

Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерії машин, споруд та технологій

(назва факультету)

Автомобілів

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Вдосконалення стратегій розподілу енергії в гібридних автомобілях із застосуванням оптимізаційних методів

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МАМ-61 спеціальності 274

«Автомобільний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Кучірка В.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Рогатинський Р.М.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

П'єнтак М.Д.
(прізвище та ініціали)

Зав. кафедри

(підпис)

Цьонь О.П
(прізвище та ініціали)

Рецензент

(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 автомобілів
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«17» листопада 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Кучірці Василю Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вдосконалення стратегій розподілу енергії в гібридних автомобілях із застосуванням оптимізаційних методів

Керівник роботи Рогатинський Роман Михайлович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 14 » листопада 2025 року № 4/7-970

2. Термін подання студентом завершеної роботи 19 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики електричних автомобілів гібридного типу.

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

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

4 Науково-дослідний розділ. 5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

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

Класифікація основних типів гібридних транспортних засобів – 2А1.

Принципові схеми сучасних технологій зберігання енергії – 4А1.

Функціональна схема системи управління енергією – 1А1.

Оптимізаційні алгоритми розподілу енергії в гібридах – 1А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н. доц. Ткаченко І.Г.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Стручок В.С.		

7. Дата видачі
завдання

17.11.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	21.11.2025	
2	Технологічний розділ	26.11.2025	
3	Конструкторський розділ	5.12.2025	
4	Науково-дослідний розділ	12.12.2025	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	17.12.2025	
6	Оформлення графічної частини	19.12.2025	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра	22.12.2025	

Студент

(підпис)

Кучірка В.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Рогатинський Р.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Вдосконалення стратегій розподілу енергії в гібридних автомобілях із застосуванням оптимізаційних методів».

Метою кваліфікаційної роботи магістра є розробка та обґрунтування предиктивної стратегії розподілу енергії в гібридному транспортному засобі із застосуванням оптимізаційних методів і прогнозної інформації про умови руху, з метою підвищення паливно-енергетичної ефективності та забезпечення дотримання обмежень тягової батареї, електроприводу й двигуна внутрішнього згоряння в характерних режимах експлуатації.

Основні завдання, які необхідно вирішити у роботі:

- Проаналізувати сучасний стан та основні тенденції розвитку електромобільності і гібридизації транспортних засобів у світі та в Україні, визначивши ключові технічні й інфраструктурні фактори, що впливають на ефективність електрифікованого транспорту.
- Провести класифікацію електрифікованих транспортних засобів за типом силової установки та способом поповнення енергії, обґрунтувавши місце NEV і PHEV як найбільш релевантних об'єктів для задачі оптимізації розподілу енергії.
- Розглянути конструктивне та схемне виконання гібридних силових установок, визначити типову структуру енергетичних потоків і режимів роботи, а також сформулювати перелік ключових параметрів, що характеризують роботу агрегатів.
- Виконати розрахунок основних вузлів гібридного транспортного засобу для побудови математичної моделі, включаючи тяговий розрахунок, узгодження потужності ДВЗ та електромашини, вибір параметрів батареї, силової електроніки й трансмісії з урахуванням обмежень за струмами, напругою та тепловими режимами.
- Дослідити технічні підходи до формування горизонту прогнозування та підключеності гібридних транспортних засобів, розглянувши роль сенсорів і засобів зв'язку V2V, V2I, V2X у підготовці прогнозних даних для керування енергією.
- Проаналізувати основні стратегії та алгоритми керування розподілом енергії в гібридах та розробити предиктивну оптимізаційну стратегію керування розподілом енергії в гібридному транспортному засобі на основі математичної моделі та прогнозної інформації.

Перший розділ кваліфікаційної роботи магістра, «Загально-технічний розділ», включає аналіз поточного стану та тенденцій розвитку електромобільності й гібридизації у світі та в Україні, а також розгляд базових принципів гібридизації і підходів до керування енергією.

Другий розділ, «Технологічний розділ», містить опис і порівняння конструктивних схем гібридних силових установок, а також детальний аналіз основних вузлів гібридного транспортного засобу. Окрему увагу приділено технологіям вимірювання та даним.

У третьому розділі, «Конструкторський розділ», визначено вихідні дані та вимоги до об'єкта моделювання, виконано розрахунок параметрів і узгодження вузлів силової установки для побудови математичної моделі.

Четвертий розділ, «Науково-дослідний розділ», містить огляд і розрахунковий аналіз стратегій керування розподілом енергії в гібридних транспортних засобах із застосуванням оптимізаційних методів. У розділі запропоновано та обґрунтовано предиктивну стратегію розподілу енергії на основі прогнозованої інформації про умови руху та рекупераційні фази

У розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» розглянуто основні принципи та функції управління охороною праці на виробництві, а також концепцію захисту населення і територій у разі загрози чи виникнення надзвичайних ситуацій.

Пояснювальна записка складається з п'яти розділів і 70 сторінок формату А4 та 8 аркушів формату А1 графічної частини і 8 сторінок додатків.

Ключові слова: гібридний автомобіль, предиктивні стратегії, АКБ, електромобіль, силова установка електромобіля.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	7
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Поточний стан електромобільності та гібридизації у світі й Україні	9
1.2 Класифікація транспортних засобів: HEV, PHEV, BEV	14
1.3 Принципи гібридизації та базові підходи до керування енергією	19
1.4 Висновки та постановка завдання на магістерську роботу	25
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	27
2.1 Конструктивні схеми гібридних силових установок	27
2.2 Вузли гібридного транспортного засобу	31
2.3 Технології вимірювання та дані для керування	36
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	40
3.1 Вихідні дані та вимоги до об'єкта моделювання	40
3.2 Розрахунок параметрів та узгодження вузлів силової установки	43
3.3 Підключеність гібридів і горизонт прогнозування	47
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ	51
4.1 Огляд і розрахунок стратегій керування розподілом енергії	51
4.2 Предиктивна стратегія розподілу енергії гібридного транспортного засобу	56
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	62
5.1 Принципи та функції управління охороною праці на виробництві	62
5.2 Системний підхід до захисту населення і територій у разі загрози або виникнення надзвичайних ситуацій	65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	68
БІБЛІОГРАФІЯ	69
ДОДАТКИ	71

ВСТУП

У сучасних умовах розвиток гібридних транспортних засобів набуває особливого значення як практичний компроміс між екологічністю електротранспорту та вимогами до дальності ходу, надійності й доступності енергопостачання. Зростання частки електрифікованих автомобілів зумовлене необхідністю скорочення споживання викопного палива та зниження викидів, а також посиленням регуляторних вимог до екологічних показників транспорту. Водночас реальні умови експлуатації характеризуються мінливими навантаженнями, обмеженнями зарядної інфраструктури та неоднорідністю дорожніх профілів, що робить особливо актуальним підвищення паливно-енергетичної ефективності гібридних силових установок. Технологічний прогрес у сфері тягових батарей, силової електроніки та систем керування забезпечує можливість реалізації більш складних алгоритмів енергоменеджменту, які здатні підвищувати ефективність без погіршення динамічних характеристик і ресурсу компонентів.

Виходячи з наведених обставин, тема даної роботи, присвячена вдосконаленню стратегій розподілу енергії в гібридних автомобілях із застосуванням оптимізаційних і предиктивних методів, є актуальною та практично значущою. На відміну від традиційних правилкових підходів, оптимізаційні алгоритми дозволяють узгоджувати витрату палива з обмеженнями батареї та електроприводу, забезпечуючи керовану траєкторію стану заряду впродовж поїздки. Використання прогностичної інформації про умови руху, зокрема профіль швидкості, ухили дороги та потенційні рекупераційні фази, створює передумови для предиктивного планування використання енергетичного ресурсу батареї та підвищення частки відновленої енергії.

Метою роботи є розробка та обґрунтування предиктивної стратегії розподілу енергії в гібридному транспортному засобі із застосуванням оптимізаційних методів і прогностичної інформації про умови руху, з метою підвищення паливно-енергетичної ефективності та забезпечення дотримання обмежень тягової батареї, електроприводу й двигуна внутрішнього згоряння в характерних режимах експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан та основні тенденції розвитку електромобільності і гібридизації транспортних засобів у світі та в Україні, визначивши ключові технічні й інфраструктурні фактори, що впливають на ефективність електрифікованого транспорту.

2. Провести класифікацію електрифікованих транспортних засобів за типом силової установки та способом поповнення енергії, обґрунтувавши місце NEV і PHEV як найбільш релевантних об'єктів для задачі оптимізації розподілу енергії.

3. Розглянути конструктивне та схемне виконання гібридних силових установок, визначити типову структуру енергетичних потоків і режимів роботи, а також сформувати перелік ключових параметрів, що характеризують роботу агрегатів.

4. Виконати розрахунок основних вузлів гібридного транспортного засобу для побудови математичної моделі, включаючи тяговий розрахунок, узгодження потужності ДВЗ та електромашини, вибір параметрів батареї, силової електроніки й трансмісії з урахуванням обмежень за струмами, напругою та тепловими режимами.

5. Дослідити технічні підходи до формування горизонту прогнозування та підключеності гібридних транспортних засобів, розглянувши роль сенсорів і засобів зв'язку V2V, V2I, V2X у підготовці прогнозних даних для керування енергією.

6. Проаналізувати основні стратегії та алгоритми керування розподілом енергії в гібридах та розробити предиктивну оптимізаційну стратегію керування розподілом енергії в гібридному транспортному засобі на основі математичної моделі та прогнозної інформації.

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Поточний стан електромобільності та гібридизації у світі й Україні

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

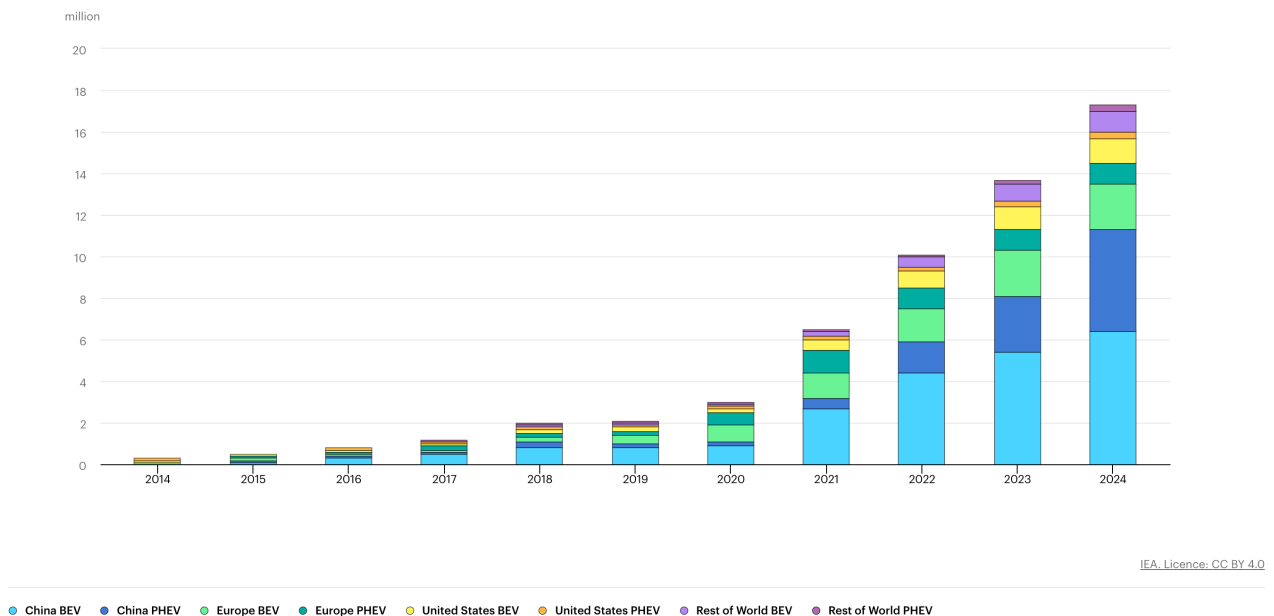


Рисунок 1.1 – Динаміка продажів електро- і гібридних автомобілів у світі

На глобальному рівні відбувається одночасне вдосконалення акумуляторних систем, силової електроніки та алгоритмів керування енергією. З боку батареї найбільш помітними є зростання енергомісткості, покращення ресурсу та зниження втрат у широкому діапазоні температур, що підвищує

реальну дальність та стабільність характеристик у різних кліматичних умовах. Паралельно розвиваються системи керування батареєю, які переходять від простого контролю напруги та струмів до більш складних моделей стану заряду та стану здоров'я, оцінювання теплових режимів і прогнозування деградації. У силовій електроніці спостерігається тенденція до підвищення робочих напруг, зменшення втрат перетворення та зростання питомої потужності інверторів і DC/DC-перетворювачів, що позитивно впливає на ефективність трансмісії та масогабаритні показники. Для гібридів додатковим важелем стають карти ефективності двигуна внутрішнього згоряння і стратегія його використання: сучасні системи управління намагаються утримувати ДВЗ у зонах найкращої паливної економічності, компенсуючи динамічні вимоги електромашиною та акумулятором. Саме тому енергоменеджмент у гібридах із часом стає не менш важливим, ніж апаратна частина, оскільки від алгоритму розподілу енергії залежить фактичний ефект гібридизації у реальному трафіку.

Розвиток зарядної інфраструктури у світі є неоднорідним, але загальна тенденція полягає у збільшенні частки швидкісних зарядок, розширенні мережі на основних транспортних коридорах і поступовому переході до інтеграції з енергосистемою. Для міського середовища домінують сценарії повільної зарядки, які краще узгоджуються з нічними провалами навантаження та нижчими вимогами до мережевої інфраструктури. Для міжміських поїздок критичними стають швидкісні зарядки, що скорочують час поповнення енергії, але водночас підвищують вимоги до якості енергії, пікової потужності та керування тепловими режимами батареї. На рівні транспортної політики в багатьох країнах електрифікація підтримується нормами щодо викидів, податковими та митними стимулами, а також регулюванням міського доступу. Для виробників це означає необхідність оптимізувати не тільки витрату енергії, а й викиди у специфічних режимах, включно з холодним стартом, короткими поїздками та заторами, де гібриди часто демонструють кращу стабільність ефекту, ніж автомобілі з ДВЗ без електрифікації.

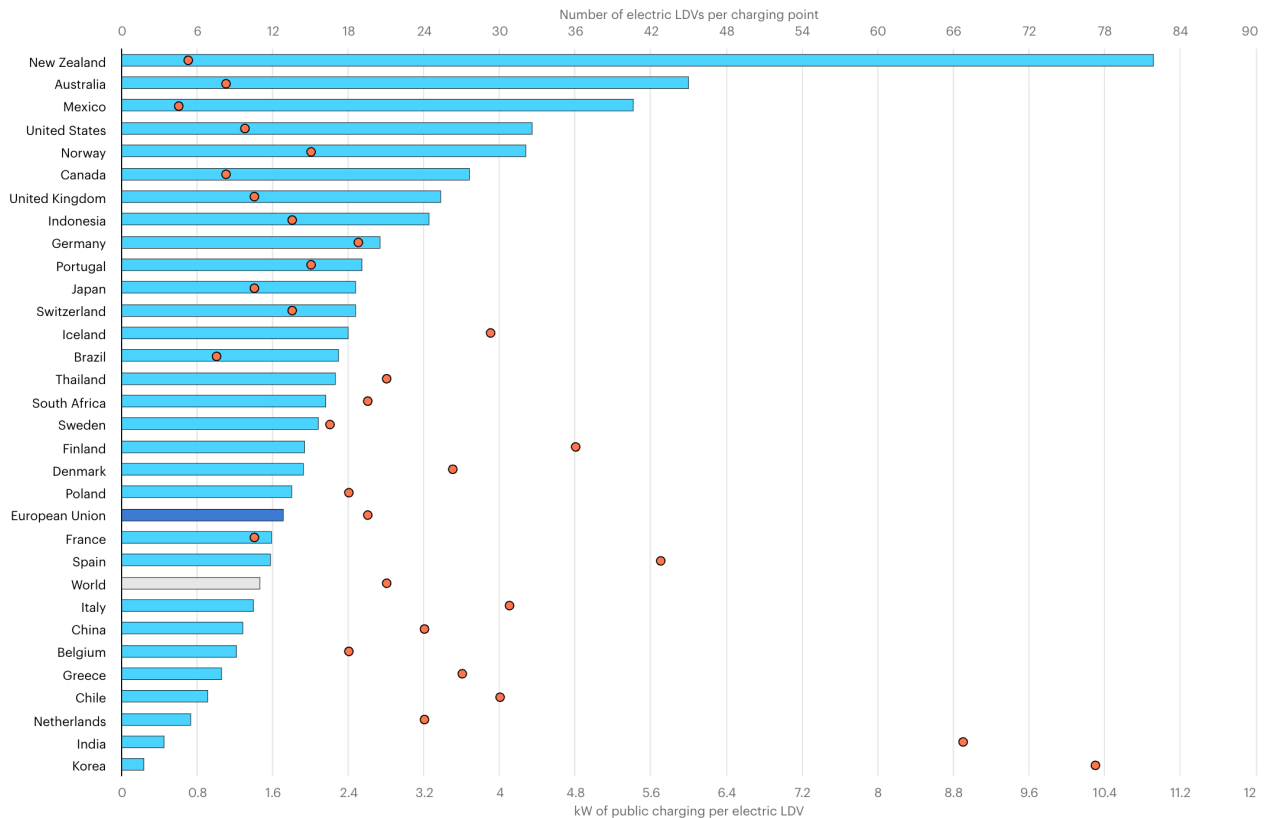


Рисунок 1.2 – Кількість електромобілів і кіловат-годин на одну зарядну станцію

Український контекст формує окрему траєкторію розвитку електромобільності та гібридизації. Ринок має високий інтерес до електрифікованих транспортних засобів як інструмента зменшення експлуатаційних витрат, але практична доступність технологій істотно залежить від імпорتنих каналів, структури вторинного ринку та наявності інфраструктури в містах і на міжміських маршрутах. Для більшості користувачів критичними є не тільки технічні характеристики, а й ризики сервісу та ремонту, які у випадку електрифікованих авто пов'язані з високовольтними компонентами, діагностикою батареї та доступом до кваліфікованих фахівців. На фоні обмежень енергетичної інфраструктури та нерівномірної географії зарядних пунктів гібриди, зокрема підключувані, можуть розглядатися як перехідне рішення: вони зберігають можливість руху на паливі, але здатні суттєво знизити витрату у міському циклі за рахунок електричного режиму та рекуперації. Водночас ефект підключуваної гібридизації в Україні сильніше залежить від дисципліни зарядки та доступності повільної зарядки вдома або на роботі, адже без регулярного поповнення енергії такі автомобілі часто експлуатуються як важчі гібриди з меншим вигрешем у паливній економічності.

