МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний університет
Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

на тему Покращення енергетичних якостей гібридного транспортного засобу

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.141
Грачов В.Є.
(прізвище та ініціали) (підпис)

спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва)

спеціалізація
(шифр і назва)

освітньо-професійна програма
141.00.11 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва)

Керівник Артемчук В.В.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя

2024 рік

Запорізький національний університет

Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

(повна назва кафедри)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

Спеціалізація

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма 141.00.11 Електроенергетика, електротехніка

(шифр і назва)

та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., доц.  В.Л. Коваленко

“_01_”__грудня__2024 року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

Грачов Валерій Євгенійович

1. Тема роботи: Покращення енергетичних якостей гібридного транспортного засобу

Керівник роботи: Артемчук В.В.

затверджені наказом ЗНУ від «_01_»_травня__2024__року №_361-с___

2. Строк подання студентом роботи: 28 лютого 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: характеристики приводів транспортних засобів; об’єми споживання електричної енергії транспортним засобом; технічні дані транспортних засобів; погодні умови

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які рекомендовано розробити): вступ; 1) аналіз існуючих силових енергоустановок ГТЗ; 2) аналіз енергетичних показників в електроприводі ГТЗ; 3) покращення енергетичних якостей ГТЗ

5. Перелік графічного матеріалу: 1) титульна сторінка; 2) типи силових енергоустановок; 3) типи гібридних систем за структурою; 4) функціональна схема ГТЗ; 5) баланс енергії при циклічному руху ГТЗ

6. Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Артемчук В.В., професор		
Розділ 2	Артемчук В.В., професор		
Розділ 3	Артемчук В.В., професор		
Нормоконтроль	Коваленко І.І., асистент		

7. Дата видачі завдання 01.06.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
1	Аналіз існуючих силових енергоустановок гібридних транспортних засобів (ГТЗ)	01.10.2024	
2	Аналіз енергетичних показників в електроприводі гібридного транспортного засобу	01.11.2024	
3	Покращення енергетичних якостей гібридного транспортного засобу	01.12.2024	

Студент _____ Грачов В.Є.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник дипломної роботи _____ Артемчук В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтролер _____ Коваленко І.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена дослідженню шляхів покращення енергетичних показників гібридних транспортних засобів (ГТЗ). Проведено аналіз сучасних підходів до оптимізації силових установок, використання інноваційних матеріалів, технологій та відновлюваних джерел енергії. Визначено перспективи вдосконалення конструкції ГТЗ для підвищення їхньої енергоефективності, екологічності, надійності та зниження експлуатаційних витрат.

Ключові слова: транспортний засіб, електропривод, силові енергетичні установки, енергетична ефективність, акумуляторні батареї

ABSTRACT

The master's thesis is devoted to the study of ways to improve the energy performance of hybrid vehicles (HVT). An analysis of modern approaches to optimizing power plants, the use of innovative materials, technologies and renewable energy sources has been carried out. Prospects for improving the design of HVT to increase their energy efficiency, environmental friendliness, reliability and reduce operating costs have been identified.

Keywords: vehicle, electric drive, power plants, energy efficiency, batteries

ЗМІСТ

Вступ 6
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИЛОВИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК ГІБРИДНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ (ГТЗ) 8
1.1 Сучасний стан розвитку гібридних транспортних засобів 8
1.2 Основні характеристики гібридних силових установок 11
1.3 Фактори, що стримують масове впровадження гібридного транспорту 23
2 АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ГІБРИДНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ 25
2.1 Основні енергетичні показники ГТЗ та критерії їх оцінки 25
2.2 Взаємозв’язок між схемами побудови ГТЗ і енергетичними показниками 33
2.3 Режими руху ГТЗ 42
3 ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЯКОСТЕЙ ГІБРИДНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ 52
3.1 Удосконалення роботи силової установки ГТЗ 52
3.2 Використання сучасних матеріалів та технологій для ГТЗ 56
3.3 Перспективи розвитку ГТЗ 66
Висновки 71
Список використаних джерел 73
Додатки 76

ВСТУП

Актуальність роботи. Електричний транспорт сьогодні є невіддільною частиною сучасної інфраструктури. Він виконує ключову роль у забезпеченні сталого розвитку міст та сільських районів, пропонуючи енергоефективний і екологічний спосіб перевезення як пасажирів, так і вантажів. З огляду на зростання чисельності населення, інтенсифікацію міського руху та вимоги до зниження викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище, електрорухомий склад, у тому числі і електромобілі, стали об’єктами багатьох досліджень та винаходів. Їх удосконалення дає змогу суттєво підвищити експлуатаційні показники, зменшити витрати енергії та знизити негативний вплив на екологію.

Зокрема, увага приділяється оптимізації енергетичних характеристик рухомого складу. Це включає як поліпшення ефективності використання існуючих систем, так і інтеграцію новітніх технологій, таких як гібридні силові установки. У сучасних умовах гібридні установки знаходять своє застосування у різних видах транспорту: від автомобілів до суден. Це підкреслює перспективність цієї технології для широкого впровадження, включно з електрорухомим складом.

Наукові дослідження в цій сфері зосереджуються на розробці нових схем керування силовими установками, використанні рекуперативного гальмування, а також застосуванні інтелектуальних систем для оптимізації руху. Ці підходи дозволяють не лише знизити витрати енергії, але й підвищити надійність та довговічність обладнання.

Також, зі зростанням масштабів використання електричного транспорту постає питання не лише економічності, але й екологічності. Розвиток технологій дозволяє суттєво зменшити залежність від традиційних джерел енергії, таких як вугілля, газ або нафтові продукти. Натомість рухомий склад, оснащений сучасними гібридними установками, здатний позитивно вплинути на навколишнє середовище, зменшуючи викиди шкідливих речовин.

Однією з ключових переваг гібридних систем є їхня універсальність. Ці системи можуть працювати як у режимі чисто електричного транспорту, так і в комбінації з традиційними двигунами внутрішнього згоряння. Наприклад, у міських умовах гібридні установки дозволяють використовувати лише електричний привід, що усуває викиди шкідливих речовин під час руху. На довгих відстанях або у випадку високих навантажень можливе залучення додаткових джерел енергії для забезпечення стабільності та потужності.

Важливо зазначити, що розвиток гібридних систем напряму залежить від прогресу в суміжних галузях. Наприклад, використання високоефективних акумуляторів дозволяє значно збільшити запас ходу електричного транспорту, тоді як вдосконалення систем керування сприяє оптимізації роботи гібридних установок. Іншим важливим напрямом є впровадження інтелектуальних систем керування, які дозволяють ефективно планувати рух транспорту з урахуванням профілю маршруту, навантаження та умов руху.

Метою даної роботи є дослідження та оптимізація енергетичних характеристик рухомого складу з гібридними силовими установками. Особливий акцент зроблено на використанні моделювання для аналізу енерговитрат під час різних режимів руху, таких як прискорення, сталий рух і гальмування. Увага також приділена аналізу перспектив застосування гібридних силових установок у транспортних засобах.

На основі вищезазначеного, дана робота спрямована на дослідження інноваційних підходів до використання гібридних систем у рухомому складі. Основна увага приділяється практичним аспектам застосування цих технологій у реальних умовах експлуатації.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИЛОВИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК ГІБРИДНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ (ГТЗ)

1.1 Сучасний стан розвитку гібридних транспортних засобів

В загальному уявленні силову енергоустановку (СЕУ) можна представити, як комплекс обладнання, який призначений для перетворення одного виду енергії в інший із метою подальшого використання отриманого виду енергії. Силові установки використовуються енергетиці, промисловості, в транспорті, та інших галузях, забезпечуючи роботу машин, механізмів і систем. Тобто СЕУ можна умовно назвати своєрідним перетворювачем енергії.

Із розвитком технологій удосконалюються і силові енергоустановки. Зараз основні типи силових енергоустановок можна поділити на такі, що в основі мають двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), електромашини, турбінні установки, теплові установки, гібридні силові установки (ГСУ), системи з відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ) (рис. 1.1).

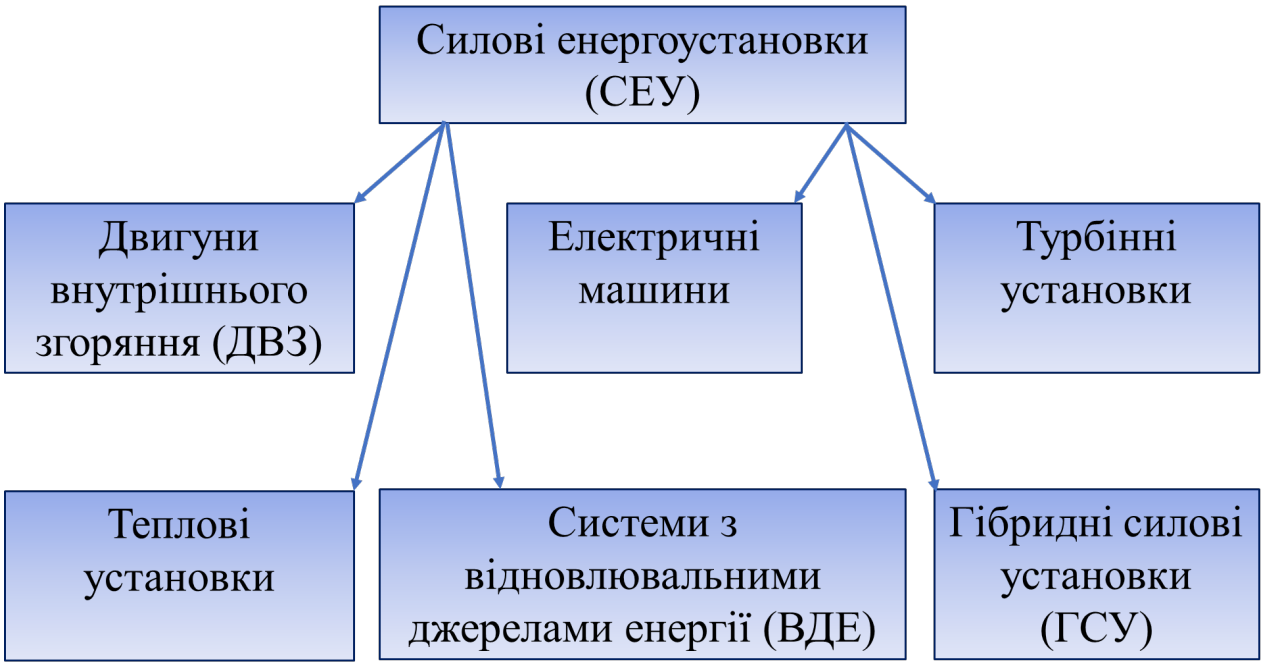


Рисунок 1.1 – Типи силових енергоустановок (СЕУ)

Основні типи двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) в абсолютній своїй більшості – це дизельні та бензинові двигуни. Проте зараз активно розробляються двигуни внутрішнього згоряння, які працюються на синтетичних паливах, а також на водневій суміші. Наприклад, компанія «Тайота» вже представила такий двигун, який вважають майбутнім конкурентом електромобілям.

Електричні машини, що використовують в силових установках поділяють на машини змінного (синхронні та асинхронні) та постійного струму.

Турбінні установки поділяють на газові, парові або комбіновані та використовують енергії газів або пари під високим тиском для обертання турбіни.

Теплові установки-двигуни включають парові машини та Стірлінг-двигуни. І хоча двигуни такого типу, особливо парові, можна вважати архаїзмом, двигунам Стірлінга прогнозують більш широке застосування, принаймні для певних умов і задач.

Гібридні силові установки (ГСУ) поєднують двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) і електродвигун для зниження витрат пального та викидів. ГСУ працюють у кількох режимах:

- послідовний режим;
- паралельний режим;
- послідовно-паралельний.

Гібридні силові установки більш детально будуть розглянуті більш детально нижче.

Системи з відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ). Дані системи викликають не менший інтерес через свою перспективність, як і ГСУ. Ці системи побудовані на основі викорситання паливних елементів, де наприклад, хімічна енергія водню перетворюється на електричну через електрохімічну реакцію, сонячні панелі, вітряні турбіни. Звичайно, що системи з ВДЕ також можуть працювати з разом з іншими, зазначеними вище системами. Дані системи можуть розглядатися як окремі, так і комплексні. Але слід враховувати,

що окрема система відновлювальних джерел енергії потребує додаткового обладнання у вигляді накопичувачів енергії для стабилізації живлення споживача. Саме тому, дану систему розглядають у комплексі з іншими, хоча за часом вона може працювати навіть 80 % часу.

Силові енергоустановки відрізняються енергоефективністю, екологічністю, застосуванням, джерелами енергії (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Порівняння СЕУ за деякими характеристиками

Тип СЕУ	Енергоефективність, %	Викиди CO_2	Основне джерело енергії
Двигун внутрішнього згоряння	35…40	високі	дизпаливо, бензин
Елктромашина	90…94	нульові	електроенергія
Газова турбіна	65	висока	газ
Гібридна система	45	середні	дизпаливо або бензин + електроенергія
Системи з ВДЕ	60…92	нульові	водень, енергія сонця

Таким чином, силові енергоустановки є ключовим компонентом багатьох технологій, забезпечуючи енергією промисловість, транспорт і житлову інфраструктуру. Тенденції розвитку включають інтеграцію гібридних систем, впровадження відновлюваних джерел енергії та підвищення енергоефективності.

1.2 Основні характеристики гібридних силових установок

На нашу думку, гібридна силова установка (ГСУ) є вдалою технологією, що поєднує декілька джерел енергії для забезпечення максимальної ефективності та зниження впливу на довкілля. Основна мета таких установок – досягнення балансу між потужністю, економічністю та екологічною безпекою. На відміну від традиційних установок, що використовують лише один тип джерела енергії, ГСУ забезпечують гнучкість у виборі режимів роботи та підвищують загальну продуктивність системи.

Однією з головних позитивних рис гібридної установки є те, що ДВЗ працюють у так званому «п’ятні» максимального ККД двигуна. Дійсно, наведене у паспорті двигуна ККД відображає максимальне його значення. Але у звичайних режимах цього можна досягти лише на деяких режимах роботи двигуна. Це значно впливає на середнє значення ККД, а отже і установки в цілому. Тому додаткове обладнання, яке дозволяє підтримувати ККД на максимальному або близькому до нього значенні, дозволяє значно підвищити енергоефективність системи в цілому.

Але це не всі можливості ГСУ. Якщо дана система дозволяє працювати від електричного джерела енергії, наприклад, акумуляторної батареї, то загальну енергоефективність системи можна підняти ще на більш високий рівень. Ці питання будуть додатково розглянуті у подальшому.

Із зазначеного витікають й інші переваги ГСУ, а саме економія пального, зменшення екологіного впливу, тихіща робота, а також можливість рекуперації.

До недоліків гібридних систем безумовно можна віднести вищу вартість, збільшення масо-габаритних показників, ускладнення конструкції, збільшення експлуатаційних витрат. Однозначної універсальної оцінки економічної доцільності для низки випадків введення в експлуатацію ГСУ немає, у кожному випадку необхідно розглядати це питання окремо.

Розглянемо коротко приклад з придбанням легкового автомобіля. Один автомобіль дизельний, другий бензиновий, третій з ГСУ. Вартість автомобілів

розглядалася для однієї марки, одного року випуску, близькими пробігами (≈ 100 тис. км) і наближеним технічним станом (гарний). Найнижча вартість була у бензинового, середня у дизельного, найвища – у гібридного. Після порівняння початкової вартості автомобіля, палива та деяких витрат на обслуговування було виявлено, що дизельний автомобіль за рахунок меншої вартості дизпалива, лише через 4…5 років експлуатації стає більш вигідним, ніж бензиновий. Якщо ж порівнювати з гібридним, то цей розрив стає ще більшим – до 8…10 років (залежно від ціни палива та інтенсивності міських умов, де гібрид економічніший). А у разі низького пробігу або тривалого використання в умовах траси гібрид взагалі може не окупити свою високу початкову вартість. Причому, при розрахунках брали середній пробіг (15…25) тис. км/рік. При менших пробігах терміни «окупнсоті» зсуваються в ще більший бік.

У той же час зазначимо, якщо експлуатація авто використовується в міських умовах і гібрид має можливість їздити чисто на електриці, то цей розрив скорочується. Також має значення, для яких цілей переважно слугує автомобіль, місто, траса або місто-траса. І не розглядалися поламки елементів двигуна і, відповідно, вартість їх ремнту. Крім того, якщо ми говоримо про умови роботи таких машин, то в країнах різні співвідношення цін на бензин, дизпаливо і електрику, можуть бути певні пільги на гібриди і додаткові обмеження на дизелі. В сучасних дизельних машинах необхідно покупати рідину, яка впливає на екологічність, що додається до вартості дизпалива. Отже, даним прикладом було показано умовність і неоднозначність даного питання. Але це не означає, що слід ставити під сумнів необхідність розвитку гібридних технологій. Навпаки, їх удосконалення дозволить зменшити вартість даної технології і значить, зробити її більш привабливою.

Гібридні силові установки поділяються на різні типи залежно від призначення, конструктивних особливостей та джерел енергії, що використовуються. У контексті, наприклад, стаціонарних ГСУ їх класифікація має велике значення для оптимального вибору технології залежно від умов експлуатації та вимог, що до них висуваються. Основними критеріями

класифікації стаціонарних ГСУ є джерело енергії, структура системи та режим роботи.

За типом джерела використовуваної енергії ГСУ фактично збігаються з розглянутими вище силовими енергоустановками, тому немає сенсу це повторювати.

За режимом роботи:

- резервні ГСУ, використовуються для аварійного живлення в разі відключення основного джерела енергії. Найчастіше їх використовують на промислових об'єктах, залізниці (для живлення вузлів зв’язку), в лікарнях, та іншій критичній інфраструктурі;
- базові ГСУ, забезпечують енергопостачання об'єктів, наприклад, віддалених об’єктів, де немає доступу до централізованої мережі;
- пікові ГСУ, включаються у роботу для покриття підвищеного енергоспоживання у часи пікових навантажень.

Із розвитком інтелектуальних технологій класифікація стаціонарних ГСУ постійно розширюється. Наприклад, з’являються адаптивні системи, здатні змінювати режим роботи залежно від умов експлуатації. Це дозволяє забезпечити максимально раціональне використання енергоресурсів. Сучасні стаціонарні ГСУ також інтегруються з «розумними» мережами, що дозволяє ефективно розподіляти енергію між споживачами.

За рівнем мобільності:

- стаціонарні;
- мобільні.

