

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Оптимізація методів проєктування та впровадження електромобілів
типу EREV з оцінкою їх технічних і екологічних параметрів

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

«Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

Білоус М.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Білоус М.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Міронов Д.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль П'єнтак М.Д.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Зав. кафедри Цьонь О.П.
(підпис) (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 Білоусу Максиму Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимізація методів проєктування та впровадження електромобілів типу EREV з оцінкою їх технічних і екологічних параметрів

Керівник роботи Міронов Дмитро Вікторович, к.т.н.

(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 типу EREV.

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 електро- і гібридних транспортних засобів – 2А1.

Екологічні параметри використання електро- і гібридних авто – 1А1.

Функціональна схема електромобіля типу EREV – 1А1.

Характеристика основних вузлів електромобіля типу EREV – 2А1.

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)

Білоус М. Р.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Міронов Д.В.

(прізвище та ініціали)

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.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

студенту Білоусу Мар'яну Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимізація методів проєктування та впровадження електромобілів типу EREV з оцінкою їх технічних і екологічних параметрів

Керівник роботи Міронов Дмитро Вікторович, к.т.н.

(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 типу EREV.

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)

Вузли силової частини електромобіля типу EREV – 2А1.

Вузли ходової частини електромобіля типу EREV – 2А1.

Схеми компоновки електромобілів типу EREV – 1А1.

Результати наукових досліджень – 2А1.

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)

Білоус М. Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Міронов Д.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Оптимізація методів проектування та впровадження електромобілів типу EREV з оцінкою їх технічних і екологічних параметрів».

Метою кваліфікаційної роботи магістра є розробка методики оцінки технологічних та екологічних параметрів функціонування електромобілів типу EREV з метою удосконалення підходів до їх проектування та реалізації.

Основні завдання, які необхідно вирішити у роботі:

- Виконати аналіз поточного стану та ключових тенденцій розвитку світового і вітчизняного ринків електричних та гібридних транспортних засобів.
- Систематизувати та класифікувати основні типи електрифікованих транспортних засобів, визначивши їхні принципові відмінності за структурою силової установки та режимами роботи.
- Розглянути екологічні аспекти впровадження електротранспорту, зосередивши увагу на впливі на довкілля та можливостях зниження викидів і забруднюючих речовин.
- Сформулювати концептуальні положення щодо транспортного засобу типу EREV і обґрунтувати базові конструктивні характеристики, необхідні для досягнення заданих показників ефективності.
- Виконати розрахункове визначення ключових технічних параметрів EREV, що характеризують енергетичні, тягово-динамічні та експлуатаційні властивості.
- Розробити методику оцінювання технологічних та екологічних параметрів функціонування електромобілів типу EREV з урахуванням реальних режимів експлуатації.
- Надати рекомендації щодо поліпшення охорони праці та безпеки у процесі виробництва та експлуатації транспортних засобів.

Перший розділ кваліфікаційної роботи магістра, «Загально-технічний розділ», включає аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку ринку електро- і

гібридних транспортних засобів, а також постановку завдання на магістерську роботу.

Другий розділ, «Технологічний розділ», містить класифікацію основних типів електро- і гібридних транспортних засобів та аналіз екологічних аспектів їх використання.

У третьому розділі, «Конструкторський розділ», проведено дослідження принципу роботи електромобілів типу EREV та виконано розрахунок основних характеристик такого транспортного засобу.

Четвертий розділ, «Науково-дослідний розділ», містить розробку методики оцінки технологічних і екологічних параметрів функціонування електромобілів типу EREV.

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 130 сторінок формату А4 та 12 аркушів формату А1 графічної частини і 12 сторінок додатків.

Ключові слова: гібридний автомобіль, EREV, АКБ, електромобіль, тяговий електродвигун.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	6
ВСТУП	9
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	11
1.1 Сучасний стан та тенденції розвитку ринку електро- і гібридних транспортних засобів	11
1.2 Нормативні вимоги та цільові технічні показники EREV як вхідні дані для оптимізації проектування	18
1.3 Висновки та постановка завдання на магістерську роботу	24
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	26
2.1 Класифікація основних типів електро- і гібридних транспортних засобів	26
2.2 Сучасні технології енергосистеми EREV	38
2.3 Екологічні аспекти використання електро- і гібридних транспортних засобів	51
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	60
3.1 Дослідження принципу роботи електромобілів типу EREV	60
3.2 Розрахунок основних характеристик електромобіля типу EREV	67
3.3 Компоновка та інтеграція силової установки EREV	81
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ	92
4.1 Розробка методики оцінки технологічних і екологічних параметрів функціонування електромобілів типу EREV	92
4.2. Багатокритеріальна оптимізація параметрів EREV на основі інтегрального показника ефективності	99
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	112
5.1 Принципи та функції управління охороною праці на виробництві: забезпечення безпеки праці як системний підхід	112
5.2 Системний підхід до захисту населення і територій у разі загрози або виникнення надзвичайних ситуацій	122
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	126
БІБЛІОГРАФІЯ	128
ДОДАТКИ	131

ВСТУП

Електрифікація колісного транспорту нині розвивається прискореними темпами під впливом сукупності взаємопов'язаних чинників. Насамперед актуалізується потреба скорочення залежності від викопних енергоресурсів, запаси яких є обмеженими, а їх видобування та споживання супроводжуються суттєвими екологічними наслідками. Паралельно посилюються міжнародні екологічні вимоги та нормативно-правове регулювання, орієнтовані на зниження викидів парникових газів і протидію кліматичним змінам. Важливу роль відіграє й технологічний прогрес у сфері акумуляторних систем та електроприводів, що забезпечує підвищення енергетичної ефективності, зниження собівартості рішень та розширення доступності електромобілів. Додатковим стимулом виступає зростання суспільного попиту на екологічно чисті транспортні засоби, який прискорює розвиток зарядної та сервісної інфраструктури і підвищує привабливість електротранспорту для споживачів.

З огляду на наведені передумови, дослідження транспортних засобів типу EREV є актуальним напрямом. Концепція EREV поєднує переваги електромобіля та гібридної схеми, забезпечуючи підвищену енергоефективність, розширений діапазон автономної роботи та зменшення негативного впливу на довкілля. Запропонована структура роботи створює умови для комплексного розгляду як теоретичних положень, так і прикладних технічних рішень, спрямованих на вдосконалення зазначеного класу транспортних засобів.

Метою роботи є розробка методики оцінки технологічних та екологічних параметрів функціонування електромобілів типу EREV з метою удосконалення підходів до їх проектування та реалізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Виконати аналіз поточного стану та ключових тенденцій розвитку світового і вітчизняного ринків електричних та гібридних транспортних засобів.
2. Систематизувати та класифікувати основні типи електрифікованих транспортних засобів, визначивши їхні принципові відмінності за структурою силової установки та режимами роботи.

3. Розглянути екологічні аспекти впровадження електротранспорту, зосередивши увагу на впливі на довкілля та можливостях зниження викидів і забруднюючих речовин.
4. Сформулювати концептуальні положення щодо транспортного засобу типу EREV і обґрунтувати базові конструктивні характеристики, необхідні для досягнення заданих показників ефективності.
5. Виконати розрахункове визначення ключових технічних параметрів EREV, що характеризують енергетичні, тягово-динамічні та експлуатаційні властивості.
6. Розробити методику оцінювання технологічних та екологічних параметрів функціонування електромобілів типу EREV з урахуванням реальних режимів експлуатації.
7. Надати рекомендації щодо поліпшення охорони праці та безпеки у процесі виробництва та експлуатації транспортних засобів.

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Сучасний стан та тенденції розвитку ринку електро- і гібридних транспортних засобів

Світовий ринок електромобільності перебуває у фазі прискореного зростання, що підтверджується динамікою продажів електричних транспортних засобів та гібридів. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства, у 2023 році глобальні продажі електромобілів перевищили 10 млн одиниць, що відповідає приблизно 14 % від загального обсягу реалізації легкових автомобілів. Порівняно з 2020 роком ринок продемонстрував майже двократне зростання, що вказує на стійку тенденцію до збільшення частки електрифікованих транспортних засобів у структурі автопарку та формування довгострокового тренду на поступове витіснення традиційних силових установок у сегменті нових продажів.

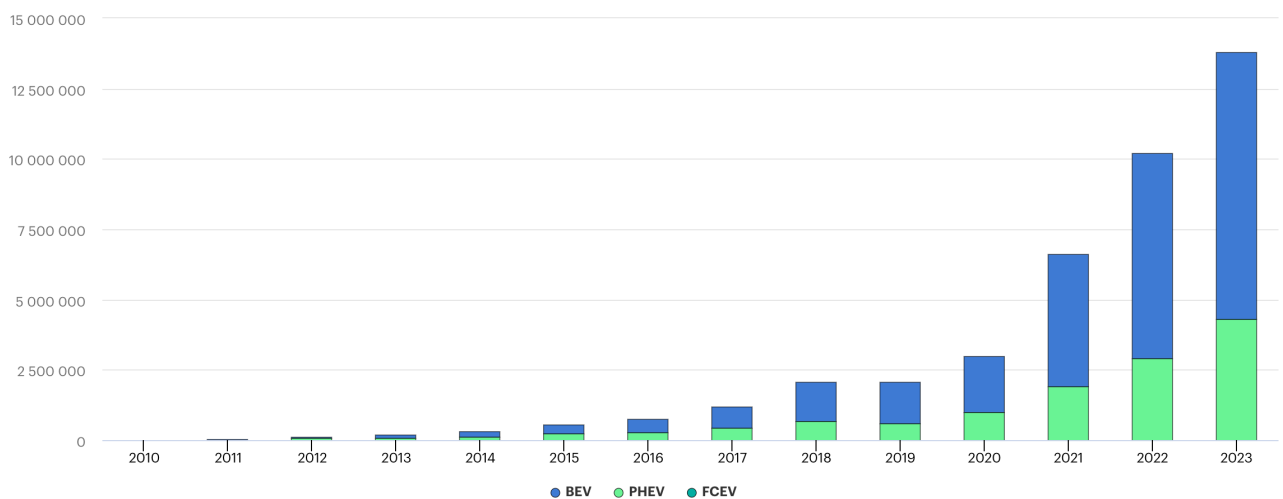


Рисунок 1.1 – Статистика продажів електромобілів у світі

Причини активного впровадження електромобілів мають системний характер і одночасно охоплюють екологічні, енергетичні, економічні та соціальні аспекти. Передусім електрифікація транспорту розглядається як один із ключових інструментів скорочення викидів парникових газів і протидії кліматичним змінам. Транспортний сектор формує значну частку глобальних

викидів CO₂, і заміщення автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння електроприводом дозволяє зменшувати прямі викиди в місці експлуатації. Ефект скорочення емісії стає найбільш вираженим у разі зростання частки відновлюваних джерел у енергобалансі, що зменшує вуглецеву інтенсивність електроенергії для заряджання.

Другою суттєвою передумовою є підвищення енергетичної безпеки. Перехід на електричний транспорт знижує залежність економіки від імпорту нафтопродуктів і пом'якшує вплив цінових коливань на паливних ринках, що є критичним для країн з обмеженими ресурсами викопного палива. У практичному вимірі це означає диверсифікацію джерел енергії для транспорту, можливість ширшого використання локальної генерації та підвищення стабільності енергопостачання у довгостроковій перспективі.

Третьою вагомою причиною виступає зменшення забруднення повітря у міських агломераціях. Електротранспорт не формує локальних викидів продуктів згоряння, а отже сприяє зниженню концентрацій оксидів азоту та твердих частинок у місцях з високою інтенсивністю руху. Це безпосередньо пов'язано з покращенням якості повітря, зменшенням екологічного навантаження на урбанізовані території та зниженням ризиків для здоров'я населення.

Четвертим фактором є економічна доцільність для кінцевого споживача. Хоча придбання електромобіля часто потребує вищих початкових витрат, експлуатаційні витрати в багатьох сценаріях є нижчими за рахунок вартості електроенергії порівняно з паливом, а також через меншу кількість вузлів, що зазнають зношування і потребують регулярного обслуговування. Додатково знижується ймовірність витрат, пов'язаних із ремонтом складних механічних агрегатів, притаманних традиційним силовим установкам.

Динаміка ринку також істотно залежить від державної політики та інституційної підтримки. Деякі країни формують комплексні програми стимулювання попиту, що включають податкові пільги, зниження вартості володіння та розвиток зарядної інфраструктури. Показовим прикладом є Норвегія, де у 2023 році частка електромобілів у нових продажах легкових

автомобілів перевищила 80 %, що стало результатом системних заходів, спрямованих на зменшення податкового навантаження та підвищення зручності експлуатації електротранспорту. Водночас значну роль у глобальному масштабі відіграє Китай, який підтримує галузь через фінансові стимули, регуляторні механізми для виробників і масштабне розширення мережі зарядних станцій; за підсумками 2023 року на китайський ринок припадала понад половина світових продажів електромобілів, а кількість зарядних точок досягла багатомільйонного рівня, що забезпечує технологічну готовність до подальшого зростання.

Європейський Союз реалізує політику скорочення викидів від транспорту та посилює вимоги до нових транспортних засобів. Стратегічним орієнтиром є обмеження продажів нових легкових автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння після 2035 року, що стимулює виробників та споживачів прискорювати перехід на електрифіковані платформи. На національному рівні окремі країни застосовували програми субсидій і податкових пільг для придбання електромобілів, що впливало на темпи проникнення технології в різних сегментах ринку. У США електрифікація транспорту підтримується через інвестиційні програми та механізми податкових кредитів, які поєднуються з розбудовою зарядної інфраструктури й локалізацією виробництва ключових компонентів.

Електромобільність у глобальному масштабі формується як багатофакторний процес, у якому поєднуються екологічні, енергетичні та економічні передумови. Досвід країн, що є лідерами у впровадженні електротранспорту, показує, що вирішальний вплив мають узгоджені державні рішення, фінансові механізми підтримки, а також системний розвиток зарядної інфраструктури. Саме комплексність підходу дозволяє суттєво прискорювати заміщення традиційного автопарку транспортними засобами з електроприводом.

В Україні процес поширення електромобілів також демонструє позитивну динаміку, хоча темпи зростання залишаються нижчими, ніж у провідних країнах. До ключових чинників, що стимулюють попит на електротранспорт, належать підвищення вартості пального, прагнення зменшити залежність від імпортованих нафтопродуктів, а також необхідність зниження екологічного

навантаження, особливо у великих містах. На цьому тлі електромобілі розглядаються як практичний інструмент підвищення енергетичної стійкості та покращення екологічних показників міського середовища.

Значну роль у зростанні українського сегмента електротранспорту відіграють регуляторні рішення, спрямовані на здешевлення ввезення та експлуатації електромобілів. Починаючи з 2018 року, для імпортованих електромобілів були запроваджені податкові послаблення, зокрема звільнення від сплати ПДВ та акцизного податку, що зменшило кінцеву вартість для споживача та підвищило доступність таких транспортних засобів. Додатково застосовуються механізми, пов'язані зі зниженням податкового навантаження на власників, а також введенням спеціальних реєстраційних ознак для електромобілів, які в окремих населених пунктах можуть бути підставою для отримання операційних переваг, зокрема пільгового паркування.

Не менш важливим фактором є інфраструктурна готовність. У найбільших містах України поступово розширюється мережа зарядних станцій, що покращує умови експлуатації та знижує бар'єри для переходу на електротранспорт у повсякденних сценаріях використання. За наявними оцінками, у 2023 році кількість зарядних точок перевищила 2500, що, попри відставання від показників країн ЄС, забезпечує базову можливість обслуговування зростаючої кількості електромобілів. Паралельно підвищується залученість держави до розвитку електромобільності через стратегічні документи, спрямовані на виконання міжнародних екологічних зобов'язань та створення умов для поступового збільшення частки електротранспорту в автопарку.

Помітний вплив на зростання ринку має й активність приватного сектору. Компанії, що здійснюють перевезення, поступово оновлюють автопарк за рахунок електромобілів, оскільки в умовах міської експлуатації вони забезпечують нижчі експлуатаційні витрати та кращу прогнозованість витрат на енергію й обслуговування. У цьому сегменті електромобілі набувають поширення насамперед у сервісах таксі та міської доставки, де маршрути мають обмежений радіус, а можливість регулярного заряджання може бути організована на базі компанії або у визначених точках інфраструктури. Такий

підхід сприяє формуванню практичного попиту та пришвидшує накопичення досвіду експлуатації електротранспорту.

У цілому, розвиток електромобільності в Україні підтримується поєднанням фінансових стимулів, інфраструктурного розширення та поступового зростання попиту з боку бізнесу і населення. Водночас темпи впровадження обмежуються низкою факторів, серед яких провідну роль відіграють нерівномірність розвитку інфраструктури, регіональні відмінності у доступності зарядних станцій та потреба у подальшій стабілізації нормативно-правового середовища.

Світові тенденції підтверджують прискорене зростання ринку електромобілів і зсув автомобільної індустрії у бік екологічно орієнтованих технологій. За даними Міжнародного енергетичного агентства, у 2020 році частка електромобілів у нових продажах становила близько 4,1 %, тоді як у 2023 році цей показник зріс до приблизно 14 %, що відображає кратне збільшення рівня проникнення технології на глобальному ринку. Основними умовами такого росту в різних країнах стали наявність розвиненої інфраструктури заряджання, фінансові стимули, а також регуляторні механізми, які одночасно впливають на виробників і споживачів.

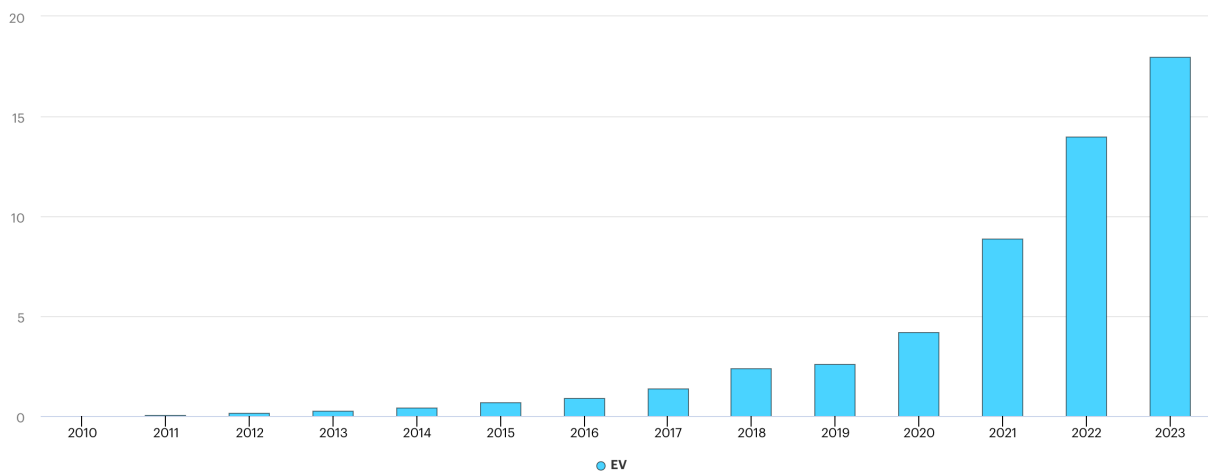


Рисунок 1.2 – Частка продажів електромобілів у світі

У розвинених країнах електромобілі поступово переходять із нішевого сегмента в масовий ринок, що підтверджується зростанням їх частки у структурі нових продажів. Показовою є ситуація в Норвегії, де електрифікація транспорту має найбільшу інтенсивність: у 2023 році переважна більшість нових легкових автомобілів була електричною, а частка моделей із двигунами внутрішнього згоряння скоротилася до мінімальних значень. У межах Європейського Союзу середній рівень проникнення електромобілів є нижчим і становить близько п'ятої частини від нових продажів, однак у низці країн цей показник істотно вищий, що пов'язано з відмінностями у державній підтримці та темпах розбудови інфраструктури. Китай, як найбільший світовий ринок електротранспорту, забезпечує значну частку глобальних продажів, а частка електромобілів у його нових реєстраціях наближається до рівнів, характерних для провідних європейських країн. У США електрифікація також демонструє зростання, при цьому темпи розвитку підтримуються державними механізмами стимулювання попиту, зокрема податковими пільгами для покупців.

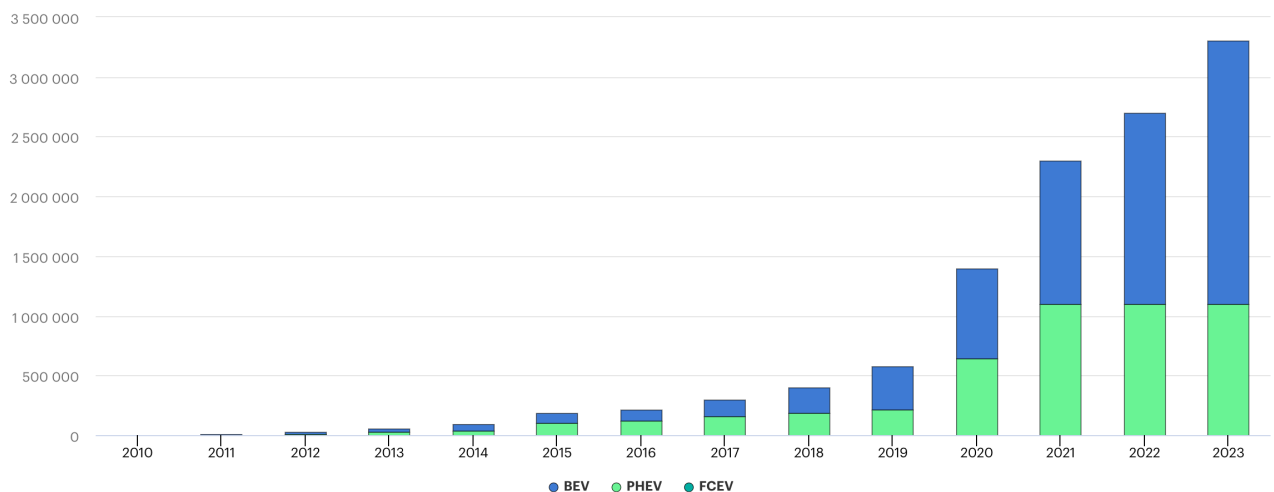


Рисунок 1.3 – Динаміки зміни кількості електро- і гібридних автомобілів у Європі

Аналіз тенденцій розвитку електрифікованого транспорту дозволяє виділити кілька стійких напрямів, які одночасно визначають пропозицію виробників і формують попит споживачів. Передусім спостерігається системне зростання частки електромобілів у загальній структурі автопарку, причому цей

процес посилюється через швидке оновлення модельного ряду та розширення сегментів, у яких електропривод стає технологічно й економічно конкурентним. Одночасно відбувається збільшення виробництва моделей, орієнтованих на масового споживача, що забезпечує поступове зниження бар'єру входу на ринок за рахунок цінової доступності. Важливим драйвером зростання є розвиток зарядної інфраструктури, який у провідних країнах відбувається паралельно зі збільшенням кількості електромобілів і спрямований на зменшення часових та логістичних обмежень під час заряджання. Додатково слід відзначити активну інноваційну динаміку в акумуляторних технологіях, що проявляється у підвищенні енергетичної щільності, зниженні вартості батарей та вдосконаленні швидкісних режимів заряджання; ці фактори прямо впливають на споживчі характеристики електротранспорту і на економічну ефективність виробництва.

На тлі світових змін український ринок електротранспорту перебуває на етапі становлення. У 2020 році частка електромобілів у продажах нових автомобілів була мінімальною, однак упродовж наступних років спостерігалось поступове зростання, і до 2023 року показник наблизився до рівня близько 5 %. При цьому структура ринку має специфічну особливість: істотна частка електромобілів представлена вживаними транспортними засобами, ввезеними з-за кордону, що є наслідком обмеженої доступності нових моделей для більшості споживачів через їх високу вартість. У 2023 році кількість нових реєстрацій електромобілів в Україні перевищила 15 тис. одиниць, що свідчить про зростання попиту порівняно з попереднім роком; при цьому переважання імпортованих вживаних авто формує орієнтацію ринку на відносно бюджетний сегмент. Найбільш поширеними моделями залишаються масові представники електромобільного класу, що традиційно домінують у сегменті доступних пропозицій на вторинному ринку.

Для українського ринку характерні кілька тенденцій, які визначають найближчу траєкторію розвитку. Насамперед зберігається попит на економічні моделі, що пояснюється співвідношенням вартості придбання та очікуваних експлуатаційних витрат. Паралельно відбувається поступове, але нерівномірне розширення зарядної інфраструктури у великих містах та вздовж основних

транспортних коридорів, що створює умови для ширшого використання електромобілів у міжміських поїздах. Окремим чинником виступає зростання інтересу бізнесу до електротранспорту в сегментах таксі та доставки, де експлуатаційні переваги електропривода проявляються найбільш виразно через регулярні маршрути й прогнозований пробіг.

Порівняння з розвиненими ринками показує, що у країнах-лідерах електромобілі вже сприймаються як повноцінна альтернатива автомобілям із двигунами внутрішнього згоряння, а їх частка зростає високими темпами. В Україні електрифікація транспорту поки що розвивається повільніше, і традиційні автомобілі з ДВЗ залишаються домінуючими. Основними стримувальними чинниками є висока початкова вартість нових електромобілів для більшості покупців та недостатня щільність зарядної інфраструктури поза межами великих міст. За таких умов прискорення розвитку потребує узгоджених заходів, що поєднують підтримку попиту, розширення інфраструктури та створення економічних передумов для зниження вартості володіння електротранспортом.

1.2 Нормативні вимоги та цільові технічні показники EREV як вхідні дані для оптимізації проєктування

Проектування EREV доцільно починати не з підбору батареї чи потужності електродвигуна, а з формування рамки – набору нормативних обмежень і цільових технічних показників, які надалі перетворюються на вхідні дані для розрахунків, моделювання та багатокритеріальної оптимізації. Особливість EREV у тому, що це електромобіль за відчуттям експлуатації (тяга формується електромашиною), але з додатковим джерелом енергії у вигляді ДВЗ-генератора. Тому вимоги до нього комбінують електричну частину (високовольтна безпека, батарея, електромагнітна сумісність, кібербезпека, програмні оновлення) і паливну (викиди/шум/теплова інтеграція ДВЗ, безпека паливної системи). У результаті вхідні дані для оптимізації мають два шари: жорсткі обмеження (що обов'язково виконати для допуску до ринку/експлуатації) і цільові KPI (що

забезпечує конкурентоспроможність, економічність і споживчу цінність).

1.2.1 Нормативні вимоги, які найбільше впливають на архітектуру EREV

На практиці нормативні вимоги зручно описувати не загальними словами, а через конкретні вимоги до систем/підсистем. Для EREV ключовими є такі регуляторні блоки:

1) Високовольтна безпека та безпека перезаряджуваної енергосистеми.

Для багатьох ринків базовим документом типового затвердження є UN Regulation No. 100 (R100, Rev.3), що встановлює вимоги до електричної силової установки та до REESS (акумуляторної системи) з акцентом на запобігання ураженню струмом, термічним подіям та небезпечним станам після впливів середовища/аварійних режимів.

2) Електромагнітна сумісність (ЕМС) – для сучасних високовольтних платформ це не формальність, а фактор, що напряду впливає на компоновку кабельних трас, екранування, фільтрацію, вибір інвертора й навіть на архітектуру заземлення/ізоляції. Як нормативна опора тут широко використовується UN Regulation No. 10 (R10) для транспортних засобів щодо ЕМС.

3) Кібербезпека та керування програмними оновленнями.

EREV зазвичай має складні Е/Е-архітектури, телематику, діагностику, інколи – ОТА-оновлення. Це переводить вимоги безпеки з суто електромеханічної площини у площину процесів: управління ризиками, загрозами, життєвим циклом програмного забезпечення. На рівні регуляторики цю сферу формалізують UN Regulation No. 155 (R155) щодо кібербезпеки та системи менеджменту кібербезпеки (CSMS), а також UN Regulation No. 156 (R156) щодо програмних оновлень і системи менеджменту оновлень (SUMS).

Окремо, якщо проєкт орієнтований на європейський ринок (або на ланцюги постачання, що з ним пов'язані), дедалі більший вплив має регулювання сталості батарей: вимоги до прозорості ланцюга постачання, декларування параметрів, вуглецевого сліду, а також цифрового паспорта батарей. Це закріплено в Regulation (EU) 2023/1542; у практичних інтерпретаціях підкреслюється, що паспорт батарей стає обов'язковим для EV-батарей у межах встановлених

строків.

Паралельно з регламентами майже завжди застосовують інженерні стандарти, які допомагають адаптувати вимоги в конструкторські рішення. Найтиповіші – ISO 26262 (функціональна безпека Е/Е систем) і ISO/SAE 21434 (кібербезпека дорожніх транспортних засобів упродовж життєвого циклу). Вони важливі не як папери, а як структура робіт: від аналізу небезпек/ризиків до валідації, керування конфігураціями та змінністю.

Щоб цей нормативний контур реально працював як вхід до оптимізації, його потрібно перетворити на перелік параметрів, які або обмежують рішення, або задають мінімальні рівні виконання. Це робиться через матрицю відповідності (compliance matrix) і паспорт вимог для платформи EREV.

