913-2>.
7. Lyashuk, O., Aulin, V., Rohatynskiy, R., Gevko, I., Gypka, A., Mironov, D., Martyniuk, V., Lutsyk, A., & Denysiuk, N. (2025). Mathematical modelling of hybrid powertrain systems for improved energy efficiency. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 27(2), C36–C52. <https://doi.org/10.26552/com.C.2025.028>.
8. Plett, G. L. (2015). *Battery management systems: Volume I: Battery modeling*. Artech House.
9. Tremblay, O., Dessaint, L.-A., & Dekkiche, A.-I. (2007). A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. In *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 284–289). IEEE.
10. 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>.
11. Onori, S., Serrao, L., & Rizzoni, G. (2016). *Hybrid electric vehicles: Energy management strategies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6781-5>.
12. Paganelli, G., Delprat, S., Guerra, T. M., Rimaux, J., & Santin, J. J. (2002). Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains. In *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference*. IEEE.
13. Sciarretta, A., & Guzzella, L. (2007). Control of hybrid electric vehicles. *IEEE Control Systems Magazine*, 27(2), 60–70. <https://doi.org/10.1109/MCS.2007.338280>.

14. 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.
15. 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.
16. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»: навч. посібник / В.С. Стручок – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.
17. 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.