Стаціонарні ГСУ використовуються для забезпечення енергією будівель, промислових об'єктів та навіть лікарень. Такі системи забезпечують надійність живлення у випадках аварійного вимкнення основних джерел енергії. Наприклад, резервні джерела, оснащені ГСУ, можуть працювати у різних режимах, забезпечуючи як базове живлення, так і підтримку в пікових ситуаціях.

За структурою гібридних систем (рис. 1.2).

Принцип роботи ГСУ ґрунтується на синхронній роботі декількох енергетичних компонентів. Ключовим аспектом роботи ГСУ є здатність адаптуватися до зміни умов експлуатації. Система може функціонувати у різних режимах:

- електричний режим (використовується електродвигун, що забезпечує нульовий рівень шкідливих викидів у довкілля);
- комбінований режим (ДВЗ та електродвигун працюють одночасно для досягнення високої потужності);
- режим рекуперації (енергія, що вивільняється під час гальмування, акумулюється у батареях для подальшого використання).

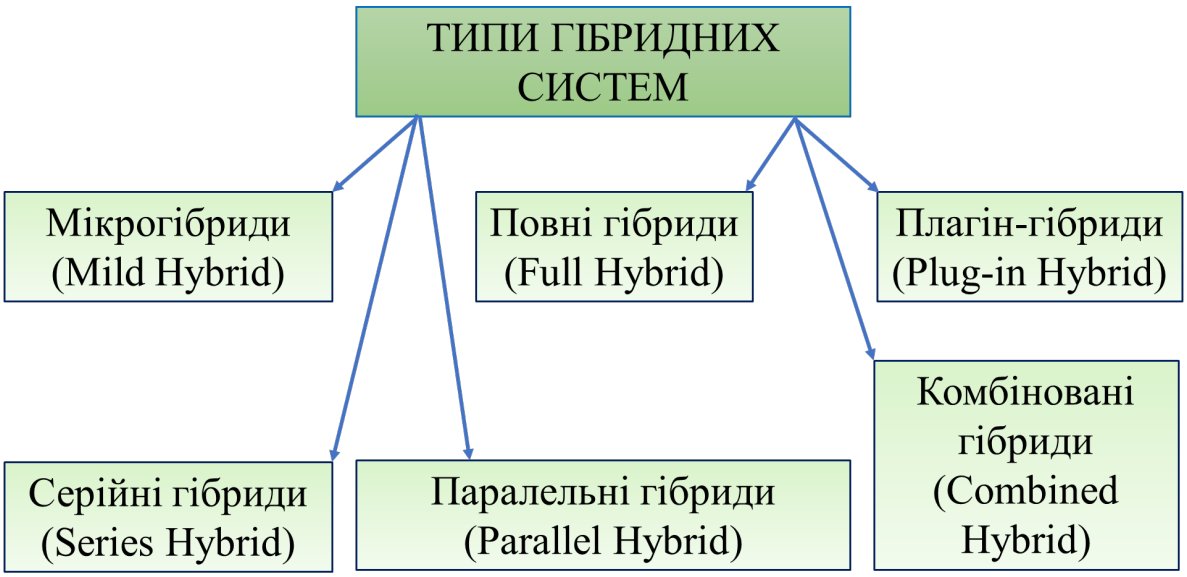


Рисунок 1.2 –Типи гібридних систем за структурою

Мікрогібриди (Mild Hybrid) використовують невеликий електродвигун для підтримки ДВЗ. Вони не можуть працювати виключно на електроенергії, але електродвигун допомагає зменшити навантаження на ДВЗ, підвищуючи загальну ефективність і знижуючи витрати пального. Електродвигун (або стартер-генератор) підтримує ДВЗ під час прискорення, забезпечуючи додаткову потужність. При цьому використовують 48-вольтову електричну систему, яка забезпечує більшу ефективність порівняно зі стандартною 12-вольтовою. Є функція «старт-стоп», яка автоматично вимикає ДВЗ під час зупинок (наприклад, на світлофорах), а потім швидко запускає його.

Потужність електродвигуна зазвичай становить 5…15 кВт. Його основною функцією є забезпечення додаткового моменту під час розгону або допомога при низьких навантаженнях. Цей же електродвигун переходить в генераторний режим при рекуперації енергії в режимі гальмування. Батарея має невелику ємність, достатню лише для допоміжних функцій. Як правило у якості електродвигуна використовують стартер, але General Motors Parallel Hybrid Truck (2004…2007 pp.) і гібриди Honda Eco-Assist, оснащені трифазним електродвигуном, який встановлювався всередині корпусу між ДВЗ і трансмісією.

Мікрогібриди дозволяють зменшити витрати пального на 10…15 % порівняно з традиційними ДВЗ і мають нижчу початкову вартість порівняно з повними гібридами. Завдяки частковій підтримці ДВЗ електродвигуном і системі «старт-стоп» вони мають зменшені викиди CO_2. Мікрогібриди мають менш складну конструкцію, ніж повні або плагін-гібриди, що спрощує технічне обслуговування.

Однак мікрогібриди мають обмежений ефект через малу ємність батареї (0,2…1,0 кВт в залежності від моделі) і невисоку потужність електродвигуна. Можна сказати, що мікрогібриди фактично є дещо покращеною версією звичайних авто з ДВЗ, які допомогають економити паливо і при цьому мають невеликий приріст вартості у порівнянні зі звичайними моделями.

Моделі автівок, що мають таку схему: Audi A6 MHEV (2019 p., використовує 48-вольтову систему для підтримки ДВЗ), Suzuki Swift Hybrid (2017 p.), Mercedes-Benz E-Class MHEV (2020 p., система забезпечує додаткові 16 кВт під час розгону, покращуючи динаміку і знижуючи витрати пального).

Розглянемо деякі аспекти ГСУ.

На даний час в автомобільній промисловості використовують різні концепції гібридних установок, наприклад, послідовна, паралельна та послідовно-паралельна структурні схеми.

Послідовна схема сконструйована таким чином, що ДВЗ з'єднаний тільки з накопичувачем енергії. А вже накопичувач з'єднаний з тяговим

електродвигуном, який передає обертальний момент на колеса. Особливістю даної схеми є забезпечення роботи ДВЗ в оптимальному режимі та забезпечує плавний старт і стабільну роботу за рахунок прямого приводу коліс. Дана схема дає можливість рекуперації енергії та автономного руху (суто на електриці). Але слід зауважити, що є різні підходи до автономного руху (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика деяких моделей з послідовною гібридною схемою

Характеристика	Nissan e-Power Note	BMW i3 REX	Chevrolet Volt
Ємність батареї (кВт·год)	1,5…2,0	33	16…18
Запас ходу на електриці (км)	2…5	150…180	50…85
Економія пального в місті	до 40 %	до 50 %	до 50 %
Середня витрата пального	3,4…4,0 л/100 км	2-3 л/100 км (з акумулятором)	2-3 л/100 км (з акумулятором)

Але треба зважати на те, що на високих швидкостях ефективність використання послідовних гібридів знижується.

У паралельній схемі ДВЗ і накопичувач з'єднані з приводом коліс через диференціал або муфти. З паралельною схемою є деяка плутанина, пов'язанна з принциповими відмінностями у роботі. Спочатку (до 2000-х років) в таких системах електродвигун виконував функцію допоміжного пристрою для ДВЗ. Окреме використання електродвигуна було неможливим. Ці автомобілі використовували просту паралельну архітектуру, де електродвигун лише допомагав під час прискорення або їзди в гору. Прикладом такого авто є перше покоління Honda Insight (1999 рік). Вже у системі Toyota Hybrid System (THS-II), хоч вона і вважається комбінованою, електродвигун міг працювати незалежно на коротких дистанціях.

У паралельних системах окреме використання стало можливим пізніше, приблизно з 2010-х років, із появою вдосконалених трансмісій і більших батарей. Наприклад, в Honda Accord Hybrid (з 2014 р.) з'являється можливість повністю електричного режиму. В моделі Hyundai Ioniq Hybrid (з 2016 р.) електродвигун працює незалежно на низьких швидкостях, а ДВЗ підключається при збільшенні навантаження. Модель Kia Niro Hybrid (з 2016 р.) до швидкості 60 км/год можуть рухатись у режимі EV. В Toyota RAV4 Hybrid (з 2021 р.) також є незалежний електричний режим на низьких швидкостях.

Отже зараз майже всі сучасні гібриди з паралельною архітектурою можуть використовувати електродвигун окремо, хоча можливість обмежується зарядом батареї та швидкістю, але через наявність в експлуатації моделей авто з паралельною схемою, які не можуть рухатись за рахунок лише одного електродвигуна, гібриди називають м'якими.

У загальних рисах до переваг паралельних гібридів можна віднести:

- більш висока ефективність у різних режимах роботи. Особливо це помітно під час прискорення або їзди на високих швидкостях;
- можливість рекуперації енергії. Особливо це актуальне для міських умов;
- гнучкість у використанні (стосується більш сучасних авто з паралельною схемою). Такі машини можуть їздити на електриці по місту і за допомогою ДВЗ за містом;
- більша універсальність за рахунок наявності двох незалежних джерел енергії;
- покращені показники потужності за рахунок можливості одночасної роботи ДВЗ та електрдвигуна. Це особливо актуально під час пікових навантажень.

До недоліків паралельних гібридів можна віднести:

- більша складність конструкції;
- більші витрати на обслуговування і ремонт;

- менша ефективність у деяких режимах у порівнянні з послідовною схемою (при низьких навантаженнях);
- збільшена вага;
- більш складна система керування розподілом енергії між ДВЗ і електродвигуном;
- менший пробіг на електротязі у порівнянні з сучасними електромобілями.

Повні гібриди іноді плутають з паралельними, але все ж різниця є. Особливостями повного гібриду мають потужніші електродвигуни і більші батареї, що дозволяє їм рухатися на електриці довше у порівнянні з паралельними гібридами. У повногібридних системах електродвигун здатний забезпечувати незалежний рух автомобіля на низьких і середніх швидкостях.

Типовий повний гібрид може проїхати біля 5 км виключно на електриці. Наприклад, Toyota Prius (4-е покоління, 2022 р.) і Ford Fusion Hybrid на електриці може проїхати до 5 км. Тобто можна бачити, що повні гібриди все ще значно обмежені порівняно з плагін-гібридами, оскільки їхні батареї не мають великої ємності (зазвичай 1…2 кВт·год).

Наступним кроком за рінем ефективності можна назвати комбіновані гібриди (Combined Hybrid). Дана схема поєднує можливості послідовної та паралельної структури. Завдяки цьому вони можуть адаптуватися до різних умов руху, вибираючи найефективніший режим роботи.

Немає сенсу описувати деталі послідовної і паралельної схем, які задіюються в процесі руху, оскільки вони вже були описані вище. Зауважимо лише деякі нюанси. Послідовний режим у комбінованому гібриді використовується на низьких швидкостях або при частих зупинках (наприклад, у місті), а паралельний режим використовується на високих швидкостях або при великих навантаженнях (наприклад, підйом на пагорб).

Загалом комбінований режим характеризується одночасним заряджанням батареї та приводом коліс двигуном внутрішнього згоряння, доповнюючи роботу електродвигуна.

Ємність батарей складає 1,5…3,0 кВт·год. Потужність електродвигуна складає має широкий діапазон, наприклад, потужність електродвигуна Toyota Prius складає 53 кВт, а у Honda Accord Hybrid – 135 кВт. Потужність ДВЗ також має діапазон від 70 до 110 кВт.

Запас ходу на електриці залежно від ємності батареї та режиму руху складає від 2 до 15 км.

Економія пального у міському циклі порівняно з традиційними автомобілями з ДВЗ можито досягати 50 %. Середня витрата пального складає 3,5…5,0 л/100 км.

Переваги комбінованих гібридів:

- адаптаптація до умов руху, автоматично перемикаючись між режимами (послідовний режим більше підходить для міста, паралельний – для траси);
- економічність завдяки оптимальному використанню енергії;
- екологічність;
- плавність ходу.

Недоліки комбінованих гібридів:

- більш висока вартість за рахунок ускладнення конструкції трансмісії та збільшення компонентів;
- обмежений запас ходу на електриці;
- більш складне обслуговування.

І нарешті верхня ланка гібридів – плагін-гібриди (Plug-in Hybrid). Цей тип гібридних автомобілів має збільшену батарею порівняно з повними гібридами та можуть заряджатися від зовнішнього джерела електроенергії (розетки чи зарядної станції). Вони дозволяють проїжджати значні відстані виключно на електриці та працюють як звичайні гібриди після розряду батареї.

Дана система дозволяє вже проїзджати на електриці до 80 км, а розробляються плагін-гібриди, які зможуть проїзджати більше 100 км.

Режими роботи включають повністю електричний, як звичайний гібрид (ДВЗ + електродвигун), комбінований. Як правило, електричний режим покриває покриває потреби переміщень по місту. Гібридний режим

використовується, коли батарея розряджена або потрібна додаткова потужність. І у комбінованому режимі електродвигун підтримує ДВЗ для економії палива. Важливою особливістю даної системи є здатність заряджати батарею від зовнішнього джерела електроенергії, і можливість заряджатися як від мережі змінного струму (AC), так і від швидкісних зарядних станцій постійного струму (DC) (в залежності від моделі).

Яскравими представниками даної системи є Mitsubishi Outlander PHEV, Hyundai Tucson Plug-in Hybrid, Volvo XC90 Recharge T8.

Переваги плагін-гібридів:

- висока гнучкість використання;
- висока екологічність;
- можливість заряджатися від відновлюваних джерел енергії;
- низькі витрати на паливо;
- висока продуктивність, що забезпечує покращене прискорення та плавність ходу.

Недоліки плагін-гібридів:

- висока ціна (наприклад, Toyota Prius Prime коштує приблизно на 25…30 % дорожче, ніж Toyota Prius).
- збільшена вага;
- більш висока вартість обслуговування та ремонту, потребує кваліфікованого персоналу.

Порівняння характеристик різних систем наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняльна характеристика гібридів

Характеристика	Мікрогібрид (Mild Hybrid)	Послідовний (Series Hybrid)	Паралельний (Parallel Hybrid)	Повний (Full Hybrid)	Комбінований (Combined Hybrid)	Плагін-гібрид (PHEV)
1	2	3	4	5	6	7
Джерело руху	ДВЗ із підтримкою електромотора	Електродвигун	ДВЗ і електродвигун	ДВЗ і електродвигун	Електродвигун, ДВЗ або обидва	Електродвигун, ДВЗ або обидва

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7
Ємність батареї, кВт·год	0,2…1,0	1,5…40	1,0…2,0	1,0…2,0	1,5…3,0	8…18
Запас ходу на електриці, км	Немає	2…180	1…5	2…8	2…5	40…80
Режими роботи	ДВЗ + допомога електромотора	EV + ДВЗ як генератор	ДВЗ або комбінований	EV, ДВЗ або комбінований	Серійний, паралельний, комбінований	EV, ДВЗ або комбінований
Економія пального в місті, %	10…15	30…50	20…40	30…50	30…50	40…70
Середня витрата палива, л/100 км	4,5…7,0	2,5…4,0	3,5…5,0	3,5…5,0	3,5…4,8	1,5…2,5
Збільшення вартості відносно бензинового авто, %	+5…10	+25…50	+20…30	+20…30	+25…35	+30…50
Призначення	Підвищення економії пального	Міський рух	Універсальність	Міський рух	Змішані умови	Змішані умови
Складність системи	Низька	Середня	Середня	Висока	Дуже висока	Дуже висока
Час зарядки, годин	Немає	Немає	Немає	Немає	Немає	2…6

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7
Зменшення викидів CO_2 (у порівнянні з ДВЗ), %	10	30…50	20…40	30…50	30…50	40…80
Потужність електродвигуна, кВт	5–15	50–200	20–90	50–90	50–135	60–200
Тип приводу	Передній	Передній/задній	Передній/повний	Передній/повний	Передній/повний	Передній/повний
Збільшення ваги автомобіля (порівняно з ДВЗ), кг	50…100	150…300	150…250	200…300	200…350	250…400
Приклади моделей	Audi A6 MHEV	Nissan e-Power, BMW i3 REX	Honda Civic Hybrid, Hyundai Ioniq Hybrid	Toyota Prius, Ford Fusion Hybrid	Toyota Prius (THS-II), Honda Accord Hybrid	Toyota Prius Prime, Mitsubishi Outlander PHEV

Якщо коротко, то можна зробити таке узагальнення:

- мікрогібриди мають найбільш доступні за вартістю та технологією, але економія палива мінімальна;
- послідовні гібриди оптимальні для міста завдяки високій економії палива, але мають обмежену ефективність на трасі;
- паралельні гібриди забезпечують баланс між потужністю та економічністю, підходять для змішаного руху;

- повні гібриди схожі на паралельні, але мають можливість руху тільки на електриці на короткі дистанції;
- комбіновані гібриди мають більшу універсальність за рахунок гнучкої архітектури, але є дорожчими у виробництві;
- плагін-гібриди мають найбільший запас ходу на електриці, значно знижують викиди, але коштують дорожче і потребують кваліфікованого персоналу для технічного огляду та ремонту.

1.3 Фактори, що стримують масове впровадження гібридного транспорту

Цілком логічно вказати на головну причину недостатнього розповсюдження даної технології, а саме збільшену ціну гібридноих транспортних засобів. Вище вже наводилося порівняння витрат і доцільність придбання більш дорогих гібридних моделей. Проте, збільшення частки гібридного транспорту може дозволити покращити екологічну ситуацію, особливо в крупних містах, з насиченним рухом. Особливо привертають увагу гібриди - плагіни, оскільки вони можуть використовуватися, як електромобілі у містах і для поїздок у передмістя, а вже далеких поїздок використовувати ДВЗ.

Розглянемо й інші гальмуючі фактори.

Одним із значних факторів, що гальмує розповсюдження гібридів є необхідність у більш кваліфікованому персоналі для технічного обслуговування і ремонту рухомого складу. І хоча такі спеціалісти насичують ринок праці, проте їх все одно не вистачає. Даний факт поглиблюється за рахунок багатьох варіацій в різних моделях, відсутності уніфікації, необхідності програмування блоків керування і т.д.

Попередній пункт тягне за собою інший фактор, а саме здорожчення експлуатаційно-ремонтних витрат. Логічно, що вбирання в себе позитивних рис від комбінації елементів електротяги і класичного ДВЗ тягне за собою і наявність недоліків цих обох видів тяги.