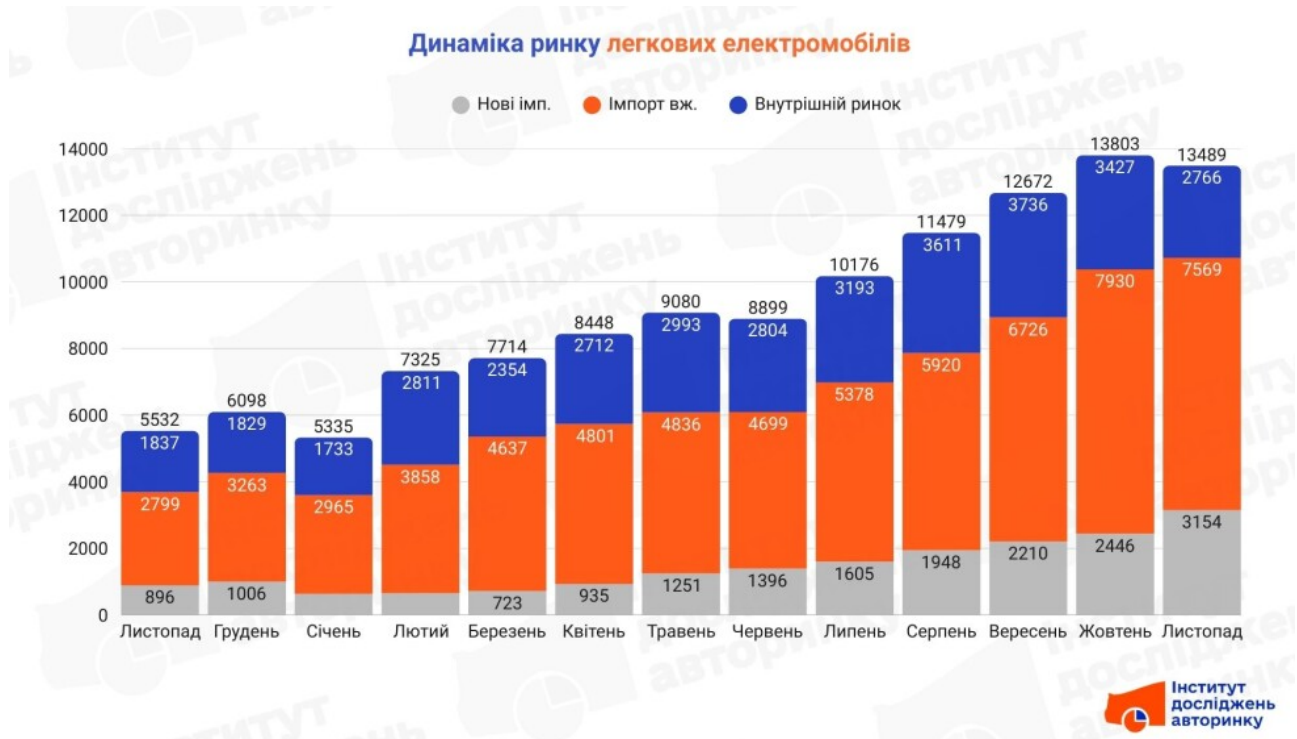


Рисунок 1.3 – Динаміка продажів електромобілів в Україні

Окремим питанням для України є стійкість інфраструктури та якість електропостачання, що впливає на практичні сценарії зарядки, а також на вимоги до бортових зарядних пристроїв і систем захисту. Для електромобілів це проявляється у потребі контролю температурних режимів зарядки, керуванні струмами і напругами, використанні діагностики стану батареї та адаптації до різної якості мережі. Для гібридів, які підключаються до мережі, додається важливість енергоменеджменту з урахуванням прогнозу маршруту та доступності зарядки, що робить перспективними предиктивні стратегії керування. У транспортних системах із високою мінливістю трафіку та умов руху саме прогнозована інформація про швидкість, профіль дороги, затори та можливості рекуперації здатна підвищити ефективність розподілу енергії. Такий підхід не є лише теоретичним, оскільки він напряму пов'язаний із практичними обмеженнями батареї за температурою, струмом та ресурсом: оптимальний розподіл енергії має мінімізувати паливну складову, але одночасно уникати режимів, які прискорюють деградацію або вихід за допустимі межі.

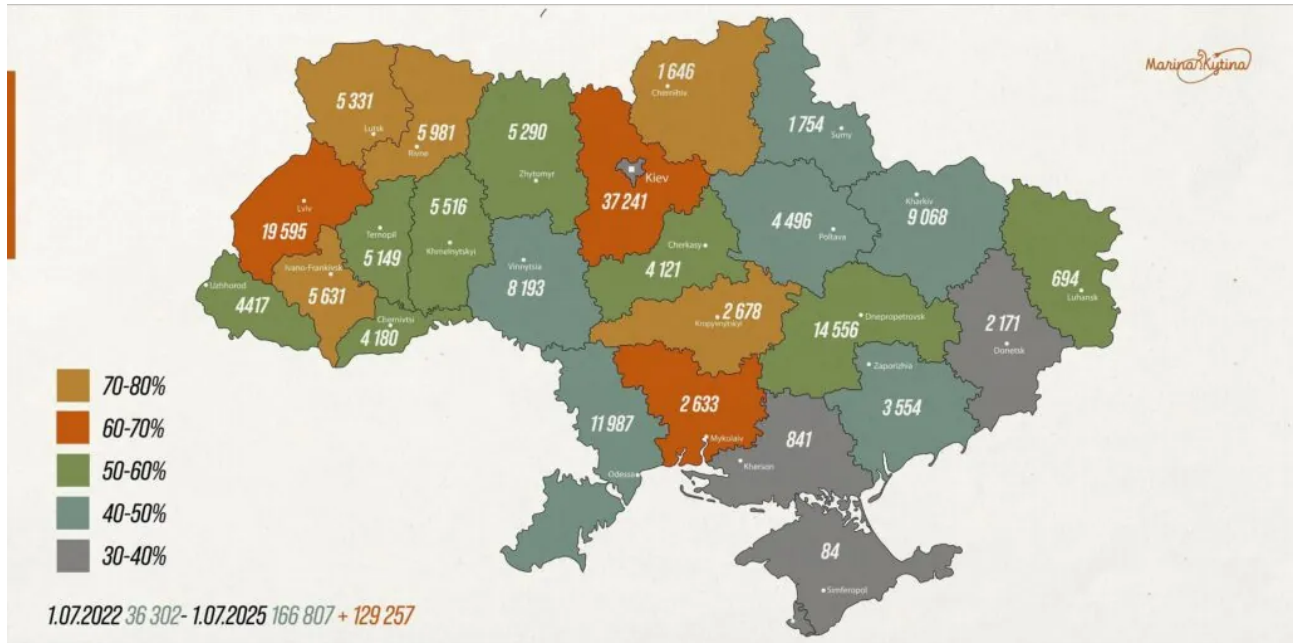


Рисунок 1.4 – Кількісний розподіл зарядних станцій по регіонах України

У світі зростає роль підключеності транспортних засобів, яка поступово перетворює енергоменеджмент із реактивного на проактивний. Збір даних від бортових сенсорів та інфраструктури дає змогу оцінювати майбутнє навантаження на силову установку, прогнозувати зони з частими розгонами і гальмуваннями, визначати ділянки підйомів і спусків, а отже заздалегідь планувати використання електроенергії та запуск ДВЗ. Для гібридних автомобілів це особливо важливо, оскільки вони мають два джерела енергії, і правильний момент перемикавання режимів суттєво впливає на витрату палива та на траєкторію стану заряду. В умовах України перспективність таких підходів пов'язана з поступовим розвитком цифрової інфраструктури, зростанням кількості систем допомоги водієві та поширенням навігаційних сервісів, які вже сьогодні формують базу для реалізації прогнозних стратегій на практиці.

Таблиця 1.1 – Характерні особливості електромобілів і гібридів у світовому та українському контексті

Параметр порівняння	Світовий контекст	Український контекст
Основні мотиви переходу	декарбонізація, регуляторні вимоги, зниження ТСО, міські обмеження для ДВЗ	економія експлуатаційних витрат, доступність імпортованих авто, прагнення автономності у витратах на паливо
Роль інфраструктури	швидкий розвиток	нерівномірний

	мережі, зростання частки швидкісної зарядки, інтеграція з енергосистемою	доступність, концентрування в містах та на окремих маршрутах, залежність від локальних умов енергопостачання
Домінуючі сценарії	поєднання міської повільної та міжміської швидкісної зарядки, розвиток флотів і корпоративних парків	перевага міського сценарію та домашньої зарядки, значущість сервісної підтримки і діагностики батарей
Значення гібридизації	перехідне і паралельне рішення, особливо для довгих маршрутів та холодних кліматів	практичний компроміс за умови нестабільної інфраструктури та різних сценаріїв поїздок
Еволюція енергоменеджменту	перехід до оптимізаційних і предиктивних EMS з використанням даних маршруту та трафіку	потреба у предиктивних підходах через обмеження інфраструктури та варіативність умов руху

Підсумовуючи, сучасний стан електромобільності та гібридизації у світі характеризується одночасним прогресом апаратної частини і методів керування, а в Україні розвиток відбувається під впливом факторів доступності інфраструктури, сервісної спроможності та економічної доцільності. За таких умов гібриди, особливо ті, що мають можливість прогнозного керування та адаптації до маршруту, є важливим об'єктом дослідження, оскільки оптимізаційні методи розподілу енергії здатні забезпечити суттєве підвищення ефективності без зміни апаратної конфігурації силової установки.

1.2 Класифікація транспортних засобів: HEV, PHEV, BEV

Класифікація електрифікованих транспортних засобів базується на джерелі енергії, способі її поповнення, наявності та ролі двигуна внутрішнього згоряння, 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.

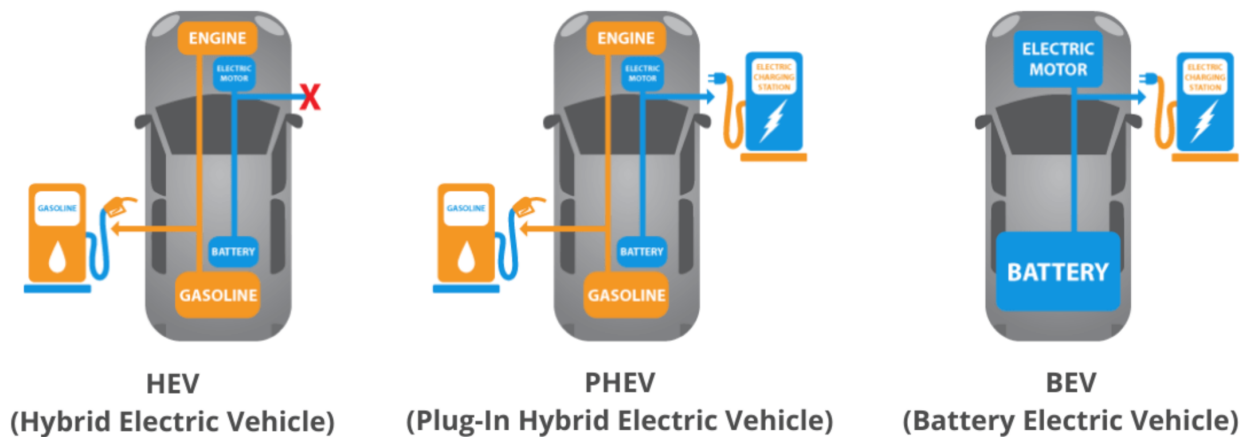


Рисунок 1.5 – Загальна класифікація електрифікованих транспортних засобів

Найбільш загально електрифіковані транспортні засоби доцільно поділяти на три ключові групи: гібридні без зовнішньої зарядки (HEV), гібридні з можливістю підключення до мережі (PHEV) та повністю електричні транспортні засоби (BEV). Хоча така трійка здається простою, за нею стоять принципово різні підходи до забезпечення енергетичних потреб руху. У HEV основним джерелом енергії залишається паливо, а електрична частина виконує функцію підвищення ефективності: відбору енергії при гальмуванні, підтримки ДВЗ у більш економічних зонах, усунення роботи двигуна на малоефективних режимах і покращення динаміки. У PHEV з'являється можливість систематично поповнювати електроенергію з зовнішньої мережі, і тому частина щоденних поїздок може виконуватися переважно в електричному режимі. У BEV механічна тяга забезпечується виключно електроприводом, а енергетична автономність визначається запасом енергії в батареї та доступом до зарядної інфраструктури. Внаслідок цього змінюється вся логіка керування: для HEV та PHEV ключовим стає оптимальний розподіл потужності між ДВЗ і електричною гілкою, а для BEV – оптимізація витрат електроенергії, термоменеджменту та зарядних стратегій, але без задачі комбінування двох джерел тяги.

Гібридні автомобілі HEV характеризуються відносно невеликою тяговою батареєю, яка зазвичай не призначена для тривалого руху лише на електротязі,

хоча короткі електричні режими можливі залежно від архітектури. Енергетично HEV реалізує замкнений цикл електроенергії: батарея заряджається переважно під час рекуперативного гальмування або шляхом роботи ДВЗ у певних режимах, а витрачається на підтримку тяги, запуск ДВЗ, роботу допоміжних агрегатів і компенсацію піків навантаження. Важливо, що в HEV стан заряду батареї, як правило, підтримується в певному робочому діапазоні, і стратегія керування спрямована на так званий режим збереження заряду, коли середній SOC у довготривалому русі не дрейфує в бік повного розряду чи заряду. Це накладає на алгоритм управління вимогу балансувати енергетичні потоки у межах короткого горизонту, не допускаючи виснаження батареї та одночасно максимізуючи користь від рекуперації і роботи електромашини в ефективних зонах.

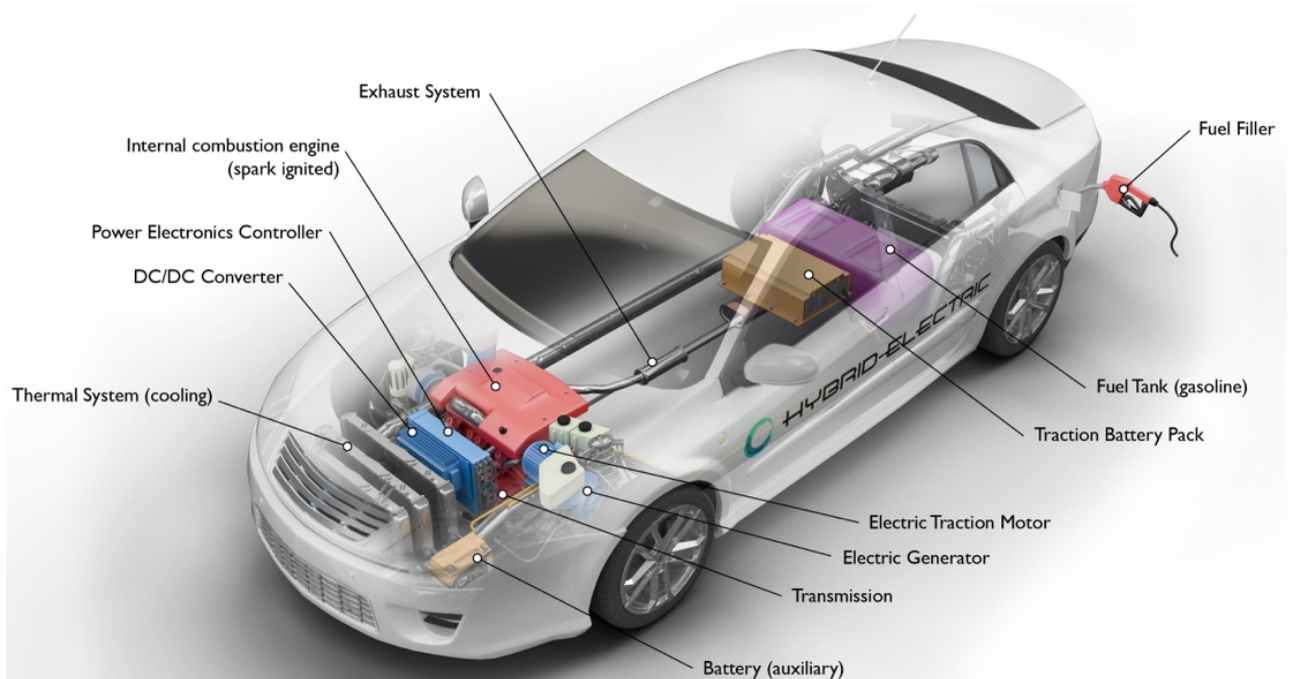


Рисунок 1.6 – Гібридні автомобілі (HEV)

Підключувані гібриди PHEV займають проміжну позицію між HEV і BEV, але не є просто збільшеним HEV. Ключова відмінність полягає у тому, що батарея PHEV має суттєво більшу енергоємність, а заряд може поповнюватися від мережі, що змінює структуру поїздок. Типовим є поділ експлуатації на два домінуючі режими. Перший – режим витрачання заряду, коли транспортний засіб на початку поїздки використовує переважно електроенергію і зменшує SOC до певного рівня. Другий – режим підтримання заряду, коли після досягнення мінімально допустимого SOC автомобіль переходить у поведінку, близьку до HEV, з утриманням SOC у робочому діапазоні. Саме на межі між цими режимами

і в процесі їх оптимального поєднання проявляється найбільший потенціал предиктивних стратегій: якщо відома довжина маршруту, трафік і рельєф, то енергоменеджмент може планувати використання батареї так, щоб максимально використати електричний режим там, де він дає найбільший вигаш, наприклад у заторах і частих прискореннях, і зберегти запас для ділянок, де рекуперація або ефективність ДВЗ є менш сприятливою. Без прогнозу PHEV часто працює або надто агресивно, швидко витрачаючи заряд, або надто консервативно, втрачаючи потенціал електричного пробігу, що прямо відображається на сумарній витраті палива та електроенергії на маршруті.

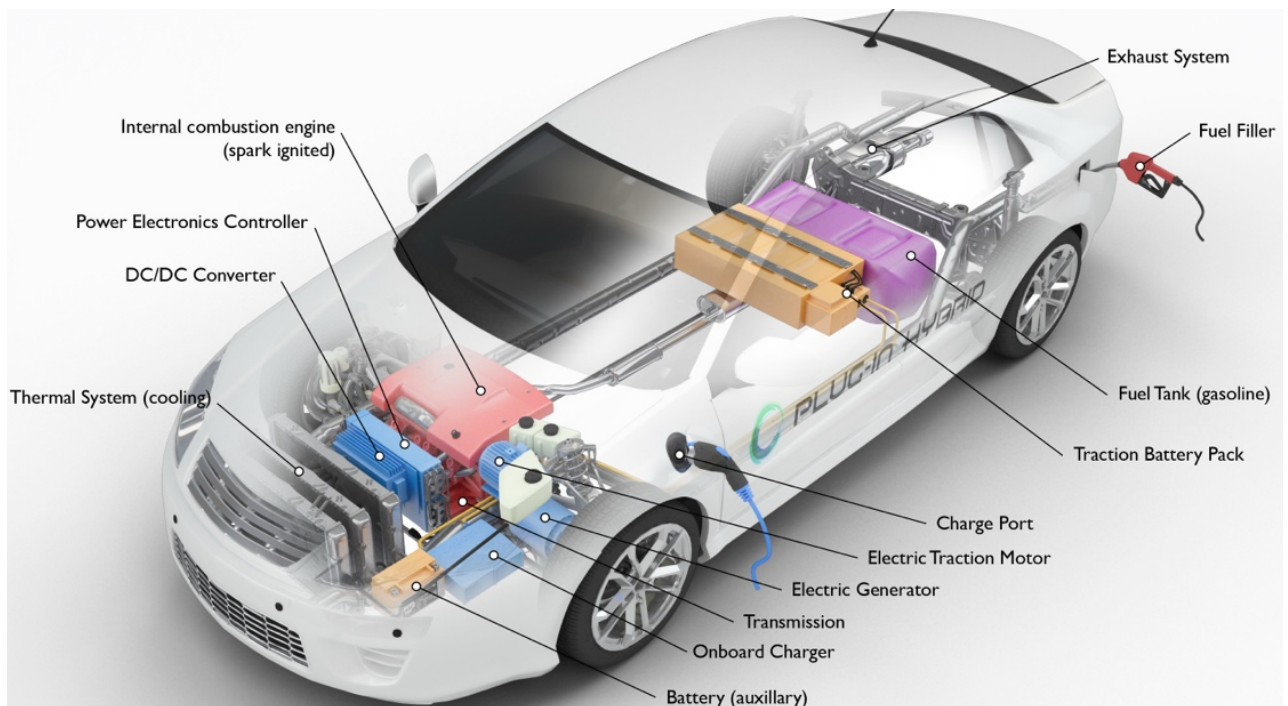


Рисунок 1.7 – Підключувані гібриди (PHEV)

Повністю електричні транспортні засоби BEV не мають ДВЗ, і тому їх класифікація більше спирається на тип електроприводу, конфігурацію батареї, рівень напруги силової мережі, систему зарядки та термоменеджмент. Відсутність ДВЗ спрощує структурну частину керування тягою, але підвищує вимоги до точності оцінювання енерговитрат і прогнозування дальності. Для BEV критичними є втрати на перетворення енергії, ефективність електромашини в різних зонах швидкості та моменту, а також вплив температури на доступну потужність і ємність батареї. У реальному русі BEV чутливі до високих швидкостей і низьких температур, що зменшує ефективність та дальність. Тому оптимізаційні підходи в BEV часто концентруються на економічному керуванні тягою, керуванні тепловими режимами та плануванні зарядок, тоді як в HEV і PHEV центральною задачею лишається розподіл енергії між двома джерелами

при дотриманні обмежень батареї, ДВЗ і силової електроніки.