У задачах оптимізації проєктування зручно розглядати вектор проєктних змінних:

$$x = [E_{bat}, P_{em}, P_{gen}, m, C_d, A_f, i_{tr}, \eta_{inv}, \eta_{gear}, P_{ch}, \dots]$$

де E_{bat} – енергоємність батареї, P_{em} – потужність електромашини, P_{gen} – потужність генераторного модуля, m – маса, C_d і A_f – аеродинамічні параметри, P_{ch} – зарядна потужність тощо. Нормативні вимоги тоді описують обмеження:

$$g_j(x) \leq 0, j = 1..k,$$

а цільові показники задають функції якості:

$$f_i(x) \rightarrow \min / \max, i = 1..n.$$

Наприклад, вимоги високовольтної безпеки та REESS (логіка R100) перекладаються у конструкторські правила як мінімально допустимі рівні захисту від ураження струмом, контроль ізоляції, недопущення небезпечних станів при відмовах і впливах, а також у необхідність закласти структурні та термічні рішення, що обмежують ризик термічної події батареї. Це не одна формула – це набір перевірок і мінімальних критеріїв, які в моделі зазвичай представлені бінарно (виконано/не виконано) або через граничні значення параметрів конструкції/алгоритмів.

Аналогічно ЕМС-вимоги (логіка R10) змушують закладати в архітектуру вимоги до екранування, фільтрів, компоновки НВ-джгутів і рознесення джерел перешкод, що в проєктній моделі може з'являтися як обмеження на допустиму

довжину/топологію траси, як вимога до типу інвертора/частоти комутації, або як штраф за рішення, які заздалегідь підвищують ризик невідповідності ЕМС.

Кібербезпека і оновлення ПЗ (логіка R155/R156) відрізняються тим, що вони змінюють не стільки залізо, скільки процес і архітектуру електроніки: потребу в керуванні ризиками, захисті інтерфейсів, контрольованих оновленнях, відстежуваності версій і конфігурацій. У контексті оптимізації це важливо, бо додає нові обмеження на Е/Е-архітектуру (наприклад, сегментація мереж, безпечні шлюзи, довірені ланцюги оновлення), а також впливає на вартісну частину моделі (BOM/розробка/валідація).

Європейський акумуляторний регламент (EU 2023/1542) додає ще один шар: якщо платформа планується як серійна і ринково довгоживуча, то параметри батареї оцінюються не лише за енергоємністю та потужністю, а й за ознаками сталості та простежуваності даних (паспорт батареї, вуглецевий слід, вимоги до ланцюга постачання). Це безпосередньо впливає на вибір хімії, постачальників, а також на необхідність збору й зберігання даних протягом життєвого циклу.

Таблиця 1.1 – Матриця нормативних вимог до EREV

Нормативний блок	Типовий документ/стандарт	Що саме вимагає від EREV
HV-безпека та REESS	UN R100 (Rev.3)	Безпечний стан електросилової частини, вимоги до REESS, мінімізація ризиків ураження/небезпечних подій.
ЕМС	UN R10	Обмеження на електромагнітні завади та стійкість систем.
Кібербезпека	UN R155	CSMS, управління загрозами і ризиками, захист інтерфейсів протягом життєвого циклу.
Оновлення ПЗ	UN R156	SUMS, контрольовані й безпечні оновлення, керування версіями/конфігураціями.

Функціональна безпека	ISO 26262	Підхід до аналізу небезпек, ASIL, вимоги до розробки та валідації Е/Е.
Кіберінженерія	ISO/SAE 21434	Процесний стандарт управління кіберризиками.
Сталість батарей	Regulation (EU) 2023/1542 + Battery Passport	Вимоги до прозорості, даних, поступових екологічних обов'язків, паспорта батареї.

Окрім нормативних обмежень, EREV потребує чітко заданих цільових показників. Вони потрібні для того, щоб у розрахунках і моделюванні не виникало ситуації, коли оптимізація дає технічно можливий, але ринково неприйнятний результат (наприклад, занадто маленька батарея, що знижує EV-режим до символічного; або надмірна батарея, що вбиває масу й вартість).

Для EREV логічно задавати KPI у двох режимах: EV-режим (рух лише від батареї) і розширений режим (робота range-extender, підтримання SOC та покриття дальніх поїздок). Саме ця двомодальність і є ключовою відмінністю EREV від BEV або класичного HEV, тому в паспорті KPI показники повинні бути розділені або чітко інтерпретовані для обох режимів.

Нижче наведено приклад набору цільових KPI для легкового EREV середнього класу як стартового технічного завдання (діапазони можна адаптувати під різні сегменти: міський, кросовер, комерційний тощо). Сенс у тому, що діапазони стають межами пошуку при оптимізації, а не точками.

Таблиця 1.2 – Приклад паспорта KPI EREV

Група показників	KPI (цільове визначення)	Рекомендований діапазон для стартового ТЗ
Електричний режим	Запас ходу в EV-режимі (реалістичний міський)	80–150 км
Енергоефективність	Споживання енергії в EV-режимі	14–22 кВт·год/100 км

Динаміка	0–100 км/год (або 0–60)	7–11 с (залежно від класу)
Режим range-extender	Потужність генераторного модуля, достатня для “крейсера”	50–90 кВт
Загальний пробіг	Сумарний запас ходу (EV + паливо)	600–900 км
NVH/комфорт	Рівень віброакустичного впливу ДВЗ-генератора в салоні	ціль: не гірше за ДВЗ-аналог у класі
Заряджання	Максимальна потужність АС/DC (за концепцією платформи)	АС 7–11 кВт; DC 50–150 кВт
Вартість/масштабованість	Цільова собівартість силової платформи	задається окремо
Надійність	Ресурс основних компонентів	≥ 200 тис. км (ціль)
Екологічність	Викиди в режимі роботи генератора (якщо застосовно)	“не гірше актуальних норм для ДВЗ у класі”

На етапі ТЗ для EREV типово виникає конфлікт: збільшення батареї покращує EV-режим, але підвищує масу й вартість; збільшення потужності генератора спрощує дальні поїздки, але погіршує NVH і ускладнює компоновку та охолодження; прагнення до високої DC-зарядки підтягує термоконтур і може вплинути на довговічність.

Тому вхідні дані краще задавати не одним набором ваг, а через профілі експлуатації, наприклад: “міський/пригород”, “змішаний”, “дальній”. У кожному профілі один і той самий КРІ отримує різну вагу в інтегральній оцінці. Це дозволяє вже на рівні проектування уникнути ситуації, коли платформа ідеальна в середньому, але програє у своєму ключовому сценарії.

1.3 Висновки та постановка завдання на магістерську роботу

Виконаний огляд тенденцій розвитку електрифікованого транспорту підтверджує доцільність і своєчасність дослідження транспортних засобів класу EREV у сучасних умовах. Зростання поширення електромобілів на глобальному ринку зумовлюється сукупною дією екологічних і енергетичних факторів, серед яких ключовими є необхідність скорочення викидів парникових газів, підвищення енергетичної стійкості та зниження рівня техногенного навантаження на довкілля. У країнах із розвиненими ринками електромобільність прискорюється завдяки поєднанню регуляторних вимог, фінансових інструментів підтримки та системному розвитку зарядної інфраструктури, що забезпечує стабільне зростання попиту та розширення пропозиції. В Україні електрифікація транспорту перебуває на етапі активного становлення: попри обмеження інфраструктурного та економічного характеру, тенденція залишається позитивною, а інтерес до електротранспорту поступово зростає. За цих умов розроблення підходів до оцінювання технологічних і екологічних характеристик функціонування транспортних засобів типу EREV є обґрунтованим напрямом, що створює передумови для подальшого удосконалення конструктивних і експлуатаційних рішень у даному сегменті.

Для реалізації поставленої мети магістерської роботи необхідно послідовно розв'язати такі завдання:

- 1) Виконати аналіз поточного стану та ключових тенденцій розвитку світового і вітчизняного ринків електричних та гібридних транспортних засобів.
- 2) Систематизувати та класифікувати основні типи електрифікованих транспортних засобів, визначивши їхні принципові відмінності за структурою силової установки та режимами роботи.
- 3) Розглянути екологічні аспекти впровадження електротранспорту, зосередивши увагу на впливі на довкілля та можливостях зниження викидів і забруднюючих речовин.
- 4) Сформулювати концептуальні положення щодо транспортного засобу

типу EREV і обґрунтувати базові конструктивні характеристики, необхідні для досягнення заданих показників ефективності.

5) Виконати розрахункове визначення ключових технічних параметрів EREV, що характеризують енергетичні, тягово-динамічні та експлуатаційні властивості.

6) Розробити методику оцінювання технологічних та екологічних параметрів функціонування електромобілів типу EREV з урахуванням реальних режимів експлуатації.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Класифікація основних типів електро- і гібридних транспортних засобів

Електричний автомобіль як об'єкт транспортної техніки характеризується тим, що тягове зусилля формується електроприводом, а джерелом енергії виступає електроенергія, накопичена або вироблена в межах енергосистеми транспортного засобу. У більшості сучасних рішень первинним накопичувачем є акумуляторна батарея, яка може заряджатися від зовнішньої електромережі, а також частково поповнювати енергію під час руху за рахунок рекуперації. Відсутність прямого спалювання палива в основному режимі роботи забезпечує суттєве зниження локальних викидів і підвищення енергетичної ефективності в умовах міської експлуатації. З огляду на конструктивні відмінності та принципи формування енергетичного балансу електрифіковані транспортні засоби доцільно поділяти на декілька базових типів, серед яких найбільш поширеними є BEV, EREV, PHEV та HEV.



Рисунок 2.1 – Типологія електро- і гібридних транспортних засобів

Повністю електричні транспортні засоби класу BEV (Battery Electric Vehicle) використовують лише електричний тяговий привід, а енергія для руху надходить з акумуляторної батареї. Такі автомобілі заряджаються від зовнішньої мережі та, як правило, мають найвищий потенціал енергоефективності серед серійних рішень завдяки високому ККД електропривода і відсутності теплових втрат, характерних для двигунів внутрішнього згоряння. Перевагою BEV є нульові локальні викиди під час експлуатації, нижчі експлуатаційні витрати та зменшена потреба в регламентному обслуговуванні силової установки. Разом з тим ефективність практичного використання BEV суттєво залежить від доступності зарядної інфраструктури та часу заряджання, а дальність пробігу визначається енергоемністю батареї і режимом руху. У сучасному сегменті BEV поширені моделі різних класів, які демонструють, що ринок сформувався як масовий і продовжує розширюватися за рахунок удосконалення батарейних технологій та прискорення заряджання.

Транспортні засоби типу EREV (Extended Range Electric Vehicle) мають тяговий електропривід як основний засіб формування руху, проте додатково оснащуються генераторним модулем на базі двигуна внутрішнього згоряння. У більшості архітектур EREV ДВЗ не має жорсткого механічного зв'язку з колесами, а використовується для вироблення електроенергії, яка або безпосередньо подається в тяговий контур, або спрямовується на підтримання рівня заряду батареї. Така концепція забезпечує більшу автономність у порівнянні з BEV, оскільки дозволяє компенсувати дефіцит зарядної інфраструктури на далеких маршрутах і підтримувати рух у ситуаціях, коли заряджання недоступне або займає надмірний час. Водночас наявність ДВЗ у складі енергосистеми призводить до ускладнення конструкції, збільшення маси, потреби у тепловому керуванні та появи викидів у режимі роботи генератора, хоча вони, як правило, нижчі, ніж у традиційних автомобілів з ДВЗ при однакових умовах руху за рахунок оптимізованого режиму роботи двигуна.

Автомобілі типу PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) поєднують електричний тяговий контур і двигун внутрішнього згоряння, а їх акумуляторна

батарея може заряджатися як від зовнішньої мережі, так і під час руху. У PHEV електричний режим часто використовується для коротких поїздок у міських умовах, тоді як у змішаних режимах або на тривалих дистанціях робота ДВЗ забезпечує необхідну автономність. Особливістю PHEV є наявність двох джерел тяги в різних компоновках, що підвищує гнучкість, але збільшує складність керування енергетичними потоками та конструктивну насиченість силової установки. Екологічний ефект PHEV значною мірою залежить від реального профілю експлуатації, частоти заряджання від мережі та частки пробігу, що виконується в електричному режимі.

Гібридні транспортні засоби типу HEV (Hybrid Electric Vehicle) також мають комбіновану силову установку, однак їхня батарея зазвичай не передбачає регулярного зовнішнього заряджання. Поповнення заряду відбувається переважно за рахунок рекуперації енергії гальмування та перетворення частини енергії ДВЗ. Електропривод у HEV виконує функції підтримки тяги, оптимізації режимів ДВЗ та зниження витрати палива в умовах частих розгонів і зупинок. Перевагою HEV є відсутність залежності від зовнішньої зарядної інфраструктури при одночасному підвищенні паливної економічності у порівнянні з класичними автомобілями з ДВЗ. Разом з тим рівень скорочення викидів і загальна екологічність HEV обмежуються тим, що основним джерелом енергії залишається паливо, а електричний контур виступає як допоміжний.

Таким чином, кожен із розглянутих типів електро- і гібридних транспортних засобів має власну область раціонального застосування, яка визначається балансом між автономністю, залежністю від інфраструктури, вартістю, екологічними показниками та особливостями експлуатації. BEV є найбільш ефективним рішенням у середовищі з розвиненою мережею заряджання та переважно міськими сценаріями руху. PHEV забезпечує компроміс між електричним режимом і автономністю, але вимагає дисципліни заряджання для досягнення екологічного ефекту. HEV орієнтований на підвищення паливної економічності без прив'язки до зарядної інфраструктури. EREV, у свою чергу, формує збалансований підхід, за якого переваги електропривода зберігаються в основному режимі експлуатації, а генераторний

модуль забезпечує розширення запасу ходу і зниження ризиків, пов'язаних з інфраструктурними обмеженнями.

2.1.1 Battery Electric Vehicle (BEV)

Battery Electric Vehicle (BEV) є транспортним засобом, силова установка якого реалізована на основі виключно електричного тягового привода. Енергія, необхідна для руху, акумулюється у батарейному пакеті, який заряджається від зовнішньої електромережі. В конструкції BEV відсутні елементи паливної системи та двигун внутрішнього згоряння, що визначає нульові локальні викиди в процесі руху та зменшену кількість обслуговуваних механічних агрегатів. Тягове зусилля створюється електродвигуном, а керування подачею енергії здійснюється силовою електронікою, яка формує необхідні режими роботи привода залежно від навантаження, швидкості та вимог до рекуперації.

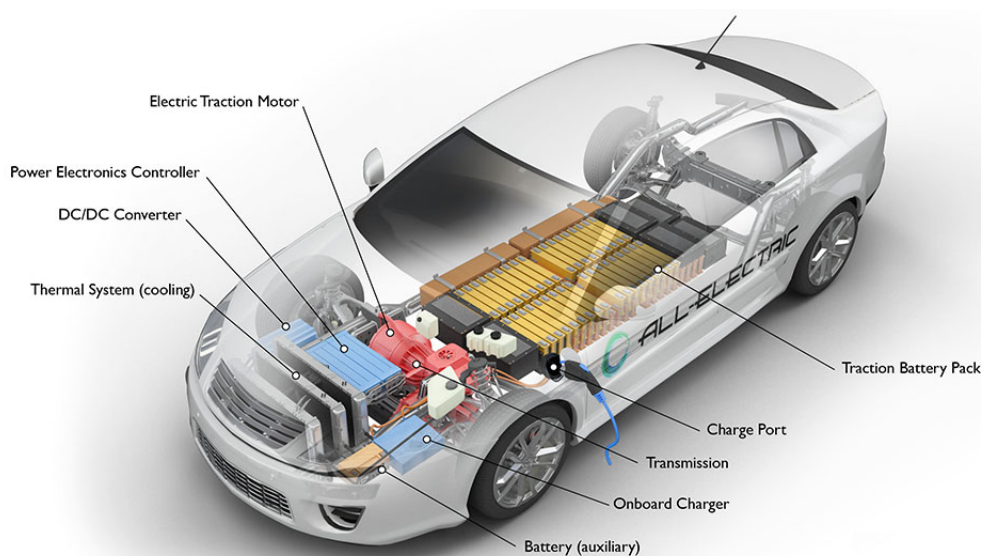


Рисунок 2.2 – Конструкція Battery Electric Vehicle (BEV)

Основу силової платформи BEV становлять акумуляторний блок, тяговий електродвигун, силова електроніка керування та вузли заряджання. Акумуляторна батарея є ключовим елементом енергосистеми, оскільки визначає запас енергії та, відповідно, потенційну дальність пробігу. Ємність батарейних систем зазвичай задається в кВт·год і для серійних легкових електромобілів перебуває в широкому діапазоні, що обумовлено класом автомобіля та цільовим сценарієм використання. Для масового сегмента характерними є значення

порядку кількох десятків кВт·год, тоді як у моделях, орієнтованих на підвищену автономність, застосовуються батареї зі значно більшим енергетичним запасом. У практичному вимірі це дозволяє забезпечувати пробіг у межах сотень кілометрів на одному заряді за умови помірних режимів руху.

Тяговий електропривод BEV перетворює електричну енергію батареї на механічну енергію, що передається на ведучі колеса. Завдяки високому ККД електродвигуна та можливості точного керування моментом в широкому діапазоні швидкостей електромобілі демонструють високі динамічні властивості й ефективність, особливо в міських циклах. Важливою функцією електропривода є рекуперація, під час якої кінетична енергія автомобіля при гальмуванні частково повертається в батарею. Це знижує сумарні енергетичні витрати на місію, а також зменшує навантаження на фрикційні гальмівні механізми.

Заряджання BEV здійснюється від зовнішньої електромережі через зарядний інтерфейс і зарядний пристрій, а тривалість процесу визначається енергоємністю батареї, допустимою потужністю заряджання та типом інфраструктури. У реальних умовах час заряджання може змінюватися в широких межах: від кількох годин при заряджанні змінним струмом на побутових або громадських станціях до десятків хвилин за наявності швидких зарядних комплексів постійного струму. Швидкі режими заряджання підвищують зручність експлуатації, однак потребують дотримання обмежень батарейної системи щодо температури, струмів та стану заряду, що визначається алгоритмами BMS і системою теплового керування.

Розвиток ринку BEV підтверджується появою широкого спектра серійних моделей у різних класах. У практиці експлуатації добре відомі приклади електромобілів з підвищеним запасом ходу та масового сегмента, що демонструють, як технологічний прогрес у батареях і силовій електроніці дозволив сформувати конкурентні споживчі характеристики. Узагальнено, саме доступність серійних рішень, поєднана з розвитком інфраструктури, забезпечила перехід BEV від раннього етапу розвитку до масового впровадження.

Порівняно з автомобілями, оснащеними двигуном внутрішнього згоряння, BEV забезпечують істотні переваги з точки зору локальної екологічності, оскільки в процесі руху відсутні викиди оксидів азоту, твердих частинок і продуктів неповного згоряння палива. Це є особливо важливим для міського середовища з високою щільністю трафіку. Водночас оцінка екологічної ефективності BEV у повному життєвому циклі потребує врахування джерела генерації електроенергії та вуглецевої інтенсивності енергосистеми. За умови заряджання від низьковуглецевих джерел сумарний ефект скорочення викидів є максимальним, тоді як при домінуванні викопної генерації екологічний вигравш зменшується, хоча локальні викиди в містах все одно залишаються практично відсутніми.

Окремим аспектом є екологічне навантаження, пов'язане з виробництвом батарей. Добування та переробка сировини, а також енергоємні технологічні операції під час виготовлення акумуляторних осередків формують додатковий вуглецевий слід і потребують контролю з боку виробників і регуляторів. У подальшому частина цього навантаження компенсується під час експлуатації завдяки високій енергоефективності електропривода та можливості використання відновлюваної електроенергії. Тому коректний висновок щодо екологічної доцільності BEV досягається на основі аналізу повного життєвого циклу, який враховує виробництво, експлуатацію та утилізацію компонентів.

2.1.2. Extended Range Electric Vehicle (EREV)

Extended Range Electric Vehicle (EREV) належить до класу електрифікованих транспортних засобів, у яких основним засобом створення тяги є електричний привід, але запас ходу розширюється завдяки наявності додаткового джерела електроенергії у вигляді генераторного модуля. Типовою є архітектура, де двигун внутрішнього згоряння не використовується для прямого приводу коліс, а працює як силова установка для генерації електроенергії з метою підтримки рівня заряду батареї або живлення тягового контуру. Така схема дозволяє поєднати переваги електропривода в міському режимі та зняти обмеження, пов'язані з дефіцитом зарядної інфраструктури на довгих маршрутах.

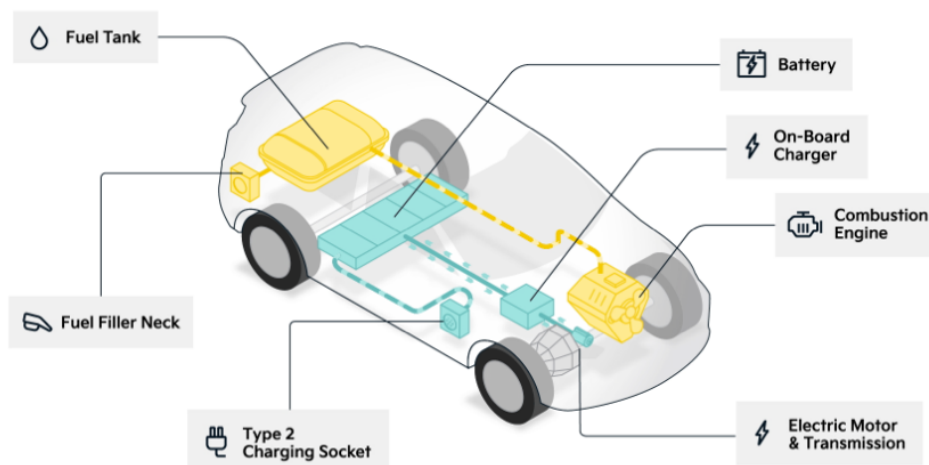


Рисунок 2.3 – Конструкція Extended Range Electric Vehicle (EREV)

Ключовою відмінністю EREV від BEV є розподіл ролей між батареєю та генераторним модулем у різних режимах експлуатації. У стандартних умовах руху, особливо на коротких і середніх дистанціях, EREV може працювати як електромобіль із живленням від батареї. Після зниження рівня заряду до заданого порога активується генераторний модуль, який забезпечує вироблення електроенергії та стабілізує енергетичний баланс, зменшуючи темп подальшого розряду. Це дає змогу істотно збільшити сумарну автономність, а також знизити залежність від доступності зарядних станцій у міжміських поїздках.

Транспортні засоби типу EREV у порівнянні з повністю електричними автомобілями мають складнішу структуру силової установки, оскільки поєднують тяговий електропривод, акумуляторну батарею та автономний генераторний модуль на базі двигуна внутрішнього згоряння. Така архітектура, з одного боку, підвищує функціональну гнучкість і зменшує залежність від зарядної інфраструктури, а з іншого — збільшує масу, конструктивну насиченість і вимоги до систем теплового керування та інтеграції компонентів. Основна перевага EREV проявляється у можливості компенсувати обмеження запасу ходу, характерні для BEV, за рахунок вироблення електроенергії в процесі руху. Унаслідок цього забезпечується більша автономність, особливо на маршрутах із недостатньо розвинутою мережею зарядних станцій.

Як приклади серійних рішень, що реалізують концепцію EREV, можуть розглядатися моделі, в яких генераторний модуль виконує функцію підтримки енергетичного балансу після вичерпання основного заряду батареї. У таких транспортних засобах тривалість руху в чисто електричному режимі визначається ємністю батарейної системи, а подальше збільшення дальності забезпечується роботою ДВЗ у відносно стабільних і оптимізованих режимах. У порівнянні з традиційними автомобілями з двигуном внутрішнього згоряння EREV дозволяють знизити витрату палива та інтенсивність локальних викидів у міському циклі, оскільки значна частина поїздок виконується на електротязі. Разом з тим у порівнянні з BEV екологічні переваги EREV є менш вираженими через наявність паливного контуру та викидів при роботі генератора, хоча сумарний вплив на довкілля може залишатися нижчим за рахунок оптимізації режимів ДВЗ і більш високої частки електричного пробігу.

У зіставленні з гібридними автомобілями типу HEV EREV зазвичай забезпечують більшу частку руху на електротязі, оскільки електропривод є основним, а ДВЗ не працює як постійне джерело тяги. У HEV електрична складова переважно виконує допоміжну функцію під час розгонів і рекуперації, а основний енергетичний потік формується за рахунок пального. Це означає, що в умовах коротких міських поїздок EREV здатні забезпечити нижчий рівень шуму та локальних викидів у порівнянні з HEV, тоді як на тривалих маршрутах різниця визначається стратегією керування генератором, ефективністю перетворень та характеристиками батареї.

Якщо порівнювати EREV з автомобілями, оснащеними лише двигуном внутрішнього згоряння, відмінності є принциповими. Електричний характер тяги забезпечує більш високу енергоефективність у режимах з частими змінами швидкості, а також створює передумови для зниження витрати палива, особливо в урбанізованих умовах. Одночасно зменшується обсяг викидів CO₂ та забруднювальних речовин у місцях експлуатації, що позитивно впливає на якість повітря в містах. У цьому контексті EREV розглядаються як перспективний компромісний клас транспортних засобів, який поєднує електричний характер

руху з розширеним запасом ходу і може бути ефективним на етапі переходу до повної електрифікації транспорту.

2.1.3. Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)

Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) є типом гібридного транспортного засобу, у якому поєднано електричний тяговий контур і двигун внутрішнього згоряння, а батарейна система передбачає можливість заряджання від зовнішньої електромережі. Особливістю PHEV є те, що автомобіль може певний час працювати в чисто електричному режимі, після чого, за необхідності забезпечення більшої автономності або при зниженні рівня заряду до встановленого порога, активується двигун внутрішнього згоряння. У порівнянні з HEV, де зовнішнє заряджання зазвичай не передбачається, PHEV забезпечує більшу частку пробігу на електротязі за умови регулярної зарядки від мережі.

Конструктивно PHEV включає електродвигун, силову електроніку, батарею більшої ємності, ніж у класичних HEV, а також двигун внутрішнього згоряння, який може працювати як джерело тяги або як енергетичний підсилювач залежно від архітектури трансмісії. Енергетична стратегія керування в PHEV передбачає розподіл потужності між ДВЗ та електроприводом, що дозволяє підтримувати комбінований режим роботи. За рахунок рекуперації частина енергії гальмування повертається в батарею, що підвищує ефективність у міських циклах. Для PHEV характерні показники електричного пробігу, достатні для коротких і середніх поїздок, тоді як на довгих дистанціях перевага проявляється у збереженні автономності завдяки паливному контуру.

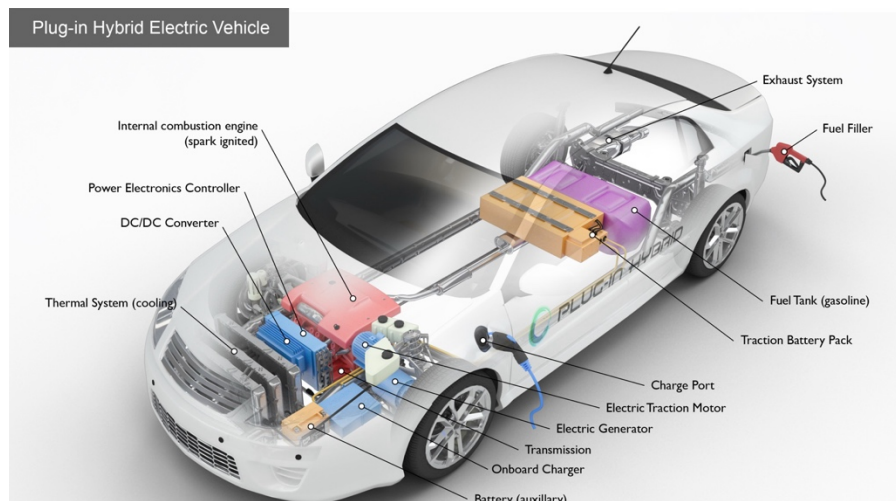


Рисунок 2.4 – Конструкція Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)

Екологічні характеристики PHEV залежать від реального режиму експлуатації. За умови високої частки електричного пробігу локальні викиди під час міських поїздок можуть бути мінімальними, а витрата палива знижується. Якщо ж заряджання від мережі використовується нерегулярно, транспортний засіб фактично переходить у режим звичайного гібрида з ДВЗ як основним джерелом енергії, що зменшує очікуваний екологічний ефект. Порівняно з BEV, PHEV має нижчий потенціал скорочення викидів у повному циклі, оскільки наявність ДВЗ означає збереження паливного контуру й відповідних емісій, однак у порівнянні з автомобілями з ДВЗ PHEV дає можливість зменшити витрату палива та покращити показники екологічності в типових міських сценаріях.

У зіставленні з EREV, PHEV зазвичай має іншу логіку ролей компонентів: у EREV тяга формується переважно електроприводом, а ДВЗ виконує роль генератора, тоді як у PHEV двигун внутрішнього згоряння часто залишається елементом тягового контуру та може передавати потужність на колеса. Водночас конструктивна гнучкість PHEV дозволяє адаптувати транспортний засіб до різних профілів експлуатації, що робить цей клас поширеним у сегменті перехідних технологій електрифікації.

2.1.4. Hybrid Electric Vehicle (HEV)

Гібридний транспортний засіб типу HEV є різновидом електрифікованого автомобіля, у якому силова установка базується на поєднанні двигуна внутрішнього згоряння та електричного тягового контуру. На відміну від систем із зовнішнім заряджанням, HEV зазвичай не передбачає підключення до електромережі для поповнення енергії в батареї. Акумуляторна система заряджається переважно за рахунок рекуперації енергії гальмування, а також шляхом перетворення частини енергії ДВЗ у електроенергію через генераторні режими електромашини. Електродвигун у такій архітектурі виконує функцію підсилення тяги, оптимізації режимів роботи ДВЗ і забезпечення підвищення загальної паливної ефективності, особливо в умовах міського циклу.