Наступним фактором є недостатня розповсюдженість зарядної інфраструктури (актуальна для плагинів). Дійсно, якщо зпочатку електромобілі мали великий популярність і, відповідно, попит, то згодом цей попит почав знижуватись (у відносних одиницях). Аналіз показав, що головними причинами цього є довга зарядка (до 8 годин від домашньої мережі), недостатньо розвинена зарядна інфраструктура. Але сюди ж можна віднести і недостатню кількість станцій техобслуговування, запасних частин, спеціалістів. Деградація акумуляторних батарей приводить до необхідності її заміни, а її вартість можя сягати 50 % від вартості автівки. Якщо людина живе в багатоповірхівці, то зарадка електромобіля ще більше ускладнюється. Навіть швидкісні зарядні станції не вирішують питання з достатністю інфраструктури. Перераховані недоліки стосуються саме гібридів-плагінів у сенсі їх вигоди використання у місті або заміських коротких поїздок. Якщо немає стабільного доступу до електроенергії, то більш дорогий гібрид втрачає частину свого функціоналу, за який було заплачено при придбанні авто. Шляхи для часткового вирішення цих проблем буде розглянуто далі.

2 АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ГІБРИДНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

2.1 Основні енергетичні показники ГТЗ та критерії їх оцінки

Основні енергетичні показники гібридних транспортних засобів (ГТЗ) характеризують їхню енергоефективність, продуктивність та вплив на довкілля. Ці показники є ключовими параметрами, які визначають ефективність використання енергії, отриманої як з паливних, так і з електричних джерел. Вони дають змогу оцінити, наскільки ефективно транспортний засіб виконує свої функції, зберігаючи при цьому оптимальний баланс між потужністю, витратами енергії та екологічною безпечністю. Зокрема, аналіз енергетичних показників охоплює такі аспекти, як питомі витрати палива, споживання електроенергії, ефективність рекуперації енергії, а також продуктивність силових агрегатів. Ці характеристики дозволяють визначити, наскільки транспортний засіб відповідає сучасним вимогам до енергоощадності, динамічності та екологічності, що є особливо актуальним в умовах глобального переходу до більш сталих і чистих технологій у транспортній галузі.

Розглянемо більш детально основні енергетичні показники гібридного транспортного засобу.

1) Споживання енергії є одним із надважливих показників, який безпосередньо впливає на економіко-екологічні характеристики транспортного засобу. Також, даний показник впливає на максимальний пробіг (запас ходу) на одній зарядці/заправці.

Питомі витрати палива відображає кількість палива, споживаного на одиницю відстані (л/100 км). Для ГТЗ важливо враховувати споживання як рідкого палива, так і електроенергії. Відповідно, споживання електроенергії – це кількість енергії (кВт·год/100 км), яка необхідна для роботи електропривода.

Споживання енергії транспортним засобом залежить від багатьох факторів. Одним із таких факторів є тип і характеристики силової установки.

Ефективність двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) залежить від його об'єму, конструкції, технологій впорскування палива, систем турбонаддуву та роботи в різних режимах. Наприклад, двигуни з прямим впорскуванням або з системою Start-Stop мають нижчі витрати палива.

ККД електродвигуна значно вищий, ніж у ДВЗ. Витрати електроенергії залежать від типу електродвигуна, потужності, частоти роботи в різних режимах та рівня ефективності систем рекуперації енергії.

Маса транспортного засобу впливає таким чином, що чим вища маса транспортного засобу, тим більшої кількості енергії необхідно для розгону та подолання опору руху. Легкі матеріали для конструкції автомобіля (наприклад, алюміній, композити) можуть знизити масу та витрати енергії.

Умови експлуатації, режим руху також має вплив. У міських умовах, з частими зупинками та розгонами, споживання енергії вище через роботу в неефективних режимах. На трасі витрати енергії зазвичай нижчі через стабільну швидкість. Сюди ж можна віднести рельєф дороги. Так, на підйомах автомобіль витрачає більше енергії, тоді як на спусках можливе її часткове повернення через рекуперацію. Стиль водіння безпосередньо впливає на витрати енергії. Агресивний стиль водіння з частими прискореннями та гальмуваннями значно підвищує витрати енергії. Багато ГТЗ мають режими економії (Eco Mode), які зменшують витрати енергії за рахунок обмеження потужності двигуна.

Кліматичні умови мають такий вплив, що низькі температури можуть знижувати ефективність акумулятора та збільшувати витрати на обігрів салону. Високі температури підвищують споживання через роботу кондиціонера.

Аеродинамічні властивості мають чималий вплив на енергетичні показники. Опір повітря залежить від форми кузова та швидкості автомобіля. ГТЗ із покращеними аеродинамічними характеристиками (низький коефіцієнт опору) споживають менше енергії на високих швидкостях.

Втрати енергії у трансмісії залежать від її типу (механічна, автоматична, варіатор) та якості з'єднання компонентів.

Високоефективна рекуперація знижує загальні витрати енергії.

2) Коефіцієнт корисної дії (ККД) відображає співвідношення між корисною потужністю на виході і загальним споживанням енергії. Для ГТЗ зазвичай окремо аналізують ККД двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), електродвигуна та системи рекуперації. Високий ККД електродвигуна є однією з основних переваг ГТЗ порівняно з традиційними автомобілями.

ККД двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) відображає ефективність перетворення енергії палива на механічну роботу і залежить від типу ДВЗ (атмосферний, турбований), технологій впорскування палива (безпосереднє або непряме), роботи в оптимальному діапазоні обертів. У сучасних ДВЗ ККД становить 30…40 %, решта енергії втрачається у вигляді тепла.

Електродвигуни зазвичай мають ККД на рівні 85…95 % і залежить від типу двигуна (асинхронний, синхронний, з постійними магнітами), ефективності електронної системи керування.

ККД системи рекуперації енергії визначає ефективність повернення кінетичної енергії у вигляді електричної енергії до акумулятора під час гальмування.

ККД трансмісії оцінює втрати енергії при передачі крутного моменту від двигуна до коліс. Зауважимо, що автоматичні коробки передач мають нижчий ККД порівняно з механічними.

Сукупний ККД ГТЗ залежить від взаємодії всіх компонентів. У сучасних гібридних транспортних засобах сукупний ККД силової установки може досягати 40…50 %, що значно вище, ніж у традиційних автомобілів із ДВЗ.

На ККД впливають такі фактори, як ефективність компонентів силової установки, режими роботи, система рекуперації, втрати в трансмісії та шинах, умови експлуатації, температурні режими.

3) Запас ходу. Загальний запас ходу (кілометри), який транспортний засіб може пройти на одній зарядці акумулятора та повному баку палива.

Електричний запас ходу – це дистанція, яку автомобіль може подолати лише на електроенергії, без залучення ДВЗ.

Даний показник залежить від декількох чинників, наприклад, ємності батареї, ємності паливного баку, ККД силової установки, аеродинамічних характеристик тощо. Цей показник впливає на економічно складову об’єкту, оскільки чим більший запас ходу, тим привабливішим є транспортний засіб.

Електричний запас ходу визначає відстань, яку автомобіль може подолати, використовуючи лише енергію акумуляторної батареї і залежить від ємності батареї (кВт·год) та ефективності електродвигуна. Зазвичай він становить від 30 до 100 км для традиційних гібридів (plug-in) і більше 300 км для електромобілів.

Сумарний запас ходу включає відстань, яку автомобіль може подолати, використовуючи обидва джерела енергії, а саме акумулятор і паливо і може досягати 500…1000 км залежно від ємності паливного бака, акумулятора та ефективності систем. На запас ходу впливають такі фактори, як ємність акумулятора, споживання енергії електродвигуном, розмір паливного бака і ефективність ДВЗ, режиму використання енергії, стилю водіння, умов експлуатації та ефективності системи рекуперації. Зрозуміло що, чим вища ємність батареї, тим більший запас ходу в електричному режимі. Наприклад, акумулятор на 12 кВт·год дає приблизно 50…60 км електричного запасу ходу. Економічний електродвигун із високим ККД зменшує витрати енергії і збільшує запас ходу. Середнє споживання становить 15…20 кВт·год/100 км.

Вплив паливного бака і ефективність ДВЗ. Наприклад, транспортний засіб із баком на 40 літрів та витратами 5 л/100 км може подолати до 800 км.

Режим використання енергії. Гібридні автомобілі зазвичай працюють у трьох режимах:

- електричний режим, запас ходу обмежується ємністю батареї;
- гібридний режим, коли використовується як акумулятор, так і паливо, що подовжує запас ходу;
- традиційний режим (ДВЗ), в якому використовується лише двигун внутрішнього згоряння.

Вплив інших чинників, таких як стиль водіння, умови експлуатації, рекуперація енергії було розглянуто вище був наведений вище.

Приклади запасу ходу в сучасних ГТЗ:

- Toyota Prius Plug-in Hybrid має електричний запас ходу 50 км, а сумарний запас ходу – понад 900 км;
- Hyundai Ioniq Plug-in Hybrid має електричний запас ходу 63 км, а сумарний запас ходу близько 1100 км;
- Chevrolet Volt має електричний запас ходу 85 км, а сумарний запас ходу близько 675 км.

4) Показники рекуперації енергії. Ефективність системи рекуперації відображає відсоток енергії, що повертається в акумулятор при гальмуванні. Рекуперація є важливим елементом енергозбереження, що суттєво підвищує ефективність роботи ГТЗ.

До основних показників системи рекуперації енергії можна віднести ефективність рекуперації (ККД рекуперації), максимальну потужність рекуперації.

Як вже зазначалося ефективність рекуперації (ККД рекуперації) відображає відсоток кінетичної енергії, що перетворюється на електроенергію і повертається в акумулятор. Для сучасних ГТЗ рівень рекуперації становить 60…70 %. Під максимальною кількістю енергії (кВт) розуміється енергія, яку система може зберігати під час гальмування і залежить від потужності електродвигуна та ємності акумулятора. Крім того, оцінюється за відсотком уповільнення, що забезпечується без використання традиційних гальм.

При розробці системи рекуперації розраховують втрати енергії під час рекуперації, які включають механічні втрати, електричні втрати у системі передачі енергії, а також втрати на зарядку акумулятора.

На ефективність рекуперації впливають такі фактори, як тип і потужність електродвигуна, ємність і характеристики акумулятора, стиль водіння, рельєф місцевості, система управління енергією.

До переваг сучасних ефективних систем рекуперації відносять збільшення запасу ходу, повернення енергії до акумулятора, що дозволяє зменшити залежність від палива або зарядки, зниження зносу гальмівної системи, що збільшує їхній термін служби і безумовно, екологічні переваги, а саме зменшення енергетичних втрат і підвищення загальної ефективності ГТЗ сприяє зниженню викидів.

Розглянемо деякі приклади ефективності рекуперації в сучасних ГТЗ:

- Toyota Prius, в якій рівень рекуперації доходить до 65% кінетичної енергії;
- Tesla Model 3, в якій інтенсивне рекуперативне гальмування дозволяє відновлювати до 70% енергії

Цікаво акцентувати увагу на різниці між ефективністю систем рекуперації залізничного електрорухомого складу (до 15 %) і електромобілями або ГТЗ (до 70 %). Згідно наукових досліджень, залізничний електрорухомий склад може мати ефективність рекуперації до 40…45 %, але це для гірських умов і мова йде лише про рекуперацію. Проте, треба враховувати, що для підйому на височину необхідно витрати енергію, а значить втрати енергії у відносних величинах буде більшою.

Різниця у рівнях рекуперації енергії між електропоїздами / електровозами та електромобілями чи гібридними транспортними засобами (ГТЗ) пов'язана з кількома технічними, експлуатаційними та фізичними аспектами. Однією з причин є відмінності в масі та кінетичній енергії.

Електропоїзди/електровози значно важчі за електромобілі та ГТЗ. Їхня кінетична енергія під час руху значно більша, і її ефективне перетворення в електроенергію обмежене фізичними властивостями електродвигунів і акумуляторних систем. Частина енергії втрачається у вигляді тепла через тертя та механічні втрати. І хоча накопичена кінетична енергія локомотива значно більше, ніж автівки, проте для накопичення цієї енергії потребується і більше первинної енергії, а за рахунок теплових втрат повернути енергію через рекуперацію в абсолютних величинах можна більше, а у відносних менше.

Тобто, інакше кажучи, з енергетичної точки зору чим менша маса транспортного засобу, тим краще.

Іншою причиною є різниця у системі акумуляції енергії. У більшості електропоїздів/електровозів рекуперована енергія не зберігається на борту, а передається назад у контактну мережу. Однак ефективність цього процесу обмежена залежністю від стану контактної мережі та наявності іншого поїзда, який може використати цю енергію. Тобто на даній ділянці має бути не тільки електрорухомий склад, а він ще має бути у режимі тяги. Це є суттєвим обмеженням. Хоча слід зауважити, що на сучасному рухомому складі розробляється сучасна система накопичення рекуперованої енергії у суперконденсаторах та батареях. Ці системи звичайно високовартісні і ускладнюють конструкцію ЕРС. Іншим напрямком розвитку даної системи є встановлення стаціонарних накопичувачів вздовж колій на певних відстанях від тягових підстанцій. Проте, такі системи все ще знаходяться на стадіях розробки і мають високу вартість.

У електромобілях і ГТЗ рекуперована енергія одразу накопичується в батареях, які спеціально оптимізовані для таких циклів зарядки. Це значно підвищує ефективність використання повернутої енергії.

Багато старіших моделей електропоїздів використовують двигуни постійного струму, які менш ефективні у режимі генерації, ніж двигуни змінного струму. Хоча зауважимо, що багато сучасного ЕРС мають вже асинхронні машини.

У електромобілях використовуються інноваційні двигуни з постійними магнітами або асинхронні двигуни, які мають високий ККД у режимі рекуперації.

Сучасні електромобілі та ГТЗ мають складні системи керування енергетичними потоками, які оптимізують процес рекуперації. Ці системи дозволяють максимально ефективно перетворювати кінетичну енергію в електричну, зменшуючи втрати. У залізничного ЕРС управління рекуперацією залежить від електромережі, що створює додаткові обмеження.

У дещо кращому з точки зору ефективності системи рекуперації мають трамваї/тролейбуси за рахунок більш частих гальмувань (зупинки, світлофори) і метро (зупинки).

Отже, електромобілі та ГТЗ мають високий рівень рекуперації завдяки компактним, високоефективним системам акумуляції, оптимізованим для індивідуального використання. У той час як електропоїзди стикаються з обмеженнями через масу, залежність від інфраструктури та складність зберігання енергії на борту. Це пояснює, чому рекуперація в ГТЗ і електромобілів є значно ефективнішою.

Потужність та енергетична щільність акумулятора. Потужність акумуляторної батареї вимірюється у кВт·год і визначає, скільки енергії вона може зберігати.

Енергетична щільність показує кількість енергії на одиницю маси акумулятора (Вт·год/кг), що впливає на загальну вагу транспортного засобу. Якщо говорити у відносних поняттях, то звичайно чим вище енергетична щільність, тим краще.

Екологічні показники. Викиди CO_2 (г/км) – кількість вуглекислого газу, що викидається в атмосферу. Викиди інших шкідливих речовин (NO_x, CH_4 тощо) використовують для оцінки впливу на довкілля.

Час зарядки акумулятора. Час, необхідний для зарядки акумулятора до повної місткості за різних типів зарядних станцій (повільна, швидка зарядка).

Цей показник безпосередньо впливає на зручність використання ГТЗ і також впливає на комерційну складову транспортного засобу. На даний час дослідники різних країн намагаються знайти рішення для швикої зарадки акумулятоних батарей.

Динамічні характеристики. Максимальна потужність системи (кВт), яка враховує сумарну потужність ДВЗ і електродвигуна. Прискорення (0-100 км/год) є важливим показником для оцінки продуктивності.

Зносостійкість компонентів розглядвє стабільність та тривалість роботи акумуляторних батарей, електродвигуна та ДВЗ, а також здатність системи витримувати цикли зарядки-розрядки без втрати продуктивності.

Отже, перелічені показники допомагають оцінити загальну ефективність, економічність та екологічність ГТЗ. Для кожної моделі ці характеристики можуть суттєво варіюватися залежно від типу гібридної системи (повний, паралельний, послідовний гібрид).

2.2 Взаємозв'язок між схемами побудови ГТЗ і енергетичними показниками

У попередньому розділі вже розглядалися пиатння, пов'язані з будуовою гібридів. Дані питання було опрацьовано з точки зору їх конструктивної побудови. Зараз цікаво їх розглянути з енергетичної точки зору.

Енергетичні показники гібридних транспортних засобів (ГТЗ) тісно пов'язані зі схемами їх побудови (послідовна, паралельна, комбінована). Кожна схема визначає, як саме відбувається взаємодія між двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ), електродвигуном та акумулятором, що впливає на ефективність використання енергії, витрати палива, запас ходу та інші характеристики.

Послідовна схема (рис. 2.1). У такій схемі електричний двигун повністю відповідає за механічний зв'язок з колесами. Другий електричний двигун, який служить генератором і перетворює механічну енергію в електричну, підключений до двигуна внутрішнього згоряння. Це енергія або надходить до першого електричного двигуна транспортного засобу, або допомагає заряджати акумулятор. Як вже зазначалось, однією з переваг цієї архітектури є те, що вона дозволяє керувати режимом роботи двигуна внутрішнього згоряння, щоб він працював в оптимальному режимі. Тим не менш, вартість, обсяг і вага цієї архітектури збільшуються двома електричними двигунами. Крім того, велика кількість перетворень енергії, які відбуваються між колесами та двигуном

внутрішнього згоряння, зменшує глобальну ефективність конструкції. Дійсно, перетворення енергії від механічної до електричної та потім назад до механічної зменшує загальну ефективність системи, і тому ця архітектура не є корисною.