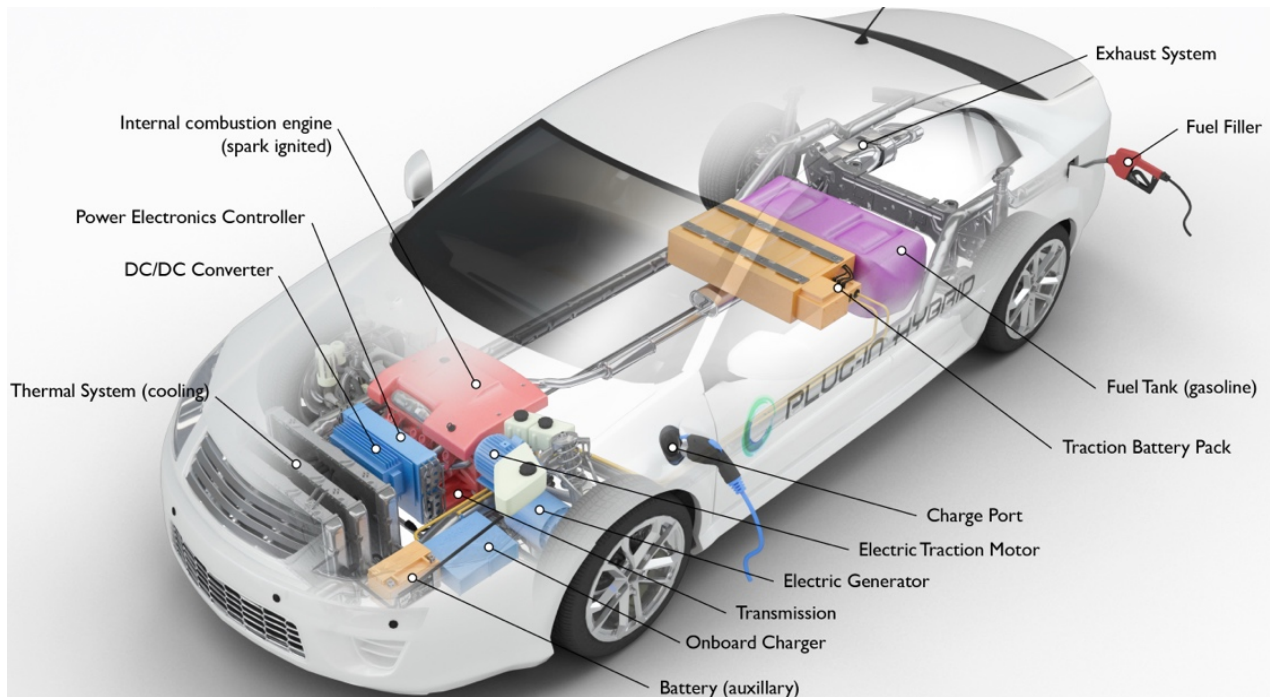


Рисунок 1.8 – Повністю електричні транспортні засоби (BEV)

В межах кожної з трьох основних груп існує додаткова деталізація, яка впливає на можливості і складність енергоменеджменту. Для HEV часто виділяють м'яку гібридизацію, де електромашина переважно допоміжна і не забезпечує повноцінний електрорух, та повну гібридизацію, де можливі самостійні електричні режими на обмежених ділянках. Від рівня гібридизації залежить, наскільки широкий простір керувальних дій доступний алгоритму: у м'яких гібридах стратегія значною мірою зводиться до оптимізації старт-стоп, рекуперації і допоміжного моменту, тоді як у повних гібридах додаються рішення про запуск ДВЗ, розподіл моментів, вибір режиму руху і керування SOC в ширшому діапазоні. Для PHEV додатковою ознакою є не лише ємність батареї, а й потужність бортового зарядного пристрою, оскільки вона визначає швидкість відновлення електричного ресурсу між поїздками і тим самим впливає на реальну частку електричного пробігу. Для BEV тип зарядки і підтримувані режими швидкісної зарядки визначають практичну придатність до міжміських поїздок і впливають на вимоги до термоменеджменту батареї, оскільки високі струми зарядки створюють значні теплові навантаження.

Енергетичні характеристики HEV, PHEV та BEV доцільно розглядати не тільки як різницю в апаратній частині, але і як різницю у поняттях ефективності. Для HEV ефективність проявляється у зменшенні витрати палива в порівнянні з аналогічним автомобілем з ДВЗ за рахунок рекуперації та оптимізації роботи

двигуна. Для PHEV ефективність набуває змішаного характеру, оскільки сумарна енергія може споживатися як у вигляді палива, так і у вигляді електроенергії з мережі, і оцінка стає залежною від сценарію зарядки та структури маршруту. Для BEV ефективність визначається витратою електроенергії на кілометр з урахуванням втрат у зарядці та перетвореннях. Ці відмінності важливі для формування цільової функції оптимізації: у HEV типово мінімізується паливо при обмеженні SOC, у PHEV необхідно мінімізувати зважену суму палива і електроенергії з додатковими обмеженнями на кінцевий SOC або на ресурс батареї, а у BEV оптимізація концентрується на мінімізації електроенергії з урахуванням термальних і ресурсних обмежень.

1.3 Принципи гібридизації та базові підходи до керування енергією

Гібридизація транспортного засобу є інженерним підходом до підвищення енергоефективності та покращення динамічних характеристик за рахунок поєднання двох джерел енергії або двох способів її перетворення в механічну роботу. У класичному розумінні йдеться про спільну роботу двигуна внутрішнього згоряння та електричної машини, які через трансмісію або силову електроніку забезпечують тягу коліс. У ширшому сенсі гібридизація може включати і поєднання різних накопичувачів енергії, наприклад батареї та суперконденсатора, або батареї та маховика, що формує гібридні системи накопичення енергії. Незалежно від конкретної реалізації, ключова ідея гібридизації полягає в розділенні функцій: один компонент ефективно забезпечує середню потужність або енергію на довгому інтервалі, тоді як інший покриває пікові навантаження, забезпечує рекуперацію та стабілізує режим роботи силового агрегату. Саме це розділення дозволяє зменшити сумарні втрати, оскільки кожен елемент працює в діапазоні, де його коефіцієнт корисної дії вищий, а небажані режими мінімізуються.

Фізична природа виграшу від гібридизації найкраще пояснюється через характерні властивості ДВЗ і електроприводу. ДВЗ має обмежений діапазон високої ефективності, який визначається співвідношенням обертів і крутного моменту, тоді як на малих навантаженнях та при частих переходних процесах його питома витрата палива зростає. У міських умовах руху значна частина енергії витрачається на повторювані розгони та гальмування, а також на роботу на холостому ході, що робить чисто двигунну силову установку неефективною. Електрична машина, навпаки, здатна забезпечувати високий момент на малих швидкостях, швидко реагувати на зміну навантаження та працювати в

рекуперативному режимі, повертаючи частину кінетичної енергії в накопичувач. Гібридна система використовує ці переваги таким чином, щоб зменшити частку енергії, яку ДВЗ витрачає на неефективні режими, і перерозподілити її на більш сприятливі точки роботи або замінити електротягою в тих ситуаціях, де електропривод дає максимальний вигаш. Водночас гібридизація не є автоматично ефективною: якщо електрична гілка використовується без урахування втрат на перетворення, обмежень батареї та реальних умов руху, то частина потенційної економії може бути втрачена. Це робить систему керування енергією центральним компонентом гібрида, який визначає, чи реалізується теоретичний потенціал у реальній експлуатації.

Принципи гібридизації тісно пов'язані з поняттям енергетичних потоків у силовій установці. 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.

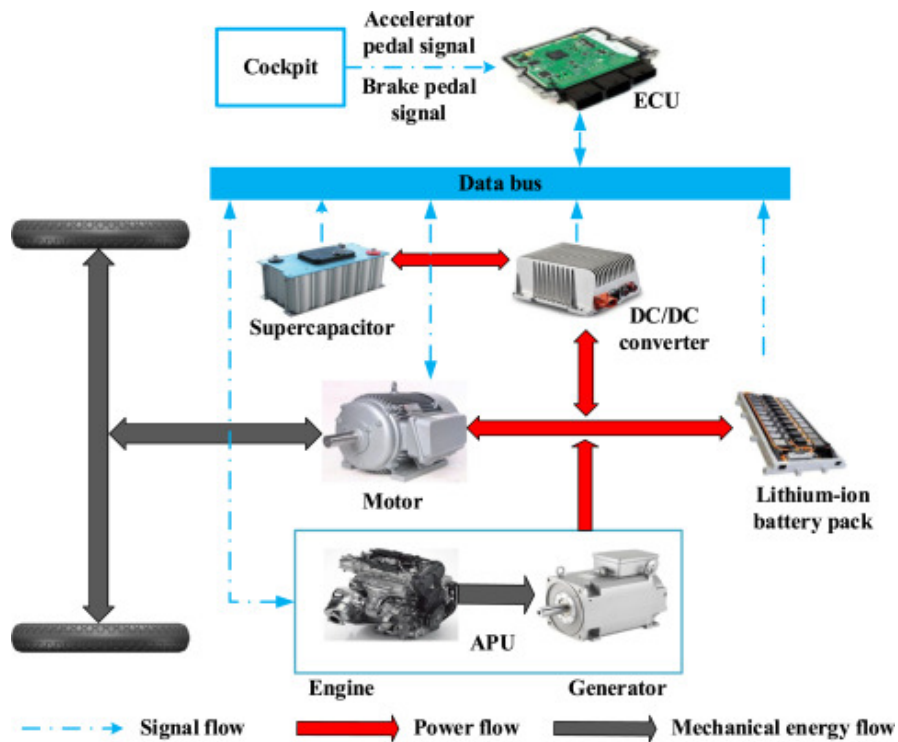


Рисунок 1.9 – Приклад енергетичних потоків у силовій установці гібриду

У контексті гібридизації важливим є розуміння рівнів керування в автомобілі. На нижньому рівні працюють швидкі контури керування електромашиною та силовою електронікою, які забезпечують реалізацію заданого моменту, обмежують струми, керують напругою і виконують захисні функції. ДВЗ має власні контури керування впорскуванням, запалюванням, наддувом та системами очищення вихлопу, які мають свої динамічні обмеження. На середньому рівні здійснюється керування трансмісією та режимами зчеплення, що визначає механічний зв'язок між агрегатами. Верхній рівень, який часто називають супервізорним керуванням або системою керування енергією, формує стратегічні рішення: коли запускати чи зупиняти ДВЗ, як розподіляти момент між джерелами, як підтримувати SOC та як організувати рекуперацію. Саме на верхньому рівні реалізуються оптимізаційні підходи, оскільки він оперує повільнішими змінними стану і має можливість враховувати прогноз або маршрутну інформацію. У результаті система керування енергією є координатором між електричною та двигунною підсистемами, який забезпечує досягнення цільових критеріїв при виконанні вимоги водія щодо тяги і дотриманні обмежень.

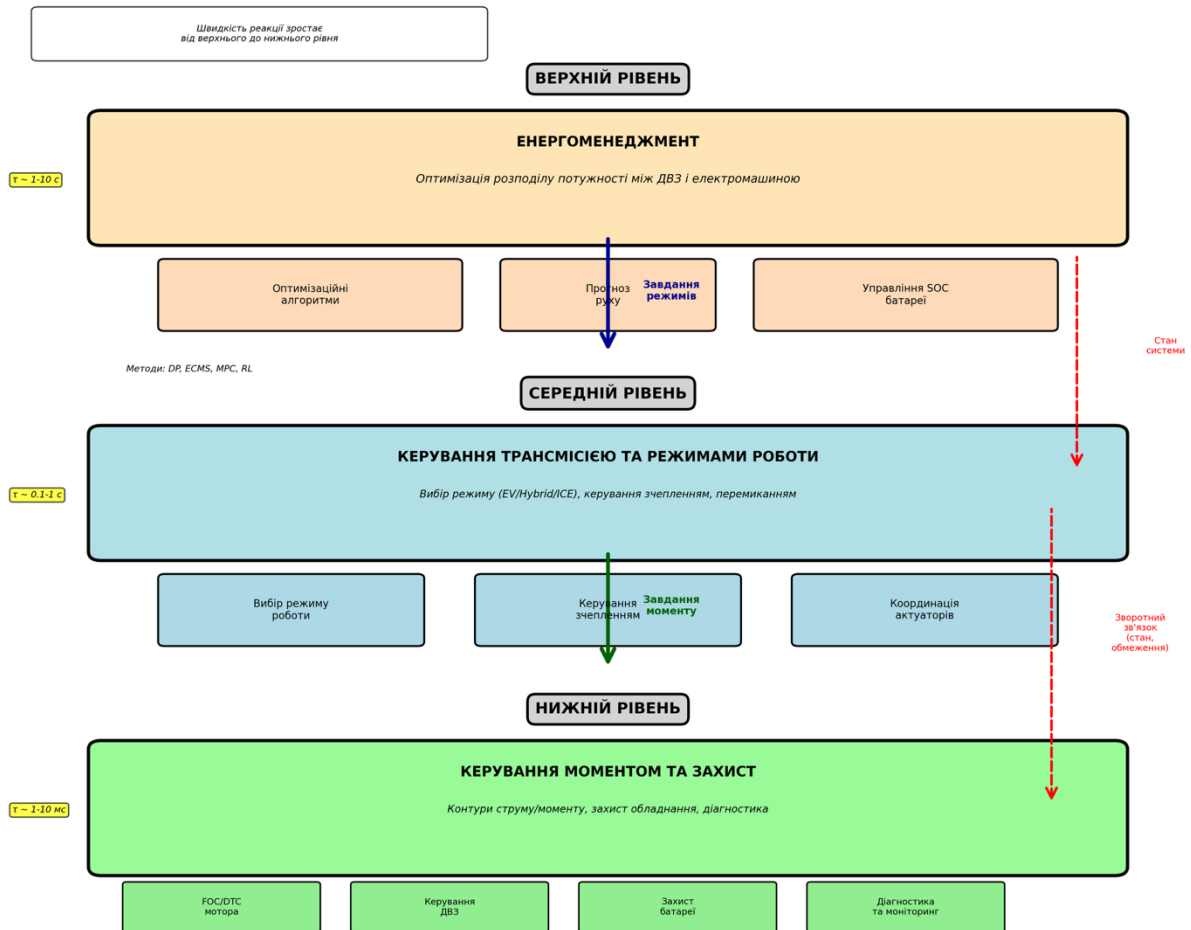


Рисунок 1.10 – Ієрархічна структура керування гібридною силовою установкою

Базові підходи до керування енергією в гібридних автомобілях історично розвивалися від простих евристичних правил до методів, що формалізують оптимізаційну задачу. Найпростішими є стратегії на основі правил, які задають перемикання режимів за порогами швидкості, навантаження, SOC та температури. Такі підходи можуть бути надійними, добре піддаються калібруванню і придатні до реалізації на серійних контролерах, але їх ефективність сильно залежить від налаштувань і часто не є оптимальною в широкому спектрі умов. Проблема полягає в тому, що правила зазвичай формуються під типові сценарії і погано враховують зміни маршруту, трафіку або профілю дороги, а також не гарантують мінімум витрат у математичному сенсі. Проте вони залишаються важливим еталоном для порівняння та базовим рівнем, від якого відштовхуються більш складні алгоритми.

Наступним кроком розвитку стали підходи, які вводять поняття еквівалентного споживання. Їхня логіка полягає в тому, щоб перевести електричну енергію, яка витрачається або накопичується в батареї, в еквівалентну кількість палива, після чого задача зводиться до мінімізації сумарної еквівалентної витрати. У такій постановці електрична енергія перестає

бути допоміжною величиною, а стає рівноправною складовою критерію оптимізації. Це дозволяє приймати рішення про розподіл потужності в режимі реального часу, використовуючи локальну інформацію про ефективність ДВЗ та електроприводу. Водночас ключовим питанням є вибір еквівалентного коефіцієнта, який відображає цінність електроенергії батареї. Якщо він обраний невдало, алгоритм може надто швидко витратити заряд або, навпаки, надто берегти його, що призводить до втрати ефективності. Тому в практичних реалізаціях застосовують адаптацію цього коефіцієнта за зворотним зв'язком від SOC або з урахуванням прогнозу маршруту, щоб підтримувати бажану траєкторію стану заряду та узгоджувати короткострокові рішення з довгостроковими вимогами.

Окрему групу становлять методи глобальної оптимізації, які розглядають задачу керування енергією як задачу оптимального керування з відомим профілем руху. У таких методах формально задаються стан системи, керувальні дії, обмеження та функція вартості, а оптимальний розв'язок визначається шляхом перебору або динамічного програмування. Перевага цього підходу полягає в тому, що він дає верхню межу потенційної ефективності для заданого маршруту і може слугувати еталоном для оцінки наближених алгоритмів. Недолік полягає в тому, що повна глобальна оптимізація, як правило, потребує знання майбутнього профілю руху і значних обчислювальних ресурсів, тому вона рідко застосовується безпосередньо в серійній реалізації. Втім, її результати є важливими для синтезу реальних алгоритмів, оскільки дозволяють ідентифікувати закономірності оптимальної поведінки системи і побудувати наближені правила або параметризовані стратегії, що відтворюють оптимальну логіку.

Перехід до предиктивних підходів зумовлений розвитком сенсорики, навігаційних систем і каналів зв'язку, які дозволяють отримувати інформацію про майбутні умови руху. Предиктивне керування використовує прогноз швидкості, рельєфу, заторів або інших факторів на певному горизонті, щоб вибирати керувальні дії не лише за поточними умовами, а й з урахуванням очікуваних навантажень. Для гібридів це означає, що SOC батареї може розглядатися як ресурс, який потрібно розподілити по маршруту оптимальним чином. Наприклад, якщо система прогнозує тривалу ділянку підйому, то доцільно заздалегідь забезпечити достатній запас електроенергії для підтримки тяги або для утримання ДВЗ в ефективній зоні. Якщо прогнозується міська ділянка з частими гальмуваннями, то батарею варто не тримати повністю зарядженою, щоб не втратити потенціал рекуперації. Таким чином, предиктивне

керування природно поєднує ефективність і збереження ресурсу батареї, оскільки воно уникає крайніх режимів, де потрібні високі струми або відбувається зайва зарядка-розрядка.

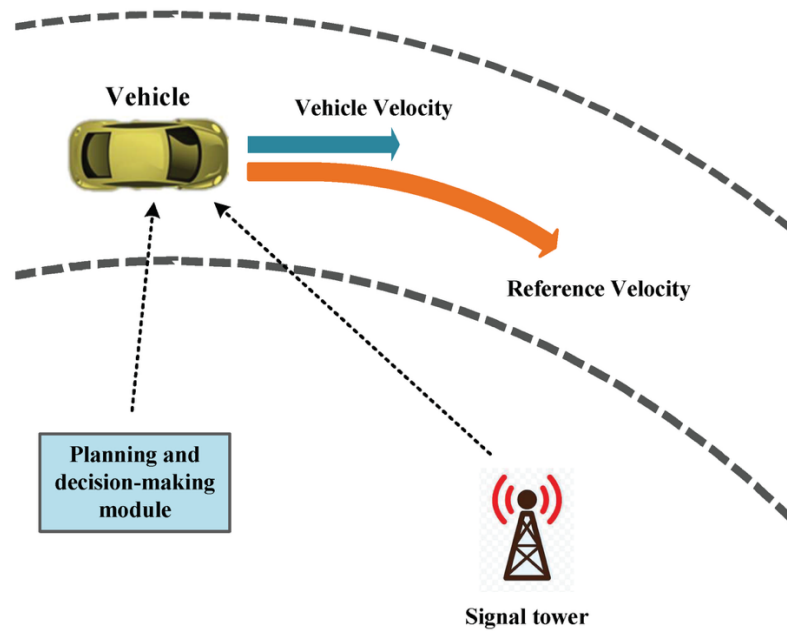


Рисунок 1.11 – Принципова схема отримання інформації транспортним засобом для предиктивного керування

Базові підходи до керування енергією також мають враховувати багатокритеріальність задачі. Мінімізація витрати палива є очевидною ціллю, але для реальних систем важливими є також знос та деградація батареї, теплові обмеження, комфорт водіння, вимоги до викидів та стійкість роботи при невизначеності. Високі струми зарядки та розрядки збільшують втрати і теплове навантаження, а також можуть прискорювати деградацію. Тому енергоменеджмент має включати обмеження на потужність батареї, температурні пороги та бажані швидкості зміни SOC, щоб уникати режимів, які небажані з точки зору ресурсу. Для гібридів із гібридними системами накопичення енергії додається ще одна свобода – розподіл потужності між двома накопичувачами з різними властивостями, що дозволяє, наприклад, перенести пікові навантаження на елемент із високою питомою потужністю і зменшити стрес для батареї. У такій системі керування енергією стає багаторівневим: верхній рівень розподіляє загальну потужність між ДВЗ та електричною гілкою, а внутрішній рівень розподіляє електричну потужність між накопичувачами, забезпечуючи узгодження за напругою, струмами і температурними режимами.

1.4 Висновки та постановка завдання на магістерську роботу

Проведений аналіз підтверджує актуальність дослідження гібридних транспортних засобів у сучасних умовах розвитку електромобільності. Зростання попиту на електрифікований транспорт обумовлене необхідністю підвищення енергоефективності, зменшення витрати палива та скорочення негативного впливу на довкілля, особливо в міських режимах руху з частими розгонами і гальмуваннями. Гібридизація силових установок дозволяє поєднати переваги двигуна внутрішнього згоряння та електроприводу, однак фактичний ефект значною мірою визначається якістю керування енергетичними потоками між агрегатами. У світі тенденції розвитку спрямовані на впровадження оптимізаційних та предиктивних стратегій розподілу енергії з використанням прогнозу маршруту і трафіку, тоді як в Україні актуальність таких рішень підсилюється нерівномірністю зарядної інфраструктури та потребою забезпечення стабільної ефективності в різних умовах експлуатації. Отже, розробка та вдосконалення стратегій керування розподілом енергії в гібридах із застосуванням оптимізаційних методів є важливим напрямом, що дозволяє підвищити ефективність силової установки без зміни її апаратної конфігурації.