Складовими HEV є двигун внутрішнього згоряння, електрична машина (або електродвигун-генератор), батарея відносно невеликої ємності, силова електроніка керування та елементи трансмісії, які забезпечують розподіл потужності. Електрична складова використовується як для підтримки моменту під час розгону, так і для відбору енергії в режимах сповільнення. Це дозволяє зменшити навантаження на ДВЗ у перехідних режимах та підтримувати його роботу ближче до оптимальних зон ККД. Для HEV характерним є те, що електричний режим руху має обмежену тривалість і реалізується переважно на низьких швидкостях або в умовах малих навантажень, після чого основний внесок у тягу знову забезпечує двигун внутрішнього згоряння.

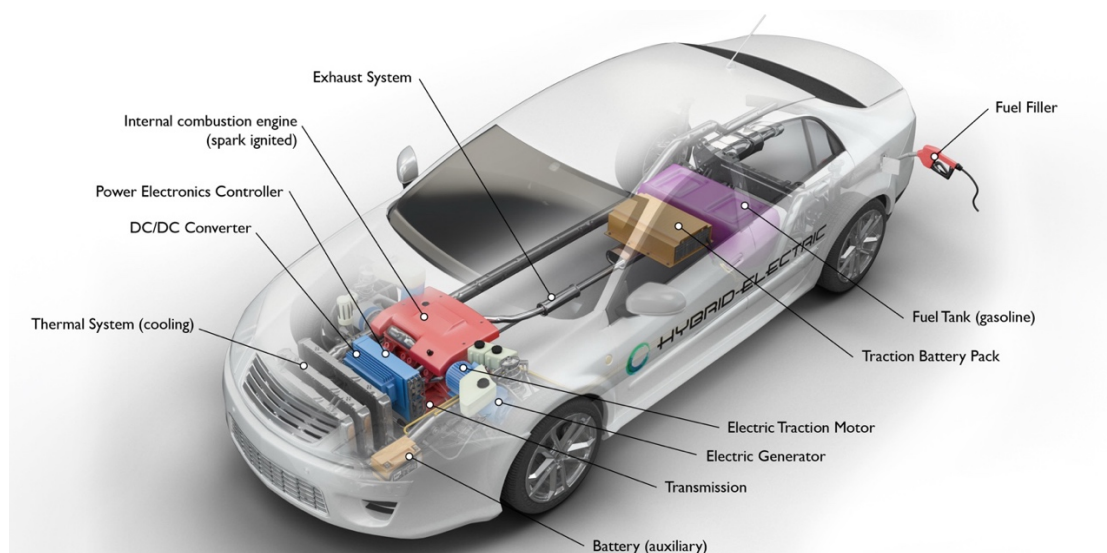


Рисунок 2.5 – Конструкція Hybrid Electric Vehicle (HEV)

Експлуатаційні режими HEV охоплюють декілька характерних сценаріїв. У режимі низьких навантажень і невисоких швидкостей може активуватися короткотривалий рух на електротязі, що знижує витрату пального в умовах заторів і частих зупинок. У змішаному режимі електродвигун працює спільно з ДВЗ, забезпечуючи підвищення тягових характеристик без різкого збільшення витрати палива. На високих швидкостях і при значних навантаженнях основна тяга формується ДВЗ, а електричний контур переважно виконує допоміжну функцію або переходить у генераторний режим залежно від стратегії керування та стану заряду батареї. Така багаторежимність забезпечує гнучкість у різних

умовах експлуатації, однак не дозволяє досягти повного усунення локальних викидів, оскільки паливний контур залишається основним джерелом енергії.

У практиці серійного виробництва HEV представлений широким спектром моделей, які стали масовими завдяки відносно невисокій залежності від інфраструктури та зрозумілій логіці експлуатації. Відомі приклади гібридних платформ демонструють, що за рахунок рекуперації та оптимізації режимів ДВЗ можливо суттєво зменшити витрату пального порівняно з традиційними автомобілями з двигунами внутрішнього згорання. Такий ефект є найбільш вираженим у міському циклі, де часті розгони та гальмування створюють умови для ефективного повернення частини енергії в батарею.

Порівняльний аналіз екологічних характеристик показує, що HEV забезпечує нижчі показники споживання пального та зменшені викиди у порівнянні з автомобілями, які працюють виключно на ДВЗ, однак поступається системам із вищою часткою електричного пробігу. У порівнянні з PHEV або EREV, де електропривод може забезпечувати більшу частину міських поїздок, HEV має обмежені можливості руху в електричному режимі через невелику ємність батареї та конструктивну орієнтацію на допоміжну роль електромашини. Водночас HEV є технологічно доцільним перехідним рішенням, яке дозволяє зменшити витрату пального та локальні викиди без необхідності формування розвиненої мережі заряджання.

З позицій доступності HEV має перевагу в тому, що не потребує підключення до зовнішніх зарядних станцій і може експлуатуватися в інфраструктурно обмежених умовах без зміни звичних підходів до використання автомобіля. Це підвищує привабливість гібридної технології для регіонів, де зарядна мережа ще не сформована. Однак з точки зору досягнення максимального екологічного ефекту в довгостроковій перспективі HEV розглядається як проміжний етап електрифікації, тоді як найбільший потенціал скорочення викидів і залежності від викопного палива забезпечують повністю електричні транспортні засоби класу BEV та рішення з високою часткою електричного пробігу, зокрема EREV і PHEV за умови регулярного заряджання.

2.2 Сучасні технології енергосистеми EREV

Енергосистема EREV є поєднанням високовольтної акумуляторної підсистеми, тягового електропривода та генераторного модуля на базі ДВЗ, з'єднаних через силову електроніку й систему теплового керування. На відміну від класичного гібридного автомобіля, у більшості архітектур EREV механічний зв'язок ДВЗ з ведучими колесами відсутній або не є основним, а тягове зусилля формується електродвигуном. У таких умовах критичними стають технологічні рішення, що визначають енергоефективність, масо-габаритні параметри, теплові режими та надійність: вибір хімії та конструкції батареї, електромеханічна та термодинамічна ефективність генераторного модуля, рівень втрат у перетворювачах, а також здатність теплової системи підтримувати параметри в допустимих межах у різних режимах.

Далі наведено огляд сучасних технологічних рішень, які доцільно розглядати як набір варіантів для подальшої оптимізації при проектуванні платформи EREV.

2.2.1 Акумуляторна підсистема EREV

Ключова відмінність EREV від BEV полягає у можливості підтримувати енергетичний баланс за рахунок генераторного модуля, що знижує вимоги до абсолютного запасу ходу від батареї, але не знімає вимоги до високої питомої потужності, стабільної роботи в широкому діапазоні температур та ресурсної стійкості. Батарея в EREV виконує одночасно роль накопичувача енергії для руху в електричному режимі та роль буфера потужності для згладжування піків навантаження, що виникають при розгонах, рекуперації та переходах між режимами роботи генераторного модуля.

Вибір хімічної системи зазвичай є компромісом між питомою енергією, питомою потужністю, ресурсом, термостійкістю та вартістю. Для серійних платформ найбільш поширені літій-іонні системи на базі катодів типу NMC/NCA та LFP. NMC/NCA забезпечують вищу питому енергію та кращі показники для компактного пакування, тоді як LFP відзначається підвищеною термічною стійкістю, потенційно нижчою вартістю та стійкістю до глибоких циклів, але має

нижчу питому енергію, що збільшує масу за фіксованої енергоємності. Для EREV, де повний запас ходу не цілком визначається батареєю, LFP може бути технологічно доцільною при акценті на довговічність і безпеку, тоді як NMC/NCA частіше застосовують, коли пріоритетом є масогабаритні показники й тривалий EV-режим.

Для сучасних паків важливим є не лише вибір хімії, а й архітектура пакування. Традиційна модульна структура поступово доповнюється підходами cell-to-pack і cell-to-chassis, які зменшують частку пасивних елементів і підвищують об'ємну енергоємність пакета. Для EREV такі рішення можуть бути особливо корисними, оскільки дозволяють компенсувати масу генераторного модуля без зниження енергоємності або без зростання габаритів. Одночасно ускладнюються вимоги до ремонтпридатності та до локалізації термічних подій на рівні осередків.

Важливим параметром є потужнісна здатність батареї, яка характеризується допустимими струмами заряду та розряду, внутрішнім опором і тепловиділенням. У EREV батарея часто працює в режимі часткової підтримки SOC, де коливання рівня заряду не обов'язково досягають крайніх значень, а основні навантаження припадають на середній діапазон SOC. Це зменшує ризики глибокого циклування, але підвищує значущість деградації через часті мікроцикли та температурні впливи.

Тепловиділення батареї в простій інженерній постановці може оцінюватися як сума джоулевих втрат і ентропійної складової. Для етапу проектування достатнім є вираз

$$\dot{Q}_{bat} \approx I^2 R_{int} + I T \frac{\partial U_{oc}}{\partial T}, \quad (2.1)$$

де I – струм, R_{int} – внутрішній опір, U_{oc} – напруга холостого ходу.

Перший доданок домінує при високих потужностях, другий може мати змінний знак залежно від режиму та хімії. Така модель дозволяє на рівні вибору компонентів оцінювати вимоги до відведення тепла й коректно порівнювати варіанти батарей при однакових циклах навантаження.

Окремо необхідно враховувати вплив швидкого заряджання. Навіть якщо концепція EREV допускає зменшені вимоги до високопотужного DC-

заряджання порівняно з BEV, очікування користувачів і конкурентне середовище часто формують потребу у підтримці принаймні середньошвидкісного DC-заряду. Високі зарядні струми збільшують тепловиділення, вимагають посилення теплового контуру і впливають на деградацію через літєве осадження при низьких температурах. Тому при визначенні зарядної потужності необхідно одночасно задавати температурні умови заряджання, допустимі обмеження BMS та стратегії попереднього підігріву батареї.

Надійність батареї визначається не лише ресурсом комірок, а й якістю BMS та системними рішеннями: контролем напруг і температур по осередках, вирівнюванням, діагностикою ізоляції, виявленням відмов датчиків та керуванням аварійними станами. Для EREV додається ще один фактор: координація BMS із системою керування генераторним модулем, оскільки алгоритм підтримки SOC має вплив на температурні режими батареї та на частоту її потужнісних коливань. Таблиця 2.1 подає узагальнений порівняльний огляд хімії і технологічних підходів у контексті EREV.

Таблиця 2.1 – Порівняльні характеристики технологій АКБ для платформи EREV

Технологія	Переваги для EREV	Обмеження	Типові наслідки для проєктування
Li-ion NMC/NCA	Висока питома енергія, компактність пакета, кращі масогабаритні показники за заданої енергоемності	Вища чутливість до термостресу, складніший контроль деградації в екстремальних режимах	Зростає значущість теплового контуру, вимоги до контролю температури і захистів
Li-ion LFP	Підвищена термостійкість,	Нижча питома енергія, можливе	Потрібна компенсація маси

	ресурсність при циклуванні, потенційно нижча вартість	зростання маси за заданої енергоємності	через архітектуру пакування або оптимізацію інших підсистем
Cell-to-pack, cell-to-chassis	Зниження частки пасивних елементів, покращення об'ємної енергоємності, потенційне зменшення маси	Ускладнення ремонтпридатності, підвищені вимоги до безпеки локалізації термічних подій	Вимагає раннього інтеграційного проєктування кузова, теплових і силових шляхів

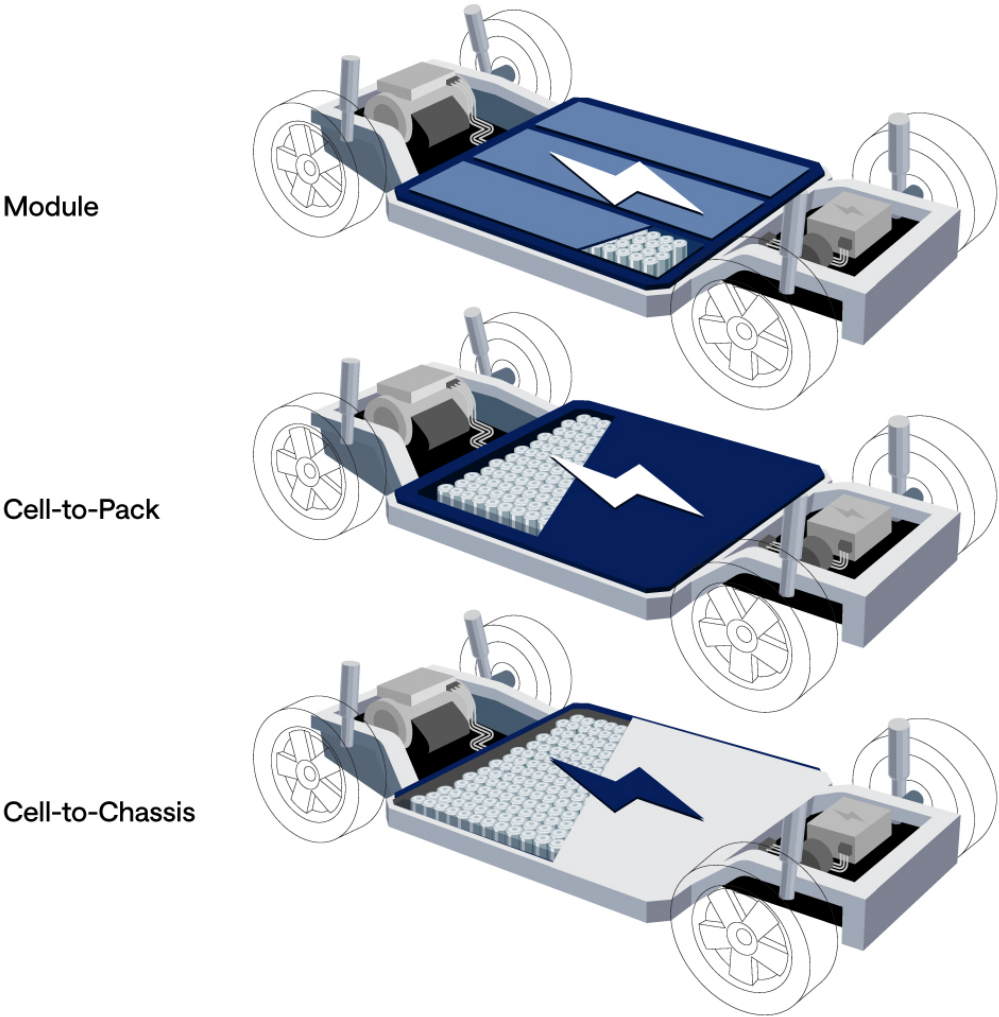


Рисунок 2.6 – Архітектури пакування батареї для платформи EREV: модульна, cell-to-pack і cell-to-chassis

2.2.2 Генераторний модуль EREV – технології ДВЗ, генератора та енергетичні режими

Генераторний модуль в EREV має забезпечувати виробництво електроенергії з високою паливною ефективністю та прийнятними показниками екологічності й акустичного комфорту. Основна технологічна перевага EREV полягає у можливості експлуатації ДВЗ у вузькій зоні високої ефективності, оскільки тягове навантаження не накладає безпосередніх вимог до динамічної реакції ДВЗ на зміну моменту на колесах. Це відкриває можливість застосування стратегії керування з квазістаціонарними режимами, де ДВЗ працює на окремих оптимальних точках, а коливання потужності покриває батарея.

Енергетична ефективність ДВЗ зручно оцінюється через карту питомої ефективної витрати палива BSFC. Для проєктних оцінок зв'язок між необхідною електричною потужністю генератора і витратою палива можна записати у вигляді

$$\dot{m}_f = \frac{P_{el}}{\eta_{gen} \eta_{rect} \eta_{ICE} LHV}, \quad (2.2)$$

де P_{el} – електрична потужність, що подається у DC-шину або на заряд батареї, η_{ICE} – ефективність ДВЗ на робочій точці, η_{gen} – ефективність електричної машини генератора, η_{rect} – ефективність випрямляча, LHV – нижча теплота згоряння палива.

Такий запис підкреслює, що ефективність генераторного модуля визначається не лише ДВЗ, а також електричною машиною й перетворювальною частиною.

У сучасних EREV застосовуються різні технологічні конфігурації:

- компактні бензинові атмосферні або турбовані ДВЗ малих робочих об'ємів, оптимізовані на роботу в генераторному режимі;
- роторно-поршневі двигуни як потенційно компактні джерела потужності з високою питомою потужністю, але зі специфічними вимогами до викидів і ресурсу;

- рішення із підвищеним ступенем уніфікації з серійними ДВЗ для зниження вартості та ризиків постачання;
- перспективні підходи, де генераторний модуль інтегрується з тепловими контурами автомобіля для використання відпрацьованого тепла в системі опалення або термopідготовки батареї.

Для EREV принциповим є узгодження номінальної потужності генераторного модуля з вимогами до режимів руху. Занадто мала потужність призводить до розряду батареї на тривалих ділянках високого навантаження і до погіршення здатності підтримувати SOC. Занадто велика потужність збільшує масу, вартість, теплове навантаження і ускладнює NVH. Практично доцільним є підхід, де генератор покриває середню потужність крейсерського руху на шосе, а пікові навантаження покриваються батареєю.

Важливим технологічним аспектом є акустична інтеграція. Оскільки в електричному режимі рівень шуму низький, запуск ДВЗ-генератора є помітною подією з точки зору комфорту. Це формує вимоги до опор, шумоізоляції, алгоритму запуску, а також до вибору частоти обертання, на якій генераторний модуль працює тривало. Вибір режимів часто виконується так, щоб уникати резонансних зон кузова і підвіски та забезпечувати стабільність акустичної картини. Таблиця 2.2 узагальнює технологічні варіанти генераторного модуля та їхній вплив на проектування.

Таблиця 2.2 – Технологічні конфігурації генераторного модуля EREV і наслідки для платформи

Конфігурація	Технологічний зміст	Переваги	Обмеження та ризики
ДВЗ малого об'єму синхронний генератор + випрямляч	Робота на оптимальних точках, електроживлення DC-шини	Висока системна ефективність при правильному керуванні, відносно проста сервісна інфраструктура	Потреба в ефективному охолодженні і NVH-інтеграції, складність викидів у

2.2.3 Силова електроніка EREV

Силова електроніка визначає ефективність передачі енергії між батареєю, генераторним модулем і тяговим електроприводом. Для EREV це особливо важливо, оскільки перетворення відбуваються як у тяговому контурі, так і в контурі генерації та заряджання. Типова структура включає тяговий інвертор, DC/DC-перетворювачі для живлення низьковольтної мережі, випрямляч або активний перетворювач для генератора, а також бортовий зарядний пристрій для AC-заряду, інколи з підтримкою DC-заряду через зовнішній зарядний модуль.

Сучасна тенденція полягає в переході від кремнієвих силових модулів до SiC-пристроїв, що забезпечують нижчі комутаційні втрати, можливість підвищення частот перемикавання, зменшення габаритів пасивних елементів і підвищення ефективності в широкому діапазоні навантажень. Для EREV це важливо з двох причин: зниження втрат зменшує теплове навантаження і спрощує теплове керування; підвищення ефективності дозволяє зменшити необхідну енергоємність батареї або паливні витрати генераторного модуля в місіях з тривалою роботою перетворювачів.

Втрати інвертора в першому наближенні поділяються на провідникові й комутаційні, а сумарні втрати можуть оцінюватися як

$$P_{loss} \approx P_{cond}(I, T) + P_{sw}(V, I, f_{sw}, T), \quad (2.3)$$

де f_{sw} – частота перемикавання.

Перехід на SiC дозволяє зменшити P_{sw} або підняти f_{sw} без пропорційного росту втрат, що напряму впливає на вибір індуктивностей, фільтрів і акустичні аспекти електропривода.

Суттєвим рішенням є вибір рівня напруги HV-платформи, зокрема 400 В або 800 В класу. Підвищення напруги зменшує струми при заданій потужності, що знижує джоулеві втрати в кабельних трасах і силових елементах та полегшує високопотужне заряджання. Водночас зростають вимоги до ізоляції, компонентної бази, архітектури захистів і EMC. Для EREV доцільність 800 В архітектури визначається не лише зарядною потужністю, а й вимогами до тягової потужності, масо-габаритних характеристик і цільових втрат у силовому контурі.

Окрему роль відіграє активний перетворювач генераторного модуля. Використання активного випрямляча або двонапрямого AC/DC-перетворювача дозволяє оптимізувати режим генератора, забезпечувати стабільність DC-шини, знижувати гармонічні складові та покращувати ЕМС-поведінку системи. Це підвищує складність і вартість, але може давати вигаш у ефективності та керованості, особливо в режимах швидкої зміни навантаження. Таблиця 2.3 систематизує ключові технологічні вибори в силовій електроніці та їхні наслідки.

Таблиця 2.3 – Технологічні рішення сигової електроніки EREV і вплив на показники

Рішення	Основний ефект	Позитивний вплив	Компроміси
Si інвертор і перетворювачі	Базовий рівень технології	Нижча вартість, широка доступність	Вищі втрати, складніші теплові режими на високих потужностях
SiC інвертор і DC/DC	Підвищення ефективності та питомої потужності	Зменшення втрат і маси, спрощення охолодження, потенціал кращої динаміки	Вища вартість, підвищені вимоги до проєктування ЕМС та ізоляції
HV 800 В класу	Зменшення струмів при заданій потужності	Менші втрати, кращі перспективи швидкого заряджання	Вимоги до компонентів, ізоляції, конструктивної реалізації та валідації

Активний випрямляч генератора	Кращий контроль DC-шини та якості електроенергії	Підвищення керованості, потенційне покращення ефективності	Додаткова складність, вартість, вимоги до охолодження
-------------------------------	--	--	---

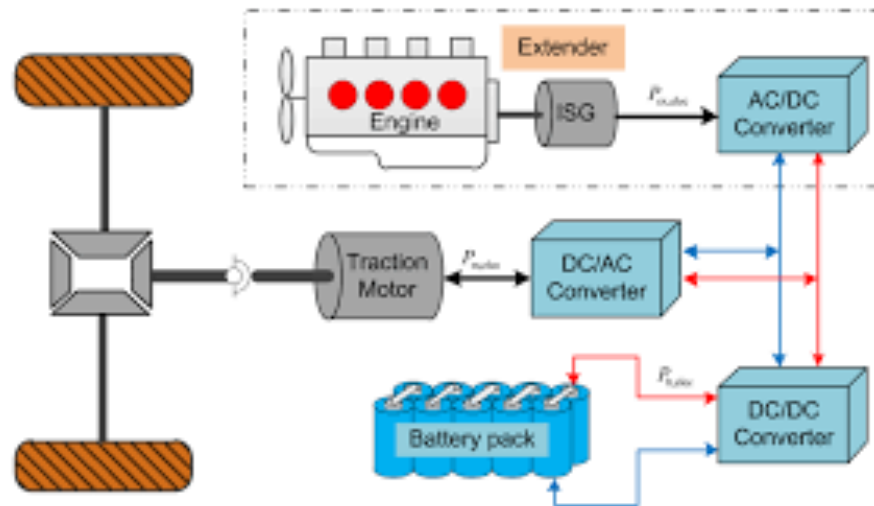


Рисунок 2.8 – Блок-схема силових перетворювачів EREV

2.2.4 Теплове керування EREV: батарея, силова електроніка, електропривод і інтеграція з ДВЗ

Теплове керування в EREV має багатоконтурний характер, оскільки теплонавантаження розподіляється між батареєю, інвертором, електродвигуном, генераторним модулем і системою кондиціювання салону. Ефективність теплової системи визначає не лише надійність, але й енергоефективність у реальних умовах, особливо в холодному кліматі, де витрати на опалення можуть суттєво знижувати запас ходу в EV-режимі.

Для батареї критичним є підтримання температури в діапазоні, який мінімізує деградацію та забезпечує допустимі струмові режими. Найпоширенішим рішенням є рідинне охолодження через теплові плити або канали в піддоні батарейного пакета. Альтернативою є пряме охолодження холодоагентом або двофазні рішення, які забезпечують високу інтенсивність теплообміну, але ускладнюють конструкцію, вимоги до герметичності й сервісу.

Силова електроніка й електродвигун також потребують ефективного відведення тепла. У сучасних системах застосовуються інтегровані охолоджувальні контури, де інвертор і мотор можуть мати спільний низькотемпературний контур, тоді як генераторний модуль і ДВЗ мають високотемпературний контур. Такий поділ дозволяє оптимізувати температурні рівні та підвищити загальну ефективність.

Особливістю EREV є можливість утилізації тепла ДВЗ. Відпрацьоване тепло може використовуватися для опалення салону або для підігріву батареї, що знижує навантаження на електричний нагрівач і підвищує зимову ефективність. Однак інтеграція теплових контурів повинна враховувати інерційність системи, обмеження температур батареї та необхідність швидкого виходу в робочий режим після запуску генераторного модуля.

З точки зору формальної моделі теплове керування може бути представлене балансом теплових потоків для кожного компонента:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \dot{Q}_{gen,i} - \dot{Q}_{rem,i}, \quad (2.4)$$

де C_i – теплоємність, $\dot{Q}_{gen,i}$ – тепловиділення, $\dot{Q}_{rem,i}$ – відведення тепла через охолодження.

Для етапу оптимізації важливо мати коректні оцінки максимальних $\dot{Q}_{gen}$ в граничних режимах та можливостей $\dot{Q}_{rem}$ для обраних теплообмінників і насосів.

Безпекова складова теплового керування батареї включає технології виявлення перегріву, локалізації термічних подій, відведення газів, конструктивні бар'єри, а також алгоритмічні обмеження потужності при небезпечних температурах. Для EREV ці алгоритми мають бути узгоджені з керуванням генераторного модуля, оскільки при обмеженні батареї може знадобитися перехід до режиму, де генератор забезпечує більшу частку потужності або навпаки. Таблиця 2.3.4 узагальнює основні теплові архітектури та їхній вплив на платформи EREV.

Таблиця 2.4 – Варіанти теплової архітектури EREV і характеристика

Архітектура	Характеристика	Переваги	Обмеження
Рідинне охолодження батареї через плити	Низькотемпературний контур із насосом і теплообмінником	Висока керованість, придатність для серійної реалізації, сумісність із підігрівом	Потрібні розрахунки рівномірності температурного поля, маса й складність контуру
Пряме охолодження холодоагентом	Теплообмін батареї з холодоагентом	Висока інтенсивність відводу тепла, потенціал для швидкого заряджання	Підвищені вимоги до герметичності та сервісу, складність інтеграції
Інтеграція з теплом ДВЗ	Використання тепла генераторного модуля для салону або батареї	Підвищення зимової ефективності, зменшення електроспоживання на опалення	Потреба у коректній термостатизації, ризик перегріву при неправильному керуванні

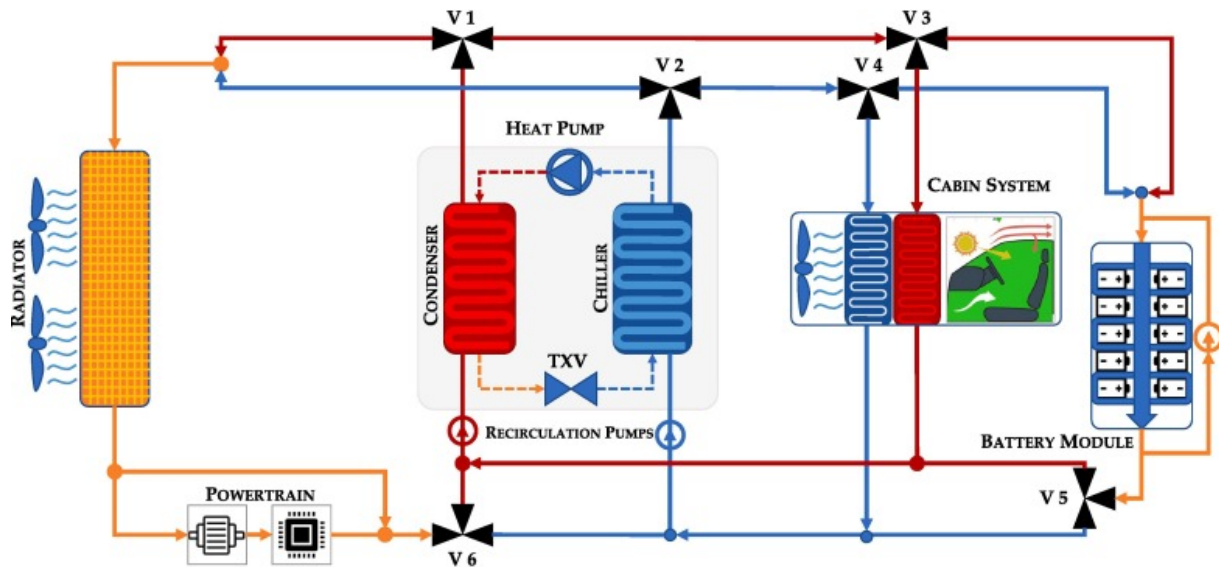


Рисунок 2.9 – Теплова схема з двома контурами: низькотемпературний для батареї, інвертора, електродвигуна; високотемпературний для ДВЗ.

Для подальшого проектного синтезу EREV перелік технологій доцільно перевести в систему критеріїв, що можуть бути формалізовані в розрахунковій моделі. Батарея визначає енергетичну ємність EV-режиму та пікову потужність; генераторний модуль визначає паливну економічність на далеких дистанціях і стабільність підтримки SOC; силова електроніка визначає частку електричних втрат і рівень теплового навантаження; теплове керування визначає здатність системи зберігати параметри в допустимих межах і не деградувати ресурс.