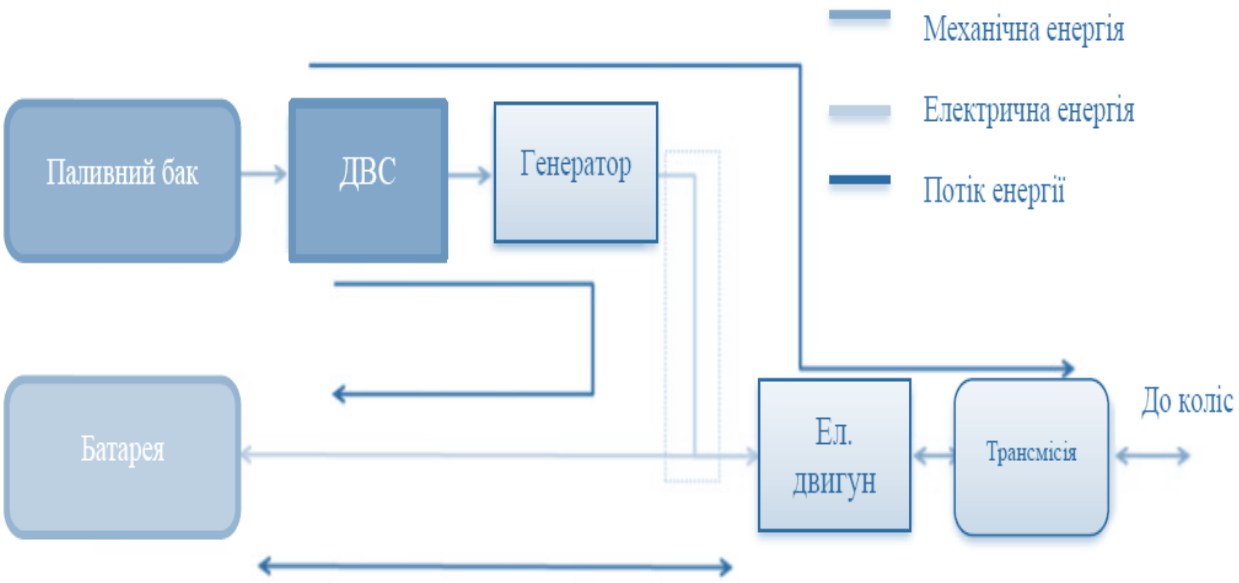


Рисунок 2.1 – Послідовна схема ГТЗ

Тобто ДВЗ не підключений безпосередньо до коліс, а використовується лише для генерації електроенергії, яка заряджає акумулятор або живить електродвигун, а вже електродвигун завжди відповідає за рух автомобіля.

Енергетичні показники послідовної гібридної схеми (ПГС). Електродвигун працює в оптимальному діапазоні потужності, оскільки його навантаження регулюється електронною системою керування. Це дозволяє мінімізувати втрати енергії в процесі її використання. Оскільки електродвигун безпосередньо приводить у рух колеса, втрати, характерні для механічних трансмісій, відсутні.

Оптимальний режим роботи ДВЗ. Оскільки двигун внутрішнього згоряння працює як генератор у стабільному діапазоні обертів, то його ККД є максимально можливим. Це дозволяє уникнути втрат, характерних для роботи ДВЗ в умовах змінного навантаження.

Проблема багатоступеневого перетворення. Енергія від ДВЗ спочатку перетворюється в електричну (генератор), а потім у механічну (електродвигун). Кожен етап супроводжується втратами: генератор втрачає 5…10 % енергії при перетворенні; електродвигун втрачає ще 5…7 % при роботі.

У послідовній схемі рекуперація енергії реалізується ефективніше, оскільки електродвигун одночасно працює як генератор і не має обмежень, пов’язаних із механічною трансмісією. Коефіцієнт рекуперації може досягати 60…70 %.

Споживання енергії у міському циклі при послідовній схемі показує найкращу ефективність у міських умовах завдяки постійному використанню електродвигуна, максимізації рекуперації енергії, зменшенню часу роботи ДВЗ.

Споживання енергії на трасі послідовна схема менш ефективна, оскільки енергія постійно проходить через генератор та електродвигун, що збільшує втрати порівняно з прямим приводом у паралельних схемах.

Основні втрати енергії можна поділити на втрати в ДВЗ, в генераторі, в акумуляторі.

Незважаючи на стабільний режим роботи, ДВЗ все одно має теплові втрати, що становлять до 60% від енергії палива. Це пов’язано з фізикою процесу роботи ДВЗ, тому такі втрати будуть у будь-якому разі. Ефективність сучасних генераторів становить 90…95 %, але частина енергії все ж втрачається. Втрати в акумуляторі відбувається під час зарядки та розрядки акумулятора, де втрачається 5…10 % енергії через внутрішній опір. Також слід зазначити, що акумуляторні батареї для продовження їх ресурсу мусять працювати у оптимальному температурному режимі. А значить необхідно витрачати енергію на підігрів/охолодження (в залежності від пори року) акумуляторної батареї.

Енергоефективність послідовної схеми багато в чому залежить від ємності акумулятора. Велика ємність дозволяє збільшити запас ходу в електричному режимі, зменшити частоту ввімкнення ДВЗ. Але, якщо

акумулятор розряджений, ДВЗ доводиться постійно працювати, що знижує енергетичну ефективність.

У зв'язку з наведеним вище витікає, що максимальна ефективність послідовної схеми є у міських умовах, мінімальні втрати енергії через трансмісію та знижені викиди шкідливих речовин завдяки частому використанню електродвигуна.

У той же час, така схема має підвищені втрати через багатоступеневе перетворення енергії, низьку ефективність на високих швидкостях або тривалих маршрутах, обмеження потужності системи, якщо акумулятор не може підтримувати потрібний рівень енергії.

Послідовна схема має свої унікальні переваги у міських умовах, але енергетичні показники знижуються через багатоступеневі перетворення енергії та обмеження на трасі. Її вибір виправданий для умов із частими зупинками, низькими швидкостями та потребою у зниженні викидів.

Паралельна схема (рис. 2.2). У паралельній схемі дві системи механічно з'єднані з колесами і обидві можуть рухати транспортний засіб або разом, або окремо. Як видно потрібен лише один електричний двигун, що представляє перевагу щодо обсягу, ваги та ціни.

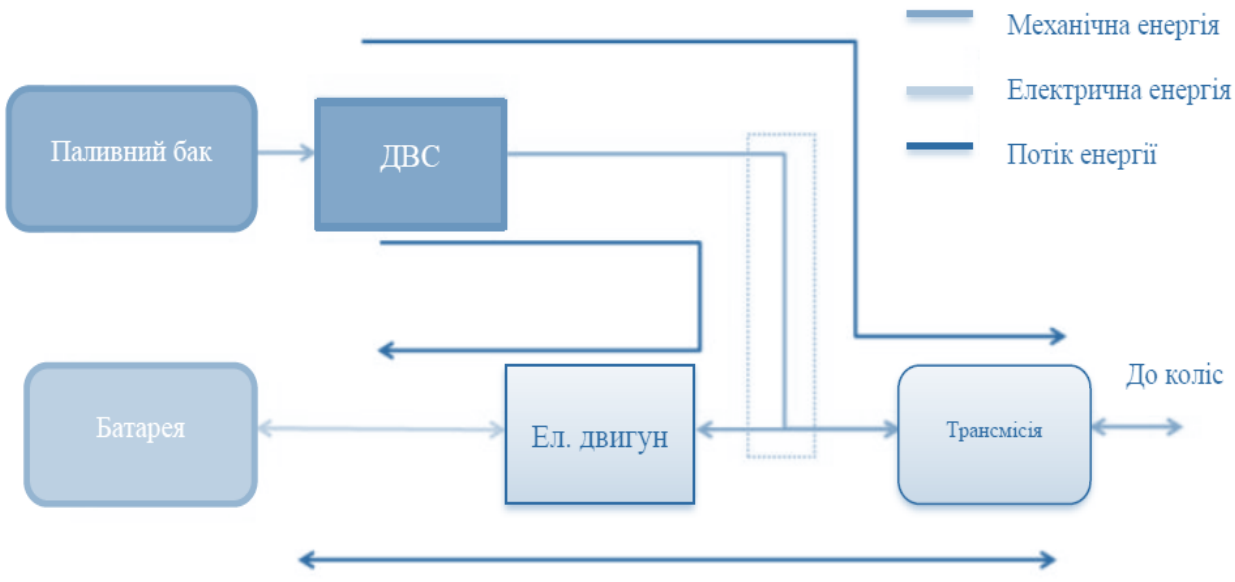


Рисунок 2.2 – Паралельна схема ГТЗ

Тут силова муфта є більш складною, ніж для послідовної архітектури. Існує два типи механічних систем зчеплення: швидкісні та муфтові з крутним моментом: швидкісне зчеплення може бути можливим завдяки планетарному набору передач; муфта крутного моменту є найпоширенішою системою зчеплення, яка використовується в цій схемі.

Можна виділити три основні методи зчеплення: зчеплення перед передачею, зчеплення після передачі та зчеплення через дорогу. Муфта перед передачею полягає у використанні тягового електричного двигуна перед системою передач (шестерня коробки передач, наприклад, варіатор), або ремінним шківом (тип Start & Stop низької потужності), або наприклад, зірочки. Постмуфта можлива завдяки інтеграції електричного двигуна після передачі. Нарешті, зчеплення через дорогу полягає в з'єднання двох енергетичних систем на різних осях коліс.

Переваги паралельної архітектури випливають з того, що вона дуже схожа на звичайний транспортний засіб. Ціна, розмір і вага зросли. Тим не менш, двигун внутрішнього згоряння безпосередньо пов'язаний з колесами, що робить його більш зручним для керування, щоб знайти свою найкращу робочу область. Цей тип архітектури використовується в основному в мікро- або м'якогібридних транспортних засобах як електричний прискорювач для допомоги двигуну внутрішнього згоряння.

При даній схемі ДВЗ може працювати в оптимальному діапазоні обертів, оскільки електродвигун допомагає компенсувати перевантаження, наприклад, під час прискорення або підйому на гору. Оскільки ДВЗ безпосередньо підключений до коліс, відсутні втрати, пов'язані з багатоступеневим перетворенням енергії (як у послідовній схемі).

При високих швидкостях на трасі ДВЗ демонструє максимальний ККД. У міських умовах, де часто потрібне уповільнення та зупинки, ефективність падає через часті перемикання між режимами.

У даній схемі електродвигун доповнює ДВЗ під час прискорення або на малих швидкостях, де ДВЗ працює з низьким ККД. У паралельній схемі електродвигун рідко використовується як основне джерело енергії, що знижує його внесок у загальну енергоефективність. Оскільки електродвигун безпосередньо працює з колесами, втрати енергії на передачу є невеликими.

Через спільне використання ДВЗ і електродвигуна, рекуперація в паралельній схемі менш ефективна порівняно з послідовною схемою. Частина енергії витрачається на підтримку роботи ДВЗ. Як і в послідовній схемі, рекуперація обмежена можливістю акумулятора приймати енергію.

Паралельна схема демонструє максимальну ефективність у режимі тривалого руху на високій швидкості, оскільки ДВЗ працює безпосередньо з колесами, а електродвигун підтримує стабільність роботи системи. Через часте перемикання між джерелами енергії споживання палива і загальна ефективність є нижчими, ніж у послідовній схемі.

У паралельній схемі з'єднання ДВЗ і електродвигуна вимагає складної трансмісії, що може створювати додаткові втрати на передачу енергії. Втрати на підтримку роботи двох систем означає, що одночасна робота ДВЗ і електродвигуна створює втрати, пов'язані з керуванням і координацією енергетичних потоків. Застосування механічних вузлів у системах перемикання між джерелами енергії може знижувати ефективність.

У паралельній схемі ДВЗ є основним джерелом енергії, тому вимоги до ємності акумулятора нижчі. Це дозволяє зменшити вартість системи. Завдяки використанню двох джерел енергії запас ходу значно більший, ніж у послідовній схемі.

З енергетичної точки зору паралельна схема має оптимальне використання ДВЗ на високих швидкостях забезпечує максимальний ККД, гнучкість у використанні енергії, оскільки ДВЗ і електродвигун можуть працювати окремо або разом, залежно від умов, менша залежність від акумулятора, система не вимагає великої ємності батареї, що знижує вартість.

Часте перемикання між джерелами енергії створює додаткові втрати. Необхідність інтеграції двох систем і трансмісії робить схему технічно складнішою. Дана схема має обмежену ефективність рекуперації, через одночасну роботу ДВЗ і електродвигуна рівень рекуперації нижчий, ніж у послідовній схемі.

Порівняння ефективності в умовах експлуатації. Паралельна схема у міських умовах має середню ефективність, оскільки електродвигун менше використовується, ніж у послідовній схемі. А на трасі найвища ефективність серед усіх схем відбувається завдяки прямому підключенню ДВЗ до коліс.

Паралельна схема оптимальна для використання в умовах тривалого руху на трасі, де ДВЗ працює з максимальною ефективністю, а електродвигун підтримує стабільність системи. Водночас у міських умовах її ефективність поступається послідовній схемі через складність управління енергетичними потоками та менш ефективну рекуперацію.

Комбінована схема (послідовно-паралельна) (рис. 2.3) поєднує паралельну та послідовну архітектуру. Використовуються дійсно дві системи силових муфт. Цей метод поєднує переваги кожної архітектури та забезпечує кращий контроль над двигуном та акумулятором.

Незважаючи на те, що обидві схеми мають усі переваги, є деякі недоліки. Це велика система з двома електричними двигунами та двома муфтами. Порівняно з попередніми моделями, це складніше керувати, але забезпечує кращий контроль роботи двигуна.

Незважаючи на те, що обидві схеми мають усі переваги, є деякі недоліки. Це велика система з двома електричними двигунами та двома муфтами. Порівняно з попередніми моделями, це складніше керувати, але забезпечує кращий контроль роботи двигуна.

У даній схемі ДВЗ працює у послідовному режимі для генерації електроенергії, коли це найбільш ефективно, наприклад, на низьких швидкостях. У паралельному режимі ДВЗ безпосередньо приводить колеса в рух на високих швидкостях або під час великих навантажень.

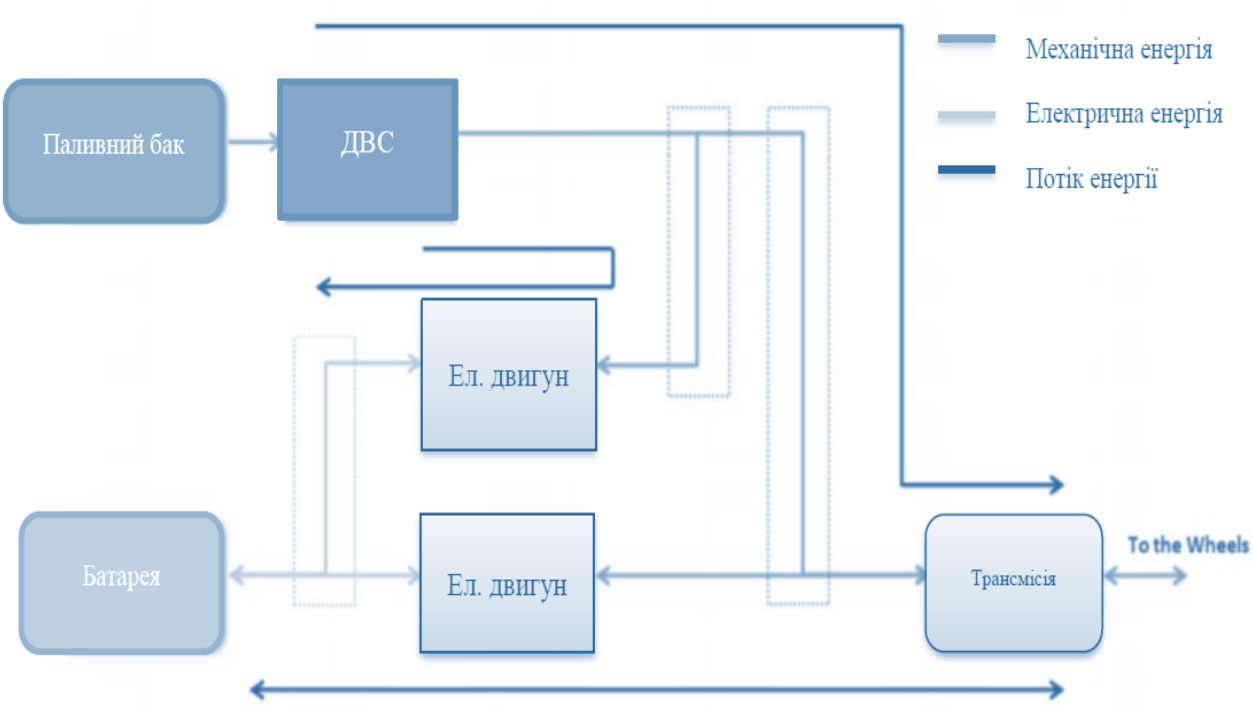


Рисунок 2.3 – Комбінована (послідовно-паралельна) схема

Комбінована схема дозволяє ДВЗ працювати переважно в діапазоні максимального ККД (зазвичай 30…40 %). Це досягається за рахунок електронного керування, яке перемикає режими роботи залежно від потреб.

Електродвигун може діяти як основне джерело енергії у міських умовах або як допоміжний агрегат для підтримки ДВЗ на трасі. Він працює безпосередньо з колесами, що зменшує втрати на передачу енергії.

У комбінованій схемі система рекуперації оптимізована для максимальної продуктивності, забезпечуючи повернення до 60…70 % кінетичної енергії в акумулятор. Система рекуперації автоматично адаптується залежно від режиму роботи (послідовного або паралельного), що дозволяє максимально ефективно використовувати енергію.

Комбінована схема демонструє високу ефективність у місті завдяки використанню електродвигуна для більшості завдань, зокрема для прискорення та руху на низьких швидкостях. На трасі система перемикається в паралельний режим, у якому ДВЗ працює безпосередньо з колесами, що знижує втрати енергії.

Комбінована схема використовує адаптивне управління, яке дозволяє уникати зайвих перетворень енергії. Наприклад, у послідовному режимі втрати на генерацію і перетворення мінімізуються. У паралельному режимі втрати у трансмісії значно нижчі, ніж у послідовній схемі. Утримання двох систем (послідовної та паралельної) може збільшувати механічні втрати через складність конструкції.

Завдяки використанню комбінованої схеми акумуляторний блок використовується ефективно, забезпечуючи як електричний рух, так і підтримку ДВЗ. Поєднання електричної та паливної енергії дозволяє досягти великого запасу ходу, який може перевищувати 900…1000 км.

Комбіновані схеми адаптуються до різних умов експлуатації, забезпечуючи оптимальну ефективність як у місті, так і на трасі, забезпечують максимальний ККД за рахунок гнучкого перемикання між режимами, система рекуперації інтегрована для ефективного використання кінетичної енергії, а використання електродвигуна у міських умовах значно знижує витрати палива.

У той же час комбіновані схеми мають більш складну конструкцію, збільшену її вартість і потенційні проблеми з обслуговуванням. Через наявність двох систем силової установки загальна маса транспортного засобу може бути більшою, що впливає на витрати енергії. Також така система має більш високу вартість виробництва та обслуговування.

Порівняння ефективності комбінованої схеми: у міських умовах має високу ефективність завдяки використанню електродвигуна та рекуперації. На трасі забезпечується конкурентна ефективність за рахунок роботи ДВЗ у паралельному режимі.

Отже, комбінована схема є найбільш універсальною серед усіх типів гібридних схем. Вона забезпечує високу ефективність як у міських умовах, так і на трасі, поєднуючи переваги послідовної та паралельної схем. Однак складність конструкції та висока вартість є основними перешкодами для її широкого застосування.