Для досягнення мети магістерської роботи необхідно вирішити такі задачі в наступних розділах:

1. Проаналізувати сучасний стан та основні тенденції розвитку електромобільності і гібридизації транспортних засобів у світі та в Україні, визначивши ключові технічні й інфраструктурні фактори, що впливають на ефективність електрифікованого транспорту.
2. Провести класифікацію електрифікованих транспортних засобів за типом силової установки та способом поповнення енергії, обґрунтувавши місце NEV і PHEV як найбільш релевантних об'єктів для задачі оптимізації розподілу енергії.
3. Розглянути конструктивне та схемне виконання гібридних силових установок, визначити типову структуру енергетичних потоків і режимів роботи, а також сформулювати перелік ключових параметрів, що характеризують роботу агрегатів.
4. Виконати розрахунок основних вузлів гібридного транспортного засобу для побудови математичної моделі, включаючи тяговий розрахунок, узгодження потужності ДВЗ та електромашини, вибір параметрів батареї, силової електроніки й трансмісії з урахуванням обмежень за струмами, напругою та тепловими режимами.

5. Дослідити технічні підходи до формування горизонту прогнозування та підключеності гібридних транспортних засобів, розглянувши роль сенсорів і засобів зв'язку V2V, V2I, V2X у підготовці прогнозних даних для керування енергією.

6. Проаналізувати основні стратегії та алгоритми керування розподілом енергії в гібридах та розробити предиктивну оптимізаційну стратегію керування розподілом енергії в гібридному транспортному засобі на основі математичної моделі та прогнозної інформації.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Конструктивні схеми гібридних силових установок

Конструктивна схема гібридної силової установки визначає, яким чином двигун внутрішнього згоряння та електрична машина взаємодіють між собою і з ведучими колесами, через які канали передається потужність, де саме можливе роз'єднання або сумування моментів, а також які режими руху можуть бути реалізовані без втрати керованості та надійності. На практиці вибір архітектури гібрида є компромісом між енергетичною ефективністю, вартістю та складністю компонування, масогабаритними обмеженнями, вимогами до динаміки і можливістю реалізації розвинених алгоритмів керування розподілом енергії. Для задачі оптимізаційного керування особливо важливо, що різні схеми створюють різний простір керувальних дій: у одних архітектурах енергоменеджмент має прямий вплив на розподіл моментів і запуск ДВЗ, у інших – може додатково керувати перетворенням механічної енергії в електричну та навпаки, а також обирати режими, де силова установка працює як послідовна, паралельна або комбінована.

Базово гібридні силові установки поділяють на серійні, паралельні, послідовно-паралельні (power-split) та їх модифікації, включно з рознесеними по осях схемами. Хоча класифікація виглядає простою, конструктивні відмінності між цими рішеннями суттєво впливають на енергетичні потоки, ефективність у різних режимах і складність синтезу керування. Усі ці архітектури, незалежно від реалізації, складаються з джерел енергії (паливо і електроенергія), перетворювачів (ДВЗ, електромашини, інвертор, генераторні ланки), механічної частини передавання моменту (трансмісія, редуктори, зчеплення, планетарні механізми), накопичувача енергії (тяговий акумулятор) та системи керування, яка координує режими роботи агрегатів.

Серійна гібридна схема характеризується тим, що двигун внутрішнього згоряння 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. Конструктивна перевага цієї схеми полягає у спрощенні механічної частини та у можливості підтримувати ДВЗ у відносно стабільному діапазоні ефективності, оскільки його робота відокремлена від миттєвих змін тягового навантаження.

Енергоменеджмент у серійному гібриді зводиться до оптимального керування потужністю генератора і батареї з урахуванням SOC та прогнозу навантажень, а також до вибору моментів вмикання і вимикання ДВЗ. Водночас основним недоліком серійної схеми є наявність двох послідовних перетворень енергії на шляху від палива до коліс, що створює додаткові втрати на генераторі та інверторі. У режимах високих швидкостей і сталого руху ці втрати можуть зробити серійну схему менш ефективною, ніж паралельну, якщо не застосовані спеціальні оптимізаційні рішення або якщо електромашина і силова електроніка не мають дуже високого ККД.

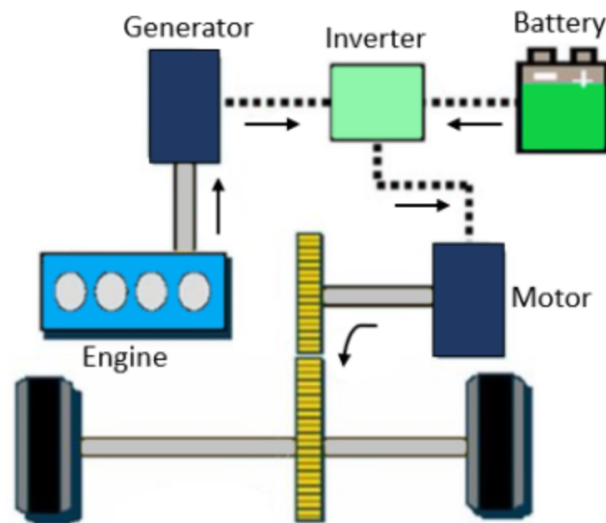


Рисунок 2.1 – Серійна гібридна схема

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 електромашина 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 електромашина виконує роль підсилювача моменту, рекуператора та, за потреби, тягового двигуна на коротких ділянках. Для керування енергією це означає, що алгоритм має вибирати частку моменту, яку доцільно забезпечити ДВЗ, і частку, яку варто сформувати електроприводом, щоб ДВЗ працював у більш економічних зонах, а батарея не виходила за допустимі межі SOC і потужності. Недолік паралельної схеми пов'язаний із необхідністю складного узгодження режимів ДВЗ і трансмісії, особливо при перемиканні передач, а також із тим, що ДВЗ у багатьох ситуаціях залишається жорстко прив'язаним до швидкості руху через

механічний зв'язок, що обмежує можливість підтримувати його в оптимальній зоні ефективності без додаткових засобів, таких як варіатор або багаторежимні зчеплення.

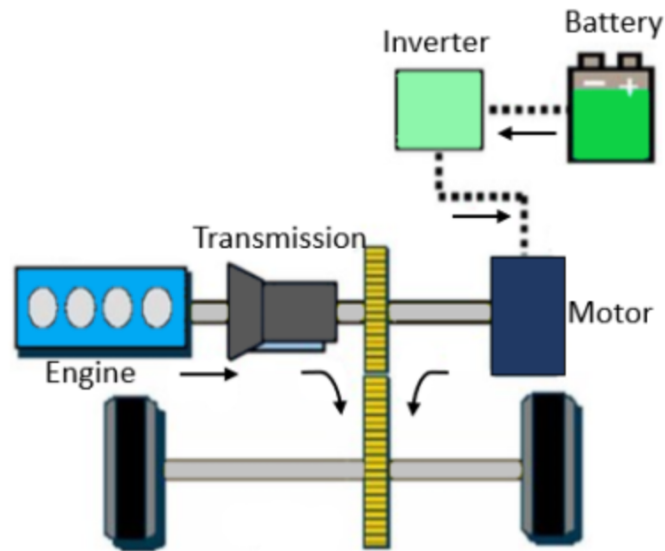


Рисунок 2.2 – Паралельна гібридна схема

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.

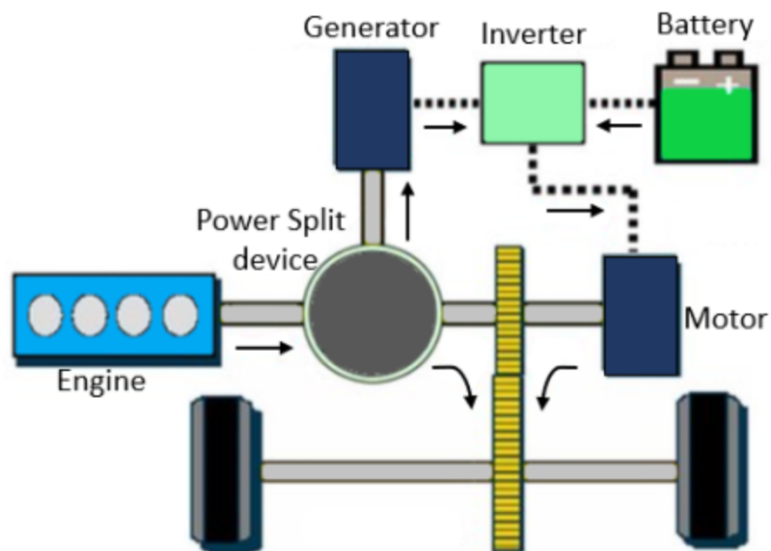


Рисунок 2.3 – Послідовно-паралельна гібридна схема

Окрему групу становлять рознесені по осях схеми, коли ДВЗ приводить одну вісь, а електропривод – іншу. Така архітектура особливо цікава тим, що дозволяє реалізувати електрифікований повний привід без складної механічної роздавальної коробки та карданних передач, спрощує компонування і може покращувати керованість за рахунок незалежного регулювання моментів на осях. У цьому випадку керування енергією тісно пов'язане з керуванням стійкістю та тягово-динамічними характеристиками, оскільки розподіл моменту між осями одночасно впливає і на ефективність, і на безпеку руху. Недоліком може бути складність узгодження двох силових каналів при високих швидкостях та в умовах змінного зчеплення, а також потреба в точних моделях і швидких алгоритмах, які забезпечують стабільну поведінку автомобіля.

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.

2.2 Вузли гібридного транспортного засобу

Гібридний транспортний засіб є складною мехатронною системою, у якій ефективність, надійність і керованість визначаються не окремим агрегатом, а узгодженою роботою набору вузлів, об'єднаних механічними, електричними та інформаційними зв'язками. На відміну від традиційного автомобіля з ДВЗ, де основна енергетична трансформація відбувається переважно в одному джерелі тяги, у гібриді енергія може передаватися різними шляхами: механічним, електричним або змішаним, а режим роботи агрегатів часто змінюється в широкому діапазоні за дуже короткий час. Це висуває підвищені вимоги як до конструктивних характеристик вузлів, так і до системи керування, яка повинна враховувати їхні динамічні обмеження, втрати, температурні режими та ресурс. Саме тому під час аналізу вузлів гібридного транспортного засобу доцільно розглядати не лише їх призначення, а й параметри, що є критичними для побудови математичної моделі та синтезу алгоритмів розподілу енергії.

Центральним вузлом гібридної силової установки у багатьох архітектурах залишається двигун внутрішнього згоряння, який забезпечує високу енергетичну щільність палива і можливість тривалої роботи без зовнішньої інфраструктури. Для енергоменеджменту важливими є характеристики ефективності ДВЗ, які описуються картою питомої витрати палива в координатах оберти–крутний момент. Ця карта відображає, що ДВЗ має обмежену область найвигіднішої роботи, тоді як на малих навантаженнях, під час холостого ходу або частих перехідних режимів його ефективність знижується. У гібриді ДВЗ часто працює ривками, з частими запусками і зупинками, що вимагає відповідної конструктивної готовності стартера або інтегрованої електромашини, а також стабільної роботи системи впорскування та очищення вихлопу. Додатковим аспектом є тепловий режим: температура охолоджуючої рідини та вихлопної системи впливає на викиди та реальну витрату, тому система керування енергією має враховувати, що повна мінімізація палива не завжди сумісна з вимогами до швидкого прогріву або підтримання температури каталітичних елементів. Для математичної моделі ключовими параметрами ДВЗ є номінальна потужність,

моментна характеристика, карта ефективності, динаміка наростання моменту і обмеження на швидкість зміни навантаження.

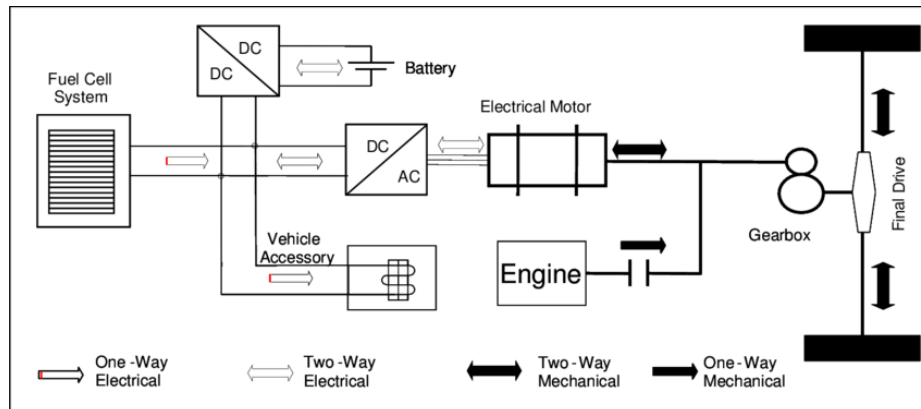


Рисунок 2.4 – Двигун внутрішнього згоряння в гібридній силовій установці

Електрична машина є другим основним тяговим елементом гібрида і може виконувати функції тягового двигуна, генератора, стартера ДВЗ і компенсатора піків потужності. В гібридних системах застосовуються синхронні машини з постійними магнітами або асинхронні машини, вибір між якими визначається вимогами до питомої потужності, ефективності, вартості і здатності працювати у широкому діапазоні швидкостей. З точки зору керування енергією важливими є карта ККД електромашини, максимальний доступний момент у функції швидкості, обмеження за струмом та температурою, а також можливість рекуперативного режиму. На малих швидкостях електромашини здатні забезпечувати високий момент, що дозволяє виконувати плавний старт і компенсувати інерційність ДВЗ. На високих швидкостях виникають обмеження по напруженості та ослабленню поля, що впливає на доступну потужність у верхній частині швидкісного діапазону. Для моделі необхідно визначити номінальні параметри електромашини, її електричні константи або узагальнену карту ефективності, а також втрати, які залежать від моменту, швидкості і температури.

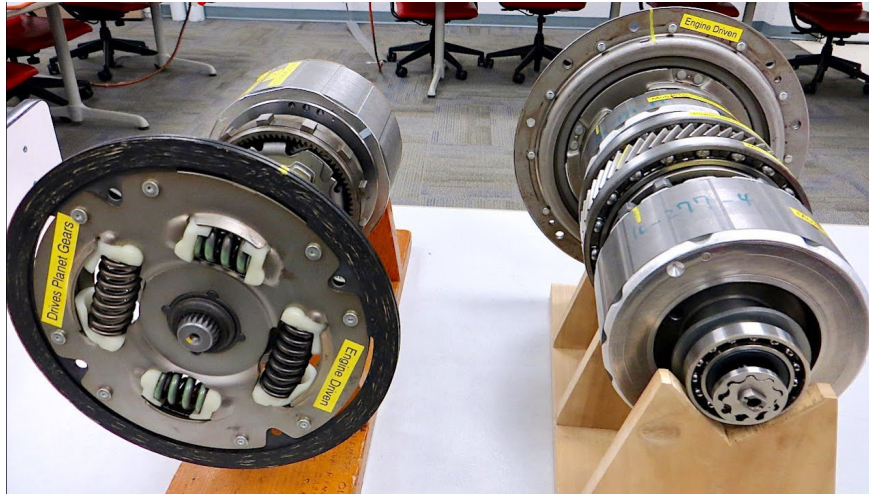


Рисунок 2.5 – Електричні машини в гібридній силовій установці

Тяговий акумулятор є ключовим накопичувачем енергії, який забезпечує електричні режими руху і приймає енергію рекуперації. У гібридному транспортному засобі батарея працює в умовах змінних струмів, частих циклів заряд-розряд і значних теплових навантажень, тому її роль виходить за межі простого джерела енергії. Для коректного керування необхідно оцінювати стан заряду, який не є безпосередньо вимірюваною величиною, а визначається через комбінацію вимірюваних струмів, напруги і моделей батареї. Окрім SOC, важливими є стан здоров'я, внутрішній опір, температурний стан та допустимі межі потужності. З точки зору оптимізаційного керування батарея задає основні обмеження: максимальний струм зарядки і розрядки, межі SOC, температурні пороги та обмеження на швидкість зміни потужності. Важливо також враховувати, що ефективність батареї залежить від температури і рівня заряду, а високі струми не лише збільшують втрати, а й прискорюють деградацію. У математичній моделі батарею зазвичай описують еквівалентною схемою із залежністю напруги холостого ходу від SOC і внутрішнім опором, який може змінюватися з температурою і віком, або застосовують розширені моделі для точнішого відображення динаміки напруги.



Рисунок 2.6 – Тяговий акумулятор в гібридній силовій установці

Силова електроніка є вузлом, що забезпечує перетворення енергії між батареєю і електромашиною, а також узгоджує різні рівні напруги в бортовій мережі. Тяговий інвертор керує струмами електромашини, реалізуючи заданий момент і забезпечуючи роботу як у тяговому, так і в рекуперативному режимі. DC/DC-перетворювачі забезпечують живлення низьковольтної мережі або можуть бути частиною системи підвищення напруги, якщо це потрібно для покращення питомої потужності і зниження струмів. Для енергоменеджменту важливі втрати в силовій електроніці, які залежать від струмів, частоти комутації і температури, а також обмеження за максимальною потужністю і струмами. У реальній експлуатації саме силова електроніка часто обмежує пікову потужність рекуперації або електричного прискорення, навіть якщо батарея має запас, тому її характеристики мають бути включені в обмеження оптимізаційної задачі.

Трансмісія і механічні з'єднувальні елементи визначають, як саме момент від ДВЗ і електромашини передається на колеса, а також які режими сумування або роз'єднання доступні. У паралельних та комбінованих схемах важливими є зчеплення, муфти та планетарні механізми, які дозволяють від'єднувати ДВЗ під час електроруху або задавати співвідношення між механічною та електричною гілками. ККД трансмісії, передатні числа, динаміка перемикачів і інерційні параметри впливають на реальні втрати та на можливість реалізації плавних переходів між режимами. Для системи керування енергією трансмісія задає додатковий рівень рішень: вибір передачі або режиму механічного з'єднання часто визначає, чи може ДВЗ працювати в ефективній зоні, і чи є можливість реалізувати рекуперацію на бажаному рівні. При побудові моделі необхідно враховувати втрати трансмісії, інерцію обертових мас та обмеження на момент, що передається через зчеплення або редуктори.

Гальмівна система у гібридному транспортному засобі фактично стає двоканалною, оскільки уповільнення може забезпечуватися як рекуперативним гальмуванням електромашини, так і фрикційними гальмами. Найбільш енергоефективним є максимальне використання рекуперації, однак вона обмежена умовами зчеплення шин, вимогами стабільності, допустимою потужністю батареї та її температурним станом. Тому необхідна координація гальмівних контурів, яка забезпечує задану водієм інтенсивність гальмування, але розподіляє її між електричним і механічним каналами так, щоб збільшити частку поверненої енергії і не погіршити керованість. Для математичної моделі та алгоритмів керування важливими є обмеження на момент рекуперації, характеристики гальмівної системи та логіка розподілу гальмівних сил по осях.

Системи термоменеджменту є критичними для гібридних транспортних засобів, оскільки ефективність і ресурс основних вузлів суттєво залежать від температури. Охолодження ДВЗ впливає на його ефективність і викиди, охолодження електромашини та інвертора визначає допустиму тривалість роботи на високій потужності, а термоконтур батареї визначає допустимі струми зарядки і розрядки, а також здатність приймати енергію рекуперації. Для алгоритмів оптимізаційного керування температура стає додатковим станом або обмеженням, оскільки іноді доцільно пожертвувати миттєвою ефективністю, щоб уникнути перегріву або прискореної деградації батареї. Це особливо важливо для предиктивних стратегій, які можуть передбачити майбутні теплові навантаження і завчасно скоригувати розподіл потужності.

Блок керування та вимірювальна інфраструктура об'єднують роботу всіх вузлів у єдину систему. Контролери різних підсистем обмінюються даними про стан агрегатів, формують команди керування та реалізують захисні режими. Для задачі розподілу енергії важливо мати доступ до достатньо точних сигналів: швидкості, прискорення, моменту, обертів, струмів, напруги, температур, а також інформації про режим трансмісії та гальмування. Неточність оцінювання SOC або температури безпосередньо впливає на оптимізаційні рішення, оскільки може призвести до перевищення допустимих режимів або до консервативної роботи з втратою ефективності. Для реалізації предиктивних стратегій додатково потрібні дані від навігації, прогноз рельєфу, трафіку та, за наявності, інформація від інфраструктури зв'язку, що формує горизонт прогнозування для енергоменеджменту.