Для формалізації в задачі оптимізації доцільно використовувати показники: сумарні втрати у тяговому контурі, граничні температури компонентів в еталонних режимах, масу та об'єм підсистем, оцінку вартості, а також ресурсні індикатори, які враховують температурно-струмову історію батареї й частоту роботи генератора. Вибір технологічного набору для платформи EREV, таким чином, зводиться до пошуку компромісу між масою, ефективністю, вартістю і ресурсом за наявності нормативних обмежень безпеки та експлуатаційної надійності.

2.3 Екологічні аспекти використання електро- і гібридних транспортних засобів

Екологічна оцінка електрифікованого транспорту набуває особливої актуальності внаслідок посилення вимог до зниження негативного впливу автомобільних перевезень на довкілля. Традиційні транспортні засоби, оснащені двигунами внутрішнього згоряння, залишаються одним із відчутних джерел антропогенних викидів, насамперед парникових газів, а також речовин, що формують локальне забруднення атмосферного повітря. У складі таких емісій ключову роль відіграють діоксид вуглецю, оксиди азоту та аерозольні частинки, які асоціюються з погіршенням якості повітря в містах і зростанням ризиків для здоров'я населення. У контексті глобальної кліматичної політики та цілей декарбонізації скорочення викидів у транспортному секторі розглядається як один із необхідних напрямів технічного розвитку, що зумовлює інтерес до електричних та гібридних силових установок.

Електро- і гібридні транспортні засоби формують інший профіль впливу на довкілля, оскільки частина енергії або весь енергетичний баланс забезпечуються електроприводом. За рахунок цього зменшуються локальні викиди в місці експлуатації, а також з'являється можливість підвищення загальної ефективності використання енергії, особливо у міських режимах руху з частими зупинками. Найбільш суттєвий ефект досягається в системах, де електропривод є основним джерелом тяги або забезпечує значну частку пробігу, що характерно для BEV, EREV та PHEV. У класичних HEV екологічний ефект також має місце, однак він зазвичай менш виражений через збереження домінуючої ролі двигуна внутрішнього згоряння в енергетичному балансі.

Разом з тим екологічний аналіз електрифікованого транспорту є коректним лише за умови врахування повного життєвого циклу. Зменшення локальних викидів під час руху не означає автоматичного усунення екологічного навантаження в цілому, оскільки частина емісій переноситься на етапи виробництва електроенергії, виготовлення компонентів і, зокрема, акумуляторних систем. Виробництво батарейних осередків потребує значної

кількості енергії та сировинних ресурсів, а добування і переробка матеріалів може супроводжуватися додатковими екологічними ризиками. Саме тому з позицій науково обґрунтованої оцінки важливо розділяти вплив на довкілля у фазі експлуатації та вплив, пов'язаний із створенням і утилізацією компонентів.

При порівнянні транспортних засобів з ДВЗ та електрифікованих рішень необхідно враховувати джерело електроенергії, що використовується для заряджання. Енергосистема з високою часткою викопної генерації підвищує вуглецеву інтенсивність кіловат-години, що зменшує загальний екологічний ефект від використання електромобілів. У той же час перехід енергетики до низьковуглецевих джерел (відновлювані технології та інші варіанти з низькою питомою емісією) суттєво підсилює позитивний ефект від електрифікації транспорту, оскільки поєднання чистішої генерації з високою ефективністю електропривода забезпечує найкращі показники щодо викидів парникових газів у повному циклі.

2.3.1. Зменшення шкідливих викидів під час експлуатації

Експлуатаційна фаза є одним із визначальних етапів впливу транспортних засобів на навколишнє середовище, оскільки саме на цьому етапі формуються локальні викиди в зоні руху транспортного потоку. Автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння в процесі роботи утворюють викиди CO_2 як наслідок спалювання пального, а також продукти високотемпературного згоряння та неповного окиснення, зокрема оксиди азоту та тверді частинки. У міських умовах ці компоненти мають підвищену концентрацію через інтенсивність трафіку та обмежену вентиляцію вуличних каньйонів, що посилює негативний вплив на повітряне середовище.

Повністю електричні транспортні засоби типу BEV у процесі руху не мають процесу згоряння палива, а отже не утворюють локальних емісій CO_2 , NO_x і твердих частинок, пов'язаних із вихлопом. Це є основою їхньої переваги в задачах покращення якості повітря у містах і зниження впливу транспортного сектору на локальні екологічні показники. За таких умов екологічний ефект BEV у фазі експлуатації визначається передусім тим, що викиди переносяться з місць експлуатації до місця виробництва електроенергії, а також залежить від

ефективності перетворення енергії у ланцюгу генерація–передача–заряджання–електропривод.

Концепція EREV забезпечує зменшення локальних викидів у ситуаціях, коли транспортний засіб працює в електричному режимі, що є типовим для коротких і середніх поїздок. За рахунок цього в міських сценаріях EREV може демонструвати екологічні показники, близькі до BEV, за умови, що більша частка пробігу виконується на енергії батареї. Однак на відміну від BEV у EREV існує режим роботи генераторного модуля, у якому виникають викиди, пов'язані зі спалюванням пального. Разом з тим важливою перевагою EREV є те, що двигун внутрішнього згоряння працює переважно у більш стабілізованих режимах, що дозволяє оптимізувати його паливну економічність і зменшувати питомі викиди порівняно з традиційною схемою ДВЗ при аналогічних умовах руху.

Для PHEV характерним є можливість тривалої експлуатації в електричному режимі за умови регулярного заряджання від мережі, що потенційно забезпечує низькі локальні викиди у міському циклі. Електричний пробіг, як правило, є обмеженим енергоємністю батареї, після чого активується двигун внутрішнього згоряння або реалізується комбінований режим. Екологічний ефект PHEV значною мірою залежить від фактичної частоти заряджання і стилю експлуатації: чим більша частка поїздок виконується на електротязі, тим нижчими є витрати палива і емісії у зоні руху. Якщо зовнішнє заряджання використовується нерегулярно, потенційні екологічні переваги зменшуються, і транспортний засіб фактично наближається за характеристиками до традиційного гібрида.

У HEV зменшення викидів під час експлуатації досягається насамперед через зниження витрати палива порівняно з автомобілями з ДВЗ. Рекуперація енергії гальмування та оптимізація режимів роботи ДВЗ дозволяють скорочувати споживання пального, особливо в умовах міського циклу. Проте HEV не забезпечує повного усунення локальних викидів, оскільки двигун внутрішнього згоряння залишається основним джерелом енергії. Тому з позицій екологічного ефекту в місці експлуатації HEV поступається BEV, а також рішенням із

більшою часткою електричного пробігу, зокрема EREV і PHEV за умови коректної експлуатаційної стратегії. Для наочності порівняння викидів під час експлуатації наведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Порівняння викидів під час експлуатації різних типів транспортних засобів

Тип транспортного засобу	CO ₂ (г/км)	NO _x (мг/км)	PM (мг/км)
BEV	0	0	0
EREV	20–50	10–30	5–10
PHEV	30–70	15–50	10–15
HEV	80–110	40–70	15–30
ДВЗ	120–150	60–90	20–50

Зіставлення результатів, наведених у таблиці, дозволяє зробити висновок, що повністю електричні транспортні засоби демонструють найкращі показники з позицій локальної екологічності під час експлуатації, тоді як гібридні рішення займають проміжне положення між електромобілями та класичними автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння. При цьому важливо підкреслити, що екологічний ефект електрифікації транспорту проявляється не лише у глобальному контексті скорочення парникових газів, але й у покращенні якості повітря в урбанізованих територіях, де транспорт є одним із основних джерел локальних забруднювачів. Отже, широке впровадження електро- та гібридних транспортних засобів може розглядатися як дієвий інструмент зниження екологічного навантаження на міське середовище.

2.3.2. Вплив на екологію упродовж життєвого циклу транспортного засобу

Оцінювання впливу транспортного засобу на довкілля не може обмежуватися лише етапом експлуатації, оскільки сумарне екологічне навантаження формується на всіх стадіях життєвого циклу, включно з

виробництвом, використанням та утилізацією. Для коректного порівняння різних типів силових установок доцільно розглядати повний ланцюг процесів, що визначають матеріаломісткість, енергоємність і обсяги емісій. У цій постановці ключовим є те, що електрифікація суттєво змінює структуру впливів: частина екологічного навантаження переноситься з фази експлуатації на фазу виготовлення компонентів, насамперед акумуляторних систем, а також на енергетичний сектор, який забезпечує генерацію електроенергії для заряджання.

На етапі виробництва традиційних автомобілів основне екологічне навантаження пов'язане з виготовленням металоконструкцій, полімерних деталей і силового агрегата, однак для електромобілів додатковим фактором стає виготовлення батарейного пакета. Виробництво акумуляторів є енергоємним процесом, що потребує значних обсягів сировини, включно з матеріалами катодів та анодів, а також рідкісними або стратегічно важливими елементами. Як наслідок, початковий вуглецевий слід електромобіля на стадії виробництва може бути вищим порівняно з автомобілем з ДВЗ, особливо у випадках великої енергоємності батареї та використання енергосистеми з високою часткою викопної генерації на підприємствах-виробниках. Для гібридних транспортних засобів характерний проміжний рівень впливу, оскільки батарейні системи мають меншу ємність, а отже нижчі потреби в ресурсах і енергії на виготовлення, однак у їх конструкції зберігається і силовий агрегат з ДВЗ, що також формує додаткову матеріаломісткість.

У фазі експлуатації профіль екологічного впливу визначається джерелом енергії та режимами використання транспортного засобу. Для BEV локальні викиди вихлопу відсутні, а сумарні викиди парникових газів залежать від вуглецевої інтенсивності електроенергії, що використовується для заряджання. У енергосистемах, де домінують низьковуглецеві джерела, електромобілі забезпечують найкращі результати щодо скорочення викидів CO₂ у повному циклі. Якщо ж електроенергія переважно виробляється на основі викопного палива, то сумарні викиди можуть бути вищими, хоча локальне забруднення в містах все одно зменшується за рахунок відсутності вихлопу. Для EREV і PHEV результати залежать від частки електричного пробігу: за умови регулярного

заряджання та високої частки руху на електротязі екологічний ефект наближається до BEV, тоді як при частому використанні ДВЗ вплив зростає. HEV забезпечує зменшення викидів через нижчу витрату палива, однак не усуває вихлопні емісії, оскільки паливний контур залишається основним джерелом енергії. Автомобілі з ДВЗ демонструють найбільший негативний вплив на стадії експлуатації через постійне утворення викидів CO₂ та локальних забруднювачів.

Таблиця 2.6 – Порівняння впливу різних типів транспортних засобів упродовж їхнього життєвого циклу

Етап життєвого циклу	BEV	EREV	PHEV	HEV	ДВЗ
Виробництво	Високий вплив через батареї	Високий вплив через батареї	Середній вплив через батареї	Низький вплив через батареї	Низький вплив
Експлуатація	Нульові локальні викиди	Низькі викиди	Середні викиди	Вищі, але нижчі за ДВЗ	Найвищі викиди
Утилізація	Високий вплив через батареї	Високий вплив через батареї	Середній вплив через батареї	Низький вплив через батареї	Низький вплив

Етап утилізації та переробки є важливим з погляду завершення життєвого циклу та повторного залучення матеріалів у виробничий обіг. Для електромобілів і гібридів специфічним викликом є поводження з акумуляторними батареями, оскільки вони містять матеріали, що потребують спеціальних технологій демонтажу, сортування та переробки. Переробка батарей дозволяє частково повертати цінні компоненти і знижувати потребу у видобутку первинної сировини, проте ефективність таких процесів залежить від

технологічного рівня підприємств, логістики та наявності нормативної бази.

Традиційні автомобілі з ДВЗ також потребують утилізації, однак структура відходів є більш типовою, а технології переробки металів і полімерів значною мірою відпрацьовані, що спрощує організацію процесу. Для електрифікованого транспорту розвиток замкнених циклів переробки батарей стає одним із визначальних напрямів зниження сумарного екологічного навантаження.

2.3.3. Порівняльний аналіз екологічності різних типів транспортних засобів

Екологічність транспортного засобу доцільно оцінювати як узагальнену характеристику впливу на довкілля в межах повного життєвого циклу, тобто з урахуванням стадій виробництва, експлуатації та завершення ресурсу (утилізації або переробки). Для різних типів силових установок структура цього впливу істотно відрізняється: для автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння найбільший внесок у сумарне екологічне навантаження формує експлуатаційна фаза, тоді як для електрифікованих транспортних засобів частина впливу зміщується на етап виготовлення компонентів і поводження з батарейними системами.

Повністю електричні транспортні засоби (BEV) вважаються найбільш екологічними під час експлуатації, оскільки в місці руху не формують вихлопних викидів. Це має вирішальне значення для урбанізованих територій, де транспорт є одним із основних джерел локального забруднення повітря. Разом з тим у межах повного життєвого циклу екологічна ефективність BEV значною мірою визначається вуглецевою інтенсивністю електроенергії для заряджання та енергоємністю виробництва батарей. За умови заряджання від низьковуглецевих джерел сумарний ефект скорочення викидів є максимальним, тоді як у енергосистемах із високою часткою викопної генерації екологічна перевага зменшується, хоча локальні викиди в містах все одно залишаються відсутніми.

Транспортні засоби типу EREV мають профіль впливу, близький до BEV у режимах, коли рух забезпечується електроприводом від батареї. У міських поїздках і на коротких дистанціях EREV здатні демонструвати низький рівень локальних викидів і шуму, а також покращені показники енергоефективності

порівняно з традиційними автомобілями. Однак наявність генераторного модуля на базі ДВЗ означає, що при його роботі формуються викиди, а отже екологічність EREV у фазі експлуатації залежить від частки електричного пробігу та стратегії керування енергетичними потоками. У порівнянні з BEV, EREV зазвичай має дещо нижчий потенціал максимального скорочення викидів, але забезпечує вищу універсальність у регіонах із недостатньо розвинутою зарядною інфраструктурою.

PHEV належить до перехідних технологій і може забезпечувати суттєве скорочення викидів у міських умовах за рахунок можливості руху в електричному режимі. Однак екологічний ефект PHEV є найбільш залежним від поведінкових та інфраструктурних факторів: за регулярного заряджання від мережі та коротких щоденних поїздок у межах електричного пробігу локальні викиди можуть бути мінімальними. Якщо ж заряджання використовується нерегулярно або профіль експлуатації передбачає тривалі маршрути, частка роботи ДВЗ зростає, і фактична екологічність PHEV наближається до HEV. З цієї причини PHEV не завжди гарантує високий екологічний ефект без відповідних умов експлуатації.

HEV забезпечує зниження витрати палива та відповідних викидів порівняно з автомобілями з ДВЗ завдяки рекуперації та оптимізації режимів роботи двигуна. Проте HEV залишається залежним від спалювання пального, а електрична складова виконує допоміжну роль, тому рівень скорочення викидів обмежений. Найбільший ефект HEV проявляється в міських циклах з частими розгонами і гальмуваннями, де рекуперація дозволяє повернути частину енергії, яка в традиційних автомобілях втрачається у вигляді тепла в гальмівних механізмах. Однак у порівнянні з транспортними засобами, де електропривод забезпечує значну частину пробігу (BEV, EREV, PHEV при заряджанні), HEV має нижчий потенціал зниження локальних викидів.

Традиційні автомобілі з двигуном внутрішнього згоряння формують найбільший екологічний вплив у фазі експлуатації, оскільки постійно утворюють викиди CO₂ та локальні забруднювачі. Навіть з урахуванням розвитку систем доочищення вихлопу та підвищення паливної ефективності, сумарний вплив

залишається вищим, ніж у електрифікованих класів, особливо в умовах міського трафіку. На етапі виробництва та утилізації автомобілі з ДВЗ також мають екологічний слід, однак він у більшості випадків є нижчим за вплив, характерний для виготовлення і переробки великоємних батарей, що притаманно BEV та частково EREV.

Таблиця 2.7 – Порівняння екологічності різних типів транспортних засобів

Тип транспортного засобу	Екологічність під час експлуатації	Екологічність на етапі виробництва	Утилізація
BEV	Висока (нульові викиди)	Низька через виробництво батарей	Складна через акумулятори
EREV	Висока (залежить від режиму)	Середня	Складна через поєднання систем
PHEV	Середня (залежить від режиму)	Середня	Складна через акумулятори
HEV	Низька	Висока	Середня
ДВЗ	Найнижча	Середня	Середня

Узагальнюючи, можна зазначити, що BEV мають найвищий потенціал екологічності за умови наявності низьковуглецевої генерації електроенергії та розвиненої інфраструктури заряджання. EREV доцільно розглядати як компромісне рішення, яке забезпечує високі екологічні переваги в міських режимах руху при зменшеній залежності від інфраструктури, що є актуальним для перехідного етапу електрифікації. PHEV та HEV виконують роль проміжних технологій і дозволяють знизити споживання пального й викиди, проте їх екологічна ефективність значною мірою залежить від реальних умов експлуатації та частки електричного пробігу.

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Дослідження принципу роботи електромобілів типу EREV

Транспортні засоби класу EREV (Extended Range Electric Vehicle) належать до електрифікованих платформ, що поєднують характерні переваги повністю електричних автомобілів і можливості, притаманні системам із двигуном внутрішнього згоряння, який використовується як допоміжне джерело енергії. Базова ідеологія EREV полягає в тому, що тягове зусилля створюється електроприводом, а основним накопичувачем енергії є акумуляторна батарея, яка забезпечує рух у електричному режимі без локальних вихлопних викидів. Для збільшення сумарної автономності у складі силової установки передбачається генераторний модуль на базі ДВЗ, що дозволяє підтримувати енергетичний баланс після зниження заряду батареї до заданого рівня. Унаслідок цього EREV зменшує критичність інфраструктурних обмежень і може забезпечувати дальні поїздки без обов'язкової прив'язки до частих зупинок для заряджання.

Функціонально EREV відрізняється від гібридних платформ, у яких ДВЗ безпосередньо пов'язаний з приводом коліс і формує основний енергетичний потік у трансмісії. У типових архітектурах EREV двигун внутрішнього згоряння не виконує роль прямого джерела механічної тяги на колесах, а працює як енергетичний підсилювач у вигляді генератора. Такий підхід забезпечує можливість керування режимами ДВЗ у більш стабілізованих зонах навантаження, що сприяє підвищенню паливної ефективності та потенційно знижує питомі викиди в режимі роботи генератора. Основна експлуатаційна перевага EREV проявляється у тому, що в міських поїздках домінує електричний режим, тоді як генераторний режим використовується переважно як засіб компенсації дефіциту енергії при тривалих маршрутах або за відсутності доступного заряджання.

Результативність концепції EREV визначається співвідношенням електричного та генераторного режимів у реальній експлуатації. У сценаріях з

короткими щоденними поїздками транспортний засіб може більшість часу працювати як електромобіль, забезпечуючи мінімальні локальні викиди та низькі експлуатаційні витрати. Для тривалих поїздок підключення генераторного модуля дозволяє зберігати мобільність без істотної залежності від зарядної інфраструктури, хоча супроводжується появою викидів CO₂ та інших компонентів вихлопу в періоди роботи ДВЗ. Саме тому з технічної точки зору важливими є характеристики генераторного модуля, алгоритми керування енергетичними потоками, а також теплове керування компонентами, які працюють у широкому діапазоні навантажень.

3.1.1. Структурна схема та ключові компоненти EREV

Силова установка EREV є багатокомпонентною системою, у якій взаємодіють тяговий електропривод, акумуляторна батарея, генераторний модуль на базі двигуна внутрішнього згоряння, силова електроніка та система керування енергією. Структурна схема такого транспортного засобу відображає зв'язки між основними енергетичними джерелами та споживачами, а також логіку розподілу потужності в різних режимах. До ключових елементів EREV відносять електродвигун, батарейний пакет, ДВЗ, електрогенератор, перетворювачі потужності та електронний блок керування, який формує стратегію роботи системи з урахуванням потреб руху, стану заряду батареї та обмежень за температурою і потужністю.

Тяговий електродвигун є центральним виконавчим елементом, який забезпечує формування обертового моменту на ведучих колесах через редуктор або відповідний вузол трансмісії. Його характеристика визначає динамічні показники автомобіля, допустимі прискорення та здатність підтримувати рух на підйомах і при високих швидкостях. Джерелом електроенергії для електродвигуна в електричному режимі є акумуляторна батарея, яка накопичує енергію, необхідну для руху, та забезпечує живлення силової електроніки. Батарейна система в EREV виконує дві функції: формує запас енергії для безвикидного руху на певну відстань і слугує буфером, який згладжує короточасні піки потужності, що виникають під час розгону або рекуперації.

Генераторний модуль включає двигун внутрішнього згоряння та електрогенератор, механічно з'єднані між собою. Роль цього модуля полягає у перетворенні енергії пального на електроенергію, яка може подаватися в тяговий контур або спрямовуватися на підтримання рівня заряду батареї. У режимі, коли заряд батареї знижується до встановленого порога, система керування активує ДВЗ і переводить генератор у робочий стан, забезпечуючи необхідну потужність для продовження руху. Така організація дозволяє істотно збільшити загальний запас ходу без значного зростання ємності батареї, що є важливим для зменшення маси та вартості акумуляторного блоку.

Функціонування EREV забезпечується системою керування енергією, яка узгоджує роботу батареї, генераторного модуля та тягового привода. Алгоритми керування визначають моменти запуску і зупинки ДВЗ, рівень потужності генератора, пріоритети використання енергії батареї, а також режими рекуперації. Стратегія керування має забезпечувати, з одного боку, виконання вимог до руху і комфорту, а з іншого — мінімізацію витрати палива і зниження рівня викидів у генераторному режимі. Додатковими споживачами енергії є допоміжні системи, зокрема системи клімат-контролю, охолодження батареї та силової електроніки, освітлення та інформаційно-керувальні комплекси, які також впливають на енергетичний баланс і мають враховуватися в режимних розрахунках.

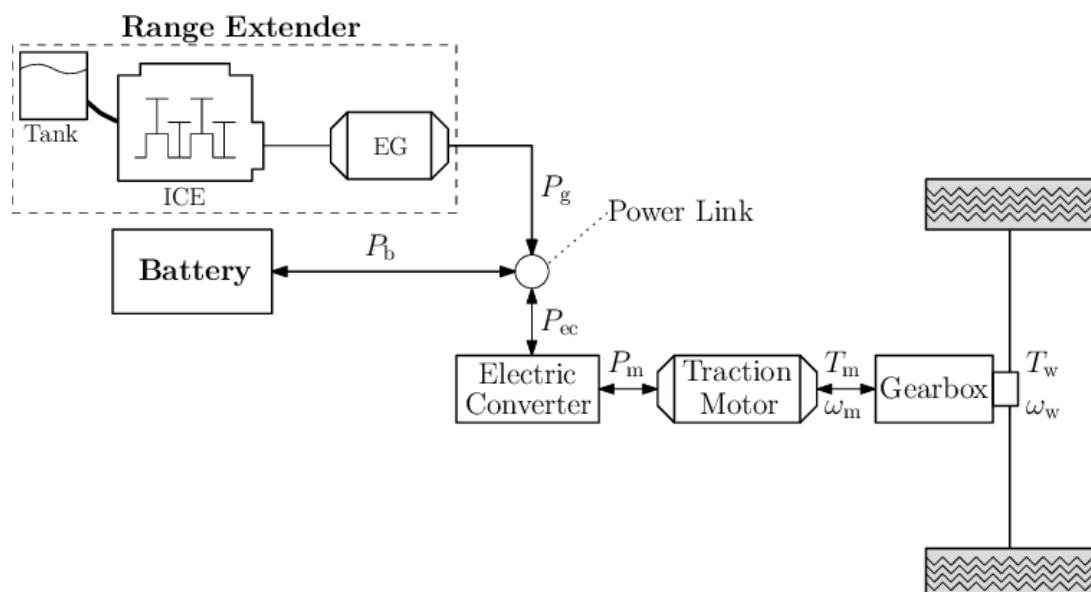


Рисунок 3.1 – Структурна схема EREV

У структурній схемі EREV акумуляторна батарея виступає базовим енергетичним джерелом для тягового електропривода. Коли рівень заряду знижується до встановленої межі, система керування активує генераторний модуль, який забезпечує вироблення електроенергії та підтримання балансу потужності. Такий принцип дозволяє продовжувати рух без обов'язкових зупинок для заряджання, що є суттєвою перевагою в умовах недостатньо розвиненої інфраструктури. Разом з тим генераторний режим супроводжується появою вихлопних викидів, хоча їх інтенсивність може бути нижчою, ніж у традиційних автомобілів з ДВЗ, за рахунок стабілізованої роботи двигуна та можливості підтримувати його в зонах оптимальної ефективності.

Концепція EREV має виражений прикладний ефект у сценаріях, де потрібне поєднання екологічності та автономності. На коротких міських маршрутах транспортний засіб може працювати переважно в електричному режимі, забезпечуючи мінімальний рівень локальних викидів і підвищену енергоефективність. На тривалих дистанціях або при відсутності зарядної інфраструктури використовується генераторний режим, який дозволяє зберігати мобільність і забезпечувати прийнятні експлуатаційні характеристики. Унаслідок цього EREV розглядається як універсальне рішення перехідного типу, здатне поєднати переваги електропривода в міських циклах і практичність автономного енергозабезпечення на довгих маршрутах.

3.1.2. Режими роботи електромобілів типу EREV

Електромобілі класу EREV можуть функціонувати в декількох характерних режимах, які визначаються станом заряду батареї, вимогами до потужності та умовами руху. Найбільш типовою є організація роботи, за якої виділяють повністю електричний, генераторний та комбінований режими. Перемикання між ними здійснюється автоматично системою керування енергією з урахуванням заданих порогових значень, температурних обмежень і потреб у тязі. У практичному сенсі така багаторежимність забезпечує гнучке використання ресурсів силової установки без необхідності суттєвого збільшення ємності батареї для покриття всіх сценаріїв поїздки.

У повністю електричному режимі рух забезпечується електроприводом, який живиться від акумуляторної батареї. Цей режим є основним для коротких і середніх поїздок, особливо у міському циклі. Перевагою є відсутність локальних вихлопних викидів та низький рівень шуму. Крім того, у цьому режимі максимально реалізуються переваги рекуперації енергії гальмування, оскільки частина кінетичної енергії повертається у батарею, підвищуючи сумарну енергоефективність місії. Електричний режим забезпечує найкращі екологічні показники в зоні експлуатації та дозволяє мінімізувати витрати палива, оскільки генераторний модуль у цей період не активується.

Генераторний режим використовується в ситуаціях, коли рівень заряду батареї наближається до нижнього допустимого порога або коли необхідно підтримувати енергетичний баланс під час тривалого руху. У цьому випадку двигун внутрішнього згоряння приводить у дію генератор, а вироблена електроенергія подається в тяговий контур і/або спрямовується на підтримання рівня заряду батареї. Важливою особливістю такого режиму є можливість відносно стабільної роботи ДВЗ, що дозволяє уникати різких змін навантаження, притаманних традиційним схемам прямого приводу коліс. Унаслідок цього забезпечується прийнятна паливна ефективність, а викиди можуть бути нижчими порівняно з режимами, де двигун постійно реагує на зміну дорожніх умов і миттєві запити на тягу.

Комбінований режим доцільно розглядати як режим підвищених вимог до потужності, коли одночасно використовуються можливості батарейної системи та генераторного модуля. Така ситуація може виникати при інтенсивних розгонах, русі на підйомах або при високих швидкостях, коли миттєва потужність, необхідна для тяги, перевищує рівень, який доцільно забезпечувати лише генератором. У цьому режимі батарея працює як буферний накопичувач, що покриває пікові навантаження, а генераторний модуль підтримує середній рівень потужності та компенсує енергетичні витрати на довшому інтервалі. Комбінований режим, як правило, супроводжується підвищеним паливоспоживанням і викидами порівняно з чисто електричним рухом, однак забезпечує необхідні динамічні властивості та експлуатаційну стійкість у

складніших умовах. Для наочності взаємодію режимів роботи EREV доцільно узагальнити у вигляді порівняльної таблиці.

Таблиця 3.1 – Взаємодія режимів роботи EREV

Режим роботи	Джерело енергії	Викиди CO ₂	Застосування
Повністю електричний	Акумулятор	0	Міські умови, короткі дистанції
Генераторний	Генератор (ДВЗ)	Низькі	Тривалі маршрути, розряд батареї
Комбінований	Акумулятор і генератор	Помірні	Високі навантаження, підйоми

Ключовою особливістю EREV є те, що перехід між наведеними режимами виконується автоматично і залежить від стану заряду, температурних параметрів батареї та силової електроніки, а також від поточного запиту на тягову потужність. Наприклад, при низькому SOC система керування може забезпечувати пріоритет генераторного режиму для стабілізації енергетичного балансу, тоді як у міських умовах із достатнім зарядом перевага надається повністю електричному режиму як найбільш енергоефективному та екологічному.

3.1.3. Система енергоменеджменту в EREV

Система енергоменеджменту є одним із визначальних функціональних елементів електромобіля типу EREV, оскільки саме вона забезпечує узгоджену роботу джерел енергії та споживачів потужності в умовах змінних навантажень і різних сценаріїв руху. В архітектурі EREV система керування енергією координує використання акумуляторної батареї та генераторного модуля на базі двигуна внутрішнього згоряння, формуючи розподіл потужності таким чином, щоб одночасно забезпечити необхідні динамічні властивості, економічність та прийнятний рівень екологічних показників. Практично це означає, що алгоритми

енергоменеджменту повинні підтримувати баланс між глибиною розряду батареї, частотою включення ДВЗ, середнім рівнем навантаження на генератор та ефективністю рекуперації.