2.3 Режими руху ГТЗ

Реверсивність є характеристикою процесів перетворення енергії в системі тягового приводу ГТЗ. Фази розгону та сталого руху є фазами прямого перетворення енергії. У цьому місці відбувається подолання сил опору руху та реалізація ГТЗ для досягнення певного прискорення. Фаза рекуперативного гальмування використовується під час зворотного процесу енергоперетворення, коли механічна енергія перетворюється на електричну енергію. Це дозволяє підвищити динамічні якості та енергетичні показники ГТЗ.

Класифікація режимів руху ГТЗ за основними фазами дозволяє визначити транспортні цикли, необхідні для аналітичних досліджень і натурних випробувань тягових систем. Крім того, це допомагає систематизувати та вирішувати загальні рівняння руху ГТЗ (тяговий, мощностний і енергетичний баланс).

Рівняння тягового балансу виглядає як

$$F_k \equiv F_\Sigma = F_f + F_\alpha + F_w + F_j$$

де

F_k – сила тяги автомобіля, необхідна подолання для рівнодіюча сили опору F_Σ;

$F_f = mgfCos\alpha$ – сила опору кочення, Н;

m – маса транспортного засобу, кг;

g – сила опору кочення;

f – коефіцієнт тертя кочення;

α – кут ухилу дороги, при малих кутах $\approx$ tg ;

$F_\alpha = \pm mgsin\ \alpha$ – сила опору ухилу дороги;

$F_w = 0{,}5c_x\rho Sv^2$ – сила аеродинамічного опору,

c_x – коефіцієнт аеродинамічного опору;

ρ – щільність повітря;

v – швидкість руху, м/с;

S – площа міделя транспортного засобу, м^2;

сила інерції

$$F_j = \delta m \frac{dv}{dt}$$

δ – коефіцієнт обліку обертових мас;

$\frac{dv}{dt}$– ускорения, м/с^2.

Сумарний коефіцієнт опору дороги:

$$\psi = f cos\alpha \pm sin\alpha$$

Якщо

$$K_w = 0{,}5 c_x \rho S/(mg)$$

$$K_j = \delta/g$$

$$G = mg$$

Рівняння тягового балансу матиме вид:

$$F_k = G\left(\psi + K_w v^2 + K_j \frac{dv}{dt}\right)$$

Граничне значення тяги автомобіля Fkмакс визначається силою зчеплення ведучих коліс з дорогою $F_{сц}$

$$\left.\begin{array}{l} F_{k\ макс} \le F_{сц}; \\ F\ \ = K_c mg\varphi, \end{array}\right\}$$

де φ та $K_c = 0{,}5$ – коефіцієнти зчеплення коліс з дорогою - (для сухого асфальту = 0,6 ... 0,7).

Момент М, приведений до валу ведучого колеса визначаються через силу тяги F_k

$$\left.\begin{aligned} M_k &= F_k r_k; \\ \omega_k &= \frac{v}{r_k}. \end{aligned}\right\}$$

ω_k - частота обертання ведучого колеса,

ω_k v - швидкість руху транспортного засобу.

Вираз тягової потужності P_k, що підводиться до ведучих коліс записується у вигляді

$$P_k = F_k v = G\left(\psi + K_w v^2 + K_j \frac{dv}{dt}\right) v.$$

Максимальна тягова потужність P_k при рухів транспортного засобу з максимальною швидкістю *v* по горизонтальному профілю

$$P_{k\text{макс}} = G(f + K_w v^2) v_{\text{макс}}.$$

потужносний баланс на валу тягового електродвигуна

$$P_M = P_k / \eta_{\text{ТР}},$$

де *P* – необхідна механічна потужність на валу електродвигуна для подолання сил опору руху.

Корисна потужність гібридної енергоустановки (ГЕУ) для реалізації тягових властивостей ГТЗ:

$$P_{\text{ГЭУ}} = P_k/\eta_{\Sigma},$$

де

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{ГЕУ}}\eta_{\text{ББП}}\eta_{\text{ЕМ}}\eta_{\text{ТР}};$$

де

$\eta_{\text{ГЕУ}}$ – ККД гібридної енергоустановки (ГЕУ);

$\eta_{\text{ББП}}$ – ККД бортового вентільного перетворювача (ББП);

$\eta_{\text{ЕМ}}$ – ККД електричної машини (ЕМ).

За інтервал часу руху t визначаємо пройдений шлях L транспортного засобу:

$$L = \int_0^t v dt,$$

а баланс енергії W_{k} при русі транспортного засобу при відомих силі тяги F_{k} або потужності P_{k}:

$$W_k = \int_0^L F_k dl = \int_0^t P_k dt$$

Витрата енергії на за 1 км пройденого шляху $w_{\text{пр}}$:

$$w_{\text{пр}} = W_{\text{k}} / L$$

Як правило, тягові системи на електроприводах мають менші втрати порівняно з тепловими двигунами, оскільки вони використовують більший рівень організації процесів енергоперетворення. Це важливий фактор для

оцінки перспектив розвитку електричних тягових систем. Дослідження витрат енергії для режимів розгону та динамічного гальмування найбільш актуальні в умовах різних режимів експлуатації ТГЗ, щ обуло частково показано у підрозділі 2.2. На рисунку 2.4 показана укрупненная функціональна схема тягової системи з ГЕУ на основі послідовної схеми, прийнятої в дослідженні за базову.

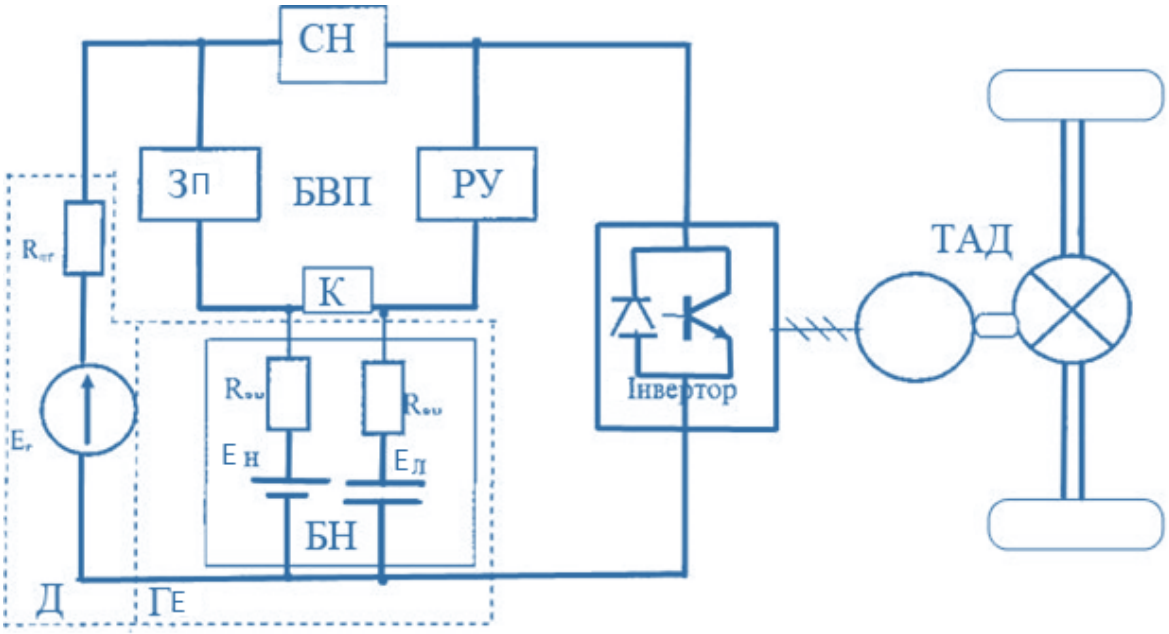


Рисунок 2.4 – Функціональна схема ГТЗ:

ЗУ – зарядний пристрій; РУ – розрядний пристрій; СН – стабілізатор напруги; БВП – бортовий вентильний перетворювач; К – ключовий комутатор; Бне – бортові накопичувачі енергії; ЕєН – енергоємний накопичувач; ЕлН – електросилової накопичувач; Д - ГУ - «двигун - генераторна установка»; ГЕУ – гібридна енергоустановка; ТАД – тяговий асинхронний електродвигун

Метод енергетичного балансу був основою для аналізу та розрахунку витрат енергії в циклічному русі ГТЗ [12 - 14, 16]. Енергетична система ГТЗ складається з енергетичних модулів, які здійснюють параллельно-послідовне перетворення та передачу енергії в: гібридну енергоустановку (ГЕУ), яка складається з Бне – бортових накопичувачів енергії, які включають ЕєН –

енергоємний накопичувач, ЕлН – електросиловий накопичувач і бортове джерело енергії в складі ДГУ - «двигуна-генераторної установки»; бортові вентильні пере

Зарядний пристрій (ЗУ) заряджає Бне від Д-ГУ і від рекуперації при гальмуванні. Д-ГУ генерує заряд при надлишковій потужності ГУ, наприклад, при вибігу, гальмуванні та стоянці. Коли Д-ГУ не має достатньо енергії, ТАБ розряджається через розрядний пристрій (РУ). Стабілізатор напруги (СН) дозволяє узгодити роботу Д-ГУ з Бне при різних режимах руху самого АКЕУ. Це робить джерело та накопичувачі енергії більш ефективними.

В загальному вигляді енергетична діаграма тягової системи гібридного автомобіля показана на рисунку 2.5 [12].

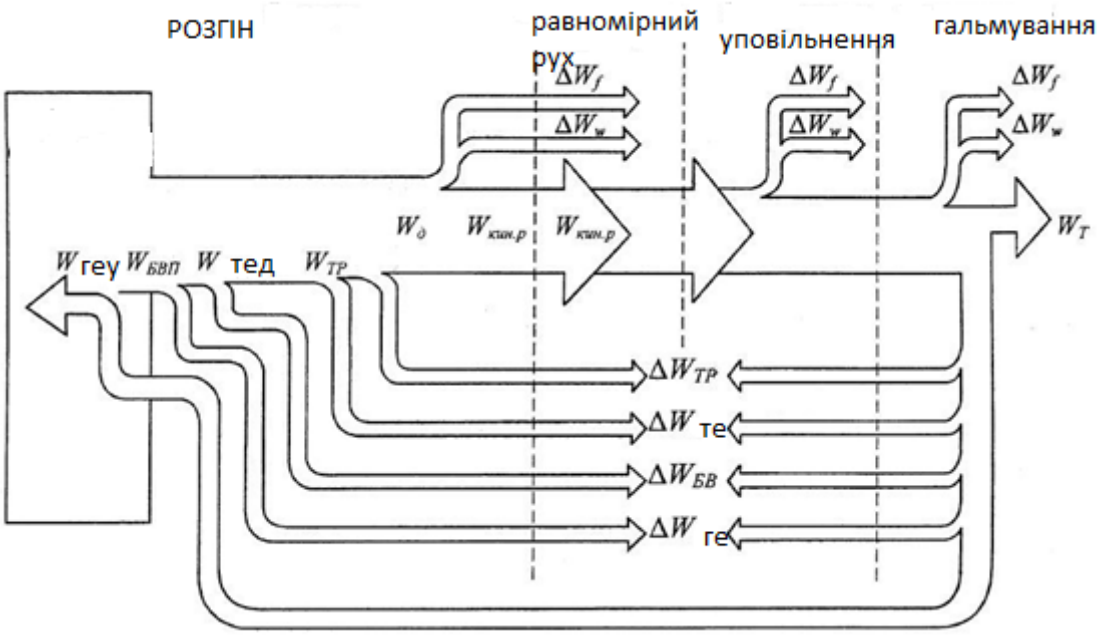


Рисунок 2.5 – Баланс енергії при циклічному руху ГТЗ [12]

Енергія, що необхідна для забезпечення руху транспортного засобу:

$$W_{\text{ГЕУ}} = W_{\text{кін}} + W_{аеро} + W_{\text{тертя}} + W_{\text{проф}}$$

де

$W_{\text{кін}}$ – кінетична енергія для розгону транспортного засобу;

$W_{аеро}$ – енергія для подолання аеродинамічного опору;

$W_{\text{тертя}}$ – енергія для подолання сил тертя;

$W_{\text{проф}}$ – енергія для подолання гравітації на підйомах.

Енергія $W_{\text{Г}}$, вироблена Д - ГУ, за цикл руху ГТЗ дорівнює

$$W_{ДГ} = \int_0^{t_Ц} U_{ДГ} I_{ДГ} dt.$$

При роботі Д - ГУ в оптимальному режимі маємо

$$I_{ДГ} = I_{ДГ}^{опт};\ U_{ДГ} = U_{ДГ}^{опт}.$$

Енергію $W_{РА}$, віддається акумуляторною батареєю при розряді і отримуємо

$$W_{рАБ} = U_{срАр} \int_0^{t_р} i_р dt,$$

де $U_А$ – середня напруга акумуляторної батареї при розряді;

$i_р$, $t_р$ - струм і час розряду.

За аналогією розрахуємо енергію заряду $W_{ЗА}$ акумуляторної батареї за час заряду $t_з$ при середньому напрузі $U_з$

$$W_{ЗАБ} = U_з \int_0^{t_з} i_з dt,$$

сумарна витрата енергії за цикл ГЕУ знаходимо як

$$W_{ГЭУ}^{Ц} = \left(\Delta W_С + \Delta W_{ТР} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{бс} + \Delta W_{ГЭУ}\right)_Р + W_{кин.Р} +$$
$$\left(\Delta W_С + \Delta W_{Р} + \Delta W\ Э + \Delta W\ \ + \Delta W\ + \Delta W ГЕУ\right)\quad - W\ У$$

де

$\Delta W_C = \Delta W_f + \Delta W_w$ – втрати енергії, що витрачаються на подолання сил тертя кочення (ΔW_f) і аеродинамічного опору (ΔW_w);

ΔW– витрата енергії в бортовій мережі АТЗ;

$\Delta W, \Delta W_Э, \Delta W_Р$ – втрати енергії в модулях системи тягового приводу (ГЕУ, БВП, ТЕД, ТР);

$W_{.Р}$– кінетична енергія, накопичена в фазі розгону;

W - енергія рекуперації при уповільненні.

У рівнянні індекси фаз циклу «Р» і «У» ставляться до кожного доданку, що знаходиться всередині відповідних дужок.

Для фази уповільнення, можливий режим, коли батарея не обмінюється енергією з електричною машиною, що $\Delta W = 0_{ГЕУ}$ і $W_{ре} = 0$.

У режимі рекуперативного гальмування без використання механічної гальмівної системи рівняння балансу енергії має вигляд:

$$\Delta W = (\Delta W_C + \Delta W_Р) + W + (\Delta W_E + \Delta W + \Delta W_{ГЕУ})$$

Отримані рівняння дають можливість розрахувати енергетику циклу ГЕУ з повною рекуперацією

$$W_{ГЭУ}^{Ц} = (\Delta W_C + \Delta W_{ТР} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{бс} + \Delta W_{ГЭУ})_Р + W_{кин.Р} +$$
$$(\Delta W_C + \Delta W_Р + \Delta W_Э + \Delta W + \Delta W + \Delta W_{ГЕУ})_У$$

Витрата енергії ГЕУ за цикл без рекуперації дорівнює

$$W_{ГЭУ}^{Ц} = (\Delta W_C + \Delta W_{ТР} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{бс} + \Delta W_{ГЭУ})_Р +$$
$$(\Delta W_C + \Delta W_Р + \Delta W + \Delta W + \Delta W + \Delta W_E + \Delta W_{ГЕУ}) + (\Delta W_C + \Delta W_У)З$$

$$+(\Delta W_C + \Delta W_P) + (\Delta W_E + \Delta W \ + \Delta W_{ГЕУ})$$

Розрахунки на основі рівнянь показали, що оптимальна робота ГЕУ дозволяє ГТЗ повною масою 2000 кг з ДГУ потужністю близько 20 кВт працювати автономно протягом 18 годин інтенсивної експлуатації при середній швидкості 45…50 км/год. Реалізація тягової конденсаторної батареї (ТКБ) як електросилового накопичувача в поєднанні з акумуляторною батареєю дозволяє демпфірувати динамічні навантаження як під час розгону ГТЗ, так і під час руху на підйом. Завдяки ефективній розробці параметрів і режимів ГЕУ акумуляторною батареєю і конденсаторною батареєю можуть постійно перебувати в підзарядженому стані. Таким чином, Бне гарантує безперебійну роботу ГТЗ. Дослідження та аналіз процесів енергоперетворення в електричних технологіях дозволяють вирішити проблему масогабаритних показників ГЕУ. Це призведе до покращення загальних техніко-експлуатаційних характеристик ГТЗ.

Термінові режими транспортного засобу. Прямолінійний рівномірний рух, також відомий як ГТЗ, по горизонтальній дорозі (i = 0), із заданою величиною кутів ухилу дороги (i> 0 при підйомі; i <0 при спуску). Розрахунок статичних режимів руху вимірює тягові сили F_k, моменти M_k і потужності R_k для різних постійних швидкостей і кутів підйому та спуску. Це визначає, перш за все, необхідні максимальні сили тяги моменту M_k і P_k для певної максимальної швидкості v; потім це визначає, як діють складові сили та моменти опору руху.

Розрахунок параметрів статичних режимів ГТЗ є основою для визначення характеристик трансмісії, таких як передавальне число u; максимальний момент $M_{макс}$, потужність P_c і кут обертання електричної машини; потужність, струм і напруга БВП і ГЕУ. Відповідно до результатів аналізу параметрів і характеристик ГТЗ, які використовуються в міських умовах, були розроблені технічні вимоги для ГТЗ.

Динамічні властивості АТЗ. У динамічних режимах розглядається рух ГТЗ як під час розгону, так і під час гальмування. Транспортний засіб повинен забезпечувати динамічні параметри не нижче, ніж у традиційних транспортних засобах, коли він рухається в міських умовах.

Розрахунок максимальних сил тяги, моменту та потужності динамічних режимів ГТЗ необхідний для визначення граничних характеристик енергоустановки.

У міських циклах руху прискорення автомобіля a (t) до заданої швидкості $v_з$ за час може бути рівноприскореним (рис. 2.6 а), рівноприскореним на першому етапі і експоненціальним на другому етапі (рис. 2.6 б), а також розгону з постійним прискоренням на першому і другому етапах, в кінці яких прискорення не дорівнює нулю (рис. 2.6 в) [17].