2.3 Технології вимірювання та дані для керування

Ефективне керування розподілом енергії в гібридному транспортному засобі неможливе без достовірного вимірювання параметрів руху, стану силових агрегатів та накопичувачів енергії, а також без коректної інтерпретації цих вимірювань у вигляді керованих змінних і обмежень. У гібриді рішення про запуск або зупинку ДВЗ, розподіл моментів між ДВЗ та електромашиною, рівень рекуперації і підтримання траєкторії стану заряду залежать від великої кількості факторів, частина з яких є безпосередньо вимірюваною, а частина оцінюється алгоритмічно.

Найбільш фундаментальною групою вимірювань є параметри руху автомобіля, оскільки вони визначають миттєву потребу в тязі та потенціал рекуперації. До базових належать швидкість, прискорення, кут повороту керма, кутова швидкість обертання навколо вертикальної осі, а також інформація про положення педалі акселератора і гальма. Саме ці величини визначають запит водія і умови стабільності, а отже задають межі, в яких може працювати енергоменеджмент. Похибка вимірювання швидкості або затримки в сигналах можуть призвести до неправильного оцінювання тягової потреби, особливо в перехідних режимах, що критично для алгоритмів, які намагаються мінімізувати витрати шляхом точного узгодження моментів ДВЗ та електроприводу. У гібридах важливим є також розуміння дорожніх умов: зчеплення шин, нахил дороги та опір руху визначають реальне навантаження на силову установку. Частина цих величин оцінюється непрямыми методами на основі моделі поздовжньої динаміки та спостережень за реакцією автомобіля на керувальні дії.

Ключовою підсистемою вимірювання є система контролю ДВЗ, оскільки двигун має інерційні обмеження і складну залежність ефективності від робочої точки. Для керування енергією необхідні оберти колінчастого вала, оцінка або вимірювання крутного моменту, витрата палива або параметри, що дозволяють її обчислити, температура охолоджуючої рідини, температура масла та, за потреби, параметри системи очищення вихлопу. У сучасних системах реальний момент ДВЗ може визначатися через моделі та сенсори, що враховують положення дроселя, тиск наддуву, масову витрату повітря та паливоподачу. Для енергоменеджменту важливо не лише знати поточний момент, а й розуміти доступний діапазон моменту з урахуванням температур, обмежень по викидах і допустимій швидкості зміни навантаження.

Для електроприводу та силової електроніки найважливішими є вимірювання електричних величин, які визначають миттєві можливості

створення моменту і рекуперації. Це, насамперед, фазні струми електромашини або їхні узагальнені компоненти в системі керування, напруга на шині постійного струму, температура силових модулів інвертора, температура обмоток і ротора електромашини, а також оберти електромашини. У контурі керування моментом ці вимірювання працюють на високій частоті, забезпечуючи точне відтворення команд, тоді як енергоменеджмент використовує їх для формування обмежень, наприклад максимального доступного моменту або максимальної потужності рекуперації в залежності від температури і напруги.

Тяговий акумулятор є вузлом, де вимірювання і оцінювання стану мають особливу складність, оскільки основні інформативні параметри є прихованими. Безпосередньо вимірюються напруга на клеммах, струм зарядки або розрядки, а також температури модулів або осередків. На основі цих даних оцінюється стан заряду, який визначає доступну енергію, і стан здоров'я, який характеризує деградацію ємності та зростання внутрішнього опору. Для керування енергією в гібриді оцінка SOC є критичною, оскільки вона задає можливість електроруху, рівень допустимої рекуперації та обмежує рішення щодо запуску ДВЗ. Особливе значення має температурна карта батареї, оскільки допустимі струми і ефективність суттєво залежать від температури, а високі струмові режими в холодному стані можуть обмежуватися з метою захисту осередків.

Гальмівна підсистема та системи активної безпеки формують окремий шар даних, який впливає на реалізацію рекуперації. Для ефективного повернення енергії потрібно знати запит водія на гальмування, доступний рівень рекуперативного моменту з боку електромашини, а також обмеження, що накладаються системами ABS і ESC. У ситуаціях, де зчеплення є низьким або існує ризик блокування коліс, рекуперація може бути обмежена, і система повинна плавно передати частину гальмівного зусилля на фрикційні гальма, не порушуючи стабільності. Для цього важливими є сигнали швидкості коліс, станів антиблокувальної системи та оцінка коефіцієнта зчеплення, які дозволяють визначити межі енергоповернення в конкретний момент часу. Для оптимізаційного керування ці дані часто виступають як обмеження, що звужують можливу область рішень, а отже впливають на потенційний виграш від гібридизації.

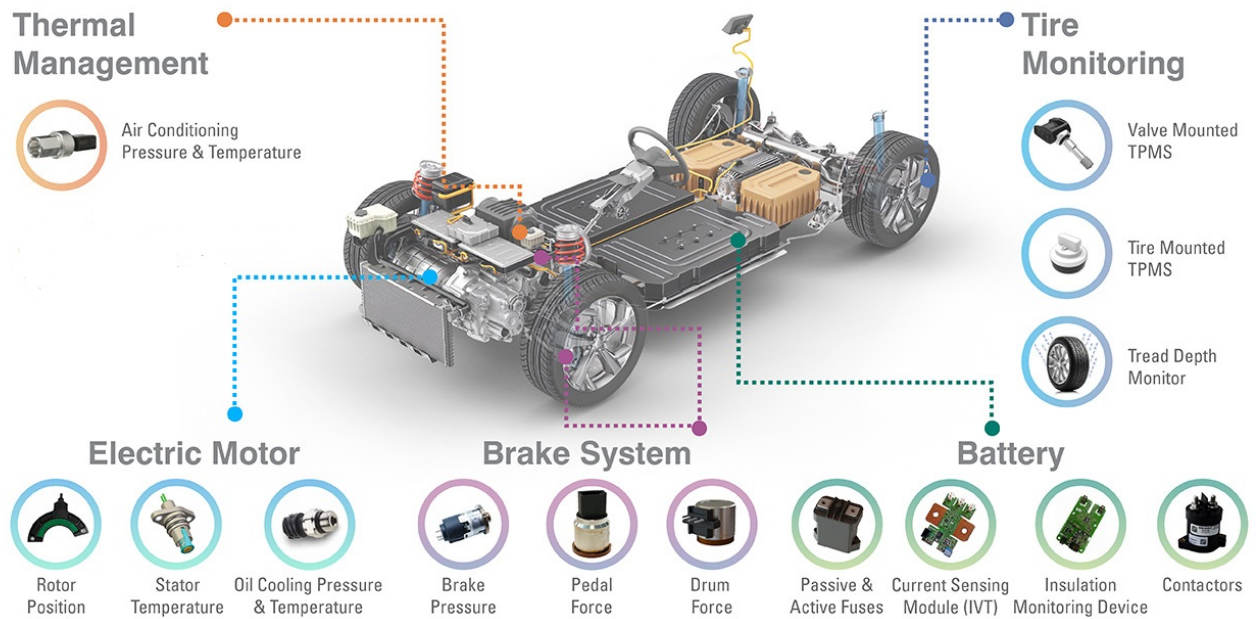


Рисунок 2.7 – Система вимірювальних датчиків і сенсорів у гібридному автомобілі

Для переходу від реактивного до предиктивного керування потрібні дані про майбутні умови руху. Основним джерелом є навігаційні системи, які надають профіль маршруту, очікувану довжину поїздки, дозволені швидкості, типові зупинки та рельєф. На основі цифрових карт можна отримати нахил дороги, що є критичним фактором для прогнозу необхідної потужності на підйомах і потенціалу рекуперації на спусках. Іншим важливим джерелом є інформація про трафік, яка дозволяє прогнозувати зміну швидкості та ймовірність заторів. Якщо є доступ до даних інфраструктури або інших транспортних засобів, можливе формування більш точного горизонту прогнозування через V2I, V2V або ширші сценарії V2X, де передаються сигнали світлофорів, обмеження швидкості, попередження про події на дорозі та інші параметри. Для енергоменеджменту така інформація трансформується у прогноз профілю швидкості, прискорень і, відповідно, необхідної тягової потужності, що дозволяє планувати використання батареї і запуск ДВЗ більш раціонально.

Формування даних для керування включає не лише вимірювання, а й оцінювання станів і параметрів через спостерігачі та моделі. У гібридному транспортному засобі широко застосовуються алгоритми оцінювання SOC і SOH батареї, оцінювання доступної потужності за температурою, оцінювання дорожнього нахилу і коефіцієнта зчеплення, а також оцінювання реального моменту агрегатів. Така модельно-орієнтована діагностика необхідна тому, що частина величин не може бути виміряна безпосередньо або вимірювання було б надто дорогим чи ненадійним. Однак застосування оцінювачів вводить у систему

невизначеність, оскільки оцінка залежить від якості моделі і від шуму вхідних даних. Тому для оптимізаційних алгоритмів важливо враховувати затримки, похибки та можливість відмови датчиків, застосовуючи механізми фільтрації, перевірки правдоподібності та деградаційні режими керування, які зберігають безпеку при втраті частини інформації.

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Вихідні дані та вимоги до об'єкта моделювання

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. Важливо, що енергоменеджмент у гібриді є задачею, де оптимальність рішень залежить від наявних обмежень агрегатів, від структури маршруту та від вибраного критерію ефективності. Тому вихідні дані мають охоплювати як геометрію та масо-інерційні характеристики автомобіля, так і енергетичні характеристики силової установки, обмеження батареї, параметри перетворювачів і трансмісії, а також характеристики типових сценаріїв руху.

Першою складовою вихідних даних є опис транспортного засобу як об'єкта поздовжньої динаміки. Для коректного визначення тягових потреб необхідні маса автомобіля з урахуванням пасажирів і вантажу, радіус коліс, передатні числа трансмісії та головної передачі, коефіцієнти опору коченню, аеродинамічні параметри, зокрема лобова площа і коефіцієнт аеродинамічного опору, а також ефективність трансмісії. Ці дані визначають, яку потужність необхідно подати на колеса для заданого профілю швидкості, і є основою для розрахунку необхідної потужності силової установки в кожен момент часу.

Другою складовою вихідних даних є вибір гібридної архітектури та рівня гібридизації, оскільки саме структура силової установки визначає набір можливих режимів і доступних керувальних дій. Для задачі дослідження стратегій розподілу енергії доцільно формалізувати, чи є об'єкт HEV або PHEV, яку схему використано – паралельну, серійну або комбіновану, і які з'єднувальні елементи визначають перемикання режимів. Якщо розглядається PHEV, додатковою вимогою є визначення початкового стану заряду батареї та політики його використання по маршруту, оскільки це прямо впливає на оптимальне рішення.

Третьою складовою є параметризація ДВЗ як енергетичного джерела. Для моделі необхідно задати номінальну потужність і максимальний крутний момент, залежність максимального моменту від обертів, карту питомої витрати

палива або узагальнену модель витрати в функції потужності і швидкості, а також динамічні обмеження, які відображають швидкість наростання моменту, затримки системи керування та обмеження по температурі. Якщо модель використовується для синтезу предиктивного керування, важливо, щоб вона коректно описувала різницю між миттєвими втратами в ДВЗ при переходних процесах і ефективністю при сталому режимі, оскільки саме ці ефекти часто визначають доцільність електричного підсилення або вимкнення ДВЗ.

Четвертою складовою є опис електроприводу та силової електроніки. Для електромашини необхідно задати номінальну і максимальну потужність, межі моменту в функції швидкості, карту ККД або модель втрат, а також обмеження за струмом і температурою. Для інвертора необхідно врахувати втрати перетворення, обмеження по струму і напрузі на DC-шині, а також температурні обмеження силових ключів. У практичній задачі розподілу енергії ці параметри визначають реальну доступність електричного підсилення і рекуперації. Якщо модель не враховує падіння доступної потужності при перегріві або при високій напрузі батареї, вона може переоцінювати потенціал електричної гілки і формувати керувальні рішення, які неможливо реалізувати.

П'ятою складовою вихідних даних є опис тягового акумулятора та системи керування батареєю. Для моделі необхідно задати номінальну ємність, номінальну напругу або діапазон напруги, залежність напруги холостого ходу від SOC, внутрішній опір, який визначає втрати і падіння напруги під навантаженням, межі SOC та максимально допустимі струми зарядки і розрядки. Оскільки в оптимізаційній задачі SOC є ключовою змінною стану, важливо забезпечити коректний баланс енергії й відображення обмежень батареї. У вимогах до об'єкта моделювання потрібно також визначити, як враховується деградація батареї.

Шостою складовою є визначення сценаріїв руху і профілів навантаження, на яких буде виконуватися моделювання і порівняння стратегій керування. Для коректної оцінки енергоменеджменту необхідно вибрати їздові цикли або реальні маршрути, які охоплюють різні режими: міський, заміський, змішаний, а також режими з перепадами висот. Для предиктивних стратегій важливо, щоб сценарій містив інформацію, яка може бути доступною наперед, наприклад профіль ухилів або очікувану швидкість, а також щоб була визначена довжина горизонту прогнозування. У вимогах до об'єкта моделювання доцільно задати, які саме сигнали вважаються відомими на горизонті, які мають похибки і як ці похибки моделюються.

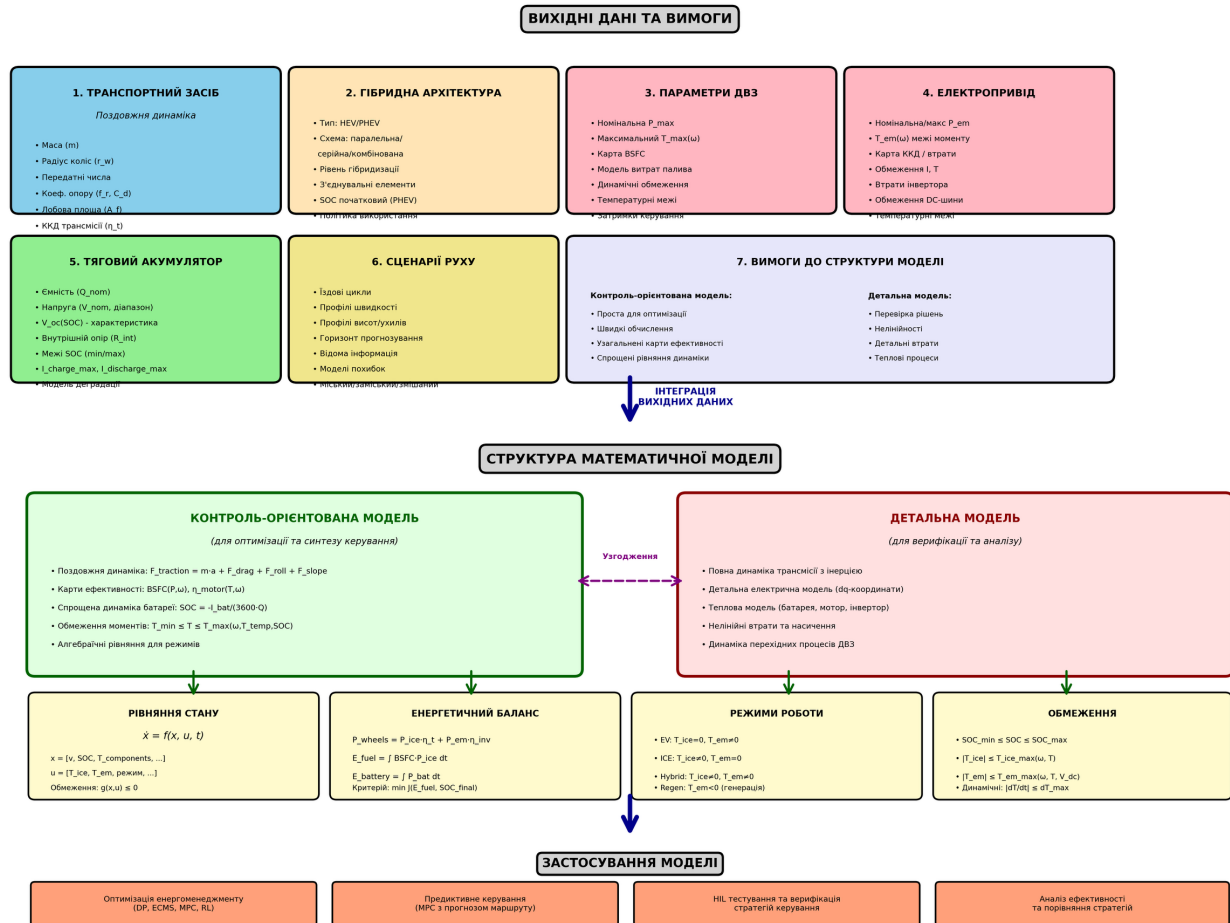


Рисунок 3.1 – Функціональна схема представлення математичної моделі гібриду

Оскільки модель повинна бути придатною до оптимізаційних методів, важливо сформулювати вимоги до її структури з точки зору чисельної реалізації. Для синтезу оптимального або предиктивного керування потрібна модель, яка є достатньо простою для багаторазових обчислень на горизонті і не містить надмірної жорсткості, що ускладнює оптимізацію. Це часто означає використання контроль-орієнтованої моделі, де складні фізичні процеси апроксимуються узагальненими картами ефективності та спрощеними динамічними рівняннями. Паралельно доцільно мати більш детальну модель для перевірки, де можуть бути враховані нелінійності, детальні втрати і теплові процеси. Вимога узгодження двох рівнів моделі є важливою, оскільки оптимізаційний алгоритм повинен переноситися на реалістичніший рівень без втрати адекватності результатів.

3.2 Розрахунок параметрів та узгодження вузлів силової установки

Розрахунок параметрів та узгодження вузлів гібридної силової установки є ключовим етапом, який забезпечує фізичну реалізованість математичної моделі та коректність подальшого синтезу алгоритмів розподілу енергії. На цьому етапі виконують тяговий і енергетичний розрахунок, визначають потрібні діапазони потужності та моменту для ДВЗ і електромашини, узгоджують параметри тягової батареї й силової електроніки, а також перевіряють, чи забезпечуються задані динамічні вимоги на характерних режимах руху. Для гібридного транспортного засобу важливо, що узгодження не зводиться до підбору номінальних значень; необхідно забезпечити працездатність у широкому спектрі режимів, включно з пуском, розгоном, рухом на підйомі, рекуперативним гальмуванням та тривалим рухом із заданою швидкістю.

Початковою складовою є поздовжній тяговий розрахунок, який дозволяє визначити необхідну силу тяги на колесах і потужність, що повинна бути забезпечена силовою установкою. Загальне рівняння сил для прямолінійного руху може бути записане як сума опорів та інерційної складової:

$$F_{tr} = F_{tr} + F_{aero} + F_{grade} + F_{in} \quad (3.1)$$

де F_{tr} – необхідна сила тяги на колесах; F_{tr} – сила опору коченню; F_{aero} – аеродинамічний опір; F_{grade} – складова опору підйому; F_{in} – інерційна складова.

Опір коченню зазвичай моделюють як

$$F_{tr} = mgC_{tr} \quad (3.2)$$

де m – маса автомобіля; g – прискорення вільного падіння; C_{tr} – коефіцієнт опору коченню.

Аеродинамічний опір описують формулою

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (3.3)$$

де ρ – густина повітря; C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору; A – лобова площа; v – швидкість руху.

Опір підйому визначається через кут ухилу дороги θ :

$$F_{grade} = mg \sin(\theta) \quad (3.4)$$

а інерційна складова

$$F_{in} = m_{eq} a \quad (3.5)$$

де a – прискорення; m_{eq} – еквівалентна маса, що враховує обертові маси трансмісії та коліс. У простому випадку її задають як

$$m_{eq} = m(1 + \delta) \quad (3.6)$$

де δ – коефіцієнт, який враховує вплив обертових мас.

Після визначення необхідної сили тяги потужність на колесах обчислюють як

$$P_w = F_{tr} v \quad (3.7)$$

а необхідний крутний момент на колесах

$$T_w = F_{tr} r_w \quad (3.8)$$

де r_w – динамічний радіус колеса.

Для переходу від колісних величин до величин на валу силового агрегату потрібно врахувати передатне число трансмісії i_t , передатне число головної передачі i_0 та ККД трансмісії η_t . Тоді момент на вході трансмісії:

$$T_{in} = \frac{T_w}{i_t i_0 \eta_t} \quad (3.9)$$

а кутова швидкість на вході трансмісії:

$$\omega_{in} = \frac{v}{r_w} i_t i_0 \quad (3.10)$$

Потужність на вході трансмісії:

$$P_{in} = \frac{P_w}{\eta_t} \quad (3.11)$$

Ці співвідношення формують основу для узгодження агрегатів, оскільки показують, які моменти та швидкості потрібні від ДВЗ і електромашини на різних режимах.