Основним завданням системи енергоменеджменту є визначення моментів переходу між режимами роботи, а також керування потужністю кожного джерела енергії в межах встановлених обмежень. У повністю електричному режимі система забезпечує живлення електропривода від батареї, контролюючи струми розряду, температуру та допустимі межі стану заряду. У генераторному режимі здійснюється запуск ДВЗ та керування роботою генератора, при цьому алгоритм прагне підтримувати двигун у зоні підвищеної ефективності, обмежуючи часті переходи та коливання навантаження. У комбінованому режимі система координує одночасну роботу батареї та генератора, використовуючи батарею як буфер для покриття пікових навантажень і стабілізації енергетичного балансу.

Важливою складовою енергоменеджменту є оптимізація енергетичних потоків з урахуванням рекуперації. У процесі гальмування та сповільнення система визначає допустимий рівень рекуперативного моменту, який може бути реалізований електроприводом, і оцінює можливість прийому енергії батареєю без перевищення обмежень за SOC і температурою. За сприятливих умов рекуперація дозволяє зменшити сумарні витрати енергії на місію, що є особливо відчутним у міському циклі. У ситуаціях, коли батарея має обмежену здатність до прийому енергії (наприклад, високий SOC або низька температура), система енергоменеджменту повинна коригувати рекупераційні режими та забезпечувати необхідне гальмування іншими засобами. Для наочності функції системи енергоменеджменту в різних режимах роботи EREV доцільно узагальнити у вигляді таблиці.

Таблиця 3.2 – Функції системи енергоменеджменту у кожному з режимів роботи EREV

Режим роботи	Джерело енергії	Основні функції системи енергоменеджменту
Повністю електричний	Акумулятор	Контроль подачі енергії, рекуперація енергії
Генераторний	Генератор (ДВЗ)	Оптимізація роботи ДВЗ, зарядка батареї
Комбінований	Акумулятор і генератор	Розподіл енергії, підтримка максимальної потужності

Система енергоменеджменту також виконує функцію моніторингу стану ключових компонентів та адаптації параметрів керування до фактичних умов. До контрольованих параметрів належать стан заряду батареї, її температура та допустимі струми, температури силової електроніки й електродвигуна, поточні енергетичні витрати, а також параметри роботи генераторного модуля. На основі цих даних система коригує стратегію розподілу потужності, щоб уникати перевантажень, зменшувати деградаційні фактори батареї та підтримувати передбачувану економічність. Таким чином, енергоменеджмент у EREV забезпечує адаптивність силової установки та є технологічною основою для досягнення узгоджених показників автономності, енергоефективності та екологічності в різних експлуатаційних режимах.

3.2 Розрахунок основних характеристик електромобіля типу EREV

Для забезпечення обґрунтованого вибору параметрів силової установки EREV доцільно виконувати розрахунки ключових характеристик, які визначають запас ходу, динамічні властивості та енергетичну ефективність. До таких характеристик відносять необхідну ємність акумуляторної батареї,

номінальну і пікову потужність електропривода, параметри генераторного модуля, а також витрати енергії на заданих профілях руху. Розрахунковий апарат повинен враховувати умови експлуатації, зокрема рух у міському циклі та на трасі, а також вплив додаткових споживачів (кліматична система, електрообладнання), які можуть суттєво змінювати енергетичний баланс.

3.2.1. Розрахунок акумуляторної батареї для EREV

Акумуляторна батарея є центральним накопичувачем енергії в EREV і визначає електричний запас ходу, який є критичним параметром для ефективної експлуатації в міському режимі. Для попереднього розрахунку ємності батареї доцільно використовувати співвідношення між бажаним електричним пробігом та питомими витратами енергії транспортного засобу. У спрощеному вигляді необхідна ємність батареї може бути визначена через:

$$D = \frac{C \cdot \eta}{E_c} \quad (3.1)$$

де C – ємність батареї (кВт·год), η – ККД електродвигуна та інших компонентів, E_c – середня енергетична витрата на кілометр шляху (кВт·год/км).

Питома витрата енергії залежить від багатьох факторів, серед яких маса транспортного засобу, аеродинамічний опір, опір коченню та стиль водіння. Для оцінки в межах попереднього проектування може прийматися типове значення для легкового EREV у міському циклі, яке відповідає сучасному рівню енергоефективності. Наприклад, при бажаному електричному запасі ходу 80 км, питомій витраті енергії 0,18 кВт·год/км та ККД системи $\eta_{\text{сист}} = 0,9$ отримаємо:

$$C = \frac{D \cdot E_c}{\eta} = \frac{80 \cdot 0.18}{0.9} = 16 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (3.2)$$

Отримане значення є орієнтовним і на етапі деталізації проєкту потребує уточнення за рахунок моделювання місій руху, врахування профілю швидкості, температурних умов, впливу додаткових споживачів та обмежень за допустимою глибиною розряду батареї.

Окрім енергоемності, для акумуляторної батареї принципово важливим є забезпечення необхідної потужності, оскільки саме цей параметр визначає здатність енергосистеми покривати пікові навантаження під час інтенсивного розгону, руху на підйомах і підтримання високої швидкості. Потужність батареї

повинна відповідати вимогам тягового електропривода з урахуванням втрат у силовій електроніці, кабельних лініях та внутрішньому опорі елементів батарейного пакета. На етапі попереднього проєктування оцінювання необхідної потужності батареї доцільно виконувати через баланс тягової потужності на колесах і ККД передавання енергії до привода. Пікова потужність батареї може бути орієнтовно визначена за співвідношенням:

$$P = \frac{F \cdot v}{\eta_d}, \quad (3.3)$$

де F – сила тяги (Н), v – максимальна швидкість автомобіля (м/с), η_d – ККД передачі енергії.

Сила тяги в загальному випадку формується як сума складових, що долають інерційні та дорожні опори. Для оцінювання в умовах руху по горизонтальній ділянці з прискоренням доцільно використовувати вираз:

$$F = m \cdot a + 0.5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 + \mu \cdot m \cdot g, \quad (3.4)$$

де a – прискорення (м/с²), ρ – густина повітря (кг/м³), μ – коефіцієнт тертя, g – прискорення вільного падіння (9.81 м/с²).

З урахуванням прийнятих для середнього легкового EREV параметрів маси, аеродинаміки та опору коченню розрахунки пікової потужності показують, що енергосистема повинна бути здатною забезпечувати підвищені навантаження в перехідних режимах. Разом із тим для типових умов руху на сталих швидкостях потреба в потужності є нижчою, тому на етапі попереднього проєктування доцільно розділяти вимоги до номінальних і пікових режимів віддачі енергії. З огляду на сучасний рівень технологій акумуляторних систем у транспорті, для EREV доцільно орієнтуватися на літій-іонні батареї, оскільки вони забезпечують достатні показники питомої енергії та потужності, а також прийнятні масо-габаритні характеристики, що безпосередньо впливає на енергоефективність і дальність ходу в електричному режимі.

3.2.2. Розрахунок та вибір електродвигуна для електромобіля типу EREV

Електродвигун є базовим елементом тягового привода EREV, тому його параметри визначають динаміку розгону, можливість підтримання заданої максимальної швидкості, подолання підйомів і загальну енергетичну

ефективність силової установки. На стадії попереднього проєктування вибір електродвигуна обґрунтовують через необхідну тягову потужність у характерних режимах руху. Розрахункова потужність, яку повинен забезпечувати привід на заданій швидкості, може бути визначена за співвідношенням:

$$P = \frac{F \cdot v}{\eta_d}, \quad (3.5)$$

де F – сила тяги, необхідна для руху автомобіля (Н), v – максимальна швидкість (м/с), η_d – ККД системи передачі енергії.

Силу тяги доцільно оцінювати як суму складових, що компенсують інерційні та дорожні опори. Для руху по горизонтальній ділянці при заданому прискоренні використовується вираз:

$$F = m \cdot a + 0.5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 + \mu \cdot m \cdot g, \quad (3.6)$$

де m – маса автомобіля (кг), a – бажане прискорення (м/с²), ρ – густина повітря (1.225 кг/м³ при нормальних умовах), C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору, A – площа фронтальної поверхні автомобіля (м²), μ – коефіцієнт тертя шин, g – прискорення вільного падіння (9.81 м/с²).

Для прикладу приймається середній легковий автомобіль масою $m = 1500$ кг, який розганяється до швидкості $v = 33,33$ м/с (120 км/год) з прискоренням $a = 2,5$ м/с². Додатково приймаються $\rho = 1,225$ кг/м³, $A = 2,2$ м², $C_d = 0,3$, $\mu = 0,01$. Тоді сила тяги становить:

$$\begin{aligned} F &= 1500 \cdot 2.5 + 0.5 \cdot 1.225 \cdot 0.3 \cdot 2.2 \cdot (33.33)^2 + 0.01 \cdot 1500 \cdot 9.81 \\ &= 3750 + 450.1 + 147.15 = 4347.25 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Відповідна потреба в потужності привода за $\eta_{пр} = 0,9$ визначається як:

$$P = \frac{F \cdot v}{\eta_d} = \frac{4347.25 \cdot 33.33}{0.9} \approx 161 \text{ кВт.} \quad (3.7)$$

Отримане значення характеризує вимоги до пікового режиму, коли одночасно поєднані висока швидкість і потреба у прискоренні. Для реальної компоновки EREV це означає, що електропривід повинен мати запас за піковою потужністю на рівні не нижче 160 кВт, а з урахуванням експлуатаційних резервів і можливих підйомів доцільно закладати діапазон пікових значень порядку 180–200 кВт. Номінальна потужність при цьому може бути меншою, оскільки в

міському циклі частіше реалізуються режими зі значно нижчими середніми навантаженнями.

Окрім потужності, критично важливою характеристикою є крутний момент, оскільки саме він визначає здатність забезпечувати потрібну силу тяги на колесах у перехідних режимах. Орієнтовна оцінка крутного моменту може бути виконана через радіус колеса та ККД механічної передачі:

$$T = \frac{F \cdot R}{\eta_r}, \quad (3.8)$$

де R – радіус колеса (м), η_r – ККД редуктора. Для автомобіля із радіусом колеса 0.35 м і ККД редуктора 0.95, обертальний момент становитиме:

$$T = \frac{4347.25 \cdot 0.35}{0.95} \approx 1600 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.9)$$

Ця оцінка показує, що в перехідних режимах силова установка повинна забезпечувати високі значення моменту на колесах. Вимоги до моменту електродвигуна фактично реалізуються через вибір типу машини, параметрів інвертора, передатного числа редуктора та допустимих струмів у піковому режимі з урахуванням теплових обмежень.

З погляду придатності до EREV доцільним є застосування синхронних електродвигунів із постійними магнітами, оскільки вони поєднують високий ККД у широкому діапазоні навантажень, компактність і сприятливі масо-габаритні характеристики. Для EREV це має принципове значення, тому що зниження маси силового комплексу прямо впливає на питомі витрати енергії в електричному режимі, а ефективність привода визначає реальний електричний запас ходу.

3.2.3. Розрахунок та вибір двигуна внутрішнього згорання для електромобіля типу EREV

Двигун внутрішнього згорання в EREV виконує функцію привода генератора і використовується як автономне джерело електроенергії в ситуаціях, коли заряд батареї знижується до порогового значення або коли необхідно підтримувати енергетичний баланс на тривалих маршрутах. На відміну від традиційних схем, де ДВЗ безпосередньо формує тягу на колесах і працює в умовах різко змінного навантаження, у EREV режим його роботи може бути

стабілізованим, що створює передумови для утримання двигуна в зоні підвищеної паливної ефективності. Це зменшує витрату палива в генераторному режимі та дозволяє знизити питомі викиди за рахунок оптимізації робочих параметрів.

Потужність двигуна внутрішнього згоряння в силовій установці EREV визначається потребами генераторного модуля, який повинен забезпечити електроенергією тяговий електропривод та, за необхідності, здійснювати підзаряд акумуляторної батареї. Таким чином, розрахунок потужності ДВЗ доцільно виконувати через енергетичний баланс електричної частини, враховуючи коефіцієнти корисної дії перетворення механічної енергії в електричну і ефективність самого двигуна. Для генераторного режиму необхідна потужність ДВЗ може бути представлена співвідношенням:

$$P_{\text{ДВЗ}} = \frac{P_{\text{ген}} + P_{\text{зар}}}{\eta_{\text{ДВЗ}} \cdot \eta_{\text{ген}}}, \quad (3.10)$$

де $P_{\text{ген}}$ – потужність, необхідна для роботи електродвигуна (кВт), $P_{\text{зар}}$ – потужність, потрібна для зарядки батареї (кВт), $\eta_{\text{ДВЗ}}$ – ККД ДВЗ, $\eta_{\text{ген}}$ – ККД генератора.

Для прикладу можна прийняти, що у генераторному режимі тяговий електропривод потребує 50 кВт, а додаткове навантаження, пов'язане з підтриманням або підзарядкою батареї, складає ще 10 кВт. Якщо прийняти $\eta_{\text{ДВЗ}} = 0,35$ і $\eta_{\text{ген}} = 0,9$, то потужність ДВЗ, необхідна для забезпечення такої генерації, становитиме:

$$P_{\text{ДВЗ}} = \frac{60}{0,35 \cdot 0,9} \approx 190 \text{ кВт.}$$

Отриманий результат підкреслює, що точність оцінки суттєво залежить від прийнятих значень ефективності ДВЗ і генератора, а також від того, яку частку часу генераторний модуль працює на номінальному навантаженні. На практиці для EREV важливим є вибір такого робочого режиму двигуна, при якому паливна витрата мінімізується, а енерговитрати на перетворення є найбільш прийнятними.

Окремо слід враховувати оптимальний діапазон обертів двигуна, оскільки саме стабільна робота в зоні підвищеної ефективності є одним із ключових

принципів EREV. Для цього на етапі проектування обирають робочий інтервал частоти обертання ДВЗ, в межах якого забезпечується максимальна економічність при генерації. Як приклад, ефективний діапазон може відповідати середнім обертам порядку 2000–3000 об/хв, за яких двигун працює стабільно, а питома витрата пального наближається до мінімальних значень для даного типу агрегата.

Тип пального і конструктивне виконання ДВЗ в EREV також визначаються вимогами до масо-габаритних показників і екологічних характеристик. У практиці для таких систем частіше використовують бензинові двигуни малого робочого об'єму через компактність і простоту інтеграції, хоча в умовах тривалої роботи під навантаженням можуть розглядатися й дизельні варіанти або рішення на альтернативних видах палива, що дозволяють знизити питомі викиди CO₂.

Для оцінювання запасу ходу в генераторному режимі та підбору об'єму паливного бака використовують співвідношення, яке пов'язує витрату пального з бажаною додатковою дальністю. Якщо витрата пального в генераторному режимі становить 6 л/100 км, а необхідно забезпечити додатково 400 км запасу ходу, то розрахунковий об'єм пального можна оцінити як:

$$V_{\text{бак}} = \frac{\text{Запас ходу} \cdot \text{Споживання пального}}{100} = \frac{400 \cdot 6}{100} = 24 \text{ л.} \quad (3.11)$$

З отриманого значення випливає, що для забезпечення генераторної автономності може бути достатнім відносно невеликий бак, що позитивно впливає на масо-габаритні характеристики. У цьому випадку доцільним є застосування ДВЗ малої або середньої робочої потужності, який забезпечує необхідну генерацію, працюючи в оптимальному режимі, та характеризується прийнятним рівнем викидів.

3.2.4. Розрахунок та вибір генератора для електромобіля типу EREV

Генераторний модуль є ключовим вузлом EREV, оскільки саме він забезпечує вироблення електроенергії з механічної енергії ДВЗ та підтримує живлення тягового електропривода в умовах низького SOC батареї. Основною вимогою до генератора є забезпечення необхідної електричної потужності в генераторному режимі з урахуванням додаткового навантаження на підзаряд батареї.

Загальна вимога до потужності генератора може бути визначена як сума потужності, необхідної для тягового електропривода, та потужності, спрямованої на заряджання або стабілізацію стану заряду батареї::

$$P_{\text{ген}} = P_{\text{двигуна}} + P_{\text{зар}}, \quad (3.12)$$

де $P_{\text{двигуна}}$ – потужність для живлення електродвигуна, $P_{\text{зар}}$ – потужність для зарядки акумулятора.

Як приклад, якщо для підтримання руху в генераторному режимі електропривод потребує $P_{\text{дв}} = 50 \text{ кВт}$, а для підзарядки або компенсації розряду необхідно $P_{\text{зар}} = 10 \text{ кВт}$, тоді розрахункова потужність генератора становить:

$$P_{\text{ген}} = 50 + 10 = 60 \text{ кВт}.$$

Окрім заданого рівня потужності, одним із ключових параметрів генераторної установки є коефіцієнт корисної дії. Високий ККД генератора безпосередньо зменшує втрати енергії під час перетворення механічної енергії ДВЗ на електроенергію, що підвищує загальну ефективність силової установки та зменшує витрату пального в генераторному режимі. Для сучасних генераторних установок EREV характерними є значення ККД на рівні близько 0,9, однак у реальних умовах він може змінюватися залежно від режиму навантаження, температурних умов та стабільності частоти обертання.

У зв'язку з цим на практиці доцільно оцінювати необхідну механічну потужність на валу ДВЗ, яка повинна бути підведена до генератора для забезпечення заданого електричного навантаження. Якщо прийняти $\eta_{\text{ген}} = 0,9$, то необхідна механічна потужність може бути визначена як:

$$P_{\text{ДВЗ}} = \frac{P_{\text{ген}}}{\eta_{\text{ген}}} = \frac{60}{0,9} \approx 67 \text{ кВт}. \quad (3.13)$$

Отримане значення показує, що для забезпечення 60 кВт електричної потужності генератор повинен отримувати приблизно 67 кВт механічної потужності, а різниця між цими величинами відповідає втратам у процесі перетворення. Така оцінка є важливою для узгодження вибору ДВЗ і генератора та для визначення режимів їх спільної роботи.

Вибір робочого діапазону генератора та ДВЗ в EREV визначається необхідністю забезпечення стабільної генерації в зоні найкращої ефективності.

На відміну від традиційної схеми прямого привода коліс, у EREV генераторний модуль може працювати у відносно вузькому інтервалі обертів, що дозволяє підбирати параметри так, щоб мінімізувати питому витрату пального і стабілізувати тепловий режим. Як правило, у якості ефективного діапазону розглядають середні частоти обертання порядку 2000–3000 об/хв, що забезпечує компроміс між економічністю, шумовими характеристиками та здатністю підтримувати необхідну потужність.

Тип генератора також впливає на масо-габаритні показники, стабільність роботи та ефективність. Для транспортних застосувань доцільно розглядати синхронні генератори з постійними магнітами, оскільки вони забезпечують високий ККД, компактність і стабільну генерацію в широкому діапазоні навантажень. У той же час асинхронні генератори можуть мати простішу конструкцію, однак зазвичай поступаються за ефективністю, що є критичним для EREV, де завданням є мінімізація втрат у генераторному контурі.

При інтеграції генератора в компоновку EREV необхідно враховувати масу, габарити та вимоги до охолодження. Для транспортних засобів важливо мінімізувати додаткову масу силової установки, щоб не погіршувати енергоефективність у електричному режимі. З цієї причини в практичних рішеннях часто використовуються конструкційні матеріали з високим співвідношенням міцності до маси, а вузли генераторного модуля компонуються з урахуванням обмежень підкапотного простору і вимог до технічного обслуговування.

3.2.5. Розрахунок та вибір системи рекуперації енергії для електромобіля типу EREV

Система рекуперації енергії є важливим функціональним елементом EREV, який забезпечує перетворення частини кінетичної енергії транспортного засобу під час гальмування у електричну енергію з її подальшим накопиченням у батарейній системі. Ефективність рекуперації визначає, наскільки повно транспортний засіб може використовувати енергію, яка в традиційних автомобілях розсіюється у вигляді тепла в гальмівних механізмах. Для EREV це має подвійне значення: по-перше, зменшуються питомі витрати енергії в

міському циклі, а по-друге, збільшується реальний електричний запас ходу без збільшення ємності батареї.

Потенційний обсяг енергії, доступної для рекуперації, у найпростішій постановці може бути оцінений через кінетичну енергію транспортного засобу перед початком гальмування:

$$E = \frac{1}{2}mv^2, \quad (3.14)$$

де m – маса автомобіля (кг), v – швидкість автомобіля перед гальмуванням (м/с).

Наприклад, для автомобіля масою $m = 1500$ кг, який здійснює гальмування зі швидкості $v = 20$ м/с, кінетична енергія становить:

$$E = \frac{1}{2} \cdot 1500 \cdot (20)^2 = 300 \text{ кВт} \cdot \text{с}.$$

Реальна кількість енергії, яку вдається повернути під час рекуперативного гальмування, визначається сумарною ефективністю рекуперативного контуру. До цього контуру входять електродвигун, що працює в генераторному режимі, силова електроніка перетворення, а також акумуляторна батарея, здатна приймати зарядний струм без перевищення допустимих меж за температурою та станом заряду. Тому потенційна кінетична енергія гальмування використовується лише частково, а частка відновлення визначається узагальненим ККД системи рекуперації.

Якщо для розрахункового випадку прийняти, що сумарний ККД рекуперації становить $\eta_{\text{рек}} = 0,8$, тоді енергія, яка фактично може бути накопичена у батареї, оцінюється як:

$$E_{\text{збережена}} = E \cdot \eta = 300 \cdot 0.8 = 240 \text{ кВт} \cdot \text{с}. \quad (3.15)$$

Отримана енергія може бути використана для живлення допоміжних споживачів або для підвищення запасу ходу в електричному режимі. Однак для коректного проектування рекуперативної системи необхідно визначити не лише енергію, а й потужність, яка реалізується в процесі гальмування, оскільки саме потужність визначає вимоги до генераторного режиму електропривода та допустимі параметри заряджання батареї.

Середня потужність рекуперації при гальмуванні може бути розрахована через відношення відновленої енергії до часу гальмування:

$$P = \frac{E_{\text{збережена}}}{t}, \quad (3.16)$$

де t – тривалість гальмування (с). Якщо тривалість гальмування становить 5 секунд, тоді:

$$P = \frac{240}{5} = 48 \text{ кВт.}$$

Це означає, що рекуперативний контур у відповідному режимі повинен забезпечувати прийом потужності близько 50 кВт. Така вимога є важливою для вибору електродвигуна, силового інвертора та параметрів батарейної системи, оскільки прийом високих зарядних потужностей можливий лише за умови достатнього запасу за струмом і ефективного тепловідведення.

При виборі електропривода для рекуперації необхідно враховувати, що електродвигун повинен мати можливість працювати у генераторному режимі з високим ККД і забезпечувати стабільний контроль рекуперативного моменту. Для EREV доцільною є інтеграція рекуперації в загальну систему керування енергією, яка визначає допустиму величину рекуперативної потужності залежно від SOC батареї, її температури, умов зчеплення шин з дорогою та необхідного рівня сповільнення. У випадках високого SOC або низької температури батареї система керування може обмежувати рекуперацію, передаючи частину гальмівного моменту на фрикційні механізми для забезпечення стабільності.

Функціональні можливості рекуперації залежать також від конфігурації електропривода та гальмівної системи. У сучасних EREV найчастіше застосовується керована рекуперація із плавним узгодженням рекуперативного та фрикційного гальмування, що забезпечує передбачувану реакцію автомобіля та підтримує вимоги до безпеки. Така система повинна забезпечувати стійкість під час гальмування на різних покриттях, уникати блокування коліс та підтримувати коректний розподіл гальмівних зусиль між осями.

З урахуванням виконаних оцінок доцільно приймати, що рекуперативна система EREV має бути розрахована на потужність порядку 50 кВт і інтегрована

в алгоритми енергоменеджменту, що забезпечують регулювання інтенсивності рекуперації залежно від стану батареї та умов руху.

3.2.6. Розрахунок та вибір трансмісії і редуктора для електромобіля типу EREV

Трансмісійний вузол EREV забезпечує передавання крутного моменту від тягового електродвигуна до ведучих коліс і визначає відповідність між швидко-моментними характеристиками електропривода та вимогами до руху автомобіля. У типових компоновках EREV застосовується одноступеневий редуктор, який знижує частоту обертання електродвигуна до рівня, необхідного для забезпечення заданої швидкості руху, і одночасно підвищує крутний момент на колесах. Вибір передатного числа редуктора є одним із ключових етапів, оскільки воно впливає на динаміку розгону, максимальну швидкість, енергоефективність та рівень шуму.

Передатне число редуктора може бути визначене як відношення кутової швидкості електродвигуна до кутової швидкості коліс:

$$i = \frac{\omega_{\text{двигуна}}}{\omega_{\text{колес}}}, \quad (3.17)$$

де $\omega_{\text{двигуна}}$ – кутова швидкість електродвигуна (рад/с), $\omega_{\text{колес}}$ – кутова швидкість коліс (рад/с).

Для прикладу приймається максимальна швидкість $v = 33,33$ м/с (120 км/год) і радіус колеса $R = 0,35$ м. Тоді:

$$\omega_{\text{колес}} = \frac{v}{R} = \frac{33,33}{0,35} \approx 95,2 \text{ рад/с}. \quad (3.18)$$

Якщо максимальна частота обертання електродвигуна становить $n_{\text{дв}} = 12000$ об/хв, то його кутова швидкість визначається як:

$$\omega_{\text{двигуна}} = \frac{12000}{60} \cdot 2\pi \approx 1256,64 \text{ рад/с}. \quad (3.19)$$

Тоді передатне число редуктора становитиме:

$$i = \frac{\omega_{\text{двигуна}}}{\omega_{\text{колес}}} = \frac{1256,64}{95,2} \approx 13,2. \quad (3.20)$$

Отримане значення означає, що редуктор повинен забезпечувати зниження частоти обертання електродвигуна приблизно у 13 разів, щоб реалізувати максимальну швидкість 120 км/год при заданому радіусі колеса. На практиці передатне число уточнюється з урахуванням реальної частоти обертання

електродвигуна під навантаженням, характеристик моменту, допустимих обертів, а також вимог до прискорення і енергоефективності в робочому діапазоні швидкостей.

Окрім передатного числа, редуктор у складі тягової трансмісії EREV повинен забезпечувати передачу крутного моменту на колеса в обсязі, достатньому для реалізації заданих динамічних характеристик. Для попереднього оцінювання моменту використовується зв'язок між потужністю електродвигуна та його кутовою швидкістю. Крутний момент на валу електродвигуна у відповідному режимі може бути визначений як:

$$T_{\text{двигуна}} = \frac{P_{\text{двигуна}}}{\omega_{\text{двигуна}}}, \quad (3.21)$$

де $P_{\text{двигуна}}$ – потужність електродвигуна (Вт).

Для прикладу, якщо потужність електродвигуна становить $P_{\text{дв}} = 150 \text{ кВт}$, а кутова швидкість у відповідному режимі дорівнює $\omega_{\text{дв}} = 1256,64 \text{ рад/с}$, крутний момент на валу електродвигуна становитиме:

$$T_{\text{двигуна}} = \frac{150000}{1256.64} \approx 119.4 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Редуктор збільшує момент на колесах пропорційно передатному числу, тому момент на ведучих колесах можна оцінити як:

$$T_{\text{колес}} = T_{\text{двигуна}} \cdot i = 119.4 \cdot 13.2 \approx 1575.3 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (3.22)$$

Це значення відображає можливість трансмісії забезпечувати достатній крутний момент для розгону та подолання підйомів. У реальному проєктуванні момент на колесах уточнюється з урахуванням ККД редуктора, допустимих пікових струмів електродвигуна та вибраної характеристики моменту в низькошвидкісній області, оскільки саме низькі швидкості визначають стартові та тягові властивості.

Загалом для EREV характерною є одноступенева передача, яка забезпечує простоту конструкції, зменшення маси та зниження втрат у механічному контурі. У поєднанні з широким діапазоном регулювання електропривода це дозволяє покривати необхідний діапазон швидкостей без застосування багатоступеневих коробок передач, що є важливим для підвищення енергоефективності та надійності.

Матеріали редуктора та елементів трансмісії повинні відповідати вимогам до міцності та довговічності при високих навантаженнях, але водночас забезпечувати мінімізацію маси. На практиці це реалізується через застосування сталевих або алюмінієвих сплавів, оптимізацію геометрії зубчастих передач і забезпечення високого ККД, який для сучасних редукторів може перевищувати 0,95. Висока ефективність редуктора зменшує механічні втрати і сприяє зниженню споживання енергії в електричному режимі.

3.2.7. Розрахунок маси та аеродинаміки автомобіля типу EREV

Маса транспортного засобу та його аеродинамічні характеристики є визначальними факторами, що формують питомі витрати енергії, а отже впливають на електричний запас ходу та загальну ефективність EREV. Збільшення маси підвищує енерговитрати на розгін та подолання опору коченню, тоді як аеродинамічний опір домінує на середніх і високих швидкостях, визначаючи необхідну потужність для підтримання руху.

Аеродинамічна сила опору при русі автомобіля визначається залежністю:

$$F_{\text{аеро}} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2, \quad (3.23)$$

де $F_{\text{аеро}}$ – сила аеродинамічного опору (Н), ρ – густина повітря (1.225 кг/м^3 при нормальних умовах), C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору, A – площа фронтальної поверхні автомобіля (м^2), v – швидкість руху автомобіля (м/с).

Для автомобіля з параметрами $C_d = 0,3$, $A = 2,2 \text{ м}^2$ і швидкістю $v = 30 \text{ м/с}$ при $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ аеродинамічний опір становитиме:

$$F_{\text{аеро}} = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 0.3 \cdot 2.2 \cdot (30)^2 \approx 370 \text{ Н}.$$

Відповідна потужність, необхідна для подолання аеродинамічного опору, визначається як:

$$P_{\text{аеро}} = F_{\text{аеро}} \cdot v = 370 \cdot 30 \approx 11.1 \text{ кВт}. \quad (3.24)$$

Опір коченню та вплив маси на тягові потреби оцінюється через силу кочення:

$$F_{\text{тертя}} = \mu m g, \quad (3.25)$$

де μ – коефіцієнт тертя шин (зазвичай 0.01), m – маса автомобіля (кг), g – прискорення вільного падіння (9.81 м/с^2).