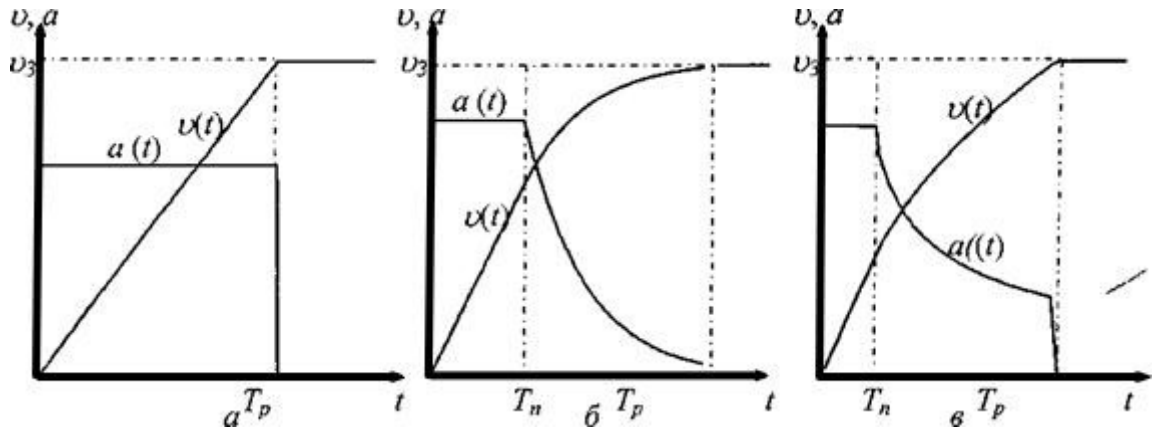


Рисунок 2.6 – Діаграми руху транспортного засобу в міських умовах [17]

В літературних джерелах [16 – 19] наведені порівняльні характеристики щодо витрати енергії на одиницю пройденого шляху. Згідно цих досліджень при експоненційному законі розгону ГТЗ на 2,7 % витрачається більше енергії, ніж при рівноприскореному, а рух по закону ліфта на 11,6 % менше з точки зору енерговитрат у порівнянні з рівноприскореним рухом.

3 ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЯКОСТЕЙ ГІБРИДНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

3.1 Удосконалення роботи силової установки ГТЗ

Як вже зазначалося, силова установка гібридного транспортного засобу (ГТЗ) є складною інтегрованою системою, яка забезпечує ефективне використання енергії з різних джерел, а саме двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) та електродвигуна. Головною метою цієї системи є максимізація енергоефективності та мінімізація впливу на довкілля, що досягається шляхом оптимального управління енергетичними потоками між різними компонентами. У сучасних умовах інженери прагнуть забезпечити високу продуктивність ГТЗ, одночасно знижуючи витрати палива, покращуючи динамічні характеристики автомобіля та забезпечуючи комфорт водіння.

Деякі основні напрямки підвищення ефективності роботи ГТЗ наведено на рисунку 3.1.

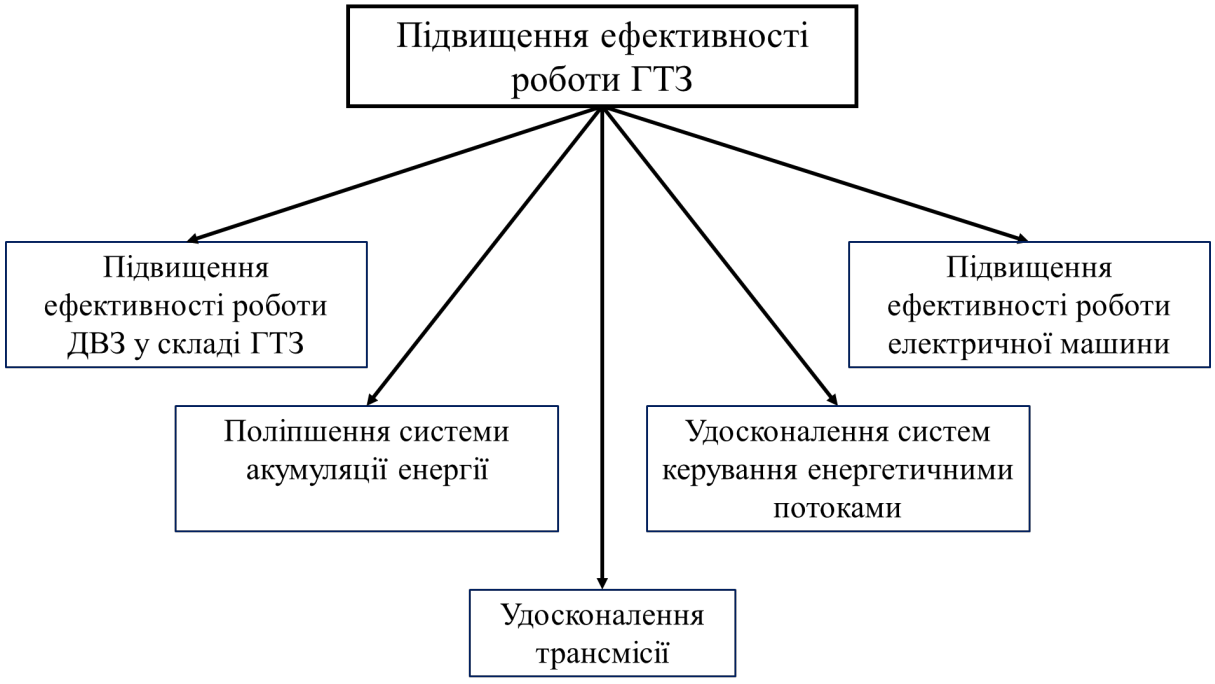


Рисунок 3.1 – Підвищення ефективності роботи ГТЗ

Удосконалення двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) є складною інженерною задачею. Роботи по удосконаленню ДВЗ відбуваються по деяким напрямкам, зокрема:

- покращення паливної системи, наприклад, використання сучасних технологій упорскування палива, зокрема, безпосереднє упорскування під високим тиском;
- впровадження системи турбонаддуву для підвищення потужності та зменшення об'єму двигуна;
- використання змінних фаз газорозподілу для оптимізації роботи двигуна на різних обертах.

Центральною ідею роботи ГТЗ є використання двигуна внутрішнього згоряння в так званому п'ятні максимального ККД. Це важливий аспект, оскільки зазначений у технічних характеристиках ККД є максимально можливим. Але звичайний транспортний засіб має ККД двигуна до 30 % (бензинові) і до 40 % (дизельні) і цей максимальний ККД має місце всього 15…20 % часу роботу у міських умовах, до 50 % на трасі, а у змішаному циклі всього до 35 %. Це пов'язано з роботою ДВЗ в оптимальному діапазоні обертів. Саме цей оптимальний діапазон обертів і забезпечує ГТЗ, коли ДВЗ працює як генератор, що у кінці кінців мінімізує витрати палива.

Іншим значним напрямком розвитку ДВЗ є застосування легких і термостійких матеріалів в конструкції для зменшення механічних втрат.

Використання системи Start-Stop для уникнення роботи двигуна на холостих обертах.

Окремим розвитком ДВЗ є зміна його принципу дії, коли головними робочими органами є не кривошипно-шатунний механізм, а обертові частини. Як заявляють дослідники такі двигуни є універсальними і можуть працювати на багатьох запальних сумішах, а саме бензині, дизпаливі, газу, і навіть водневій суміші. Причому такі двигуни не потребуватимуть додаткових суттєвих налаштувань, мають меншу масу і габарити, менше конструктивних частин, є більш технологічними і дешевими. У якості недоліків зауважується відносна

невелика їх довговічність, хоча «слабкі» елементи можуть бути відносно легко замінені і двигун буде готовий до роботи. Така і подібні конструкції є дуже перспективними.

Вдосконалення роботи електродвигуна базується на використанні більш ефективних електричних машинах. Наприклад, використання синхронних двигунів із постійними магнітами (PMAC) мають високий ККД (до 95 %) або поєднання машин змінного і постійного струму.

Також можливе застосування технологій охолодження для підтримки ефективності під час тривалих навантажень. Однак цей і попередній пункт можливо не є самим пріоритетним, оскільки такі електричні машини значно зростають в ціні, а підвищення їх ККД складає лише декілька відсотків. Тобто однозначно варто розвивати розробку більш ефективних електричних машин, проте їх масове впровадження доцільне після зменшення вартості виробництва таких машин.

Перспективним напрямком розвитку даної технології є модернізація систем керування. У даному ракурсі можливе впровадження інтелектуальних алгоритмів керування електродвигуном, які враховують умови руху та енергетичні потреби, використання інверторів із високою ефективністю для мінімізації втрат при перетворенні енергії, удосконалення керування системою рекуперації енергії для максимально ефективного повернення кінетичної енергії в акумулятор.

Удосконалення акумуляторних систем, а саме використання акумуляторів із високою енергетичною щільністю. Важливим кроком, що підвищує привабливість таких транспортних засобів є підвищення швидкості зарядки, збільшення терміну служби акумулятора. Про один з таких механізмів було сказано вище. Тобто впровадження системи активного охолодження та нагрівання для збереження оптимальної температури роботи дозволяє значно подовжити роботу акумуляторних батарей. Іншим механцізмом є використання нових хімічних складів електроліту для зменшення деградації акумулятора.

Інтеграція системи керування енергетичними потоками включає алгоритми оптимального розподілу енергії. Це означає використання системи керування, яка в режимі реального часу розподіляє енергію між ДВЗ, електродвигуном та акумулятором для мінімізації витрат.

Впровадження інтелектуальної системи дозволить прогнозувати енергоспоживання. Така система відстежує і враховує рельєф дороги, трафік і стиль водіння для оптимізації використання енергії, автоматично обирає найбільш оптимальні режими роботи. Наступним кроком розвитку системи є впровадження штучного інтелекту для адаптивного управління силовою установкою, враховуючи умови експлуатації.

Зменшення механічних втрат у трансмісії можливе шляхом використання автоматичних трансмісій із низькими втратами. Наприклад, для зменшення втрат можливе застосування безступінчатих варіаторів (CVT) або двоступеневих автоматичних коробок передач із високим ККД.

Також доцільним є використання легких матеріалів. Це можуть бути, наприклад, різноманітні сплави для зменшення ваги конструктивних елементів.

Цікавим напрямком розглядається використання зв’язку з інфраструктурою. Інтеграція з дорожньою інфраструктурою для отримання інформації про затори, умови руху, що дозволяє оптимізувати енергоспоживання. При цьому необхідне регулярне оновлення алгоритмів керування для врахування нових технологій і покращення енергоефективності.

Отже, удосконалення роботи силової установки ГТЗ передбачає комплексний підхід, що включає оптимізацію роботи ДВЗ, електродвигуна, акумуляторів, систем керування енергією та механічних компонентів. Завдяки впровадженню інноваційних технологій можна значно підвищити енергоефективність, знизити витрати палива та забезпечити екологічність транспортного засобу.

3.2 Використання сучасних матеріалів та технологій ГТЗ

Сучасні матеріали, інноваційні технології та інтеграція зовнішніх джерел енергії є ключовими факторами вдосконалення гібридних транспортних засобів. Ці аспекти дозволяють знижувати вагу, підвищувати енергоефективність і розширювати можливості для зменшення впливу на довкілля.

Частково ці питання вже було розглянуто у попередньому підрозділі, але є сенс деякі питання розглянути більш детально. Хоча звичайно, перелічені питання є достатньо об’ємними і можуть бути окремими розділами роботи. Проте спробуємо розглянути в загальних рисах деякі аспекти цих важливих і перспективних напрямів досліджень.

Використання сучасних матеріалів. Сучасні матеріали забезпечують зниження ваги, підвищення міцності конструкції та зменшення енергоспоживання транспортних засобів. Сучасні матеріали можна поділити умовно на легкосплавні, композитні та високоміцні сталі.

Легкосплавні матеріали:

1) Алюміній використовується для виготовлення кузовних панелей, двигунів, деталей трансмісії. Алюміній забезпечує зниження ваги автомобіля без втрати міцності.
2) Магнієві сплави застосовуються в компонентах трансмісії, підвіски та елементів внутрішнього обладнання. Ці сплави забезпечують ще більшу економію ваги порівняно з алюмінієм.
3) Вуглецеві композити використовуються в спортивних і преміум-моделях ГТЗ для зменшення маси кузова та компонентів шасі. Мають високу міцність і корозійну стійкість.
4) Високоміцні сталі використовують для виготовлення каркасу кузова, що дозволяє забезпечити безпеку пасажирів і одночасно знизити загальну вагу транспортного засобу.

Використання сучасних технологій у вигляді інтелектуальних систем керування, покращення силових компонентів, системі рекуперації енергії тощо було розглянуто у попередньому підрозділі. Тому у даному підрозділі розглянемо інше інноваційне рішення.

Розглянемо один із найважливіших елементів ГТЗ, як і електромобіля, а саме акумуляторної батареї. Як відомо, акумуляторна батарея в електромобілі може складати до 50 % від загальної вартості. Акумуляторна батарая впливає на чимало чинників, таких як вартість траспортного засобу, запас ходу, швидкість заряду, відсоток від загальної маси тощо. Щодо ГТЗ, то звичайно було б вигідно мати батарею, яка б дозволяла повністю здійснювати міські поїздки чисто на електротязі і мала функцію заряджатися від зовнішньої мережі, тобто добре відомий «Plug-in». Ці системи вже існують, але мова йде про збільшення запасу ходу на електриці та здешевленні системи в цілому.

Отже, акумулятори є ключовим компонентом електричних і гібридних транспортних засобів (ГТЗ), забезпечуючи зберігання та подачу енергії для роботи електродвигуна. Вибір типу акумулятора залежить від його характеристик, таких як енергетична густина, довговічність, вартість і екологічність. Розглянемо основні типи акумуляторів, що використовуються в сучасних транспортних засобах.

Свинцево-кислотні акумулятори (Lead-Acid Batteries) мають такі характеристики:

- енергетична густина – низька (20…40 Вт·год/кг);
- термін служби: 300…500 циклів заряд-розряд;
- вартість - низька, це найдешевший тип акумуляторів:

Свинцево-кислотні акумулятори мають такі переваги:

- доступність і низька ціна;
- простота виробництва та переробки;
- стійкість до короткочасних перевантажень.

Їх недоліки:

- велика вага та обмежена енергетична густина;

- низький термін служби;
- шкідливий вплив на довкілля через свинець.

Такі акумулятори використовуються здебільшого в стартових системах автомобілів і у невеликих електромобілях.

Нікель-металогідридні акумулятори (NiMH, Nickel-Metal Hydride Batteries) мають такі характеристики:

- енергетична густина – середня (60…120 Вт·год/кг);
- термін служби – 500…1000 циклів заряд-розряд;
- вартість – середня;

Переваги таких акумуляторів:

- вища енергетична густина порівняно зі свинцево-кислотними акумуляторами;
- екологічно безпечніші, ніж NiCd акумулятори (нікель-кадмієві);
- надійна робота в широкому температурному діапазоні.

Недоліки:

- втрата частини заряду через саморозряд;
- складність переробки;
- вища вартість порівняно зі свинцево-кислотними акумуляторами;

Нікель-металогідридні акумулятори часто використовуються в гібридних транспортних засобах (наприклад, Toyota Prius першого покоління).

Літій-іонні акумулятори (Li-ion, Lithium-Ion Batteries) мають такі характеристики:

- енергетична густина – висока (150…250 Вт·год/кг);
- термін служби – 1000…3000 циклів заряд-розряд;
- вартість – висока.

Переваги літій-іонних акумуляторів:

- висока енергетична густина, що забезпечує великий запас ходу;
- низький рівень саморозряду;
- легкість і компактність;
- тривалий термін служби.

Їх недоліки:

- висока вартість виробництва;
- чутливість до перегріву, що потребує системи охолодження;
- виробництво залежить від видобутку літію, що є екологічною проблемою;
- пожежонебезпечні.

Літій-іонні акумулятори широко використовуються в сучасних електромобілях та гібридних транспортних засобах (Tesla, Nissan Leaf, BMW i3).

Літій-залізо-фосфатні акумулятори ($LiFePO_4$, Lithium Iron Phosphate Batteries) має такі характеристики:

- енергетична густина – середня (90…150 Вт·год/кг);
- термін служби – 2000…4000 циклів заряд-розряд;
- вартість – вища за NiMH, але нижча за Li-ion.

Переваги:

- висока стабільність і безпека (низький ризик перегріву);
- тривалий термін служби;
- висока екологічність порівняно з Li-ion.

Недоліки:

- нижча енергетична густина, що обмежує запас ходу;
- вища вартість порівняно з традиційними технологіями.

Даний тип акумуляторів часто використовуються у транспортних засобах із меншими вимогами до запасу ходу (електробуси, комерційний транспорт).

Твердотільні акумулятори (Solid-State Batteries) мають такі характеристики:

- енергетична густина – дуже висока (250…400 Вт·год/кг);
- термін служби – потенційно понад 5000 циклів заряд-розряд;
- вартість – дуже висока через новизну технології.

Переваги:

- висока енергетична густина, вища навіть ніж у Li-ion;

- підвищена безпека завдяки відсутності рідкого електроліту;
- вищий термін служби і нижчий рівень саморозряду.

Недоліки:

- висока вартість на етапі виробництва;
- технологія перебуває у фазі розвитку.

Є припущення, що такі акумулятори потенційно можуть замінити літій-іонні батареї в майбутніх поколіннях електромобілів і ГТЗ.

Інші типи акумуляторів.

Натрій-іонні акумулятори є експериментальною технологією з дешевшою сировиною (натрій замість літію). Енергетична густина нижча за Li-ion, але перспективна для недорогих електромобілів.

Водневі паливні елементи генерують електроенергію через хімічну реакцію водню й кисню. Можуть використовуватися в транспортних засобах на водневому паливі (Toyota Mirai, Hyundai Nexo). В даному підрозділі водневі технології не розглядаються.

Акумуляторна батарея складається з кількох модулів, кожен із яких складається з збірки комірок. Основні характеристики акумуляторної батареї визначаються кількістю елементів і організацією модуля. Щоб створити модуль, можна розмістити кілька комірок послідовно та/або паралельно. У послідовних гілках комірки збільшують напругу, тоді як паралельні гілки збільшують вихідний струм.

Відмінність між акумуляторами високої потужності та батареями високої потужності полягає в тому, як вони організовані та розташовані. Під час високої прискорення або уповільнення (важлива фаза гальмування) батареї високої потужності можуть приймати велику кількість енергії. Як правило, високоенергетичні батареї оптимізують накопичення енергії, щоб збільшити тривалість поїздки.