Далі визначають вимоги до динамічних характеристик, які зазвичай задаються як час розгону до певної швидкості, максимальна швидкість та здатність рухатися на заданому ухилі з заданою швидкістю. Для оцінки потужності, необхідної на сталому русі на швидкості v , достатньо врахувати опори без інерційної складової:

$$P_{w,ss} = (mgC_{rr} + \frac{1}{2}\rho C_d A v^2 + mgsin \theta)v \quad (3.12)$$

Ця формула дозволяє оцінити, яку мінімальну механічну потужність повинна забезпечувати силова установка в умовах тривалого руху, наприклад на автобані або на підйомі.

У гібриді розрахунок номінальної потужності ДВЗ та електромашини виконується з урахуванням розподілу ролей між ними. ДВЗ доцільно узгоджувати під забезпечення середньої потужності та вискоєфективних режимів, тоді як електромашини забезпечує піки тягової потужності і рекуперацію. Узагальнено сумарна тягово-доступна потужність у режимі комбінованої тяги може бути записана як

$$P_{tr,avail} = \eta_{mech} P_{ICE} + \eta_e P_{EM} \quad (3.13)$$

де P_{ICE} – потужність ДВЗ; P_{EM} – потужність електромашини; η_{mech} і η_e – узагальнені коефіцієнти, що враховують втрати механічного та електричного

каналів. На практиці ці коефіцієнти залежать від режиму, тому в моделі часто переходять до карт ефективності, але навіть таке узагальнення корисне для первинного узгодження.

Для ДВЗ важливо визначити діапазон робочих точок і максимальний момент як функцію обертів. Механічний зв'язок моменту, потужності і швидкості задається:

$$P_{ICE} = T_{ICE} \omega_{ICE} \quad (3.14)$$

На рівні розрахунку узгодження доцільно задати максимальний момент $T_{ICE,max}(\omega)$ і перевірити, чи забезпечує він вимоги до розгону і руху на підйомі при вибраних передатних числах. Для цього необхідно пов'язати ω_{ICE} з швидкістю руху через трансмісію і радіус колеса. Якщо використовується дискретна коробка передач, для кожної передачі отримують свою залежність:

$$\omega_{ICE}(v) = \frac{v}{r_w} i_t i_0 \quad (3.15)$$

В результаті можна оцінити доступну колісну силу від ДВЗ на конкретній передачі:

$$F_{ICE}(v) = \frac{T_{ICE}(\omega_{ICE}(v)) i_t i_0 \eta_t}{r_w} \quad (3.16)$$

Порівняння $F_{ICE}(v)$ з необхідною тяговою силою $F_{tr}(v)$ дозволяє визначити, де ДВЗ самостійно забезпечує рух, а де потрібне електричне підсилення.

Для електромашини аналогічно використовують залежність доступного моменту від швидкості:

$$P_{EM} = T_{EM} \omega_{EM} \quad (3.17)$$

Електромашини має характерну область сталого моменту на малих швидкостях і область сталої потужності на високих швидкостях. Для спрощеного узгодження можна задати:

$$T_{EM,max}(\omega) = \begin{cases} T_{EM,rated}, & \omega \leq \omega_b \\ \frac{P_{EM,max}}{\omega}, & \omega > \omega_b \end{cases} \quad (3.18)$$

де ω_b — базова кутова швидкість, що відповідає переходу до режиму ослаблення поля; $T_{EM,rated}$ — граничний момент у зоні сталого моменту; $P_{EM,max}$ — максимальна потужність у зоні сталої потужності. Така модель дозволяє первинно оцінити, чи електропривод здатен покрити піки навантаження в потрібному діапазоні швидкостей.

Параметри тягового акумулятора узгоджують, виходячи з потрібної електричної потужності для електроприводу, обмежень за струмами та необхідного запасу енергії для заданих режимів. Для зв'язку потужності батареї, напруги та струму використовують:

$$P_b = U_b I_b \quad (3.19)$$

У моделі батареї з внутрішнім опором напруга на клемі визначається як

$$U_b = U_{oc}(SOC) - I_b R_{int} \quad (3.20)$$

де $U_{oc}(SOC)$ – напруга холостого ходу, залежна від SOC; R_{int} – внутрішній опір. Втрати в батареї:

$$P_{loss,b} = I_b^2 R_{int} \quad (3.21)$$

Саме ця залежність показує, що великі струми різко збільшують втрати і теплове навантаження, а отже в оптимізаційному керуванні доцільно обмежувати пікові струми або вводити штрафи за їх зростання.

Динаміка стану заряду описується через баланс заряду:

$$\frac{dSOC}{dt} = - \frac{I_b}{Q_{nom}} \quad (3.22)$$

де Q_{nom} – номінальна ємність батареї в ампер-годинах (у разі використання SI часто переводять у кулони). Якщо використовувати енергетичну форму, можна записати через потужність:

$$\frac{dSOC}{dt} \approx - \frac{P_b}{E_{nom}} \quad (3.23)$$

де E_{nom} – номінальний запас енергії батареї. Така апроксимація застосовується в контроль-орієнтованих моделях, коли важливо швидко обчислювати зміну SOC на горизонті.

Узгодження батареї також включає перевірку допустимих струмів зарядки і розрядки, які задаються через максимальні значення $I_{dis,max}$ та $I_{ch,max}$ і відповідні межі потужності:

$$P_{dis,max} = U_b I_{dis,max}, P_{ch,max} = U_b I_{ch,max} \quad (3.24)$$

Ці межі прямо визначають максимальну тягову електропотужність і максимальну потужність рекуперації. Якщо в задачі передбачається інтенсивна рекуперація, необхідно перевірити, чи не буде батарея обмежувати енергоповернення через високий SOC або низьку температуру, а також чи достатній запас по $P_{ch,max}$ для прийому енергії на типових гальмуваннях.

Силу електроніку узгоджують за максимальною потужністю, струмами та напругами. Якщо η_{inv} – ККД інвертора, то зв'язок між потужністю батареї та потужністю електромашини у тяговому режимі можна записати як

$$P_{EM} = \eta_{inv} P_b - P_{loss,EM} \quad (3.25)$$

а в рекуперативному режимі

$$P_b = \eta_{inv} P_{EM,gen} - P_{loss,inv} \quad (3.26)$$

де $P_{loss,EM}$ і $P_{loss,inv}$ – втрати в електромашині та інверторі. У спрощеному узгодженні часто використовують сумарну ефективність електричного каналу

η_e , але для коректного обмеження рекуперації важливо виділити окремі межі по струму інвертора та по напрузі DC-шини.

Після узгодження номіналів агрегатів необхідно сформулювати набір обмежень, які згодом будуть використовуватися в оптимізаційній задачі. По суті, це допустима область керування, яка задається як обмеження на моменти, потужності та SOC:

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (3.27)$$

$$0 \leq T_{ICE}(t) \leq T_{ICE,\max}(\omega_{ICE}) \quad (3.28)$$

$$-T_{EM,\max,\text{gen}}(\omega_{EM}) \leq T_{EM}(t) \leq T_{EM,\max}(\omega_{EM}) \quad (3.29)$$

$$|I_b(t)| \leq I_{\max}(SOC, T) \quad (3.30)$$

Ці обмеження формують фізичні межі, в яких алгоритм розподілу енергії повинен знаходити оптимальні рішення, і вони є критичними для реалізованості предиктивної стратегії.

Окремо необхідно врахувати умови узгодження рекуперативного гальмування. Максимальна рекуперативна сила на колесах, обмежена можливостями електромашини і батареї, може бути записана як

$$F_{\text{regen},\max} = \frac{T_{EM,\text{gen},\max} i_t i_0 \eta_t}{r_w} \quad (3.31)$$

але фактично вона не може перевищувати межу, визначену зчепленням шин з дорогою:

$$F_{\text{brake},\max} \leq \mu mg \quad (3.32)$$

де μ – коефіцієнт зчеплення. Це означає, що навіть за високих можливостей електроприводу рекуперація може бути обмежена дорожніми умовами або системами стабілізації, що повинно бути враховано у моделях та сценаріях оцінювання.

3.3 Підключеність гібридів і горизонт прогнозування

Підключеність гібридних транспортних засобів є технологічною основою переходу від реактивного керування енергією до керування, що враховує майбутні умови руху. У традиційних гібридах рішення про розподіл потужності між ДВЗ та електроприводом приймаються переважно на основі поточних вимірювань швидкості, прискорення, стану заряду батареї та запиту водія. Такий підхід може бути ефективним у середньому, але він принципово обмежений, оскільки не дозволяє цілеспрямовано планувати використання електроенергії батареї як ресурсу на майбутніх ділянках маршруту. У підключеному гібриді з'являється можливість отримувати дані про рельєф, дорожні обмеження,

світлофорні фази, трафік та події на маршруті, а також обмінюватися даними з іншими транспортними засобами й інфраструктурою. Це створює умови для формування горизонту прогнозування, тобто інтервалу майбутнього часу або відстані, на якому система керування має прогноз вхідних збурень і може оптимізувати керувальні дії з урахуванням цього прогнозу. Для гібридів, особливо PHEV, горизонт прогнозування безпосередньо впливає на ефективність, оскільки дозволяє розподіляти SOC по маршруту так, щоб електричний ресурс використовувався там, де він дає максимальний виграш, і зберігався там, де він менш ефективний або потрібен для прийому рекуперації.

Підключеність транспортного засобу формується на основі двох основних джерел інформації: бортової сенсорики та зовнішніх даних. До бортової сенсорики належать системи сприйняття оточення та стану руху, які вже використовуються в системах допомоги водієві. Камери дозволяють розпізнавати дорожні знаки, смуги руху, сигнали світлофорів і оцінювати поведінку потоку. Радари забезпечують вимірювання відстані та відносної швидкості до об'єктів попереду і можуть використовуватися для прогнозу необхідних розгонів і гальмувань. Лідари, хоча і не є обов'язковими для всіх класів транспортних засобів, здатні формувати високоточну просторову картину, корисну для складних сценаріїв. Важливо, що для задачі енергоменеджменту ці сенсори не потрібні як повноцінна система автономного керування, але вони є джерелом короткострокового прогнозу тягового навантаження, оскільки дозволяють оцінити, чи буде автомобіль змушений гальмувати через повільніший транспорт попереду або чи є можливість підтримувати сталу швидкість.

Зовнішні дані формуються на основі навігації та цифрових карт, а також каналів зв'язку з інфраструктурою і іншими транспортними засобами. Цифрові карти містять геометрію маршруту, обмеження швидкості, типи доріг, а також можуть містити профіль ухилів, що є критичним для прогнозу потужності на підйомах і потенціалу рекуперації на спусках. Дані про трафік дозволяють сформувати прогноз швидкості на маршруті з урахуванням заторів, аварій або тимчасових обмежень. Для міських умов особливо важливою є інформація про світлофорні об'єкти, зокрема їх розташування і цикли фаз, оскільки вона визначає ймовірність зупинок і, відповідно, структуру розгонів і гальмувань. З погляду предиктивного керування енергією найбільш корисним є перехід від статичних даних карти до динамічних даних інфраструктури, де система може отримувати актуальний стан світлофора, рекомендовану швидкість для

проходження перехрестя або попередження про події, що впливають на швидкість руху.

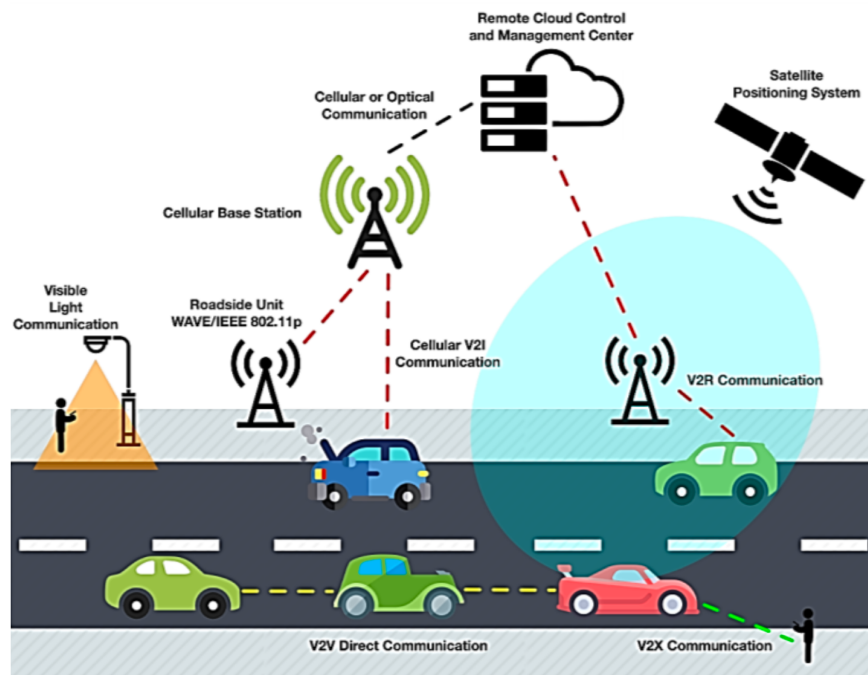


Рисунок 3.2 – Канали зв'язку транспортного засобу з зовнішніми джерелами даних

Технологічною основою обміну даними є архітектури зв'язку V2V, V2I та V2X. V2V передбачає обмін інформацією між транспортними засобами, наприклад про швидкість, прискорення, намір гальмувати або змінювати смугу. Для енергоменеджменту це дозволяє формувати прогноз динаміки потоку, зменшувати кількість різких прискорень і гальмувань через завчасне реагування, а отже підвищувати ефективність. V2I передбачає обмін із дорожньою інфраструктурою, зокрема зі світлофорами, інформаційними табло, дорожніми датчиками та системами керування трафіком. Це дозволяє отримати інформацію, яка недоступна лише з бортових сенсорів, наприклад точний таймінг фаз світлофора або попередження про обмеження швидкості заздалегідь. V2X є узагальненням, що включає комунікацію з будь-якими зовнішніми об'єктами, включно з хмарними сервісами, транспортними мережами та енергосистемою. Для гібридів, що підключаються до мережі, V2X може також стосуватися інформації про доступність зарядних пунктів, стан мережі або тарифні сигнали, хоча у межах даної роботи основний інтерес зосереджується на дорожньому контексті та прогнозі навантаження.

Поняття горизонту прогнозування в контексті керування енергією означає інтервал, на якому система має прогноз вхідних збурень або профілю місії і може

оптимізувати керування так, щоб мінімізувати витрати енергії та дотриматися обмежень. Формування прогнозних даних для горизонту включає перетворення різнорідної інформації в профіль величин, що безпосередньо впливають на енергетичний баланс: прогноз швидкості $v(t)$ або $v(s)$, прогноз прискорення $a(t)$, профіль ухилу $\theta(s)$, а також ймовірні зупинки та обмеження. На основі цих профілів можна оцінити прогнозовану тягову силу і потужність за співвідношеннями поздовжньої динаміки, а отже оцінити, які режими будуть найбільш вигідними для ДВЗ та електроприводу. Важливим моментом є те, що навіть якщо прогноз швидкості не є точним, прогноз структури режимів, наприклад чергування розгонів і гальмувань або наявність підйомів і спусків, може бути достатнім для того, щоб система керування енергією приймала більш раціональні рішення. Оскільки прогноз завжди містить невизначеність, у підключених гібридах необхідно враховувати похибки та затримки в даних. Похибка може бути випадковою, наприклад через непередбачувану поведінку трафіку, або систематичною, наприклад через неточний профіль ухилів у карті чи затримки в отриманні даних інфраструктури. Для енергоменеджменту це означає, що оптимізаційна задача має бути сформульована так, щоб рішення були робастними, тобто не призводили до порушення обмежень навіть при помірних відхиленнях прогнозу.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Огляд і розрахунок стратегій керування розподілом енергії

Керування розподілом енергії в гібридному транспортному засобі є надбудовою верхнього рівня, що працює в складі ієрархічної архітектури керування силовою установкою. Типово для гібридів виділяють локальні контури керування окремими підсистемами (ДВЗ, електричні машини, батарея, трансмісія) та супервізорний контролер HCU/VCU, який приймає запит водія та формує цільові дії для підконтролерів відповідно до поточних обмежень і станів агрегатів. Саме всередині супервізора реалізується стратегія енергоменеджменту, яка визначає розподіл моментів і потужностей між доступними джерелами енергії та, як наслідок, істотно впливає на сумарну витрату палива й електроенергії.

З огляду на рівень застосування оптимізаційної теорії та доступність інформації про майбутній маршрут/режим руху, стратегії енергоменеджменту доцільно розглядати як три узагальнені класи: евристичні (правилкові), субоптимальні (локальна оптимізація в реальному часі) та оптимальні (глобальна оптимізація для відомої місії руху). Такий поділ важливий, оскільки в гібридній силовій установці кількість ступенів свободи більша, ніж у традиційній, і саме алгоритм їх використання визначає кінцеву ефективність: від простого перемикавання режимів до оптимального розв'язання задачі керування на горизонті або на всьому циклі.

4.1.1 Узагальнена постановка задачі енергоменеджменту

У більшості прикладних задач для HEV/PHEV метою енергоменеджменту є мінімізація витрати палива за умови виконання тягового запиту та дотримання обмежень батареї й приводів. У дискретному часі (крок $k = 0, \dots, N - 1$) зручно записати узагальнену постановку:

$$\min_{\{u_k\}} J = \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k, w_k) + J_N(x_N), \quad (4.1)$$

де x_k – вектор станів (наприклад, SOC і стан трансмісії), u_k – керування (наприклад, коефіцієнт розподілу моментів і додатковий момент для підзаряду), w_k – збурення/відомі профілі місії (швидкість, ухил), g_k – миттєва “ціна” (паливо, штрафи), J_N – кінцевий термін (наприклад, вимога до SOC наприкінці місії).

Саме таке структурування явно використовується в динамічному програмуванні для енергоменеджменту PHEV: термінальна вартість задає бажаний кінцевий стан, а рекурсія мінімізує суму миттєвих витрат і вартості продовження руху.

Щоб з'єднати постановку з фізикою руху, енергетичний запит на колесах можна оцінювати через спрощену поздовжню динаміку. У вигляді потужності на колесах:

$$P_{\text{whl}}(t) = v(t) (m \dot{v}(t) + mg \sin \alpha(t) + mg f_r \cos \alpha(t) + \frac{1}{2} \rho C_d A v^2(t)), \quad (4.2)$$

де m – маса, v – швидкість, α – ухил, f_r – коефіцієнт кочення, ρ , $C_d A$ – аеродинамічні параметри. Інтегрування дає енергію місії на колесах:

$$E_{\text{whl}} = \int_0^T P_{\text{whl}}(t) dt. \quad (4.3)$$

Цей енергетичний профіль зручний для виявлення ділянок рекуперації (від'ємний запит) і для предиктивного коригування цільового SOC, що буде використано нижче.

4.1.2 Евристичні стратегії і правилове керування

Правилові стратегії будуються на порогах і фіксованих правилах переходів між режимами та розподілу моментів. Вони мають високу швидкодію та технологічну простоту, однак потребують ретельної калібровки порогів і зазвичай не можуть адаптуватися до різних умов руху без додаткових механізмів. У практиці зустрічаються варіації з нечіткою логікою та підходи, коли правила “витягають” з офлайн-оптимальних політик, але базова ідеологія залишається пороговою.

Для типової PHEV-логіки з перемиканням між чисто електричним та гібридним режимами природно використовувати три інформаційні змінні: стан заряду батареї, швидкість та тяговий момент на колесах. Режим переходить з електричного в гібридний, якщо хоча б один критерій виходить за межі допустимого, а повернення в електричний відбувається лише за одночасного виконання більш м'яких умов із гістерезисом. У прикладі реалізації контролер приймає рішення за SOC, швидкістю та моментом, а пороги для переходів задані так, щоб уникати частих перемикачів (наявний гістерезис за SOC, швидкістю та моментом).

Математично режимний перемикач можна представити як:

$$\text{Mode}_k = \begin{cases} \text{EV}, & \text{якщо } \xi_k > \xi_{\text{EV}}^{\uparrow} \wedge v_k < v_{\text{EV}}^{\uparrow} \wedge T_{\text{whl},k} < T_{\text{EV}}^{\uparrow}, \\ \text{HEV}, & \text{якщо } \xi_k < \xi_{\text{HEV}}^{\downarrow} \vee v_k > v_{\text{HEV}}^{\downarrow} \vee T_{\text{whl},k} > T_{\text{HEV}}^{\downarrow}, \\ \text{Mode}_{k-1}, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (4.4)$$

де ξ – SOC, а верхні/нижні пороги формують гістерезис. У гібридному режимі додатково задається логіка підзаряду батареї через ISG, тобто частина моменту ДВЗ спрямовується не лише на тягу, а й на генерацію, причому величина цього “довантаження” залежить від швидкості колінчастого валу/машин.