Для $m = 1500\text{кг}$ і $\mu = 0,01$:

$$F_{\text{тертя}} = 0.01 \cdot 1500 \cdot 9.81 \approx 147.15 \text{ Н.}$$

Потужність для подолання опору коченню на швидкості $v = 30\text{м/с}$:

$$P_{\text{тертя}} = F_{\text{тертя}} \cdot v = 147.15 \cdot 30 \approx 4.4 \text{ кВт.} \quad (3.26)$$

Маса впливає і на витрати енергії під час розгону. Енергія, необхідна для розгону від нуля до швидкості v , може бути оцінена через зміну кінетичної енергії:

$$E_{\text{розгін}} = \frac{1}{2} m (v^2 - v_0^2). \quad (3.27)$$

Для розгону до $v = 30\text{м/с}$ (за $v_0 = 0$) при $m = 1500\text{кг}$:

$$E_{\text{розгін}} = \frac{1}{2} \cdot 1500 \cdot (30)^2 \approx 675 \text{ кВт}\cdot\text{с.}$$

Таким чином, зменшення маси та покращення аеродинаміки є прямими шляхами зниження енергоспоживання EREV. Наприклад, зниження маси на 100 кг дозволяє зменшити енергію розгону та втрати на кочення, а оптимізація коефіцієнта аеродинамічного опору навіть на 0,05 може суттєво знизити потребу в потужності на високих швидкостях. Для досягнення таких результатів у сучасному автомобілебудуванні застосовують легкі конструкційні матеріали, оптимізацію геометрії кузова, зменшення площі лобового опору та вдосконалення елементів, що формують потік повітря навколо автомобіля.

3.3. Компоновка та інтеграція силової установки EREV

Компоновка силової установки EREV визначає не лише можливість фізичного розміщення основних компонентів, а й системну енергоефективність, динаміку, керованість, ресурс вузлів та рівень конструктивної складності. На відміну від традиційних автомобілів з ДВЗ, де компоновка підпорядкована переважно механічному ланцюгу передавання потужності, в EREV тягове зусилля формується електроприводом, а генераторний модуль виконує функцію енергетичного підживлення. Це змінює набір домінуючих критеріїв: зростає значущість масо-центрових параметрів, аеродинамічної інтеграції днища та теплової архітектури, а також прокладання високовольтних трас і забезпечення

електромагнітної сумісності. Компонувочні рішення безпосередньо впливають на значення маси, розподілу навантажень по осях, коефіцієнта аеродинамічного опору і ефективності тепловідведення, що в підсумку формує витрати енергії на одиницю пробігу та здатність платформи працювати в заданих режимах без перегріву й деградації.

3.3.1 Базові компонувальні схеми EREV і їхні конструктивні наслідки

Типова силова установка EREV складається з таких елементів: тяговий електропривод (електродвигун з редуктором та диференціалом або e-axle), високовольтна батарея, силова електроніка, система заряджання, а також генераторний модуль на базі ДВЗ з електрогенератором, випрямлячем і допоміжними системами. Компонівка визначає, де саме розміщується батарея, як інтегрується e-axle, де встановлюється генераторний модуль, як організовані теплові контури і трасування кабельних мереж.

У сучасних конструкціях застосовуються кілька домінуючих схем.

Перша схема є платформною і найбільш поширеною для легкових EREV: батарея розміщується в зоні днища як структурний або напівструктурний елемент, e-axle встановлюється на одній з осей, а генераторний модуль розміщується в передньому або задньому звісі залежно від типу приводу. Така компоновка забезпечує низький центр мас, сприятливий розподіл маси по осях, а також дозволяє оптимізувати аеродинаміку днища. Водночас вимагається жорсткий контроль геометрії підлоги, кліренсу, захисту батареї від ударних навантажень і вологи, а також правильне формування силових шляхів при аварійних навантаженнях.

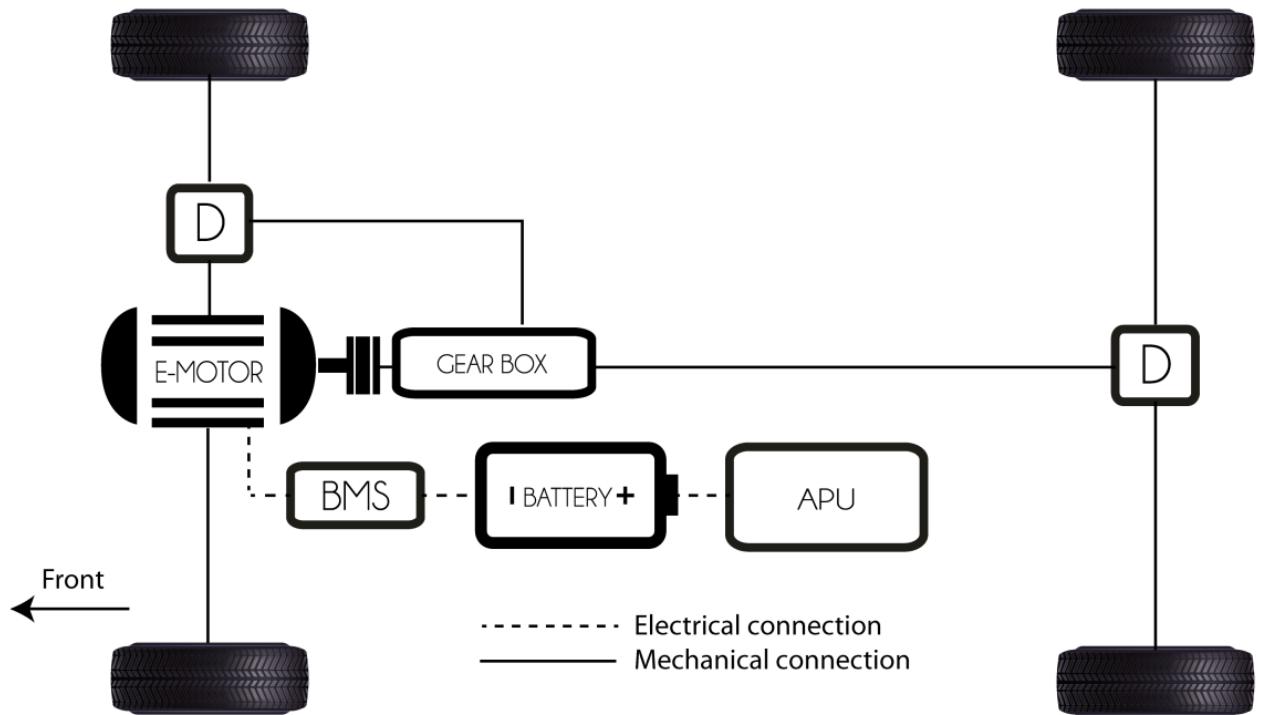


Рисунок 3.2 – Передньопривідна компоновка EREV

Друга схема передбачає розміщення батареї частково в днищі й частково у центральному тунелі або задній зоні, що може бути характерно для платформ, адаптованих з існуючих кузовів. Вона спрощує перехід від традиційних платформ, але ускладнює досягнення високої об'ємної енергоємності та може погіршувати розподіл маси й аеродинамічну інтеграцію днища.

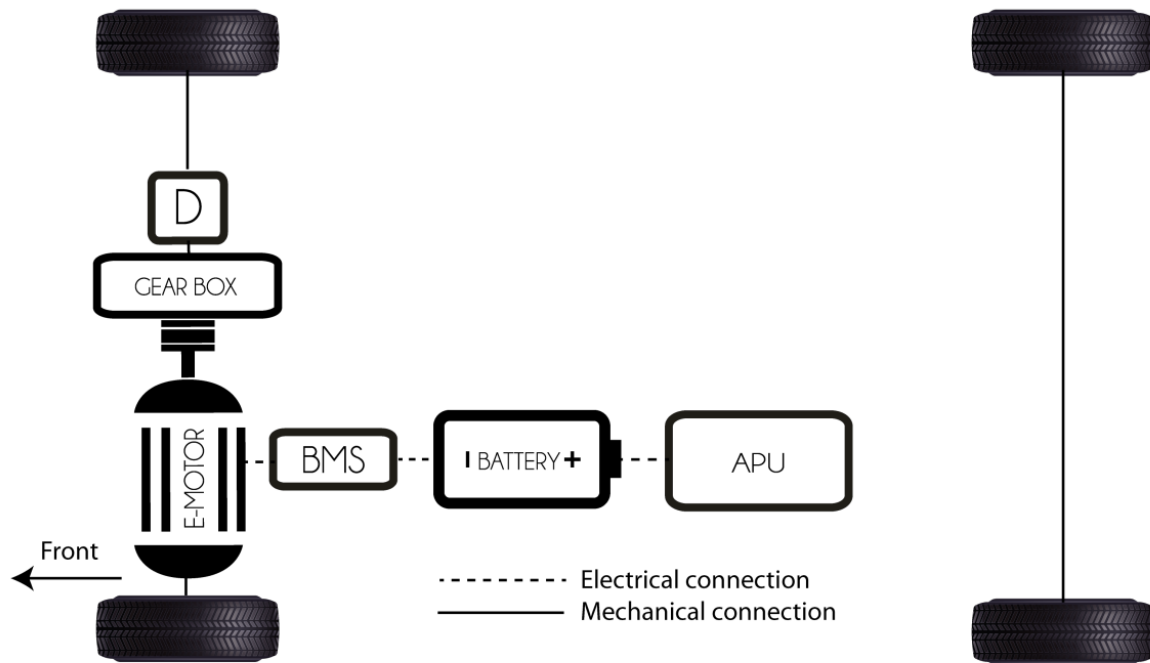


Рисунок 3.3 – Компоновка EREV з розміщенням коробки передач на передній вісі ТЗ

Третя схема застосовується для комерційних транспортних засобів або платформ з підвищеними вимогами до вантажного простору. У таких випадках батарейні модулі розміщуються під рамою, між лонжеронами або по боках, е-axle інтегрується з мостом, а генераторний модуль розташовується в окремому відсіку. Перевагою є масштабованість за енергоемністю і можливість швидкого сервісу, проте масо-центрові показники та аеродинаміка можуть бути гіршими, ніж у легкових платформ.

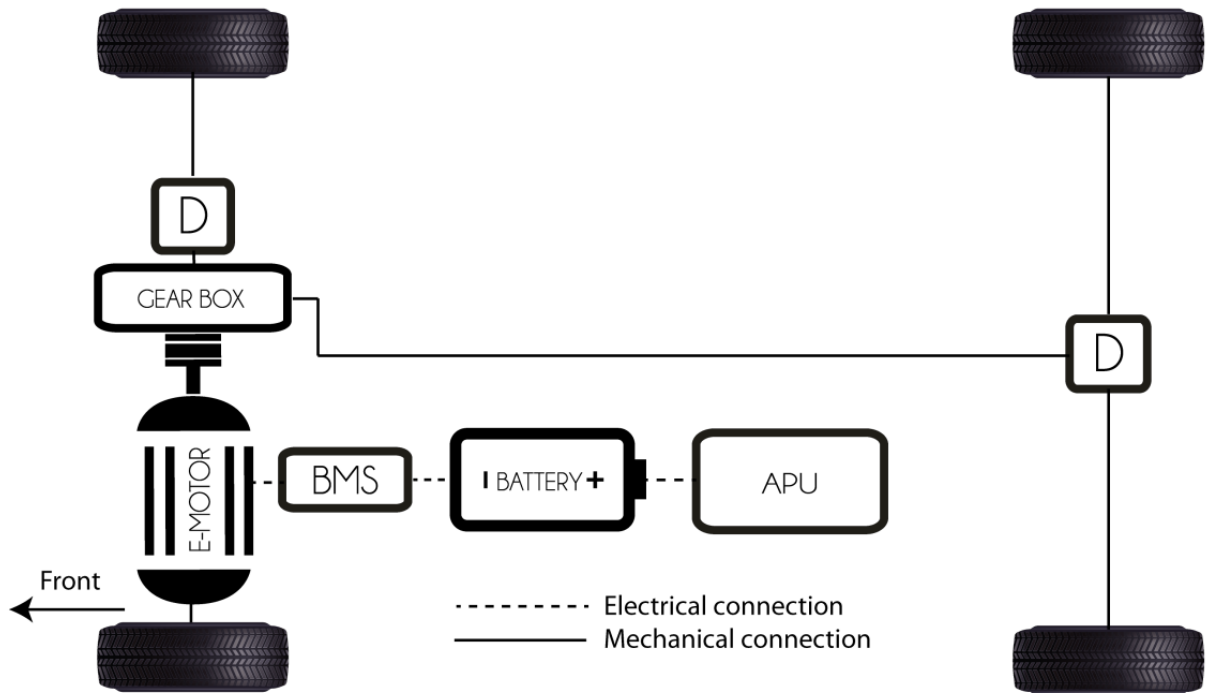


Рисунок 3.3 – Компоновка EREV для комерційних ТЗ

Практично важливим є те, що вибір компоувальної схеми повинен виконуватися одночасно з вибором теплової архітектури, оскільки доступні об'єми для теплообмінників, прокладання магістралей охолодження і розміщення насосів/клапанів є обмеженими. Компоновка також визначає допустиму довжину високовольтних магістралей, що впливає на втрати, масу джгутів, ЕМС-поведінку та конструктивні вимоги до захисту.

3.3.2 Масо-габаритні обмеження та їхній вплив на енергоспоживання

Масо-габаритні обмеження в EREV формуються габаритами кузова, вимогами до пасажирського простору, кліренсу, геометрією підвіски та обмеженнями на навантаження по осях. Батарея, силова електроніка і генераторний модуль додають значну частку маси, і без коректної інтеграції це призводить до збільшення витрат енергії на кочення і прискорення. Для проектної оцінки енергоспоживання на рівні місійного розрахунку доцільно використовувати баланс сил на колесах:

$$F_{tr} = F_{roll} + F_{aero} + F_{grade} + m a, \quad (3.28)$$

$$\text{де } F_{roll} = mgf_r, F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_d A_f v^2, F_{grade} = mg \sin(\theta).$$

Цей вираз підкреслює, що маса m впливає на три складові одночасно: на кочення, на здолання підйомів і на інерційну складову при розгонах.

З практичної точки зору в EREV зростання маси часто відбувається не лише через батарею, а й через необхідність резерву по потужності та охолодженню. Якщо компоновка призводить до погіршення тепловідведення, то доводиться збільшувати площу теплообмінників, потужність насосів, масу магістралей і навіть вводити додаткові контури. Це створює вторинний масовий ефект і може погіршувати енергоспоживання.

Важливим аспектом є розподіл маси по осях і положення центра мас. Низький центр мас є перевагою, але надмірне зміщення маси в передній або задній зв'яз може погіршувати керованість і підвищувати втрати на шинах через зміну нормальних реакцій і характеристик ковзання. З технологічної точки зору доцільно прагнути до розподілу маси, близького до симетричного для легкових платформ або до регламентованих меж для комерційних. Це також пов'язано з вимогами до гальмівної системи та здатності ефективно використовувати рекуперацію без передчасного блокування або втрати зчеплення. Таблиця 3.3 може бути використана для оцінювання внеску основних вузлів у масу і габаритні обмеження на концептуальному етапі. Значення мас наведені як типові інтервали для легкового сегмента та мають уточнюватися за каталогами компонентів.

Таблиця 3.3 – Орієнтовні інтервали мас основних компонентів EREV та компоновочні наслідки

Компонент	Типовий інтервал маси	Компоновочні обмеження	Вплив на енергоефективність
Батарейний пакет 15–30 кВт·год	120–250 кг	Висота підлоги, кліренс, силовий захист днища	Зростання маси підвищує витрати на кочення і розгін; низький центр мас покращує керованість

e-axle (двигун + редуктор + диференціал)	70–140 кг	Простір у підрамнику, геометрія підвіски, охолодження	Визначає ККД тягового контуру і теплове навантаження
Інвертор і DC/DC	15–40 кг	Близькість до двигуна і батареї, ЕМС, охолодження	Втрати перетворення формують теплове навантаження і непрямі витрати енергії
Генераторний модуль (ДВЗ + генератор)	120–220 кг	Віброізоляція, повітрозабір, вихлоп, охолодження	Визначає паливну ефективність у дальньому режимі, впливає на NVH і тепловий баланс
Теплові контури і теплообмінники	20–60 кг	Об'єми в передній частині, магістралі, сервіс	Неефективна компоновка збільшує паразитні втрати насосів і вентиляторів

3.3.3 Високовольтні траси, ЕМС і інтеграція силової електроніки

Компоновка електричних компонентів визначає довжину та конфігурацію високовольтних трас, а також взаємне розташування джерел електромагнітних перешкод і чутливих елементів. З інженерної точки зору доцільно мінімізувати довжину високострумівих ділянок і уникати паралельного прокладання з низьковольтними сигнальними лініями. Це знижує втрати, масу джгутів і ризики ЕМС-невідповідності.

Розміщення інвертора максимально близько до електродвигуна зменшує довжину трифазних кабелів, які є суттєвим джерелом електромагнітних

випромінювань. Розміщення DC/DC і зарядних блоків поблизу батареї зменшує довжину DC-магістралей, проте створює теплову концентрацію, що збільшує вимоги до охолодження й вентиляції. Компромісним рішенням є модульна силова електроніка, інтегрована в єдиний корпус з розподіленими теплообмінними поверхнями та чітко визначеними точками з'єднань для HV-кабелів.

Для EREV додається інтеграція генераторного модуля. Якщо генератор і випрямляч розміщені далеко від батареї, зростають втрати й складність трасування. Якщо вони розміщені близько до батареї, виникають додаткові вимоги до NVH і теплового розділення, оскільки ДВЗ створює вібрації й локальне тепловиділення.

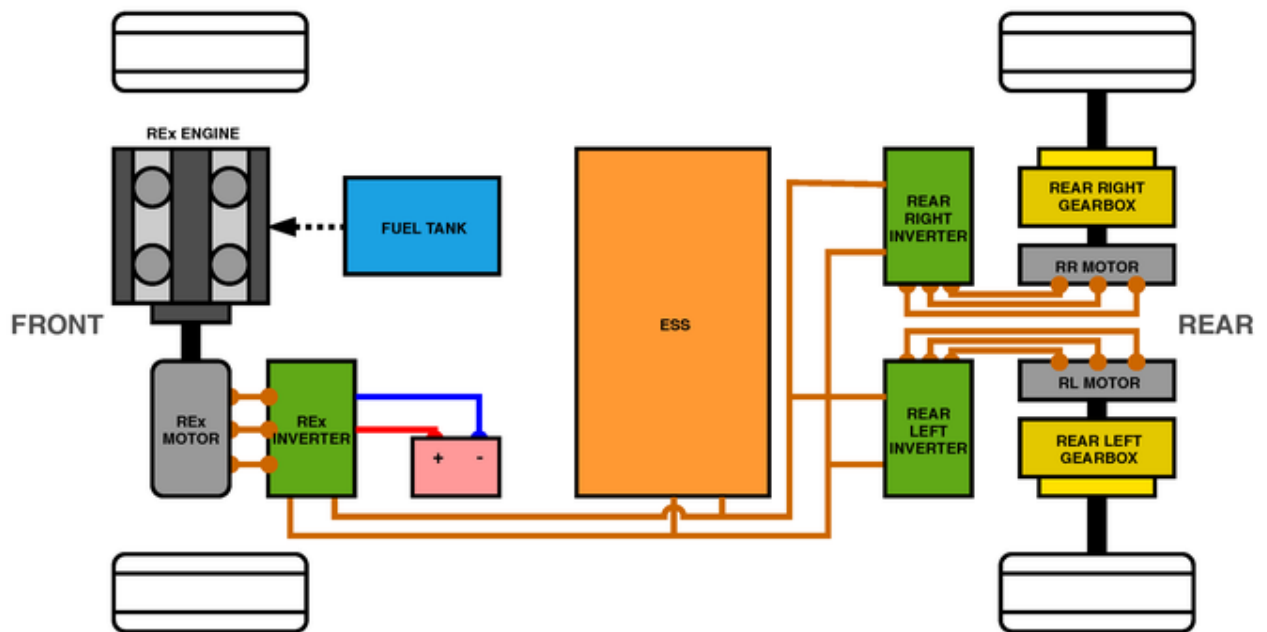


Рисунок 3.4 – Принципова схема прокладання НV-магістралей у платформній компоновці

3.3.4 Інтеграція теплових контурів і локалізація теплових джерел

Компоновка визначає можливість реалізації ефективних теплових контурів. Основними тепловими джерелами є батарея під час високих струмових режимів, інвертор і електродвигун при високих навантаженнях, а також генераторний модуль, який формує значний тепловий потік. Якщо ці джерела розміщені компактно, спрощується магістральна система охолодження, але

зростає теплове навантаження на локальні зони, що може потребувати збільшення площі теплообмінників та інтенсифікації потоків.

Для легкових платформ доцільним є розділення на низькотемпературний контур, що обслуговує батарею, інвертор і електропривод, та високотемпературний контур ДВЗ. Взаємодія контурів може здійснюватися через теплообмінник або через тепловий насос, який дозволяє переносити тепло для підігріву салону чи батареї. Компоновка повинна забезпечувати достатні об'єми для теплообмінників, оптимальні довжини магістралей і доступ до сервісних вузлів.

У EREV додатковим резервом енергоефективності є використання тепла ДВЗ для підігріву салону і термopідготовки батареї, проте це рішення повинно бути обмежене вимогами температурних режимів батареї. Надмірне підведення тепла або повільні перехідні процеси можуть погіршувати ресурсність.

Для інженерної формалізації теплових обмежень доцільно використовувати баланс для кожного компонента:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \dot{Q}_{gen,i} - \dot{Q}_{rem,i}, \quad (3.29)$$

де C_i – еквівалентна теплоємність, $\dot{Q}_{gen,i}$ – тепловиділення, $\dot{Q}_{rem,i}$ – відведення тепла.

Компоновка впливає на $\dot{Q}_{rem,i}$ через вибір теплообмінної поверхні, доступний потік повітря, довжину магістралей і можливість використання контурів різних температурних рівнів. Таблиця 3.4 узагальнює взаємозв'язок компоновки та теплових втрат, що важливо для подальшого моделювання.

Таблиця 3.4 – Компоновочні фактори та їхній внесок у теплові втрати і енергоефективність

Компоновочний фактор	Фізичний механізм	Наслідок для системи	Проектна рекомендація
Збільшення довжини HV-кабелів	Зростання втрат і маси джгутів	Підвищення втрат і теплового навантаження	Мінімізація довжин, оптимізація

			розташування силових блоків
Концентрація силових електроніки в одному відсіку	Локальне теплове навантаження	Підвищення вимог до охолодження, ризик перегріву	Розподіл теплових джерел, інтегровані теплообмінні поверхні
Генераторний модуль близько до батареї	Тепловий і вібраційний вплив	Погіршення умов роботи батареї, NVH	Теплове розділення, віброізоляція, керування режимами роботи
Невдала аеродинамічна інтеграція днища	Зростання C_{di} турбулентності	Підвищення витрат на високих швидкостях	Плоске днище, дифузори, оптимізація підрамників і захистів

3.3.5 Вплив компоновки на енергоефективність у реальних місіях

Вплив компоновки на енергоспоживання проявляється через зміну маси, аеродинаміки, теплових витрат і паразитних витрат допоміжних систем. Для міських циклів домінують інерційні витрати і втрати на кочення, тому збільшення маси через невдале компонування або надмірні конструктивні резерви дає відчутне погіршення. Для заміських режимів і високих швидкостей домінує аеродинаміка, отже якість інтеграції батарейного піддона, підрамників, захистів і теплових вузлів під днищем стає критичною. Для холодного клімату істотним є тепловий баланс, де компоновка визначає можливість ефективного використання тепла ДВЗ-генератора та зменшення енергоспоживання на опалення.

На рівні розрахункових моделей доцільно вводити зв'язок між компоновочними рішеннями і параметрами моделі, що використовуються в

розділі розрахунку: маса m , коефіцієнт C_d , площа A_f , ефективність охолодження, паразитна потужність насосів і вентиляторів. У результаті компоновка стає не описовим елементом, а джерелом числових параметрів для оптимізації.

Інтеграція силової установки EREV повинна розглядатися як міждисциплінарна задача, де компоновка одночасно забезпечує вимоги механічної інтеграції, високовольтної безпеки, ЕМС, теплової працездатності та енергетичної ефективності. Найбільш технологічно доцільними є рішення з розміщенням батареї в днищі, мінімізацією довжин високострумкових трас, близьким розташуванням інвертора до електродвигуна, розділенням теплових контурів і інтеграцією тепла генераторного модуля в системи опалення та термopідготовки. Водночас кожне з цих рішень має масо-габаритні наслідки та впливає на експлуатаційні показники. Тому компоновочна частина повинна формувати набір параметрів і обмежень, які використовуються в наступних розрахунках і в інтегральній оцінці ефективності.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Розробка методики оцінки технологічних і екологічних параметрів функціонування електромобілів типу EREV

Ключовим завданням науково-дослідного розділу є обґрунтування методичного підходу, який дозволяє кількісно оцінювати технологічні та екологічні параметри функціонування електромобілів типу EREV у різних режимах експлуатації. Така методика потрібна для того, щоб перейти від якісних тверджень щодо переваг і недоліків EREV до формалізованого аналізу, придатного для порівняння варіантів конструкції, вибору параметрів силової установки та формування рекомендацій з підвищення енергоефективності. Враховуючи гібридний характер енергетичної архітектури EREV, оцінювання повинно одночасно охоплювати показники електричного привода та батарейної системи, параметри генераторного контуру, а також екологічні наслідки, пов'язані з роботою ДВЗ у генераторному режимі й використанням енергії для заряджання батареї.

Методичний підхід доцільно будувати як багатопараметричну систему показників, у якій кожен із блоків характеризує окремий аспект функціонування транспортного засобу. У межах даного дослідження пропонується застосовувати інтегральний показник ефективності, сформований на основі зваженого поєднання технологічних, динамічних і екологічних критеріїв. Це дозволяє узгодити конфліктні цілі, характерні для EREV: зменшення витрат енергії та палива, забезпечення заданих динамічних властивостей, а також мінімізацію негативного впливу на довкілля.

4.1.1. Розробка інтегрального показника ефективності електромобіля типу EREV

Інтегральний показник ефективності для EREV доцільно визначати як узагальнену величину, яка відображає результативність роботи транспортного засобу при заданих умовах експлуатації з урахуванням ключових технологічних та екологічних чинників. Його функціональне призначення полягає у можливості порівняння різних конфігурацій силової установки, алгоритмів керування та

параметрів компонентів за єдиним числовим критерієм. На відміну від окремих показників, які характеризують лише одну підсистему (наприклад, енергоспоживання або рівень викидів), інтегральний критерій дозволяє врахувати комплексний ефект взаємодії батарейного та генераторного контурів і пов'язати технічні рішення з екологічними наслідками.

Для формування інтегрального показника доцільно виділити три групи параметрів: технологічні, динамічні та екологічні. Технологічні параметри характеризують ефективність перетворення та використання енергії в енергосистемі автомобіля і можуть включати узагальнений ККД основних вузлів. Динамічні параметри відображають здатність автомобіля забезпечувати необхідні характеристики руху (максимальна швидкість, розгінні властивості, тягові можливості у пікових режимах). Екологічні параметри описують вплив транспортного засобу на довкілля через викиди в генераторному режимі та через специфіку енергопостачання при заряджанні батареї.

Інтегральний показник ефективності може бути представлений у вигляді зваженої суми нормованих критеріїв:

$$I_{\text{еф}} = w_1 \cdot \eta_c + w_2 \cdot D_{\text{динамічні}} - w_3 \cdot E_{\text{екологічні}}, \quad (4.1)$$

де w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, що задають відносну значимість відповідних груп параметрів, $D_{\text{динамічні}}$ – агрегований показник динамічних характеристик, $E_{\text{екологічні}}$ – сумарний екологічний вплив.

Технологічний компонент η_c доцільно формувати з урахуванням ефективності ключових підсистем EREV. У спрощеній постановці його можна трактувати як узагальнену енергетичну ефективність, що відображає втрати у ланцюгу від джерел енергії до тягового зусилля, включаючи батарею, силову електроніку, електродвигун, редуктор і, за наявності, генераторний контур. Динамічний показник $D_{\text{дин}}$ доцільно визначати як агреговану характеристику, яка поєднує максимальну швидкість та розгінні можливості, нормовані відносно заданих еталонних значень. Екологічний показник $E_{\text{екол}}$ доцільно формувати як узагальнення за викидами та енергоспоживанням, прив'язаним до джерела енергії при заряджанні.

Агрегований показник динамічних характеристик доцільно виразити через нормовані параметри максимальної швидкості та інтенсивності розгону з урахуванням можливостей генераторного режиму:

$$D_{\text{динамічні}} = \frac{v_{\text{max}}}{t_{\text{розг}}} + \frac{P_{\text{ген}}}{P_{\text{ном}}}. \quad (4.2)$$

Тут v_{max} – максимальна швидкість (м/с), $t_{\text{розг}}$ – час розгону до певної швидкості (с), $P_{\text{ген}}$ – потужність генератора (Вт), а $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність електродвигуна (Вт).