Для характеристики акумуляторної батареї можна використовувати ряд показників [21], з яких найважливішими є стан заряду (SOC) батареї, який виражається в відсотках і показує рівень енергії, що залишилася в батареї

порівняно з її максимальною ємністю накопичення енергії; глибина розряду (DOD) батареї, яка показує, наскільки близька батарея до розряду; і життєвий цикл, який показує кількість циклів зарядки-роз

На рисунку 3.2 демонструє діаграму Рагона, яка дозволяє порівняти різні системи накопичення енергії, беручи до уваги питому енергію та потужність [21]. Діаграма Рагона – це графік, який використовується для порівняння різних типів накопичувачів енергії. На цій діаграмі показано питому енергію (у Вт·год/кг) і питому потужність. У зв'язку з тим, що обидві осі є логарифмічними, можна порівняти характеристики різних пристроїв. Графіки Рагоне можуть показати гравіметричну щільність енергії, але не об'ємну щільність енергії. Діаграма Рагоне демонструє, що літій-іонні технології є найефективнішими серед інших.

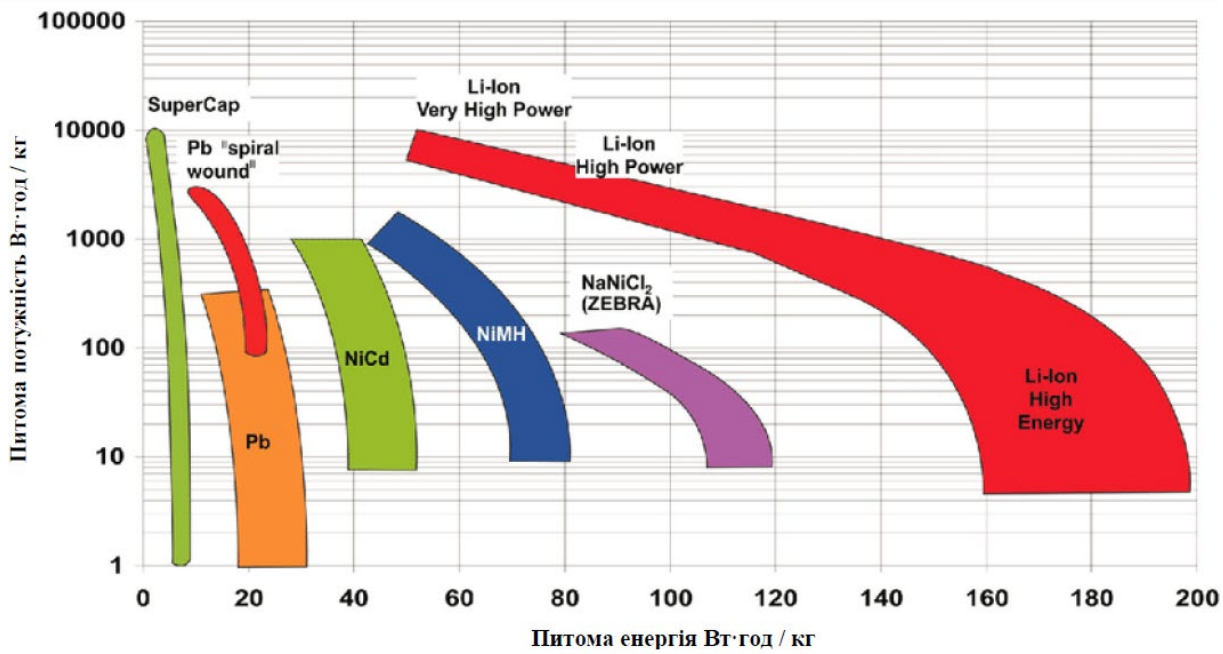


Рисунок 3.2 – Діаграма Рагона [21]

Елемент акумулятора складається з двох різних електродів, які розділені електролітом один від одного. Електроліт є як електронним ізолятором, так і іонним провідником. Одним із типів електродів є анод, а іншим – катод. На катоді відбувається окислення (втрата електронів), а на аноді відбувається

відновлення (приріст електронів). Іони, які мають позитивну зарядку, називають «катіонами», тоді як іони, які мають негативну зарядку, називають «аніонами». Як іонний провідник, електроліт забезпечує передачу іонів.

Перше покоління гібридних автомобілів було створено завдяки технології нікель-метал (NiMH). Цей тип акумуляторів був відомий своєю довговічністю та безпекою. Ці технології завжди використовувалися Toyota у своїх моделях. Як видно з діаграми Рагона, представленої на рисунку 3.2, це рішення є одним з найцікавіших. Той факт, що акумулятори NiMH потребують простої системи охолодження повітря, дає їм перевагу щодо ваги, обсягу та вартості. Тим не менш, високі гібридні автомобілі, такі як PHEV і EREV, використовують ці батареї через обмеження питомої енергії [19]. БASF (Badische Anilin- & SodaFabrik), світовий лідер у хімічній промисловості, нещодавно зробив нові кроки для розвитку. Як стверджує BASF, ємність акумуляторів NiMH може бути помножена на вісім. Цей прорив може повністю змінити поточні тенденції на ринку акумуляторів завдяки своїй доступній ціні порівняно з іншими батареями [18].

Одним із різновидів батарей є літій-іонні батареї (Li-ion). Іони можуть бути отримані з різних матеріалів, які мають різні властивості. Це змінює графік батареї, витрати та потужність [16]. Літій-іонні акумулятори використовуються виробниками автомобілів, такими як Tesla, Chevrolet та Nissan [21]; однак ці акумулятори дорожчі, ніж NiMH. Літій, який має помірну масу, є металом, який легко відновлюється. Його потенціал також привабливий, оскільки він дозволяє отримати високу питому енергію. Але літій-іонні батареї мають короткий термін життя. Збільште батареї, щоб запобігти цьому ефекту. Крім того, для безпеки вхідна потужність обмежена, щоб уникнути утворення дендриту [15, 17]. Це явище, коли літій накопичується між катодом і анодом. Це призводить до зниження робочих характеристик, коротких замкнень, перегріву або термічного збою, який може навіть призвести до вибуху.

Система охолодження, необхідна для NiMH акумуляторів, не так складна. Щоб уникнути перегріву батарей, а також для безпеки використання, потрібна

система рідинного охолодження [18, 19]. Порівняно з технологією NiMH, ця система охолодження має більшу вагу та складність. Існують інші рішення, які тут не розглядаються. Наприклад, завдяки своїй здатності швидко зберігати та віддавати енергію уперконденсатори стають все більш поширеними. Таким чином, суперконденсатори можуть бути корисною додатковою системою зберігання для високих потреб у потужності. Прикладом такої системи може бути система «Start&Stop».

Через динамічну поведінку батареї та численні взаємодії, розробка реалістичної моделі батареї є досить складним завданням. Поведінка акумулятора може бути впливана електрохімічними реакціями, взаємним опором, станом заряду, температурою, струмом заряду, розрядом або попереднім використанням [15, 20].

Моделі чорних ящиків, електричні еквівалентні схеми та електрохімічні моделі належать до різноманітних типів моделей. Електрохімічні моделі демонструють хімічні реакції та ефекти, які відбуваються в батареї. Основні електричні схеми, відомі як електричні еквівалентні схеми, складаються з резисторів і конденсаторів і призначені для відтворення поведінки акумулятора.

Для різних рівнів точності існує кілька моделей. Оскільки вони пропонують цікавий компроміс між точністю, складністю та часом обчислення, еквівалентні схеми моделей в основному використовуються. Очевидно, що проста модель не враховуватиме всі параметри, які були введені раніше. Перед вибором та впровадженням моделі необхідно визначити параметри, що враховуються. У проекті представлено лише вплив SOC і режим роботи акумулятора. Надання додаткової інформації про стан заряду (SOC) має вирішальне значення перед представленням прикладів моделей акумуляторів.

Визначення стану заряду у відсотках [21]:

$$SOC(t) = \frac{Q(t_0) - Q(t)}{Q_0} \cdot 100$$

SOC, виражена у відсотках, як функція від поточного струму акумулятора $ibatt$ (A) [21]:

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{100}{3600}\int_{t_0}^{t}\frac{i_{batt}(t)}{Q_0}dt$$

Оцінка стану заряду є складнішою, але вона важлива для плану використання акумулятора. Це дозволяє оптимізувати використання акумулятора, зберігаючи безпечний рівень заряду. Батарея зазвичай використовується в діапазоні від 10 % до 90 % SOC. Небажані хімічні реакції можуть відбуватися при більше 90 % або менше 10 % заряду батареї, що може спричинити довгострокові пошкодження акумулятора. Крім того, основні коливання напруги акумулятора від 10 відсотків до 90 відсотків.

Під час постійних циклів зарядки та розрядки високовольтна батарея виділяє тепло, тому їй потрібна особлива система охолодження, щоб вона могла нормально працювати. Забір повітря для підвищення ефективності охолодження відбувається через спеціальні повітряні забірники, які зазвичай розташовані під сидінням автомобіля. В окантовці охолоджуючого повітряного забірника є повітряний фільтр.

Під заднім сидінням є повітрозабірник, який охолоджує акумуляторну батарею гібридної системи. Гібридна батарея може перегрітися, якщо вентиляція не працює, що знижує ефективність гібридного автомобіля та може призвести до пошкоджень. Необхідно регулярно чистити повітрозабірник, щоб уникнути перегріву акумуляторної батареї гібридної системи.

Потраплення води або інших матеріалів у повітрозабірник може призвести до короткого замикання та пошкодження акумуляторної батареї гібридної системи. Автомобілі не можуть перевозити великі обсяги води, наприклад, охолоджувачі води. Вода може пошкодити батарею гібридної системи. Забезпечуючи безпеку під час технічного обслуговування, при знятті затиску сервісного розмикача ланцюга високовольтний ланцюг буде розірвано.

У перетворювачі-інверторі високовольтний конденсатор залишається зарядженим після відключення ланцюгів високої напруги. При обслуговуванні гібридних автомобілів необхідно почекати не менше десяти хвилин після зняття затиску сервісного розмикача ланцюга, щоб конденсатор розрядився до початку роботи. Коли система знаходиться в стані готовності READY, затиск сервісного розмикача ланцюга не повинен зніматися. Несправність може бути викликана включенням живлення (READY) при знятому сервісному розмикачі ланцюга. Затиск сервісного розмикача ланцюга затискає ланцюг модуля акумуляторної батареї, щоб відключити ланцюг високої напруги вручну. Ця процедура гарантує безпеку обслуговування.

Вимикач блокування забезпечує затиск сервісного розмикача ланцюга. Коли затиск розблоковано, ЕБУ гібридної системи вимикає основні реле системи та вимикає вимикач блокування. Тим не менш, для безпеки необхідно вимикати живлення до зняття затискача сервісного розмикача ланцюга.

У гібридній системі система керування визначає ступінь заряду високовольтної акумуляторної батареї (SOC) за загальним струмом зарядки та розрядки. Система управління гібридною системою оптимально керує гібридною системою, щоб підтримувати правильний рівень заряду (рис. 3.3) [22].

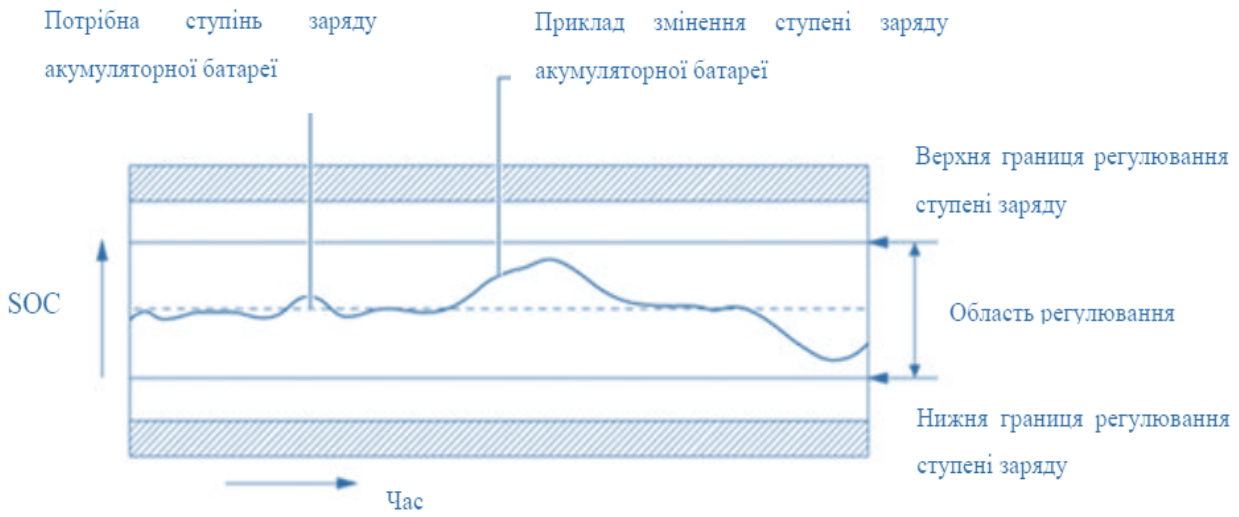


Рисунок 3.3 – Регулювання ступеню заряду акумуляторної батареї [22]

Усі компоненти високовольтної акумуляторної батареї включають модуль високовольтної акумуляторної батареї, термістор високовольтної акумуляторної батареї, розподільний блок гібридної акумуляторної батареї, вентилятор охолодження акумуляторної батареї в зборі, блок контролю стану акумуляторної батареї, також відомий як датчик напруги акумуляторної батареї, і затиск для сервісного розмикача ланцюга.

Елементи високовольтної акумуляторної батареї містяться в пластикових контейнерах. Таким чином досягаються високі питомі потужності, маси та терміну служби. Спеціальна система охолодження з вентилятором використовується для належного охолодження акумуляторної батареї, яка виділяє велику кількість тепла під час повторних зарядок і розрядок.

Высоковольтна акумуляторна батарея складається з багатьох окремих модулів. Вони послідовно з’єднані за допомогою двох модулів шин. Термістор високовольтної акумуляторної батареї складається з трьох датчиків температури високовольтної акумуляторної батареї та одного датчика температури впускного повітря.

Система управління гібридної системи оптимізує систему охолодження, підтримуючи температуру високовольтної акумуляторної батареї в певному діапазоні за допомогою датчика напруги акумуляторної батареї або блока контролю стану акумуляторної батареї.

3.3 Перспективи розвитку ГТЗ

Окрім наведених вище інноваційних рішень для підвищення ефективності роботи гібридних транспортних засобів доцільно також розглянути інші можливі інноваційні рішення, які можливо будуть розвиватися і застосовуватись у майбутньому.

Першим варіантом є розвиток інтеграції технологій автономного водіння. Зараз ця технологія активно розвивається і удосконалюється і включає два напрямки, а саме автономні системи і Системи Car-to-X. Автономні системи

оптимізують рух транспортного засобу, забезпечуючи енергоефективний стиль водіння, а системи Car-to-X – зв’язок з інфраструктурою, що дозволяє уникати заторів і вибирати найефективніший маршрут. Частково даний пункт був розглянутий вище.

Іншим важливим і перспективним напрямком є інтеграція зовнішніх джерел енергії, що дозволяє збільшити автономність і зменшити залежність від викопного палива. На даний час у якості перспективної розглядається технологія з використання сонячної енергії (сонячних панелей) для підвищення енергоефективності гібридних транспортних засобів (ГТЗ) і електромобілів. Їх інтеграція дозволяє використовувати сонячну енергію для підзарядки акумуляторів або живлення допоміжних систем, що зменшує витрати енергії з основних джерел. У сучасних ГТЗ впроваджуються дві основні концепції використання сонячних панелей: інтеграція в кузов транспортного засобу та динамічні системи зарядки під час руху. Розглянемо їх.

Інтеграція сонячних панелей у козовні частини транспортного засобу.

У якості матеріалів для сонячних панелей можуть бути використані панелі на основі різних матеріалів:

1) монокристалічні кремнієві панелі забезпечують найвищий ККД (до 22 %), але є дорожчими;
2) полікристалічні кремнієві панелі менш ефективні (15…18 %), проте дешевші та легші у виробництві;
3) гнучкі панелі на основі тонкоплівкових матеріалів (CIGS). Вони легкі, гнучкі, можуть інтегруватися у складні поверхні кузова, але мають нижчий ККД (10…12 %).

Розташування панелей може бути на даху, капоті, багажнику і навіть бічних частинах транспортного засобу. На даху можливе максимальне отримання сонячної енергії завдяки максимальній відкритості сонцю.

Капот і багажник можуть бути використані як додаткове джерело енергії, але їхня ефективність. Ще меншу ефективність мають панелі, розташовані на бічних сторонах кузова.

Потенційно інтеграція гнучких сонячних панелей в дизайн може бути без порушення естетики автомобіля, використовуючи технології вбудованого скління або спеціальні покриття.

Враховуючи низький ККД сонячних панелей, їх використання можливе лише для підзарядки акумулятора. Тобто вони не можуть бути основним джерелом енергії, але позитивним є те, що при відповідних погодних умовах вони можуть працювати довгий час, безперервно підзараджаючи акумуляторну батарею. Так, сонячні панелі потенційно можуть генерувати 300…1000 Вт·год за день, залежно від площі та інтенсивності сонячного випромінювання. Це дозволяє збільшити запас ходу в електричному режимі на 2…8 км/день, живити систему допоміжні системи, наприклад, охолоджувати салон за допомогою системи кондиціонування, живити мультимедіа, навігацію, освітлення та інші електричні компоненти. Також позитивними моментом є те, що сонячні панелі дозволяють зменшити навантаження на основну батарею, знижуючи витрати енергії акумулятора і продовжити його термін служби.

У якості прикладів можна навести модель Toyota Prius Prime, яка оснащена опційними сонячними панелями на даху. Ці панелі заряджають акумулятор для допоміжних систем. В моделі Hyundai Sonata Hybrid інтеграція сонячних панелей збільшує запас ходу до 1300 км за рік при щоденному використанні. В автівці Lightyear 0 електромобіль із сонячними панелями на даху, капоті та багажнику, здатний проїжджати до 70 км/день на сонячній енергії.

Динамічні системи зарядки під час руху.

Динамічні системи зарядки використовують сонячні панелі для постійного поповнення заряду акумулятора під час руху. Це дозволяє зменшити залежність від зовнішніх джерел енергії та збільшити автономність транспортного засобу. Розташування панелей подібне до попереднього варіанту. Гнучкі тонкоплівкові панелі дозволяють покрити складні форми поверхонь. Використання надтонких покриттів дозволяють зменшити опір повітря.