Щоб пов'язати рішення з енергетикою, доцільно записати баланс потужностей у гібридному режимі:

$$P_{\text{whl}} = \eta_{\text{tr}}(\cdot)(P_{\text{ICE} \rightarrow \text{tr}} + P_{\text{EM} \rightarrow \text{tr}}), P_{\text{bat}} = P_{\text{EM}} + P_{\text{aux}} - P_{\text{regen}}, \quad (4.5)$$

де η_{tr} – ККД трансмісійного тракту, P_{aux} – допоміжні споживачі, P_{regen} – рекуперація (за наявності). Для правилowego алгоритму керування фактично задає Mode і деяку функцію P_{ICE} або додаткового моменту T_{LPS} для заряджання, що прямо визначає P_{bat} та подальшу еволюцію SOC.

4.1.3 Субоптимальні стратегії з еквівалентною мінімізацією витрат палива (ECMS) і зв'язок з RMP

На відміну від RBS, ECMS використовує локальну оптимізацію в реальному часі, зводячи електричну енергію до “еквівалентної” витрати палива за допомогою коефіцієнта еквівалентності. Миттєва еквівалентна витрата визначається як сума реальної витрати палива двигуном і еквіваленту, що відповідає потужності батареї:

$$\dot{m}_{\text{eq}}(t) = \dot{m}_f(t) + \dot{m}_{\text{bat}}(t) = \dot{m}_f(t) + \frac{s}{Q_{\text{LHV}}} P_{\text{bat}}(t). \quad (4.6)$$

Тут Q_{LHV} – нижча теплота згоряння палива, P_{bat} може бути як додатною (розряд), так і від'ємною (заряд при рекуперації), а параметр s перетворює електричну потужність у паливний еквівалент.

Динаміка SOC (у тій же нотації) задається через струм батареї:

$$\dot{\xi}(t) = f(\xi, u, t) = -\frac{I_{\text{bat}}(\xi, u, t)}{Q_{\text{bat}}}, \quad (4.7)$$

де Q_{bat} – зарядна ємність, u – керування (наприклад, розподіл моментів/потужностей).

Зв'язок ECMS з принципом мінімуму Понтрягіна проявляється через гамільтоніан оптимальної задачі, який включає миттєву витрату та внесок ко-стану $\lambda(t)$:

$$H(\xi, u, \lambda, t) = -\lambda(t) f(\xi, u, t) + \dot{m}_f(u, t), \dot{\lambda}(t) = -\lambda(t) \frac{\partial f}{\partial \xi}. \quad (4.8)$$

Інтерпретаційно гамільтоніан відповідає сумарній еквівалентній витраті з урахуванням електроенергії, а еквівалентний фактор можна пов'язати з ко-станом.

Практичний алгоритм ECMS у кожний момент часу розглядає множину допустимих керувань $u \in \mathcal{U}$ (наприклад, можливі значення коефіцієнта розподілу моменту між електричним та гібридним шляхами, і додатковий момент ДВЗ для підзаряду) та обирає те u^* , яке мінімізує $\dot{m}_{\text{eq}}(t)$ або еквівалентно мінімізує H з урахуванням обмежень:

$$u^*(t) = \arg \min_{u \in \mathcal{U}} (\dot{m}_f(u, t) + \frac{s}{Q_{\text{LHV}}} P_{\text{bat}}(u, t)), \quad (4.9)$$

$\xi_{\min} \leq \xi(t) \leq \xi_{\max}, P_{\text{bat}}^{\min} \leq P_{\text{bat}}(t) \leq P_{\text{bat}}^{\max}, T_{\text{ICE}}, T_{\text{EM}}$ в межах допустимого.

Ключова інженерна проблема ECMS полягає у виборі та адаптації s : занадто велике s зменшує розряд і зсуває роботу до ДВЗ, занадто мале – агресивно витрачає батарею. Тому в реальних застосуваннях сприв'язують до бажаної траєкторії SOC (charge-sustaining/charge-depleting) і до умов маршруту.

4.1.4 Предиктивні функції для керування цільовим SOC для підвищення рекуперації

Предиктивні стратегії використовують інформацію про маршрут наперед, щоб змістити роботу батареї так, аби звільнити ємність під очікувані фази рекуперації. Ідея полягає у модифікації опорного значення SOC ξ_{ref} уздовж місії: перед довгими спусками або ділянками гальмування ξ_{ref} знижується, щоб батарея могла прийняти більший заряд при рекуперації. Це реалізується як надбудова над стратегією типу charge-sustaining, яка змінює референс SOC залежно від виявлених наперед фаз рекуперації.

Алгоритм у загальному вигляді включає підготовку даних профілю висоти, перетворення його в ухил, розрахунок енергетичного запиту на колесах за профілем швидкості й ухилу, детектування рекупераційних фаз за знаком/величиною енергетичного запиту та обчислення потенційно відновлюваної енергії в кожній фазі. Далі ця енергія переводиться в еквівалентну зміну SOC, і референс ξ_{ref} знижується на ділянці перед рекуперацією рівно настільки, щоб “звільнити” місце в батареї під очікуваний заряд.

Розрахунково цей крок можна записати так. Нехай для i -ї фази рекуперації, виявленої на інтервалі $[t_{i,s}, t_{i,e}]$, енергія, яку можна відновити, оцінена як:

$$E_{\text{rec},i} = \int_{t_{i,s}}^{t_{i,e}} \eta_{\text{rec}}(t) (-P_{\text{whl}}(t))_+ dt, \quad (4.10)$$

де $(\cdot)_+ = \max(\cdot, 0)$, η_{rec} – ефективність рекупераційного тракту (електромашина, інвертор, батарея). Еквівалентна потреба в ємності за SOC:

$$\Delta \xi_i = \frac{E_{\text{rec},i}}{E_{\text{bat,nom}}} = \frac{E_{\text{rec},i}}{Q_{\text{bat}} U_{\text{oc}} \kappa}, \quad (4.11)$$

де $E_{\text{bat,nom}}$ – номінальна енергоємність, U_{oc} – характерна напруга (або функція SOC), κ – коригувальний коефіцієнт, що враховує допустиму глибину використання та неідеальність напруги. Тоді цільовий SOC перед фазою задається як:

$$\xi_{\text{ref}}(s) = \xi_{\text{CS}} - \Delta \xi_i, s \in [s_{i,\text{prep}}, s_{i,s}], \quad (4.12)$$

де ξ_{CS} – базовий рівень charge-sustaining, а $s_{i,\text{prep}}$ – позиція старту “підготовчої” ділянки, довжина якої підбирається так, щоб енергія, яка

витратиться до входу в рекуперацію, приблизно дорівнювала $E_{\text{rec},i}$ (тобто звільнене місце буде заповнене на наступній фазі).

4.1.5 Оптимальні стратегії керування та інструмент синтезу

МРС реалізує оптимізацію на скінченному горизонті прогнозування з принципом ковзного вікна: на кожному кроці формується задача мінімізації, знаходиться послідовність керувань $u_{k:k+N}$, але в об'єкт подається лише перша дія u_k , після чого модель уточнюється за похибкою між виходом моделі та об'єкта і розрахунок повторюється. Такий цикл є характерним для застосування МРС у гібридних силових установках, де об'єктом є силова установка, а оптимізація працює на горизонті.

У стандартній формі МРС-задача для енергоменеджменту може записуватися як:

$$\min_{u_{k:k+N-1}} \sum_{j=k}^{k+N-1} (\dot{m}_f(j) + \beta (\xi_j - \xi_{\text{ref},j})^2) \text{ за умови } x_{j+1} = f(x_j, u_j, w_j),$$

де β – вага стабілізації SOC (або інші штрафи), а w_j може включати прогноз швидкості й ухилу, отриманий з навігації/підключеності. МРС є природною платформою для предиктивних стратегій, коли частина інформації про майбутнє доступна, але повний цикл невідомий.

Опукла оптимізація цікава тим, що при коректній побудові моделі й обмежень забезпечує високу обчислювальну ефективність. Для приведення задачі енергоменеджменту до опуклої форми необхідно винести за дужки дискретні рішення (стан ДВЗ увімкнено/вимкнено, передача), дискретизувати задачу в часі та описати компоненти силової установки опуклими моделями. У цьому випадку обчислювальні витрати можуть бути слабко залежними від кількості станів, що робить підхід привабливим як офлайн-інструмент або як частину дворівневих схем.

Динамічне програмування (DP) розглядається як еталон глобально оптимального керування для відомого циклу, а також як джерело політик для подальшого стиснення у правила або для калібрування параметрів реального контролера. Алгоритм backward-оптимізації задає термінальну вартість $J_N(x_N)$ та рекурсивно обчислює мінімальну вартість продовження:

$$J_N(x_N) = g_N(x_N), J_k(x_k) = \min_{u_k \in U_k(x_k)} [g_k(x_k, u_k, w_k) + J_{k+1}(f_k(x_k, u_k, w_k))].$$

Для прив'язки DP до PHEV постановки задаються збурення, стани та керування. Як збурення використовуються профілі швидкості та ухилу:

$$w_k = \begin{bmatrix} v_k \\ \alpha_k \end{bmatrix},$$

а як стани – SOC та поточна передача:

$$x_k = \begin{bmatrix} SOC_k \\ gr_k \end{bmatrix}.$$

Керуванням обрано дві змінні: коефіцієнт розподілу моменту sf між електричним та гібридним шляхами і додатковий момент зсуву робочої точки lps , який задає довантаження ДВЗ для підзаряду батареї; разом:

$$u_k = \begin{bmatrix} sf_k \\ lps_k \end{bmatrix}.$$

Інтерпретаційно $sf = 1$ означає повністю електричний тяговий режим (ДВЗ вимкнений), $sf = 0$ – тяга від ДВЗ, а електропривід використовується переважно для рекуперації; lps визначає додаткову “генераторну” складову моменту через ISG.

Функція вартості в DP-реалізації для енергоменеджменту бере суму миттєвої витрати палива та додає термінальний штраф, який примушує досягти заданого кінцевого SOC:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \dot{m}_f(k) \Delta t + J_{\text{fin}}(SOC_N), J_{\text{fin}} = \gamma (SOC_N - SOC_{\text{fin}})^2,$$

де γ – великий коефіцієнт, що реалізує “жорсткість” вимоги. Такий вибір відображає підхід, коли електроенергія не входить до running-cost напряму, але контролюється через кінцеву умову SOC.

4.2 Предиктивна стратегія розподілу енергії гібридного транспортного засобу

Предиктивна стратегія розподілу енергії в гібридному транспортному засобі базується на принципі використання інформації про майбутні умови руху для підвищення загальної ефективності силової установки. У контексті гібридів ключовою перевагою такого підходу є можливість не лише реагувати на поточний запит водія, а й цілеспрямовано формувати енергетичний стан батареї на ділянках маршруту, де очікуються тривалі рекупераційні фази. Основна ідея предиктивної функції керування SOC полягає в тому, щоб завчасно звільнити достатній резерв ємності батареї та акумулювати максимально можливу частину енергії під час довгих фаз рекуперації.

У подальшому викладі предиктивну стратегію доцільно трактувати як надбудову над реальним (каузальним) алгоритмом розподілу потужності, наприклад ECMS у режимі charge-sustaining, де предиктор не замінює основний оптимізатор миттєвої потужності, а модифікує опорну траєкторію стану заряду

батареї вздовж місії. Така надбудова змінює цільове значення SOC залежно від наявності рекупераційних фаз, які виявляються попереду транспортного засобу на основі прогнозних даних маршруту.

4.2.1 Вихідні припущення та предиктивні вхідні дані

Предиктивна стратегія потребує доступу до профілю швидкості та профілю висот (або ухилів) на маршруті наперед. У дослідженні, на яке спираємося, припускається, що ці профілі відомі для всієї місії руху, тобто від початку до кінця циклу.

Така постановка відповідає ідеології довгострокового електронного горизонту (e-horizon), коли інформація про маршрут попереду транспортного засобу використовується в супервізорному контролері для підвищення ефективності шляхом прогнозування майбутніх умов руху та відповідного планування режимів силової установки.

Практично вхідні предиктивні дані можуть надходити з навігаційних карт, сервісів трафіку та інфраструктури, а також з бортових сенсорів. Однак для задачі предиктивного керування SOC критичною є саме реконструкція маршруту в координаті відстань із коректним профілем висот, оскільки ухил прямо формує енергетичні ділянки потенційної рекуперації (спуски та гальмування). Саме тому першим етапом алгоритму є підготовка висотного профілю і перетворення його в ухил.

4.2.2 Підготовка профілю висоти та розрахунок ухилу

Висотний профіль, отриманий із запису або карти, містить шум і дискретизаційні похибки, тому його доцільно фільтрувати, а вже потім перетворювати в сигнал ухилу дороги. Цей крок формалізований як обов'язковий перший етап алгоритму: висота фільтрується для усунення шуму і далі конвертується в ухил.

Нехай $h(s)$ – висота над рівнем моря як функція пройденої відстані s . Тоді ухил можна оцінювати як

$$\alpha(s) = \arctan\left(\frac{dh}{ds}\right) \approx \frac{dh}{ds}, \quad (4.13)$$

де апроксимація справедлива для малих кутів у радіанах. Для дискретної сітки s_k з кроком Δs похідна оцінюється різницевою схемою

$$\frac{dh}{ds} \big|_k \approx \frac{h_{k+1} - h_{k-1}}{2\Delta s}. \quad (4.14)$$

Фільтрація може виконуватися, наприклад, ковзним середнім або низькочастотним фільтром, щоб уникнути штучних пилок у $\alpha(s)$, які здатні спричинити хибне виявлення рекупераційних фаз.

4.2.3 Розрахунок глобального енергетичного запиту на колесах

Після підготовки $\alpha(s)$ та за наявності прогнозного профілю швидкості наступним кроком є розрахунок енергетичного запиту на колесах для проходження циклу з використанням спрощеної моделі поздовжньої динаміки. Цей етап прямо визначений як розрахунок глобального енергетичного запиту на колесах за профілями швидкості та ухилу.

Силовий баланс уздовж напрямку руху запишемо у вигляді

$$F_{tr}(t) = m\dot{v}(t) + mgsin \alpha(t) + mgf_r \cos \alpha(t) + \frac{1}{2}\rho C_d A v^2(t), \quad (4.15)$$

де F_{tr} – необхідна тягово-гальмівна сила на колесах (може бути від’ємною), m – маса, f_r – коефіцієнт кочення, ρ – густина повітря, $C_d A$ – аеродинамічний параметр. Тоді миттєва потужність на колесах

$$P_{whl}(t) = v(t) F_{tr}(t), \quad (4.16)$$

а енергетичний запит за інтервал $[t_a, t_b]$

$$E_{whl}(t_a, t_b) = \int_{t_a}^{t_b} P_{whl}(t) dt. \quad (4.17)$$

У координаті відстані зручно використовувати перехід $dt = ds/v$, тоді

$$E_{whl}(s_a, s_b) = \int_{s_a}^{s_b} F_{tr}(s) ds, \quad (4.18)$$

що особливо корисно для локалізації рекупераційних фаз і прив’язки подальшої модифікації SOC саме до “просторових сегментів” маршруту.

4.2.4 Виявлення рекупераційних фаз і оцінка відновлюваної енергії

Побудований профіль енергетичного запиту використовується для виявлення рекупераційних фаз у циклі та визначення кількості енергії, яку можна відновити в кожній із фаз. Цей етап сформульований як детектування фаз рекуперації за енергетичним профілем з оцінкою відновлюваної енергії в кожній фазі.

Рекупераційною фазою будемо вважати інтервал, де $P_{whl}(t) < 0$. Для i -ї фази, що триває на $[t_{i,s}, t_{i,e}]$, теоретично доступна механічна енергія на колесах

$$E_{whl,i}^- = \int_{t_{i,s}}^{t_{i,e}} (-P_{whl}(t)) dt. \quad (4.19)$$

Реально відновлена енергія обмежена ефективністю та потужнісними/струмовими межами компонентів. Тому доцільно вводити обмежену рекупераційну потужність

$$P_{rec}(t) = \min (\eta_{em}\eta_{inv}\eta_{bat} \cdot (-P_{whl}(t)), P_{ch,max}(\xi, T), P_{em,max}(\omega), P_{brk,lim}),$$

де $P_{ch,max}$ – допустима потужність заряду батареї (залежить від SOC ξ та температури T), $P_{em,max}$ – допустима потужність електромашини (залежить від швидкості ω), $P_{brk,lim}$ – обмеження по гальмівній системі/зчепленню. Тоді оцінка відновлюваної енергії

$$E_{rec,i} = \int_{t_{i,s}}^{t_{i,e}} P_{rec}(t) dt. \quad (4.20)$$

4.2.5 Перетворення відновлюваної енергії в еквівалент SOC і модифікація цільової траєкторії

Ключовим механізмом предиктивної стратегії є перетворення оціненої відновлюваної енергії кожної фази в еквівалент зміни SOC і подальше коригування опорного значення SOC. Цей крок сформульований так: енергія, яку можна відновити в кожній фазі, переводиться в еквівалент стану заряду батареї, після чого ці значення використовуються для зниження опорного SOC; причому зниження застосовується лише на просторових сегментах безпосередньо перед кожною рекупераційною фазою, а довжина такого сегмента дорівнює тій відстані, на якій транспортний засіб встигне витратити енергію, що буде відновлена в наступній рекуперації.

Нехай $E_{bat,nom}$ – доступна (використовувана) енергоємність батареї в робочому інтервалі SOC, тоді еквівалентна зміна SOC від фази рекуперації:

$$\Delta\xi_i = \frac{E_{rec,i}}{E_{bat,nom}}. \quad (4.21)$$

Якщо відомі номінальна напруга U_{nom} та зарядна ємність Q_{bat} , то можна прийняти $E_{bat,nom} \approx U_{nom} Q_{bat} \Delta\xi_{use}$, де $\Delta\xi_{use}$ – допустима глибина використання між ξ_{min} і ξ_{max} . Для врахування невизначеності прогнозу корисно вводити коефіцієнт запасу $\kappa \in (0,1]$:

$$\Delta\xi_i = \kappa \frac{E_{rec,i}}{E_{bat,nom}}, \quad (4.22)$$

щоб не перерозряджати батарею в очікуванні рекуперації, яка може виявитися меншою.

Далі формується модифікована опорна траєкторія $\xi_{ref}(s)$. Якщо базова стратегія є CS, то ξ_{ref} простому випадку є сталою (на рівні початкового SOC).

Предиктивна функція формує локальні зниження ξ_{ref} перед фазами рекуперації:

$$\xi_{ref}^{pred}(s) = \xi_{ref}^{CS} - \sum_i \Delta\xi_i \cdot 1_{s \in [s_{i,prep}, s_{i,s}]}, \quad (4.23)$$

де $s_{i,s}$ – початок i -ї рекупераційної фази, $s_{i,prep}$ – початок підготовчого сегмента, а 1 – індикатор належності відстані сегменту.

Визначення довжини підготовчого сегмента логічно прив'язати до енергії, яку необхідно витратити до входу в рекуперацію. Нехай $P_{whl}^+(t) = \max(P_{whl}(t), 0)$ – додатна потужність запиту, а η_{tr} – середній ККД шляху перетворення енергії від батареї до коліс у режимі електричної тяги. Тоді енергія, яку батарея віддасть, щоб знизити SOC на $\Delta\xi_i$, оцінюється як

$$E_{use,i} \approx \Delta\xi_i E_{bat,nom}. \quad (4.24)$$

Початок підготовчого сегмента можна визначити з умови

$$\int_{t_{i,\text{prep}}}^{t_{i,s}} \frac{P_{\text{whl}}^+(t)}{\eta_{\text{tr}}} dt \approx E_{\text{use},i}, \quad (4.25)$$

або в координаті відстані

$$\int_{s_{i,\text{prep}}}^{s_{i,s}} \frac{F_{\text{tr}}^+(s)}{\eta_{\text{tr}}} ds \approx E_{\text{use},i}, F_{\text{tr}}^+(s) = \max(F_{\text{tr}}(s), 0). \quad (4.26)$$

Саме ця умова реалізує принцип, коли довжина сегмента дорівнює тій, що потрібна для споживання енергії, яку буде відновлено в наступній рекуперації.

4.2.6 Інтеграція предиктивної SoCMS з ECMS через опорний SOC та еквівалентний фактор

Оскільки предиктивна стратегія в даній постановці є функцією керування SOC, вона найприродніше інтегрується з ECMS, змінюючи опорне значення SOC, яке використовується в механізмі утримання заряду. Предиктивна інформація застосовується в алгоритмі, який модифікує саме опорне значення SOC ξ_{ref} для стратегії CS у межах SoCMS. Для ECMS у роботі charge-sustaining властивість забезпечується аналітичною функцією, яка поводить як повільний PI-контролер щодо відхилення $\xi_{\text{ref}} - \xi$.