Екологічний блок показників доцільно формувати через сумарний рівень викидів при роботі генераторного контуру та через приведені споживання енергії з урахуванням характеристик джерела електроенергії, яка використовується для заряджання батареї. Узагальнений екологічний показник може бути визначений як:

$$E_{\text{екологічні}} = \frac{E_{\text{CO2}}}{E_{\text{нор}}} + \frac{E_{\text{NOx}}}{E_{\text{нор}}} - \frac{E_{\text{віднов}}}{E_{\text{заг}}}. \quad (4.3)$$

Тут $E_{\text{нор}}$ – нормативні показники викидів (для порівняння), $E_{\text{заг}}$ – загальна спожита енергія.

З урахуванням заданих вагових коефіцієнтів інтегральний показник може бути використаний для кількісного порівняння конфігурацій EREV. Наприклад, при прийнятих вагових коефіцієнтах $w_1 = 0,4$, $w_2 = 0,4$, $w_3 = 0,2$ інтегральна оцінка може бути записана як:

$$I_{\text{еф}} = 0.4 \cdot \eta_c + 0.4 \cdot D_{\text{динамічні}} - 0.2 \cdot E_{\text{екологічні}}. \quad (4.4)$$

Знак при екологічному компоненті доцільно вводити зі зниженням інтегрального показника при зростанні негативного впливу на довкілля, оскільки підвищення викидів і енергоспоживання має зменшувати загальну оцінку ефективності. Запропонована структура інтегрального показника дозволяє формалізувати процес оцінювання EREV, порівнювати різні варіанти конструктивних рішень та визначати напрями підвищення ефективності і зниження екологічного впливу.

4.1.2. Формування критеріїв оптимальності для вибору компонентів та режимів експлуатації електромобіля типу EREV

Оптимізація параметрів і вибір компонентів для EREV потребують чітко сформульованих критеріїв, які дозволяють зіставляти альтернативні технічні рішення на єдиній кількісній основі. У практиці проектування EREV не існує одного універсального показника, який однаково добре описує енергоефективність, динаміку та екологічність. Тому доцільно формувати систему критеріїв оптимальності, що враховує специфіку енергетичної архітектури EREV, зокрема наявність двох енергетичних контурів (акумуляторного і генераторного), а також залежність результативності від сценарію експлуатації. При цьому критерії повинні відображати як технічні параметри компонентів, так і поведінку системи в заданих режимах руху.

На етапі постановки задачі оптимізації насамперед визначаються ключові технічні характеристики, які підлягають вибору або налаштуванню. Для акумуляторної батареї такими характеристиками зазвичай виступають ємність $C_{\text{бат}}$, допустима потужність заряду/розряду $P_{\text{бат}}$, маса $m_{\text{бат}}$ та допустимий робочий діапазон SOC. Для тягового електродвигуна та силової електроніки суттєвими параметрами є номінальна і пікова потужність $P_{\text{дв}}$, максимальний крутний момент T_{max} , робочий діапазон частот обертання та узагальнений ККД перетворення. Для генераторного контуру ключовими є потужність ДВЗ $P_{\text{ДВЗ}}$, ефективність його роботи у вибраному діапазоні обертів $\eta_{\text{ДВЗ}}$, ККД генератора $\eta_{\text{ген}}$, а також рівні викидів E_{CO_2} , E_{NO_x} і витрата пального в генераторному режимі. Урахування цих параметрів дозволяє перейти до побудови критеріїв, що описують інтегральний ефект від вибору конкретних компонентів.

Критерії оптимальності доцільно формувати на основі інтегрального показника ефективності, який визначається через зважені нормовані параметри, однак на практиці оптимізація окремих вузлів потребує побудови локальних критеріїв. Наприклад, для акумуляторної батареї доцільно враховувати компроміс між енергоємністю, масою та здатністю забезпечувати необхідну потужність. Такий критерій можна подати як зважену комбінацію нормованих параметрів:

$$I_{\text{акб}} = w_1 \cdot \frac{C}{C_{\text{макс}}} - w_2 \cdot \frac{m_{\text{акб}}}{m_{\text{заг}}} + w_3 \cdot \frac{P_{\text{зар}}}{P_{\text{ном}}}. \quad (4.5)$$

Тут w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритети енергоємності, маси та потужності відповідно., $C_{\text{макс}}$ – максимальна доступна ємність, $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність зарядки.

Для тягового електродвигуна критичним є узгодження потужності та моменту з вимогами до тягових режимів при збереженні високого ККД у робочому діапазоні. Тому критерій вибору електродвигуна доцільно будувати на основі співвідношення пікових характеристик та ефективності:

$$I_{\text{двигун}} = w_1 \cdot \frac{P_{\text{двигун}}}{P_{\text{макс}}} + w_2 \cdot \frac{T}{T_{\text{макс}}} - w_3 \cdot \frac{1}{\eta_{\text{двигун}}}. \quad (4.6)$$

Окремою частиною постановки критеріїв оптимальності є формалізація режимів експлуатації EREV. На відміну від BEV, де ефективність більш однозначно пов'язана з батарейним контуром, для EREV істотною є частка часу роботи у генераторному режимі. Тому критерії слід будувати з урахуванням сценаріїв руху. Для міського циклу доцільно орієнтуватися на мінімізацію енергоспоживання на кілометр у електричному режимі та максимізацію реального електричного запасу ходу. Для трасового режиму зростає роль витрати пального та ефективності генераторного контуру. Таким чином, критерій оптимальності для заданого сценарію може бути сформований як функція питомого енергоспоживання, запасу ходу та екологічних показників:

$$I_{\text{місто}} = \frac{D_{\text{електричний}}}{E_{\text{місто}}} - w \cdot \frac{E_{\text{CO2, місто}}}{E_{\text{нор}}}. \quad (4.7)$$

де $D_{\text{електричний}}$ – запас ходу в електричному режимі (км), $E_{\text{місто}}$ – енергоспоживання у міських умовах (кВт·год/км), $E_{\text{CO2, місто}}$ – викиди CO_2 у генераторному режимі, а $E_{\text{нор}}$ – нормативні показники викидів.

Для практичного застосування критеріїв доцільно враховувати також середню швидкість у циклі, запас ходу у генераторному режимі та рівні енергоспоживання в міських умовах. Це дозволяє формувати критерій оптимальності у вигляді відношення корисного результату до витрат ресурсу, наприклад:

$$I_{\text{траса}} = \frac{v_{\text{серед}} \cdot D_{\text{генераторний}}}{E_{\text{траса}}} - w \cdot \frac{E_{\text{CO2, траса}}}{E_{\text{нор}}}. \quad (4.8)$$

Сформована система критеріїв створює основу для порівняння різних комбінацій компонентів, налаштувань і режимів роботи EREV. Вона дозволяє перейти до задач багатокритеріальної оптимізації, де результатом є не один варіант, а множина компромісних рішень, узгоджених з обраними пріоритетами ефективності, динаміки та екологічності.

4.1.3. Використання методу багатфакторного аналізу для оптимізації функціонування електромобіля типу EREV

Багатфакторний аналіз є доцільним інструментом для дослідження та оптимізації EREV, оскільки функціонування такого транспортного засобу визначається одночасним впливом багатьох параметрів, які взаємодіють між собою. До таких факторів належать потужність електродвигуна, ємність батареї, характеристики генераторного модуля, передатне число редуктора, аеродинамічні параметри, маса, а також алгоритми енергоменеджменту. Зміна будь-якого з факторів може спричинити нелінійні зміни в показниках енергоефективності й екологічності, тому застосування багатфакторного підходу дозволяє виявити найбільш значущі фактори та їхні комбінації.

У межах багатфакторного аналізу формують математичну модель, яка описує залежність інтегрального показника ефективності від набору факторів. Узагальнено модель може бути подана функцією:

$$I_{\text{еф}} = f(P_{\text{двигун}}, C_{\text{акб}}, C_d, m, \dots), \quad (4.9)$$

де f – функція, що описує залежність інтегрального показника від факторів.

Для практичної реалізації оптимізації зручно використовувати апроксимаційні (регресійні) моделі, які дозволяють за результатами серії розрахункових або експериментальних точок відтворити вплив факторів на інтегральний показник. У спрощеній формі регресійну модель можна записати як:

$$I_{\text{еф}} = \beta_0 + \beta_1 P_{\text{двигун}} + \beta_2 C_{\text{акб}} + \beta_3 C_d + \beta_4 m + \epsilon, \quad (4.10)$$

де $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots$ – коефіцієнти моделі, які визначають вплив кожного фактора, ϵ – похибка моделі.

Оцінювання коефіцієнтів регресійної моделі виконується на основі масиву даних, отриманих з моделювання місій руху або з експериментальних

вимірювань. Для узгодження моделі з даними застосовується критерій найменших квадратів, який мінімізує сумарне квадратичне відхилення між значеннями інтегрального показника, отриманими з моделі, та фактичними (експериментальними або розрахунковими) значеннями:

$$\min \sum_{i=1}^n (I_{\text{еф},i} - \hat{I}_{\text{еф},i})^2, \quad (4.11)$$

де $\hat{I}_{\text{еф},i}$ – значення, спрогнозовані моделлю, $I_{\text{еф},i}$ – експериментальні значення.

Після побудови регресійної моделі її використовують як основу для оптимізаційної процедури: підбираються значення факторів, які максимізують інтегральний показник ефективності. Оптимізаційна задача може бути сформульована як:

$$\max I_{\text{еф}} = \beta_0 + \beta_1 P_{\text{двигун}} + \beta_2 C_{\text{акб}} + \beta_3 C_d + \beta_4 m, \quad (4.12)$$

Задача оптимізації розв'язується з урахуванням обмежень, які задаються технічними та експлуатаційними вимогами. Типовими є обмеження на потужність електропривода, масу, допустимий діапазон аеродинамічного опору та граничні значення параметрів енергосистеми:

$$P_{\text{двигун}} \leq P_{\text{макс}}, \quad C_{\text{акб}} \leq C_{\text{макс}}, \quad C_d \geq C_{d,\text{мін}}, \quad m \leq m_{\text{макс}}. \quad (4.13)$$

Отримані результати багатофакторного аналізу дозволяють встановити закономірності впливу параметрів на інтегральну ефективність. Наприклад, зменшення маси автомобіля може знижувати вимоги до ємності батареї, а зниження C_d – зменшувати енергоспоживання на високих швидкостях, що впливає на необхідну потужність електродвигуна та режим роботи генератора. Для представлення таких залежностей у зручному вигляді доцільно використовувати таблиці та графічні матеріали.

Таблиця 4.1 – Залежність між ключовими параметрами при багатофакторній оптимізації

C_d	$P_{\text{двигун}}$	$I_{\text{еф}}$
0.25	100	0.85
0.3	120	0.78

0.35	150	0.71
------	-----	------

Наведений формат подання результатів дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо вибору параметрів компонентів та режимів роботи EREV, орієнтуючись на максимізацію інтегрального показника ефективності з урахуванням реальних обмежень конструкції й умов експлуатації.

4.2. Багатокритеріальна оптимізація параметрів EREV на основі інтегрального показника ефективності

Багатокритеріальна оптимізація параметрів EREV є логічним продовженням методики інтегрального показника ефективності, сформованого в попередньому підрозділі. У практиці проєктування EREV одночасно мають виконуватися суперечливі вимоги: мінімізація енергоспоживання в електричному режимі, забезпечення прийнятної динаміки, обмеження маси та вартості, гарантування теплової працездатності, забезпечення ресурсу батареї, а також відповідність обмеженням з безпеки та електромагнітної сумісності. Тому постановка оптимізаційної задачі повинна містити не один критерій, а систему критеріїв, яка відображає реальні компроміси та дозволяє отримати множину технічно доцільних рішень.

Інтегральний показник у цій роботі доцільно трактувати як функцію, що переводить набір різнорозмірних показників у єдину безрозмірну оцінку. Така оцінка використовується для ранжування варіантів і як цільова функція при пошуку оптимальних параметрів силової установки.

4.2.1 Формалізація задачі оптимізації та вибір змінних

Оптимізаційна задача проєктування EREV задається вектором проєктних змінних x , набором критеріїв якості $y(x)$ та системою обмежень. У типовій постановці до змінних належать енергоємність батареї, номінальна та пікова потужність тягового електропривода, номінальна потужність генераторного модуля, параметри передавального числа, рівень високовольтної архітектури, параметри силової електроніки, а також інтеграційні параметри, що впливають

на масу і аеродинаміку. Доцільно обмежувати набір змінних тільки тими параметрами, які реально можуть змінюватися на етапі проєктування платформи, і які мають суттєвий вплив на результат.

Вихідні показники у мають відповідати цілям платформи і сценаріям експлуатації. Для EREV доцільно розглядати принаймні дві групи показників: показники електричного режиму та показники режиму підтримки енергетичного балансу за рахунок генератора. Це дозволяє уникнути ситуації, коли оптимальне рішення виявляється прийнятним лише в одному режимі й не відтворює цільову концепцію EREV. Таблиця 4.2 задає приклад структури змінних, критеріїв та обмежень, які можуть бути використані в подальших розрахунках.

Таблиця 4.2 – Структура оптимізаційної постановки для EREV

Блок	Позначення	Зміст	Тип у задачі
Змінні	E_{bat}	Енергоемність батареї, кВт·год	змінна
	P_{em}	Потужність тягового електропривода, кВт	змінна
	P_{gen}	Номінальна електрична потужність генераторного модуля, кВт	змінна
	i_{tr}	Передавальне число редуктора	змінна
	U_{HV}	Рівень HV-архітектури (клас 400/800 В)	дискретна змінна
	$m(x)$	Маса, як похідна змінна від вибору вузлів	похідна
Критерії	e_{EV}	Енергоспоживання в EV-режимі, кВт·год/100 км	мінімізувати
	t_{0-100}	Час розгону, с	мінімізувати
	f_{fuel}	Питома витрата палива в режимі підтримки SOC	мінімізувати

	T_{max}	Максимальна температура критичних компонентів	мінімізувати
	C_{sys}	Оціночна вартість силової платформи	мінімізувати
Обмеження	$g_1(x)$	Діапазон SOC у місії, межі BMS	≤ 0
	$g_2(x)$	Потужність генератора для крейсерського режиму	≤ 0
	$g_3(x)$	Обмеження по масі/навантаженням на осі	≤ 0

У реальній задачі частина змінних має дискретний характер, оскільки вибір компонентів виконується з каталогу. Це призводить до змішаних задач дискретно-неперервної оптимізації, де зручно розділяти пошук на рівень архітектури і рівень параметрів.

4.2.2 Нормування показників і формування інтегрального показника

Оскільки критерії мають різні розмірності та різну фізичну природу, необхідним є нормування. Для цього кожен показник переводиться у безрозмірну шкалу, після чого об'єднується в інтегральну оцінку. Поширеним підходом є функції бажаності, де кожному показнику y_i ставиться у відповідність значення $d_i \in [0; 1]$. Значення $d_i = 0$ відповідає неприйнятному рівню, $d_i = 1$ відповідає найкращому рівню в рамках заданого діапазону.

Для критерію, який мінімізується, може застосовуватися лінійне нормування:

$$d_i = \begin{cases} 1, & y_i \leq y_i^{best}, \\ \left(\frac{y_i^{worst} - y_i}{y_i^{worst} - y_i^{best}}\right)^{\alpha_i}, & y_i^{best} < y_i < y_i^{worst}, \\ 0, & y_i \geq y_i^{worst}, \end{cases} \quad (4.14)$$

де y_i^{best} та y_i^{worst} задаються на основі технічного завдання, а параметр α_i керує жорсткістю вимоги.

Якщо показник потрібно максимізувати (наприклад, запас ходу в EV-режимі, якщо він включається як критерій), зручно використовувати симетричний запис:

$$d_i(y_i) = \begin{cases} 0, & y_i \leq y_i^{best}, \\ (\frac{y_i - y_i^{worst}}{y_i^{worst} - y_i^{best}})^{\alpha_i}, & y_i^{best} < y_i < y_i^{worst}, \\ 1, & y_i \geq y_i^{worst}, \end{cases} \quad (4.15)$$

Для показників типу номінал (наприклад, SOC-режим, температура батареї або деякі параметри калібрування, які мають бажаний інтервал) доцільним є двостороннє задання з цільовим значенням T_i і допустимими межами $y_i^{worst} < T_i < y_i^{best}$:

$$d_i(y_i) = \begin{cases} 0, & y_i \leq y_i^{worst}, \\ (\frac{y_i - y_i^{worst}}{T_i - y_i^{worst}})^{s_{i1}}, & y_i^{worst} < y_i \leq T_i, \\ (\frac{y_i^{best} - y_i}{y_i^{best} - T_i})^{s_{i2}}, & T_i < y_i < y_i^{best}, \\ 0, & y_i \geq y_i^{best}, \end{cases}$$

де s_{i1} і s_{i2} дозволяють зробити штраф асиметричним, якщо відхилення в одну сторону небезпечніше або дорожче.

Після отримання d_i інтегральний показник D доцільно формувати мультиплікативно або адитивно. Мультиплікативна форма краще відбиває принцип неприйнятності провалу хоча б одного критерію, оскільки при $d_i \rightarrow 0$ весь показник знижується:

$$D(x) = \prod_{i=1}^n d_i(x)^{w_i}, \sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0. \quad (4.15)$$

Адитивна форма зручна для інтерпретації, але може маскувати провал критичного показника за рахунок високих значень інших:

$$D(x) = \sum_{i=1}^n w_i d_i(x). \quad (4.16)$$

В задачі EREV доцільно використовувати мультиплікативний варіант для показників, що обмежують працездатність і ресурс, а адитивний для показників, що відображають економічну складову, якщо вона не є жорстким обмеженням. Таке комбінування підвищує фізичну адекватність оцінки.

У задачах, де бажано отримати гладку залежність $d_i(y_i)$ без кусково-заданих переходів, може застосовуватися функція Харрінгтона:

$$d_i = \exp(-\exp(-z_i)), \quad (4.17)$$

де z_i є нормованою змінною, що може задаватися лінійно через показник y_i . Для критерію мінімізації зручно використовувати:

$$z_i = a_i + b_i y_i, \quad (4.18)$$

а коефіцієнти a_i, b_i визначати з двох умов калібрування, наприклад:

$$d_i(L_i) = d_L, d_i(U_i) = d_U, \quad (4.19)$$

де d_L відповідає високому рівню (наприклад, 0.8–0.9), а d_U гранично допустимому (наприклад, 0.1–0.2). Тоді через обернену функцію

$$z = -\ln(-\ln d) \quad (4.20)$$

отримується:

$$z_L = -\ln(-\ln d_L), z_U = -\ln(-\ln d_U), \quad (4.21)$$

$$b_i = \frac{z_U - z_L}{U_i - L_i}, a_i = z_L - b_i L_i. \quad (4.22)$$

Такий підхід зручний, коли показник має стохастичний розкид і необхідно зменшити чутливість до незначних флуктуацій.

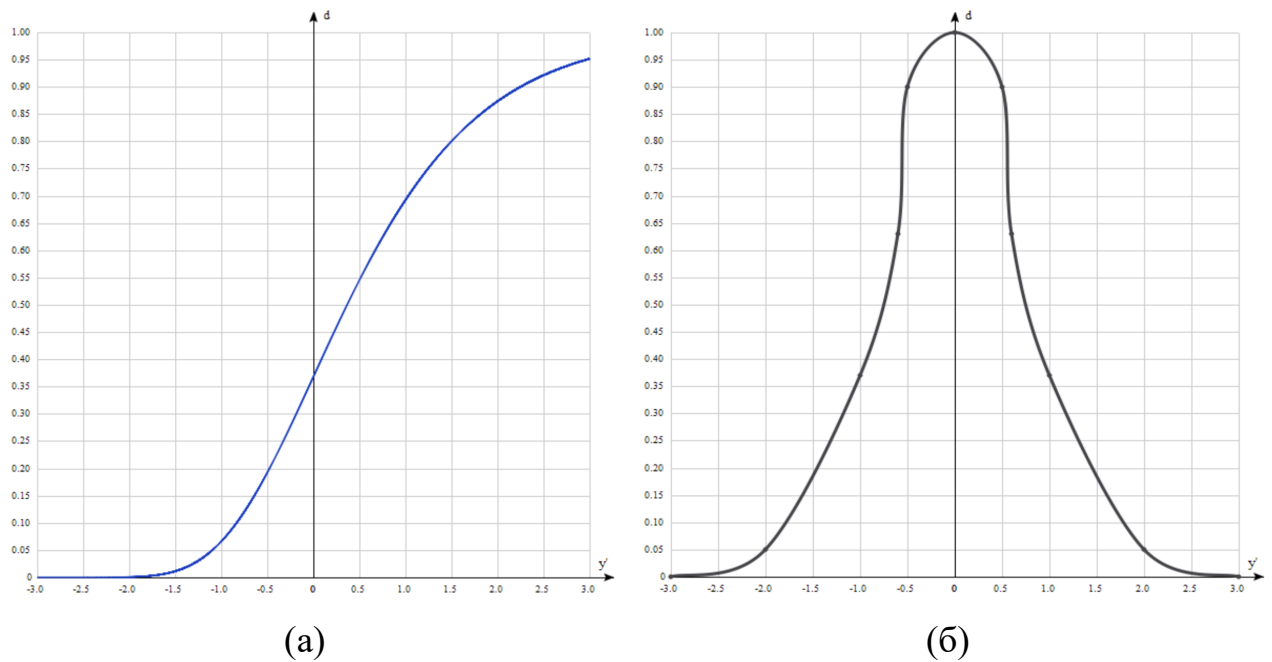


Рисунок 4.1 – Часткова функція бажаності при односторонньому (а) та двосторонньому (б) обмеженні

4.2.3 Вагові коефіцієнти та профілі експлуатації як основа для коректної оптимізації

Вагові коефіцієнти w_i не є абстрактними параметрами і повинні впливати з призначення платформи. Для EREV коректним підходом є введення профілів експлуатації, для яких визначається набір ваг. Профіль міського використання підвищує вагу енергоспоживання в EV-режимі і вагу показників рекуперації та маси. Профіль змішаного використання вирівнює пріоритети між EV-режимом і генераторним режимом. Профіль далеких поїздок підвищує вагу паливної економічності в режимі підтримки SOC і здатність генераторного модуля покривати середню потужність крейсерського руху без надмірного розряду батареї. Таблиця 4.3 показує приклад вагових коефіцієнтів для трьох профілів. Значення є орієнтовними і повинні узгоджуватися з технічним завданням і очікуваними режимами експлуатації.

Таблиця 4.3 – Приклад вагових коефіцієнтів для різних профілів експлуатації

Показник	Позначення	Міський профіль	Змішаний профіль	Далекі поїздки
Енергоспоживання EV	e_{EV}	0,30	0,22	0,12
Динаміка	t_{0-100}	0,12	0,12	0,10
Паливна економічність	f_{fuel}	0,10	0,18	0,28
Маса платформи	m	0,16	0,14	0,10
Теплова працездатність	T_{max}	0,16	0,18	0,22
Вартість платформи	C_{sys}	0,16	0,16	0,18

Важливо, що ваги мають сенс лише за умови коректного нормування та узгоджених діапазонів y_i^{best} і y_i^{worst} . Якщо діапазони задані неправильно, ваги втрачають фізичний зміст і оптимізація починає підлаштовуватися під помилки шкалювання.

4.2.4 Алгоритм оптимізації на основі інтегрального показника

Оптимізація параметрів EREV на основі інтегрального показника виконується як ітераційний процес, в якому формуються варіанти x , оцінюються моделі показників $y(x)$, перевіряються обмеження $g_j(x) \leq 0$, після чого обчислюється $D(x)$ та виконується пошук рішення з максимумом D або множини рішень з високими значеннями D при різних профілях.

Формально обмеження задаються як $g_j(x) \leq 0$. Для чисельного пошуку, особливо при використанні еволюційних методів або при каталожному переборі, доцільно вводити штрафну функцію:

$$P(x) = \sum_{j=1}^k [\max(0, g_j(x))]^{\beta_j}, \beta_j \geq 1. \quad (4.23)$$

Тоді оптимізацію можна виконувати за модифікованим критерієм:

$$\max_x \Phi(x) = \ln D(x) - \lambda P(x), \quad (4.24)$$

де $\lambda > 0$ визначає жорсткість придушення недопустимих рішень. Ця форма узгоджується з мультиплікативною природою D , оскільки працює в логарифмічному просторі та дозволяє адекватно порівнювати варіанти, що відрізняються за рівнем порушення обмежень.

Щоб інтегральний показник був фізично обґрунтованим, показники $y_i(x)$ бажано отримувати з розрахунків, де враховується баланс потужностей у контурі батарея–електропривод–генератор.

Тягову потужність на колесах у дискретному часі t_k можна задавати як:

$$P_{wh}(k) = F_{tr}(k) v(k), \quad (4.25)$$

де

$$F_{tr}(k) = ma(k) + mgf_r + \frac{1}{2} \rho C_d A_f v(k)^2 + mg \sin \theta(k). \quad (4.26)$$

Потужність на валу електродвигуна з урахуванням трансмісії:

$$P_{em}(k) = \frac{P_{wh}(k)}{\eta_{gear}(k)}. \quad (4.27)$$

Потужність DC-шини, що запитується інвертором, може бути оцінена:

$$P_{dc}(k) = \frac{P_{em}(k)}{\eta_{inv}(k)}. \quad (4.28)$$

Баланс потужностей на стороні батареї в загальному вигляді:

$$P_{bat}(k) = P_{dc}(k) - P_{gen,dc}(k) - P_{aux}(k), \quad (4.29)$$

де $P_{gen,dc}$ є електричною потужністю генераторного модуля, P_{aux} є потужністю допоміжних споживачів, включаючи теплові насоси, насоси охолодження, вентилятори.

Динаміка SOC у дискретному наближенні:

$$SOC(k+1) = SOC(k) - \frac{\Delta t}{E_{nom}} P_{bat}(k), \quad (4.30)$$

де E_{nom} є номінальною енергоємністю батареї у Wh або J (у цьому записі знак P_{bat} береться як позитивний при розряді). Обмеження на SOC записуються як:

$$SOC_{min} \leq SOC(k) \leq SOC_{max} \forall k, \quad (4.31)$$

а порушення цих обмежень природно входить у штрафну функцію $P(x)$.

Енергоспоживання в EV-режимі на пробіг L може визначатися:

$$e_{EV} = \frac{100}{L} \sum_{k \in EV} \max(0, P_{bat}(k)) \Delta t, \quad (4.32)$$

де сумування ведеться по часових кроках EV-ділянок місії, а від'ємні значення P_{bat} (рекуперація) не збільшують витрату енергії, але можуть бути враховані окремим показником ефективності рекуперації.

Витрата палива в режимі роботи генератора може оцінюватися через паливну потужність:

$$\dot{m}_f(k) = \frac{P_{gen,dc}(k)}{\eta_{ICE}(k) \eta_{gen}(k) \eta_{rect}(k) LHV}, \quad (4.33)$$

а тоді питома витрата палива на місію:

$$f_{fuel} = \frac{100}{L} \sum_{k \in GEN} \dot{m}_f(k) \Delta t. \quad (4.34)$$

Ці співвідношення дозволяють напряду зв'язати P_{gen} , стратегію керування й ефективність компонентів з критерієм f_{fuel} , що підвищує інтерпретованість оптимізації.

Теплові обмеження компонентів можна вводити на основі зосередженої моделі:

$$T_i(k+1) = T_i(k) + \frac{\Delta t}{C_i} (\dot{Q}_{gen,i}(k) - \dot{Q}_{rem,i}(k)), \quad (4.35)$$

$$T_{max} = \max_{i,k} T_i(k), \quad (4.36)$$

$$T_i(k) \leq T_{lim,i} \forall i, k. \quad (4.37)$$

Тоді критерій T_{max} формалізується однозначно, а обмеження по $T_{lim,i}$ можуть входити в систему $g_j(x)$.

У задачах концептуального проєктування EREV доцільно застосовувати підхід у два рівні. На першому рівні виконується грубий пошук архітектурних варіантів з дискретними виборами, зокрема рівня HV-архітектури, типу генераторного модуля, конфігурації тягового привода. На другому рівні виконується параметричний підбір неперервних змінних, зокрема E_{bat} , P_{em} , P_{gen} , параметрів передавального числа та обмежень керування.

Для пошуку можна застосовувати повний перебір у вузьких діапазонах, методи планування експерименту та побудову поверхні відгуку, а також еволюційні методи, якщо розмірність велика або модель містить нелінійності та дискретні елементи. Вибір методу визначається доступністю обчислювальних ресурсів і деталізацією моделі. На етапі розробки технічних рішень доцільним є поєднання планування експерименту та локального уточнення біля найкращих областей, оскільки це забезпечує керованість процесу і дає можливість отримати інтерпретовані закономірності впливу параметрів.

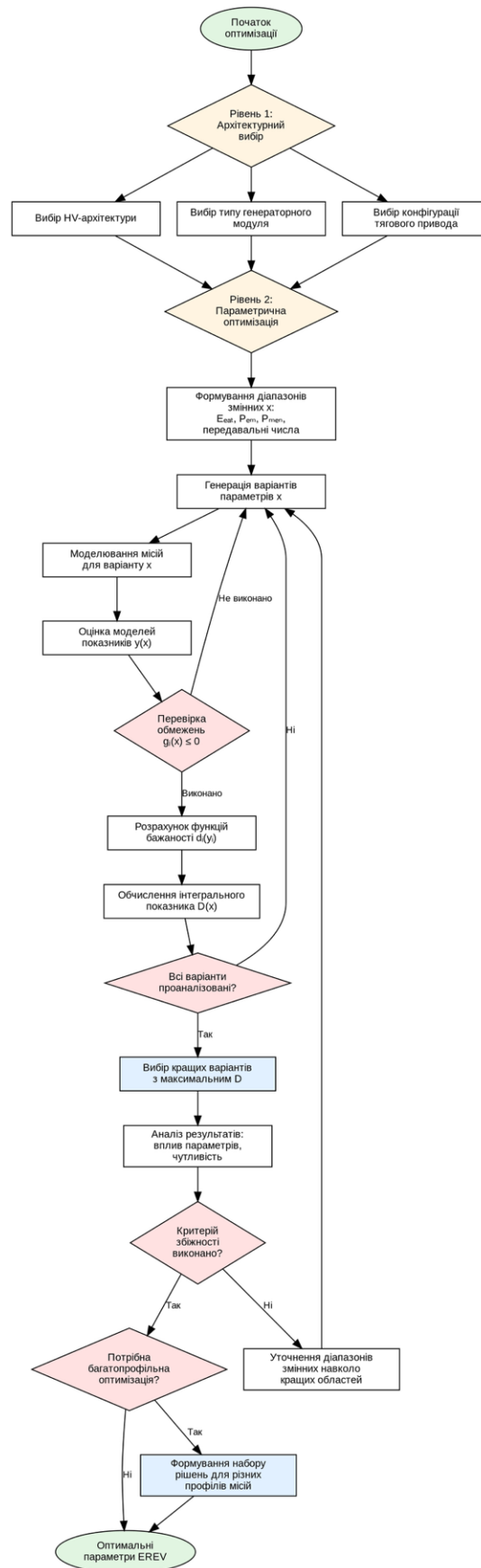


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритму оптимізації на основі інтегрального показника

4.2.5 Парето-оптимальні рішення та роль інтегрального показника в їхньому виборі

Окрім використання інтегрального показника, корисною є явна побудова Парето-множини через класичні постановки, які дозволяють контролювати компроміси.

Постановка ε -обмежень задається як:

$$\min_x y_1(x) \text{ за умов } y_i(x) \leq \varepsilon_i, i = 2, \dots, n, g_j(x) \leq 0 \quad (4.38)$$

Зміна ε_i дозволяє отримати набір Парето-оптимальних рішень і порівнювати їх за $D(x)$ у межах одного профілю експлуатації.

Для зваженого підходу:

$$\min_x \max_i [w_i | y_i(x) - y_i^{ref} |] \text{ за умов } g_j(x) \leq 0, \quad (4.39)$$

де y_i^{ref} – референтні значення, наприклад, бажані або найкращі. Така форма корисна, коли необхідно уникнути розв'язків із сильним провалом одного критерію, навіть якщо інтегральний показник лишається відносно високим через компенсацію іншими показниками.

Багатокритеріальна оптимізація за своєю природою формує не єдине рішення, а множину Парето-оптимальних рішень, у яких покращення одного критерію призводить до погіршення іншого. Для EREV типовими є компроміси між масою і EV-запасом ходу, між потужністю генератора і тепловим навантаженням, між динамікою і енергоспоживанням. У такій ситуації інтегральний показник виконує функцію механізму вибору одного рішення з Парето-множини відповідно до заданого профілю експлуатації.

Інженерно доцільним є підхід, коли спочатку формується Парето-множина за ключовими критеріями, а потім на цій множині обчислюється інтегральний показник для різних профілів. Це дозволяє уникнути ситуації, коли інтегральний показник приховує фізичний компроміс і приводить до рішення, яке є наслідком специфічних ваг, але не є стійким при зміні вимог.

Оптимальне рішення повинно бути стійким до невизначеностей, які є неминучими на етапі проєктування. До таких невизначеностей належать відхилення маси, розкид параметрів батарейних осередків, зміна температурних

умов, реальні профілі швидкості та навантаження, деградація компонентів у часі. Тому після знаходження кандидатних рішень доцільно виконувати аналіз чутливості: змінювати ключові параметри в межах можливих відхилень і перевіряти, чи зберігається прийнятний рівень показників та чи не порушуються обмеження.

Для практичної реалізації аналізу чутливості зручно використовувати сценарний підхід, де для кожного кандидата виконуються моделювання декількох режимів експлуатації: міський цикл, змішаний цикл, тривалий рух на швидкості, низькотемпературний режим, режим з обмеженим охолодженням. Якщо інтегральний показник суттєво падає при невеликій зміні параметрів, рішення вважається нестійким і потребує або зміни архітектури, або введення конструктивних резервів, або корекції алгоритмів керування енергетичними потоками. Таблиця 4.4 може бути включена як шаблон для оцінки стійкості рішення за сценаріями.

Таблиця 4.4 – Шаблон перевірки стійкості кандидатного рішення

Сценарій	Зміна умов	Контрольні показники	Критерій прийнятності
Низька температура	зниження температури батареї та навколишнього середовища	e_{EV} , T_{max} , доступна потужність	відсутність дерейтингу нижче заданого рівня, виконання обмежень BMS
Тривалий крейсер	стабільний високошвидкісний режим	f_{fuel} , T_{max} , підтримка SOC	підтримка SOC у межах, температури нижче граничних
Міський режим з піками	часті розгони й рекуперація	e_{EV} , теплові піки інвертора та двигуна	відсутність перегріву і стабільна рекуперація

Обмежене охолодження	зменшення ефективності теплообміну	T_{max} , обмеження потужності	працездатність без аварійних режимів
-------------------------	--	-------------------------------------	--

Багатокритеріальна оптимізація параметрів EREV на основі інтегрального показника ефективності дозволяє перетворити інженерне проєктування з послідовного підбору компонентів у керований процес пошуку компромісного рішення в умовах множини обмежень. Інтегральний показник забезпечує узгоджене порівняння варіантів і дає можливість формалізувати вибір рішення відповідно до профілю експлуатації. Парето-аналіз дозволяє зберігати фізичну прозорість компромісів і не підміняти технічні закономірності вибором вагових коефіцієнтів. Перевірка стійкості оптимального рішення є необхідним етапом, оскільки забезпечує практичну придатність результатів і знижує ризик отримання рішення, що є оптимальним лише в умовах ідеалізованої моделі.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

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

Організація охорони праці в роботах, пов'язаних із розробкою технічних рішень для електромобілів типу EREV і подальшим освоєнням їхнього виготовлення, доцільно розглядати як систему управління ризиками на всьому життєвому циклі виробу [21]. Такий підхід логічно впливає з загального принципу системності, інтегрованості та ієрархічності управління безпекою праці на виробництві, де охорона праці охоплює всі етапи процесу від аналізу ризиків до впровадження й контролю заходів безпеки.

В умовах EREV-орієнтованого проєкту ця теза набуває більш конкретного змісту: ризики формуються не лише в класичних виробничих операціях, а й у лабораторних випробуваннях високовольтних компонентів, у роботах з прототипами, під час налагодження силової електроніки, тестування батарейних модулів, проведення дорожніх і стендових випробувань, а також під час інтеграції програмно-апаратних систем керування.

Системний підхід у контексті EREV означає, що охорона праці повинна бути інтегрована в технічні рішення так само, як інтегруються вимоги до енергоефективності, масо-габаритних показників і надійності. Якщо розглядати EREV як комплекс взаємопов'язаних підсистем (АКБ, силова електроніка, електропривод, генераторний модуль, теплові контури, електрична архітектура та програмне забезпечення), то небезпеки також є системними: помилка в організації HV-зони або в процедурі відключення високої напруги може призвести до електротравм; порушення умов заряджання або термостатизації батарейного пакета під час випробувань може ініціювати термічні події; невірне розташування вентиляції та газовідведення в зоні батарейних тестів підвищує ризик токсичних уражень у разі дегазації. Відповідно, управління охороною праці має бути пов'язане з технологічними регламентами, планами випробувань і правилами інтеграції вузлів, а не існувати як окремий набір інструкцій.

Управління охороною праці в EREV-проектах доцільно будувати на базових принципах системності, наступності, стандартизації, координації та постійного моніторингу. Системність означає, що безпека розглядається як властивість виробничо-випробувальної системи в цілому, а не як сума локальних заходів. Наступність у практичному вимірі полягає в тому, що запровадження нових технологічних операцій (наприклад, переходу з модульної архітектури батареї на структурну або введення SiC-інверторів із вищими частотами комутації) супроводжується адаптацією процедур безпеки, навчанням персоналу й оновленням систем контролю без втрати керованості процесів. Стандартизація у свою чергу формує уніфіковані правила, які однаково застосовні на дільницях складання, у HV-лабораторії, у зоні динамометричних стендів та на випробувальних маршрутах.

Ключовим елементом системи є чітко визначені інформаційно-контрольні зв'язки між рівнями управління, виробничими та інженерними групами, а також службами, відповідальними за безпеку. У загальному випадку центр координації зосереджується у профільному підрозділі або функції охорони праці, яка відповідає за планування, облік умов праці, організацію навчання та моніторинг дотримання вимог.

Для EREV-орієнтованого виробництва і випробувань доцільно уточнити, що ця функція повинна бути тісно інтегрована з інженерними напрямками: конструкторським підрозділом, технологічною службою, командою функціональної безпеки, підрозділом якості та лабораторіями. Причина полягає в тому, що значна частина небезпек виникає на стику дисциплін: електрика та механіка (електрична дуга при неправильній комутації), електрика та терміка (перегрів силових модулів або батареї), механіка та хімія (пошкодження комірок із викидом продуктів розкладу електроліту).

Для підвищення наукової обґрунтованості управління охороною праці доцільно вводити формалізовані процедури ідентифікації небезпек та оцінювання ризиків. У прикладній постановці ризик можна представити як функцію ймовірності події та тяжкості наслідків:

$$R = P \cdot S,$$

де P – оцінка ймовірності реалізації небезпечної події, S – оцінка тяжкості наслідків. Для виробничо-випробувальних процесів EREV корисно враховувати також фактор експозиції, тобто тривалість або частоту контакту персоналу з небезпекою:

$$R = P \cdot S \cdot E,$$

де E характеризує інтенсивність впливу (наприклад, час перебування в HV-зоні або кількість операцій комутації за зміну). Така трифакторна форма зручна для ранжування ризиків у дільницях, де ймовірність інциденту може бути низькою, але тяжкість наслідків високою, що характерно для робіт із високою напругою та високою енергоємністю батарейних систем.

У практиці EREV-проектів доцільним є введення допустимих порогів ризику та критеріїв прийнятності, які узгоджуються з регламентами підприємства. Для цього можна застосовувати нормовану шкалу:

$$R_n = \frac{R}{R_{lim}},$$

де R_{lim} є гранично допустимий рівень ризику для конкретного виду робіт. У такій постановці умова прийнятності набуває вигляду

$$R_n \leq 1.$$

Якщо умова не виконується, необхідно або зменшити P через інженерні бар'єри та процедури (блокування, міжзамикання, контроль доступу), або зменшити E через зміну організації робіт, або зменшити S через засоби колективного та індивідуального захисту, а також через зниження енергії/потужності під час налагоджень і випробувань.

Окремий акцент для EREV повинен робитися на прогнозуванні ризиків і плануванні заходів на підставі даних. У загальному вигляді прогнозування і планування є функцією системи управління охороною праці та передбачає розробку програм з механізації, автоматизації, моніторингу та створення безпечних умов праці.

У разі EREV ці програми доцільно прив'язувати до критичних операцій: складання та герметизація батарейних модулів, робота з охолоджувальними контурами, високовольтні з'єднання, випробування інверторів на високих

струмах, діагностика ізоляції HV-мережі, тестування алгоритмів керування генераторним модулем на стендах. Для таких операцій ефективною є інтеграція процедур типу аналізу небезпек технологічного процесу (наприклад, із фіксацією відхилень, причин та бар'єрів), а також аналізу відмов і їх наслідків, який дозволяє зв'язати технічні відмови з ризиками для персоналу.

Контроль і моніторинг умов праці в EREV-середовищі потребує розширення переліку параметрів порівняно з класичними промисловими дільницями. Окрім шуму, освітленості, температури та концентрацій шкідливих речовин, важливими є специфічні параметри: наявність і справність HV-блокувань, контроль доступу до високовольтних зон, контроль залишкової напруги після відключення, параметри вентиляції у зонах батарейних тестів, наявність систем газовідведення та фільтрації, контроль електростатичних розрядів у зонах складання силової електроніки. У високовольтних лабораторіях і на стендах доцільно застосовувати принцип багатоканального контролю стану: технологічні датчики (температура силових модулів, струми, напруга), датчики безпеки (відкриття дверей, стан блокувань, контроль ізоляції), а також індикатори аварійних режимів (дим, газу, локальний перегрів).

Таблиця 5.1 – Відображення функцій управління охороною праці на етапи проєктування і підготовки виробництва EREV

Функція управління	Зміст у загальному вигляді	Приклад реалізації для EREV-проєкту
Ідентифікація небезпек	Виявлення джерел небезпек у процесах	Аналіз HV-операцій, операцій заряджання/розряджання батарей, робіт з охолоджувальними рідинами, стендових випробувань
Оцінювання ризиків	Ранжування ризиків за $R = P \cdot S \cdot E$	Матриця ризиків для батарейної лабораторії та

		дільниці силовії електроніки; визначення критичних операцій
Планування заходів	Формування програм зниження ризиків	Впровадження блокувань HV-доступу, регламентів відключення, процедур перевірки залишкової напруги, систем вентиляції
Навчання і допуск	Підготовка персоналу та перевірка компетенцій	Спеціалізоване навчання з HV-безпеки, допуск до робіт на стендах, тренування аварійних процедур для батарейних подій
Моніторинг і контроль	Вимірювання параметрів середовища і процесів	Контроль ізоляції, температур, газів, диму; аудит виконання процедур і стану блокувань
Коригувальні дії	Усунення причин відхилень і інцидентів	Розслідування причин інцидентів на стендах, корекція техпроцесів, оновлення інструкцій та бар'єрів

Управління охороною праці в середовищі розробки та виробництва EREV доцільно організовувати через формалізовані інформаційно-контрольні зв'язки між керівниками робіт, виконавцями та профільними службами підприємства, де координуючу роль виконує підрозділ охорони праці.

У науково-технічному проєкті EREV цей підрозділ має працювати не лише як контрольна ланка, а як елемент системи інженерного менеджменту, який забезпечує прогнозування та планування заходів, ведення обліку умов праці, організацію навчання й допусків, а також моніторинг дотримання встановлених процедур у лабораторіях, на стендах та у виробничих зонах.

Це особливо важливо через те, що значна частина операцій EREV пов'язана з високою напругою, високими струмами, енергоємними батарейними системами, силовою електронікою та тепловими режимами, які можуть швидко переходити в аварійні стани без достатнього часу на реакцію персоналу.

Функція прогнозування ризиків у системі управління охороною праці вважається однією з ключових, оскільки на її основі формуються програми організаційних і технічних заходів, включно з механізацією та автоматизацією, зниженням частки ручної праці, удосконаленням вентиляції і впровадженням систем моніторингу.

Для EREV прогнозування доцільно конкретизувати як оцінювання ризиків для типових сценаріїв: комутація високовольтних з'єднань під час складання прототипу; заряджання, розряджання і балансування батарейних модулів у лабораторії; стендові випробування інвертора та електропривода на високих навантаженнях; тестування генераторного модуля під тривалим навантаженням; роботи з охолоджувальними контурами та їх герметичністю. У таких сценаріях ризик має сенс подавати як очікуваний збиток від подій з різною ймовірністю та різними наслідками:

$$R_{\text{exp}} = \sum_{k=1}^K p_k C_k,$$

де p_k – ймовірність реалізації k -го небезпечного сценарію за визначений період або за визначену кількість операцій, а C_k – узагальнена величина наслідків, що може враховувати травматизм, матеріальні втрати, простій стендів, пошкодження компонентів і витрати на відновлення. Такий запис зручний для ранжування сценаріїв, коли подія має малу ймовірність, але потенційно критичні наслідки, що характерно для робіт з високою напругою та батарейними системами.

Для переходу від прогнозування до практичних дій формуються програми підвищення безпеки, які, окрім технічних бар'єрів, мають включати аналіз причин травматизму та коригувальні заходи з профілактики нещасних випадків і професійних захворювань.

У випадку EREV доцільно додати, що аналіз причин інцидентів має охоплювати також передумови, пов'язані з проєктними рішеннями: компоновку HV-компонентів і доступність роз'ємів; логіку HV-інтерлоків; процедури перевірки залишкової напруги; інформативність маркування та індикаторів; узгодження режимів випробувань з можливостями тепловідведення. Це створює прямий зворотний зв'язок між результатами безпекового аналізу і процесом інженерної валідації прототипів, що підвищує наукову обґрунтованість рішень і зменшує ризики на етапі серійного освоєння.

Контроль стану умов праці є обов'язковою складовою системи управління і реалізується через регулярні перевірки та інструментальні вимірювання параметрів виробничого середовища з подальшим аналізом звітів і розробкою коригувальних дій [22].

У EREV-орієнтованих лабораторіях і виробничих дільницях контроль доцільно розширювати на параметри, що прямо пов'язані з електробезпекою та термічними режимами. До таких параметрів належать: справність міжзамикань і блокувань доступу до HV-зон; контроль ізоляції високовольтного контуру; наявність і працездатність засобів швидкого знеструмлення; контроль концентрацій газів або продуктів дегазації в зонах батарейних тестів; параметри вентиляції та місцевих відсмоктувачів; контроль температури у критичних вузлах стендів і батарейних шаф. Для підвищення керованості системи корисно формалізувати результати перевірок у вигляді інтегрального індексу відповідності:

$$I_{\text{comp}} = \frac{\sum_{j=1}^M w_j s_j}{\sum_{j=1}^M w_j},$$

де $s_j \in [0; 1]$ – оцінка виконання j -го контрольного пункту, а w_j – ваговий коефіцієнт критичності. За таким індексом можливо відстежувати динаміку

безпекового стану лабораторії або дільниці у часі та встановлювати пороги прийнятності для допуску до випробувань підвищеної небезпеки.

Економічне стимулювання у системі управління охороною праці розглядається як інструмент підтримки заходів безпеки, включно зі створенням фондів для впровадження нових технологій і заохочення персоналу за відповідальне дотримання вимог. Для EREV-тематики економічний аспект має додаткову специфіку, оскільки вартість помилки в окремих операціях може бути високою через ціну батарейних модулів, силової електроніки і випробувального обладнання, а також через простоти проєктних стендів. Вкладення в безпеку може оцінюватися через очікуване зниження збитків:

$$\Delta R_{\text{exp}} = \sum_{k=1}^K (p_k^{(0)} C_k^{(0)} - p_k^{(1)} C_k^{(1)}),$$

де індекс 0 – відповідає стану до впровадження заходу, а індекс 1 – стану після впровадження. Тоді простий показник доцільності заходу можна записати як:

$$ROI_{\text{safety}} = \frac{\Delta R_{\text{exp}} - C_{\text{meas}}}{C_{\text{meas}}},$$

де C_{meas} – вартість реалізації заходу. Для програм безпеки тривалої дії більш коректним є приведення до вартості грошей у часі:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{\Delta R_{\text{exp}}(t) - C_{\text{meas}}(t)}{(1+r)^t},$$

де r – ставка дисконту, T – горизонт планування. Такий формалізм дозволяє обґрунтовувати впровадження систем моніторингу, додаткових блокувань, модернізації вентиляції або роботизації операцій з точки зору техніко-економічної ефективності.

Планування заходів з охорони праці виконується на рівні підприємства та на рівні галузі, включно з науковими дослідженнями у сфері охорони праці, проєктуванням систем безпеки й моніторингом їх впровадження, а на підприємствах акцент робиться на адаптації робочих місць, автоматизації моніторингу та створенні безпечних умов праці. Для EREV-проєктів планування

доцільно пов'язувати з етапами життєвого циклу виробу та контрольними точками проєкту: проєктування прототипу, виготовлення дослідної партії, стендові випробування, дорожні випробування, підготовка серійних технологічних процесів. На кожній контрольній точці має виконуватися перевірка готовності середовища за критеріями охорони праці, а також готовності процедур допуску, інструктажів і реагування на відхилення. Формалізовано це може бути подано у вигляді циклу керування, де планування, виконання, перевірка та коригування утворюють замкнений контур, який є основою системного підходу. Інтеграція принципів безпеки в усі аспекти виробничого процесу передбачає проєктування технологічних процесів з урахуванням ризиків, підготовку персоналу до робіт підвищеної небезпеки та постійний моніторинг середовища, а також проведення експертизи з охорони праці на етапі розробки технологій до їхнього впровадження. У застосуванні до EREV це означає, що будь-яка нова операція, наприклад введення нової технології герметизації батарейного пакета, перехід на іншу напругу HV-архітектури або застосування нових силових модулів, повинна супроводжуватися переглядом процедур безпеки, оцінкою ризиків і перевіркою наявності технічних бар'єрів. Експертиза з охорони праці в такій постановці має включати аналіз енергії небезпечних процесів, для чого корисним є розрахунок запасеної енергії та її потенційного вивільнення. Для батарейних систем базовим є співвідношення

$$W_{\text{bat}} = U_{\text{nom}} Q,$$

де U_{nom} – номінальна напруга, Q – електричний заряд, а для конденсаторних ланок інвертора критичним може бути

$$W_c = \frac{1}{2} C U^2,$$

що є підставою для вимог щодо часу розрядження, перевірки залишкової напруги і застосування розрядних ланок у стендових умовах.

Реалізація стандартизації в управлінні охороною праці забезпечує єдині підходи до оцінки умов праці, розробки інструкцій і навчання, а також полегшує інтеграцію нових технологій за умови відповідності нормам; як орієнтир

наводиться застосування міжнародних підходів управління охороною праці, зокрема ISO 45001. Для EREV-орієнтованої діяльності стандартизація повинна включати уніфіковані процедури HV-безпеки, протоколи роботи з батарейними модулями, регламенти для випробувальних стендів, критерії допуску до робіт, порядок розслідування відхилень і інцидентів. Науково доцільним є введення показників результативності системи, які дозволяють порівнювати періоди або підрозділи. Для цього в практиці безпеки застосовують частотні показники, які можуть бути подані в загальній формі:

$$FR = \frac{N_{inc} \cdot 10^6}{H}, SR = \frac{D_{lost} \cdot 10^6}{H},$$

де N_{inc} – кількість інцидентів певного типу за період, D_{lost} – кількість втрачених днів працездатності, H – відпрацьовані людино-години. Для EREV доцільно окремо вести частоту потенційно небезпечних відхилень у HV-операціях та у батарейних тестах, оскільки профіль ризику істотно відрізняється від традиційних механоскладальних процесів.

На рівні взаємодії між персоналом та керівництвом важливою є культура безпеки, яка реалізується через регулярні тренінги, інструктажі, залучення співробітників до удосконалення процесів та можливість повідомляти про небезпеки на робочих місцях. Для проєктів EREV культура безпеки особливо важлива через часті зміни конфігурації прототипів, оновлення програмного забезпечення стендів, введення нових сценаріїв випробувань і високий темп ітерацій. У таких умовах зростає ризик відхилень, які не були повністю відображені в документації, тому система повинна стимулювати раннє виявлення небезпек і фіксацію передумов інцидентів.

Використання сучасних інформаційних технологій для управління охороною праці передбачає впровадження автоматизованих систем моніторингу в реальному часі та інтеграцію таких систем з іншими платформами підприємства; як приклад – застосування IoT для збору даних щодо параметрів середовища. У контексті EREV доцільно розширити ідею IoT до цифрового контуру безпеки випробувань, коли дані датчиків температури, газів, диму, параметрів вентиляції, станів дверей і міжзамикань, а також контроль ізоляції

HV-системи формують єдине поле для оперативної діагностики. Науковою перевагою такого підходу є можливість переходу від постфактум-аналізу до предиктивного контролю, коли критичні тренди виявляються до досягнення аварійних порогів. У простому вигляді сигнал раннього попередження може базуватися на нормованому відхиленні:

$$z(t) = \frac{X(t) - \mu_X}{\sigma_X},$$

де $X(t)$ – вимірюваний параметр (температура, концентрація), μ_X та σ_X – статистичні параметри нормального режиму. У разі перевищення заданого порогу $z(t)$ формується команда на зупинку випробування або на корекцію режиму.

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. Проведене дослідження забезпечило цілісне опрацювання питань, пов'язаних із проєктуванням, принципами функціонування та оцінюванням ефективності електромобілів типу EREV. У межах роботи систематизовано технологічні й екологічні аспекти застосування таких транспортних засобів, що дозволило обґрунтувати доцільність їх розвитку в умовах зростання вимог до енергоефективності та скорочення шкідливого впливу транспорту на довкілля. Запропонований підхід до виконання розрахунків і моделювання створює основу для подальшого вдосконалення конструктивних рішень та впровадження інновацій, спрямованих на підвищення техніко-економічних показників.

2. У роботі виконано комплексний аналіз основних компонентів силової установки EREV, включаючи акумуляторну батарею, тяговий електродвигун, двигун внутрішнього згоряння генераторного контуру, систему рекуперації енергії, трансмісію та редуктор. За результатами розрахункових оцінок визначено раціональні параметри зазначених вузлів з урахуванням їхньої енергетичної ефективності, впливу на масо-габаритні характеристики та залежності від аеродинамічних параметрів автомобіля. Це дозволило перейти від загального опису структури EREV до формалізованих рекомендацій щодо підбору компонентів, які забезпечують узгоджену роботу системи в різних режимах експлуатації.

3. Важливим результатом є розроблення методики оцінки технологічних і екологічних параметрів EREV, що базується на інтеграції показників енергоспоживання, динамічних характеристик та екологічного впливу в єдиний інтегральний критерій ефективності. Такий підхід забезпечує можливість кількісного порівняння варіантів конструктивних рішень, режимів роботи та конфігурацій компонентів, а також створює підґрунтя для оптимізації параметрів силової установки. Використання інструментів багатофакторного аналізу підвищує обґрунтованість вибору проектних параметрів і дозволяє виявляти найбільш впливові фактори, що визначають ефективність системи в конкретних умовах руху.

4. Окремий акцент у роботі зроблено на питаннях охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, що є необхідною складовою сучасного інженерного проєктування. Розглянуті принципи управління охороною праці на виробництві та підходи до організації безпечних умов праці підтверджують доцільність інтеграції безпекових вимог у всі етапи життєвого циклу транспортного засобу – від конструкторського проєктування до експлуатації та утилізації. Такий підхід забезпечує зниження виробничих ризиків і підвищує загальний рівень надійності технічних рішень.

5. Отримані результати мають виражену практичну спрямованість і можуть бути використані як методична основа для проєктування сучасних електромобілів типу EREV. Реалізація запропонованих підходів сприятиме підвищенню енергоефективності, скороченню негативного впливу на довкілля та забезпеченню належного рівня безпеки в процесі виробництва й експлуатації. Таким чином, робота формує обґрунтований внесок у розвиток технологій електрифікованого транспорту та відповідає актуальним напрямам удосконалення транспортних засобів нового покоління.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Міжнародне енергетичне агентство (IEA). Global EV Outlook 2023: Future of Electric Mobility. – Париж, 2023.
2. Автомобілі з електричними і гібридними приводами: Монографія / Під ред. О.В. Кривенка. – Харків: НТУ «ХП», 2020. – 340 с.
3. Ван-Ден-Лінден П. Технічний розвиток електромобільності: Статистичний аналіз ринку. – Київ: ТехноПром, 2021. – 280 с.
4. Український автопром: тенденції розвитку електромобілів / Аналітичний звіт. – Київ: УкрАвтоАналіз, 2022.
5. 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.
6. Джеймс Л., Грін Б. Класифікація і проектування електромобілів. – Лондон: Routledge, 2019. – 450 с.
7. Петров М.В. Основи електротехніки для транспортних засобів. – Харків: Техніка і транспорт, 2018. – 372 с.
8. Енергетична ефективність електромобілів: аналітичне дослідження / С.В. Андрєєв, О.Г. Павленко. – Одеса: Наука і техніка, 2020. – 280 с.
9. World Electric Vehicle Journal. Advances in EV and Hybrid Technology. – Vol. 14, Issue 3, 2022.
10. 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.
11. Лопухін С.О., Тихонов Д.В. Проектування електродвигунів для гібридних транспортних засобів. – Київ: НАН України, 2021. – 320 с.
12. Бауман А. Електромобілі: Конструкція та експлуатація. – Берлін: Springer, 2020. – 400 с.

13. Розрахунки енергоефективності транспортних систем / Під ред. Коваля В.М. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2019. – 300 с.
14. Standards for Electric Vehicle Design / ISO 6469-1:2019. – Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
15. Aulin, V., Rogovskii, I., Lyashuk, O., Titova, L., Hryniv, A., Mironov, D., Volianskyi, M., Rogatynskyi, R., Solomka, O., Lysenko, S. (2024). Comprehensive assessment of technical condition of vehicles during operation based on Harrington's desirability function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (127)), 37–46.
16. Міронов Д.В. Електронне та мікропроцесорне обладнання автомобілів: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт / Д.В. Міронов – Тернопіль: ТНТУ, 2023. – 62 с.
17. Методики оцінки енергетичних і екологічних параметрів автомобілів / Під ред. Гречанюка О.В. – Київ: Транспорт і екологія, 2021. – 360 с.
18. Сучасні методи оптимізації енергоспоживання у транспорті / Баранов В.В., Савченко І.О. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2020. – 290 с.
19. Техногенні ризики і транспорт: Монографія / Кравець С.М., Поліщук Г.С. – Львів: ЛНТУ, 2022. – 310 с.
20. *Journal of Cleaner Production*. Assessing Environmental Impacts of Hybrid and Electric Vehicles. – Vol. 28, Issue 5, 2021.
21. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»: навч. посібник / В.С. Стручок – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.
22. 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.
23. 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.

24. 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.