Концептуально це означає, що при збільшенні ξ_{ref} відносно поточного SOC алгоритм дорожче оцінює використання електроенергії та зсуває розподіл потужності в бік ДВЗ/підзаряду, а при зменшенні ξ_{ref} дозволяє активніше використовувати батарею до входу в рекупераційну фазу.

У прикладній формі це можна подати як

$$s_k = \phi(\xi_k) (k_a(\xi_{\text{ref},k} - \xi_k) + \bar{s}_{k-1}), \bar{s}_{k-1} = \frac{s_{k-1} + s_{k-2}}{2}, \quad (4.27)$$

де $\phi(\xi_k)$ – нелінійна обмежувальна функція, що враховує наближення SOC до меж $\xi_{\text{min}}, \xi_{\text{max}}$, а k_a визначає інтенсивність повернення SOC до опорного значення. Принципово важливо, що у предиктивній SoCMS змінюється саме $\xi_{\text{ref},k}$, тому предиктор впливає на s_k , як наслідок, на миттєво оптимальний розподіл моменту/потужності в ECMS.

Окремо доцільно зафіксувати, що для PHEV часто використовується траєкторія ξ_{ref} , яка лінійно зменшується з пройденою відстанню, щоб прийти наприкінці місії з нижчим SOC. Така прив'язка найчастіше записується як лінійна функція від пройденої дистанції x та загальної довжини поїздки x_f . У загальному вигляді:

$$\xi_{\text{ref}}(x) = \xi_i + \frac{x}{x_f} (\xi_f - \xi_i), \quad (4.28)$$

де ξ_i – початковий SOC, ξ_f – бажаний SOC наприкінці місії. Предиктивна модифікація в такому випадку накладається на базову траєкторію як локальні

зниження перед рекуперацією, формуючи вікна ємності батареї там, де вони дають максимальний ефект.

Ефективність предиктивної SoCMS визначається співвідношенням між потенційно відновлюваною енергією у рекупераційних фазах і доступною енергоємністю батареї. Якщо батарея велика, то навіть без предиктора вона часто має достатній запас ємності для прийому рекуперації, і корекція ξ_{ref} виявляється малою, тому поведінка контролера майже не відрізняється від стандартної. Для базової (великої) батареї модифікація цільового SOC є настільки малою, що її вплив ледь помітний, тоді як для малої батареї ефект стає відчутним: цільовий SOC змінюється значніше, що призводить до помітніших змін у тренді SOC та глобальній витраті палива. Ці результати узгоджуються з фізичною інтерпретацією: коли відновлювана енергія є значною часткою від загальної енергії батареї, предиктор змушений формувати помітні вікна для рекуперації; у такому разі навіть повільна PI-подібна функція charge-sustaining у складі ECMS реагує інакше, що змінює розподіл потужності та загальні витрати.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Принципи та функції управління охороною праці на виробництві: забезпечення безпеки праці як системний підхід

Охорона праці на сучасному виробництві розглядається не як сукупність окремих інструкцій чи формальних вимог, а як інтегрована система управління, що забезпечує стабільне досягнення прийнятного рівня ризику для персоналу, обладнання та виробничого середовища. Системний підхід полягає в тому, що безпека праці формується не лише поведінкою працівника або наявністю засобів індивідуального захисту, а взаємодією багатьох елементів: організаційної структури підприємства, технологічних процесів, технічного стану обладнання, рівня підготовки персоналу, культури безпеки, якості комунікацій і контролю виконання вимог. У межах системного підходу охорона праці є складовою загальної системи менеджменту підприємства, а її ефективність визначається здатністю передбачати небезпеки, керувати ризиками, запобігати травматизму й професійним захворюванням, а також забезпечувати безперервне поліпшення умов праці.

Базовою ідеєю системного підходу є розуміння виробництва як джерела небезпек різної природи: механічних, електричних, термічних, хімічних, біологічних, ергономічних, психофізіологічних. Вони можуть діяти одночасно та взаємно підсилюватися, а наслідки їх реалізації залежать від контексту: конкретної технологічної операції, режиму роботи обладнання, стану робочого місця, досвіду працівника, часу доби та організаційних факторів. Саме тому управління охороною праці починається з формування політики безпеки, яка визначає пріоритет здоров'я працівника над виробничими показниками, і продовжується створенням процедур і ресурсного забезпечення, що дозволяють реалізувати цю політику в практиці. У системному підході важливо, що безпека не є разовим результатом; вона є процесом, який потребує постійного контролю, аналізу відхилень, коригувальних заходів і навчання.

Принципи управління охороною праці доцільно розглядати як сукупність правил, що задають логіку побудови системи. Першим фундаментальним принципом є превентивність, тобто орієнтація на попередження небезпек, а не на ліквідацію наслідків. Це означає, що підприємство повинно системно ідентифікувати ризики, оцінювати їхню значущість і впроваджувати технічні та організаційні бар'єри до того, як відбудеться інцидент. Превентивність особливо важлива для сучасних технологічних виробництв і сервісних центрів, де аварія

може призвести не лише до травми, а й до значних матеріальних втрат, простоїв, пошкодження дорогого обладнання та порушення екологічних вимог.

Другим принципом є відповідальність і лідерство керівництва. У системі охорони праці відповідальність не може бути «делегована» лише службі охорони праці; керівництво визначає правила, ресурси та культуру, у межах яких персонал приймає рішення. Якщо керівник демонструє толерантність до порушень або стимулює виконання плану за рахунок ризикованих дій, будь-які інструкції залишаються формальними. Лідерство проявляється у встановленні зрозумілих стандартів, участі у розслідуванні інцидентів, підтримці навчання та забезпеченні відкритих комунікацій, коли працівник може повідомити про небезпеку без страху покарання.

Третім принципом є комплексність і пріоритет інженерних рішень над адміністративними. У практиці управління ризиками найбільш ефективними є заходи, що усувають небезпеку або фізично відокремлюють працівника від джерела ризику, наприклад огороження рухомих частин, блокування доступу при відкритих кожухах, автоматичні відсічні пристрої, вентиляція, локальні витяжні системи, автоматизовані операції. Адміністративні заходи (інструктаж, графіки, попереджувальні знаки) і засоби індивідуального захисту залишаються важливими, але вони менш надійні, оскільки залежать від дисципліни, стомлення, уваги та людського фактора. Тому системний підхід передбачає ієрархію контролю ризиків, у якій технічні бар'єри мають пріоритет.

Четвертим принципом є безперервність і циклічність управління, що реалізується через модель планування–виконання–перевірки–удосконалення. У цьому циклі спочатку визначаються цілі і плани з охорони праці, далі вони реалізуються у вигляді конкретних заходів, після чого проводиться моніторинг показників, аудит, аналіз причин відхилень і прийняття коригувальних та запобіжних дій. Таким чином система охорони праці працює як контур зворотного зв'язку: інформація про порушення, небезпечні події та інциденти використовується для вдосконалення процедур, технічних рішень і навчання.

Функції управління охороною праці на виробництві відображають логіку роботи цієї системи та можуть бути представлені як взаємопов'язані процеси. Першою функцією є планування, яке охоплює формування політики, визначення цілей, розробку програм, розподіл ресурсів і відповідальності. На цьому етапі важливо встановити, які ризики є пріоритетними, які показники будуть вимірюватися, і які технічні або організаційні рішення повинні бути впроваджені. Планування також включає врахування специфіки виробництва:

режимів роботи, технологічних ліній, застосованих матеріалів, рівня автоматизації та вимог до персоналу.

Другою функцією є організація і забезпечення, що включає створення структури управління охороною праці, призначення відповідальних осіб, формування компетенцій, забезпечення нормативної документації, інструкцій, засобів захисту, а також технічну справність обладнання. На цьому етапі визначальним є питання компетентності: безпечне виробництво потребує не лише формального інструктажу, а й практичних навичок, розуміння ризиків та здатності діяти в нестандартних ситуаціях. Важливою частиною організації є також медичні огляди, контроль допуску працівників до робіт підвищеної небезпеки та визначення вимог до підрядників, якщо вони залучаються до виконання робіт.

Третьою функцією є ідентифікація небезпек і оцінювання ризиків. Це ядро системного підходу, оскільки саме через ризик-орієнтоване мислення визначається, які небезпеки є найбільш критичними і де потрібні інженерні бар'єри. Оцінювання ризику передбачає аналіз того, які події можуть статися, з якою ймовірністю і з якими наслідками, а також чи існують чинні заходи контролю. На основі цього визначаються додаткові заходи: модернізація обладнання, зміна технології, удосконалення організації робочого місця, введення контролю доступу, навчання або зміна процедур.

Четвертою функцією є впровадження заходів управління ризиками. На виробництві це включає технічні рішення (огородження, блокування, автоматизація, вентиляція), організаційні рішення (регламенти, дозволи на роботи, маркування зон, управління змінами), а також забезпечення засобами індивідуального захисту. Важливо, що ефективність заходів визначається їхньою інтеграцією: наприклад, огороження без контролю технічного стану або без процедури перевірки його цілісності може втратити ефективність, тоді як поєднання інженерного бар'єра, інструктажу і регулярного контролю забезпечує суттєво вищий рівень безпеки.

П'ятою функцією є моніторинг і контроль, який включає оперативний контроль на робочих місцях, планові перевірки, аудит, аналіз показників травматизму, небезпечних подій та "майже інцидентів". У системному підході важливим є не лише аналіз фактичних травм, а й аналіз подій без наслідків, оскільки вони є сигналом про наявність ризику. Моніторинг також охоплює технічний контроль обладнання: перевірки електробезпеки, стану заземлення, захисних огорожень, справності блокувань, стану вентиляційних систем тощо.

Саме функція моніторингу створює зворотний зв'язок для удосконалення системи.

Шостою функцією є розслідування інцидентів і коригувальні дії. Ефективне розслідування повинно встановлювати не лише безпосередню причину, а й кореневі причини: недоліки в організації, технічні дефекти, прогалини в навчанні, помилки у плануванні, відсутність контролю або неправильну мотивацію. Після встановлення причин визначаються коригувальні дії, що усувають фактори ризику, і запобіжні дії, що не допускають повторення. Важливо, що системний підхід розглядає інцидент як інформаційний ресурс для вдосконалення, а не як привід для покарання працівника.

Сьомою функцією є навчання і комунікації, які формують культуру безпеки. Навіть за наявності технічних бар'єрів, безпечна поведінка персоналу визначає загальний рівень ризику, особливо в роботах підвищеної небезпеки або при нестандартних ситуаціях. Навчання повинно бути регулярним, практикоорієнтованим і адаптованим до конкретних робочих операцій, а комунікації повинні забезпечувати швидке інформування про зміни в технології, нові ризики та результати аналізу інцидентів. У системному підході важливо створювати умови, де працівник не приховує небезпечні ситуації, а повідомляє про них, що дозволяє системі діяти проактивно.

5.2 Системний підхід до захисту населення і територій у разі загрози або виникнення надзвичайних ситуацій

Захист населення і територій у разі загрози або виникнення надзвичайних ситуацій (НС) є однією з ключових функцій державного управління, спрямованою на збереження життя людей, захист інфраструктури та мінімізацію негативного впливу на довкілля. Концепція цього захисту, затверджена на державному рівні, враховує комплекс заходів, які мають забезпечити оперативне реагування на НС, їхню профілактику, а також ефективну ліквідацію наслідків [23].

В основі концепції лежить системний підхід, який включає прогнозування, планування, координацію дій, впровадження інноваційних технологій і міжнародну співпрацю. Надзвичайні ситуації поділяються на техногенні, природні, соціально-політичні та військові, кожна з яких має свої особливості та потребує специфічних підходів до реагування. До техногенних НС належать аварії на виробництвах, вибухи, витoki небезпечних хімічних або радіоактивних речовин, а також транспортні катастрофи. Природні НС включають стихійні

лиха, такі як землетруси, повені, урагани, а також екологічні катастрофи, пов'язані із забрудненням повітря чи води.

Першим етапом системи захисту є розробка та впровадження нормативно-правових актів, які регулюють діяльність у сфері попередження та реагування на НС. Це включає створення чітких регламентів, інструкцій і стандартів, які визначають порядок дій органів влади, підприємств і населення у разі загрози. Наприклад, в Україні прийнято відповідне положення про класифікацію надзвичайних ситуацій, яке дозволяє чітко ідентифікувати подію як НС, оцінити її масштаби та визначити рівень реагування.

Наступним важливим компонентом є прогнозування та оцінка ризиків виникнення НС. За допомогою сучасних аналітичних методів і систем моніторингу можливо передбачити потенційні загрози, оцінити їхній вплив на населення та економіку і вжити профілактичних заходів. Наприклад, при прогнозуванні природних катастроф використовуються дані про метеорологічні та сейсмічні умови, а при оцінці техногенних ризиків – технічний стан об'єктів інфраструктури.

Ключову роль у захисті населення відіграє система сповіщення, яка повинна оперативно інформувати громадян про загрозу та порядок дій у разі НС. Система оповіщення включає використання сучасних технологій, таких як мобільні повідомлення, радіо, телебачення, а також автоматизовані системи передавання сигналів тривоги. Ефективна система оповіщення дозволяє мінімізувати паніку серед населення і забезпечити організовану евакуацію, якщо це необхідно [24].

Захист населення також передбачає створення інфраструктури для укриття і евакуації. Це включає будівництво та утримання захисних споруд, таких як бомбосховища, укриття на випадок хімічного чи радіаційного забруднення, а також планування маршрутів евакуації. Наприклад, у разі техногенної аварії з викидом токсичних речовин важливо мати детальні плани евакуації для кожного району, які враховують кількість населення, доступні транспортні засоби та альтернативні шляхи.

Ще одним важливим аспектом є підготовка та навчання населення правилам поведінки під час НС. Це включає регулярні тренінги, навчання в школах і на підприємствах, розробку інформаційних матеріалів, які пояснюють порядок дій у разі загрози. Наприклад, для працівників хімічної промисловості проводяться спеціальні навчання, які дозволяють швидко реагувати на витoki небезпечних речовин.

Реагування на надзвичайні ситуації включає проведення рятувальних операцій, надання медичної допомоги постраждалим, забезпечення населення продуктами харчування, водою та тимчасовим житлом. У разі НС техногенного або природного характеру до реагування залучаються спеціалізовані рятувальні служби, військові формування та добровольчі організації. Оперативність і злагодженість їхніх дій дозволяють зменшити втрати та швидше повернутися до нормального функціонування.

Важливим завданням у межах концепції захисту є ліквідація наслідків НС. Це включає відновлення інфраструктури, очищення територій від небезпечних речовин, забезпечення відшкодування матеріальних збитків і реабілітацію постраждалого населення. Наприклад, після повені важливо не лише відновити зруйновані будівлі та дороги, але й провести дезінфекцію території для запобігання епідеміям.

Фінансування заходів із запобігання НС і реагування на них є важливим компонентом системи захисту. У державному бюджеті виділяються кошти на створення фондів для фінансування профілактичних заходів, підтримки спеціалізованих служб і придбання необхідного обладнання. Місцеві бюджети також залучаються до фінансування заходів, які стосуються конкретних регіонів.

Міжнародна співпраця є важливим аспектом захисту населення та територій. Вона включає обмін інформацією про можливі загрози, участь у спільних навчаннях, створення міжнародних центрів реагування на НС. Наприклад, співпраця України з Європейським Союзом у сфері цивільного захисту дозволяє використовувати передові технології та кращі практики для підвищення ефективності системи захисту.

Таким чином, концепція захисту населення і територій у разі загрози або виникнення НС є багатогранною системою, яка включає профілактику, реагування та ліквідацію наслідків. Вона спрямована на збереження життя людей, мінімізацію матеріальних втрат і забезпечення сталого розвитку суспільства. Реалізація цієї концепції потребує чіткої координації дій між державними органами, підприємствами та громадянами, що дозволяє підвищити рівень національної безпеки та зменшити ризики, пов'язані з надзвичайними ситуаціями.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконано комплексний аналіз сучасного стану електромобільності та гібридизації у світі й Україні, а також систематизовано класифікацію транспортних засобів (HEV, PHEV, BEV) і принципи гібридизації. Це дозволило обґрунтувати актуальність задачі підвищення енергоефективності гібридних силових установок через удосконалення алгоритмів розподілу енергії.

2. Розглянуто конструктивні схеми гібридних силових установок і виконано технічний аналіз ключових вузлів (ДВЗ, електромашина, батарея, силова електроніка, трансмісія) з позицій їхніх енергетичних обмежень та режимів роботи. Сформовано вимоги до вимірювальної підсистеми й даних керування, що визначають реалізованість енергоменеджменту в умовах змінних навантажень.

3. Сформовано вихідні дані та вимоги до об'єкта моделювання, виконано розрахунок параметрів і узгодження вузлів силової установки на основі тягово-енергетичного балансу, обмежень по моменту/потужності та SOC. Отримано систему розрахункових залежностей і фізично коректний набір обмежень, придатний для побудови математичної моделі та подальшого синтезу оптимізаційних стратегій.

4. Проаналізовано та формалізовано основні класи стратегій керування розподілом енергії в гібридах (правиліві, ECMS, DP, MPC, опукла оптимізація), наведено їхні розрахункові постановки та критерії оптимізації. Показано, що використання оптимізаційних підходів дозволяє узгоджувати паливну економічність із ресурсними та потужнісними обмеженнями батареї, забезпечуючи керованість SOC у межах заданих вимог.

5. Розроблено предиктивну стратегію керування на основі прогнозного аналізу енергетичного запиту та виявлення рекупераційних фаз, що дозволяє коригувати опорну траєкторію SOC і підвищувати потенціал відновлення енергії. Запропонований підхід інтегрується з каузальним енергоменеджментом (зокрема ECMS/CS) через модифікацію цільового SOC на горизонті та забезпечує покращення паливної ефективності, особливо для конфігурацій з обмеженою ємністю батареї.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Sciarretta A., Guzzella L. Control of Hybrid Electric Vehicles: Optimal Energy-Management Strategies. IEEE Control Systems Magazine, 2007.
2. Serrao L., Onori S., Rizzoni G. ECMS as a realization of Pontryagin's minimum principle for HEV control. Proceedings of the American Control Conference (ACC), 2009.
3. Onori S., Serrao L., Rizzoni G. Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy for Hybrid Electric Vehicles. (конференційна публікація; повний текст у PDF).
4. O'Keefe M.P., Markel T. Dynamic Programming Applied to Investigate Energy Management Strategies for a Plug-In HEV. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2006 (звіт/публікація).
5. Zhang C., Vahidi A. Route Preview in Energy Management of Plug-in Hybrid Vehicles. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(2), 546–553.
6. Zhao Y., Cai Y., Song Q. Energy Control of Plug-In Hybrid Electric Vehicles Using Model Predictive Control With Route Preview. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica.
7. Zhang F., Hu X., Langari R., Cao D. Energy management strategies of connected HEVs and PHEVs: Recent progress and outlook. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 73, 235–256.
8. He H., Guo J., Sun C. Road Grade Prediction for Predictive Energy Management in Hybrid Electric Vehicles. Energy Procedia, 2017, 105, 2438–2444.
9. Song K., Wang X., Li F., Sorrentino M., Zheng B. Pontryagin's minimum principle-based real-time energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle considering both fuel economy and power source durability. Energy, 2020, 205, 118064.
10. Yi F., Lu D., Wang X., Pan C., Tao Y., Zhou J., Zhao C. Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle Considering Battery Degradation. Sustainability, 2022, 14(3), 1214.
11. Автомобілі з електричними і гібридними приводами: Монографія / Під ред. О.В. Кривенка. – Харків: НТУ «ХП», 2020. – 340 с.
12. Міронов Д.В. Конспект лекцій з дисципліни «Електричні та гібридні транспортні засоби» для студентів спеціальності 274 «Автомобільний

транспорт» денної та заочної форми навчання / Укл.: Д.В. Міронов – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 154 с.

13. Міронов Д.В. Електричні та гібридні транспортні засоби. Методичні вказівки до виконання практичних робіт / Д.В. Міронов, Тесля В.О. – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 65 с.

14. Міронов Д.В. Електронне та мікропроцесорне обладнання автомобілів: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт / Д.В. Міронов – Тернопіль: ТНТУ, 2023. – 62 с.

15. Техногенні ризики і транспорт: Монографія / Кравець С.М., Поліщук Г.С. – Львів: ЛНТУ, 2022. – 310 с.

16. Journal of Cleaner Production. Assessing Environmental Impacts of Hybrid and Electric Vehicles. – Vol. 28, Issue 5, 2021.

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

18. 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.

19. 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.

20. 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.