Інтелектуальні системи керування визначають пріоритет використання сонячної енергії, тобто зарядкою акумулятора або живленням допоміжних систем. Також ці системи аналізують інтенсивність сонячного випромінювання та ефективність генерації енергії.

Зазначимо також, що окрім зазначених переваг від застосування даної технології у вигляді підвищення енергоефективності, економії палива і енергії, має місце зменшення викидів CO_2 шляхом зниження залежності від викопного палива, збільшення автономності. Дана технологія особливо корисна для регіонів із розвиненим сонячним потенціалом.

Проте, при всій привабливості таких систем слід зауважити, що мають певні недоліки. По-перше, це залежність від кліматичних умов (хмарна погода та тінь знижують ефективність). По-друге, обмежена площа панелей. Тобто навіть при максимальному покритті кузова доступна площа обмежує генерацію енергії. І по-третє, такі технології мають поки що високу вартість.

Перспективою розвитку сонячних панелей у ГТЗ можуть бути інтеграція більш ефективних матеріалів з використанням перовськітів для підвищення ККД панелей до 30 % і більше.

Можна очікувати, що значно більше стануть розповсюдженими автономні транспортні засоби.

Таким чином, інтеграція сонячних панелей у ГТЗ відкриває нові можливості для підвищення енергоефективності, зменшення залежності від викопного палива та покращення екологічних показників. Розвиток матеріалів і технологій дозволить збільшити ефективність динамічної зарядки та сприятиме створенню автономних транспортних систем майбутнього.

Очікується, буде використання зарядних станцій потужністю понад 150 кВт, що дозволить значно скоротити час зарядки. Значно збільшиться кількість станцій з відновлюваними джерелами енергії.

Підвищення енергетичної ефективності буде здійснюватися і за рахунок використання двонаправленого зв’язку з мережею (V2G). Тобто електромобілі

і ГТЗ можуть зберігати енергію та віддавати її назад у мережу в пікові періоди, сприяючи стабілізації енергосистеми.

Таким чином, інтеграція сучасних матеріалів, передових технологій і зовнішніх джерел енергії є основою для подальшого розвитку гібридних транспортних засобів. Це сприятиме підвищенню їхньої енергоефективності, зниженню впливу на довкілля та створенню комфортного і економічного транспорту майбутнього.

ВИСНОВКИ

Результати проведеного дослідження у магістерській роботі дозволяють зробити низку висновків щодо підвищення енергетичних характеристик гібридного транспортного засобу (ГТЗ), а також запропонувати перспективи подальшого розвитку цієї галузі.

Аналіз сучасного стану розвитку ГТЗ підтвердив значний потенціал гібридних транспортних засобів у вирішенні актуальних питань енергозбереження та екологічності. ГТЗ поєднують переваги традиційних автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) та електромобілів, що дозволяє їм ефективніше використовувати енергію і знижувати викиди шкідливих речовин.

Енергетичні показники ГТЗ є ключовими характеристиками, які визначають ефективність роботи транспортного засобу. Основні з них включають:

Споживання енергії, що залежить від конструкції силової установки, маси транспортного засобу, аеродинамічних характеристик та умов експлуатації. Коефіцієнт корисної дії (ККД) електродвигуна та ДВЗ, який для сучасних гібридів сягає 40…50 %.

Ефективність рекуперації енергії, що є важливим елементом систем енергозбереження. У ГТЗ вона може досягати 60…70 %, що суттєво перевищує аналогічний показник для електричного рухомого складу залізничного транспорту.

Запас ходу, який визначається сукупністю характеристик акумулятора та паливного бака і для сучасних моделей може сягати понад 1000 км. Удосконалення роботи силової установки є важливим напрямком для покращення енергетичних показників ГТЗ. Зокрема:

Впровадження інноваційних систем керування енергетичними потоками дозволяє оптимізувати роботу ДВЗ і електродвигуна, забезпечуючи їхню роботу у найбільш ефективних режимах.

Покращення конструкції акумуляторів із використанням твердотільних електролітів, наноматеріалів та легких сплавів значно підвищує енергетичну щільність та знижує масу акумуляторних батарей.

Використання сучасних трансмісій із низькими втратами енергії забезпечує оптимальну передачу крутного моменту від двигуна до коліс.

Використання сучасних матеріалів і технологій сприяє зниженню ваги, покращенню енергоефективності та підвищенню надійності систем ГТЗ. Легкі сплави, композити та інтелектуальні системи керування дозволяють зменшити енергетичні втрати під час роботи транспортного засобу.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі, дає змогу збільшити запас ходу та зменшити залежність від традиційних джерел енергії. Сучасні сонячні системи дозволяють генерувати достатню кількість енергії для живлення допоміжних систем або часткового заряджання акумулятора.

Перспективи розвитку ГТЗ, пов’язані з удосконаленням конструктивних рішень і впровадженням інновацій:

- удосконалення силових установок гібридних систем;
- впровадження інноваційних матеріалів;
- розвиток інфраструктури для зарядки та обслуговування ГТЗ, що є необхідним для їхнього масового впровадження;
- інтеграція інтелектуальних систем керування та автономного водіння, які дозволяють підвищити енергоефективність і комфорт під час експлуатації.

Отже, не дивлячись на існуючі проблеми ГТЗ має значний потенціал, а також можна окреслити конкретні шляхи для подальшого покращення їхніх характеристик. Удосконалення цих технологій сприятиме зниженню витрат енергії, покращенню екологічних показників і забезпеченню сталого розвитку транспортної галузі. Проте слід враховувати, що висока вартість ГТЗ є стримуючим фактором для широкого розповсюдження таких систем.

СПИОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Скрипко Л. А. Схема для гибрида. Журнал автомобильных инженеров. 2011. № 6 (11). С. 48–50.

2. Z. Fu, G. Hou, and A. Gao, “Modeling and simulation for parallel hybrid electric vehicle powertrain,” in Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), 2011 International Conference on, pp. 114–117, 2011.

3. M. Cipek, D. Pavkovi, and J. Petri, “A control-oriented simulation model of a powersplit hybrid electric vehicle,” Applied Energy, vol. 101, pp. 121 – 133, 2013.

4. Z. Ma, D. Callaway, and I. Hiskens, “Decentralized charging control of large populations of plug-in electric vehicles,” IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 21, no. 1, pp. 67–78, Jan 2013.

5. Мисків Т. Г., Данілова Ж. Д., Жовнич В. І. Аналіз гібридного приводу автомобіля Toyota Prius. Lviv Polytechnical National University Institutional Repository : http://ena.lp.edu.ua, 2016.

6. Gwenaëlle Souffran. Dimensionnement de la chaîne de traction d’un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission. Université de Nantes, 2012. French.

7. Kwo Young, Caisheng Wang, Le Yi Wang, Kai Strunz. Electric Vehicle Battery Technologies. Chapter 2. English.

8. Saida Kermani. Gestion énergétique des véhicules hybrides : de la simulation à la commande temps réel. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2009. French.

9. PRINCIPLE OF ELECTRIC MOTOR [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.hisour.com/principle-of-electric-motor-40858/

10. What is a Squirrel Cage Motor and How Does it Work? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools- supplies/what-is-a-squirrel-cage-motor-and-how-does-it-work/.

11. Yang, T., L. Yin, G. Ingesson, P. Tunestål, R. Johansson, and W. Long

(2017). “Simultaneous control of soot emissions and pressure rise rate in gasoline PPC engine”. In: Proc. IEEE Conf. Control Technology and Applications (CCTA 2017). Hawaii, USA, pp. 572–577.

12. Гибридные автомобили серии Plug-in [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.toyota-tech.eu/HYBRID/HVDM/RU/Prius%20Plugin_RU.pdf

13. Lino Guzzella, Antonio Sciarretta. (2005). Vehicle Propulsion Systems Introduction to Modeling and Optimization. Second edition. English.

14. Observation de l’impact des dendrites sur les performances des batteries lithuim. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.mega-piles.com/news/batterie-lithium-observation-croissance-dendrites-761

15. Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sabastion E. Gay, Ali Emadi. (2005). Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. English.

16. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления/ Р. Бишоп, Дорф Р. – 2002. – 140 с

17. Controller Area Network (CAN) Overview [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.ni.com/ru-ru/innovations/white-papers/06/controller-area-network--can--overview.html

18. Diagram Ragona [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/figure/Ragone-plot-for-electrochemical-energy-storage- devices-and-traditional_fig1_331616812

19. ПІД-регулятор [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller.

20. ПІД-регулятор [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller.

21. Репнікова Н. Б. Теорія автоматичного управління: класика і сучасність/ Н. Б. Репнікова,– Київ: НТУУ (КПІ), 2012. – 238 с.

22. Писаренко А.В. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Оптимальні та адаптивні системи-1. Методи теорії оптимального

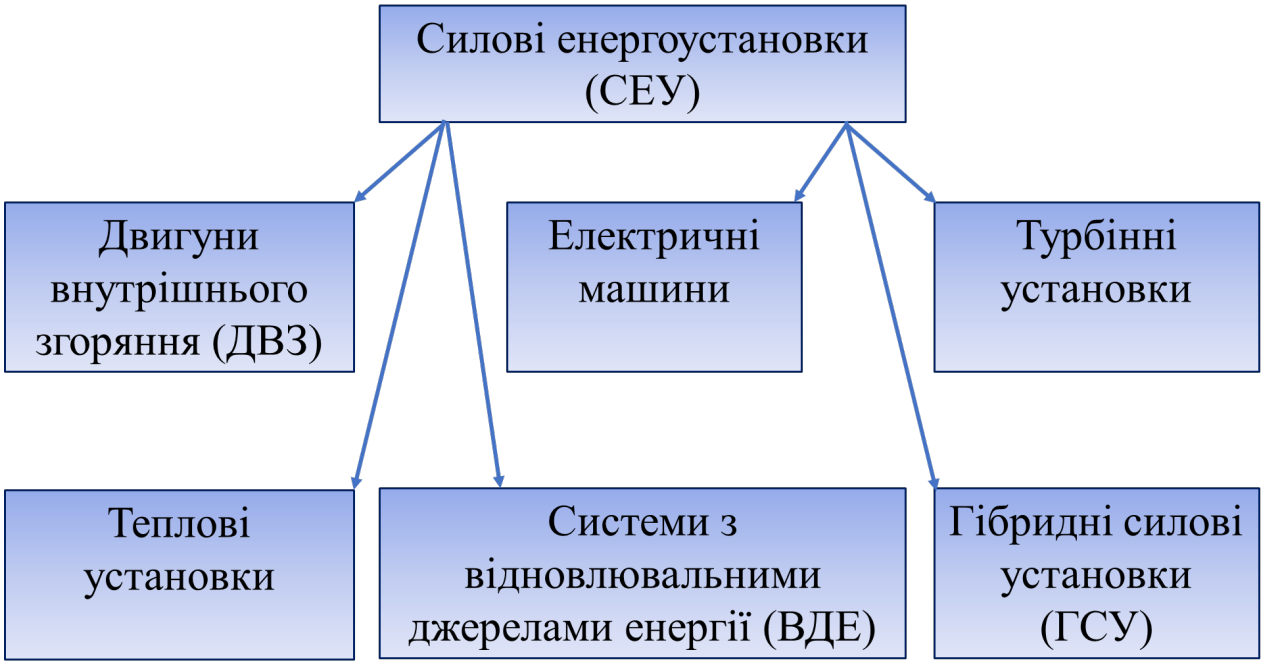
керування». Для студентів спеціальності 7,8.05020101 «Комп’ютеризовані системи управління та автоматика» всіх форм навчання/ А.В. Писаренко, Н.Б Репнікова, – Київ: “Політехніка” – 2013, 128 с.

ДОДАТОК

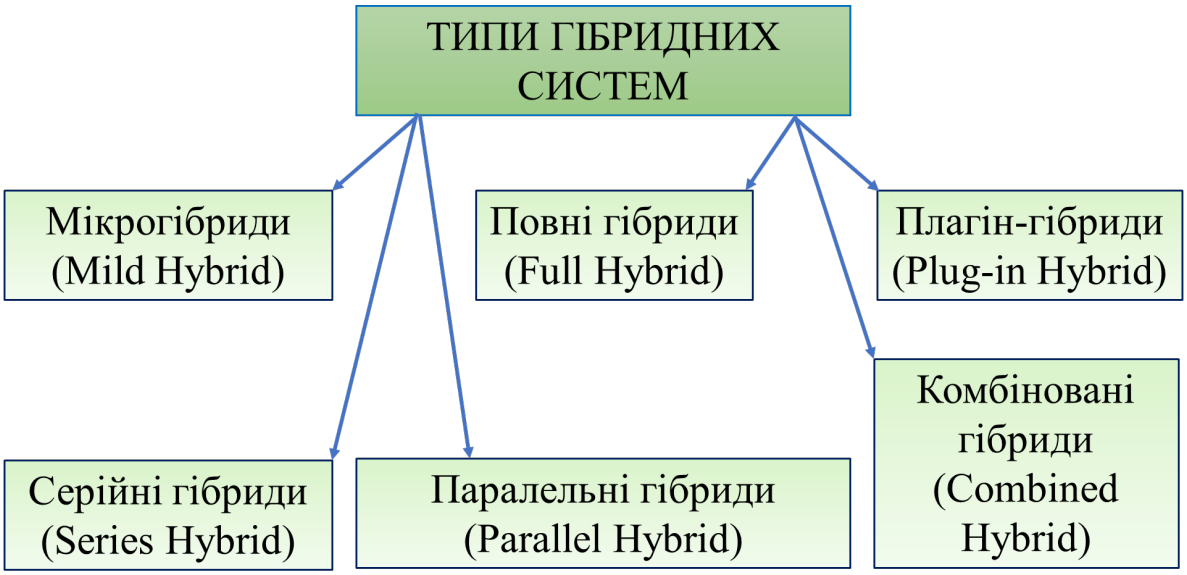
Демонстраційні матеріали до магістерської роботи

Покращення енергетичних якостей гібридного транспортного засобу

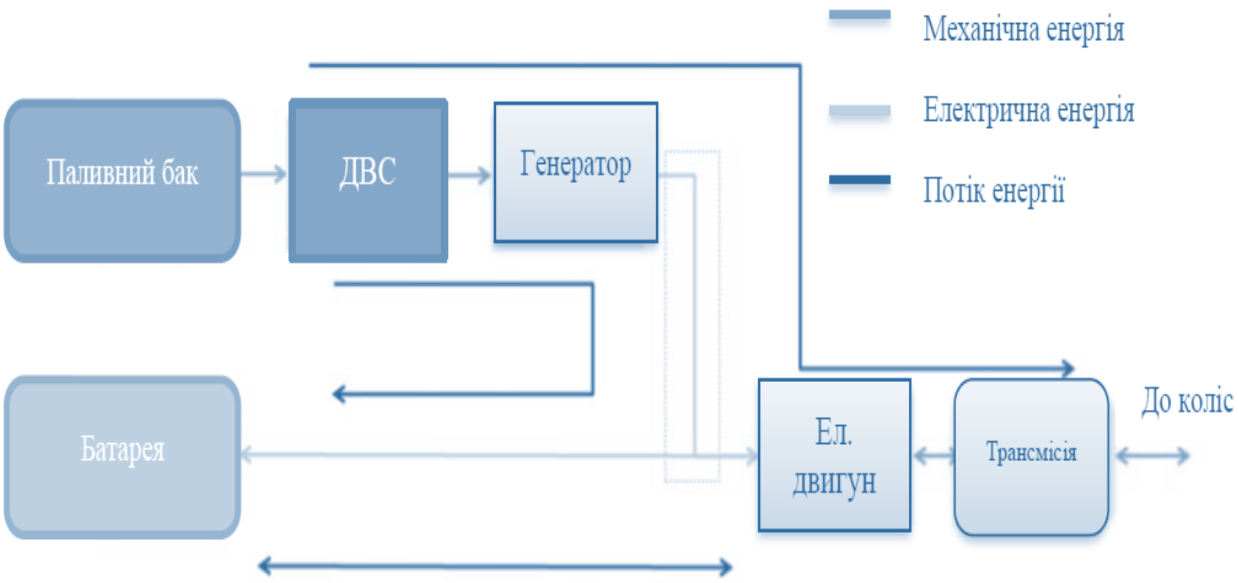
ТИПИ СИЛОВИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК (СЕУ)



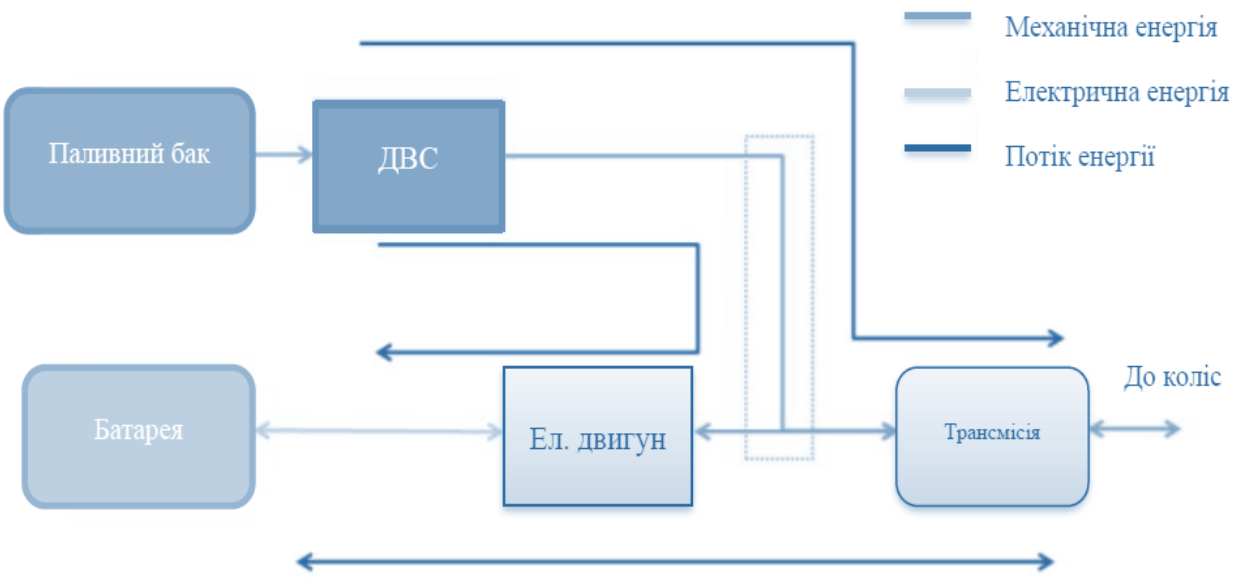
ТИПИ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ЗА СТРУКТУРОЮ



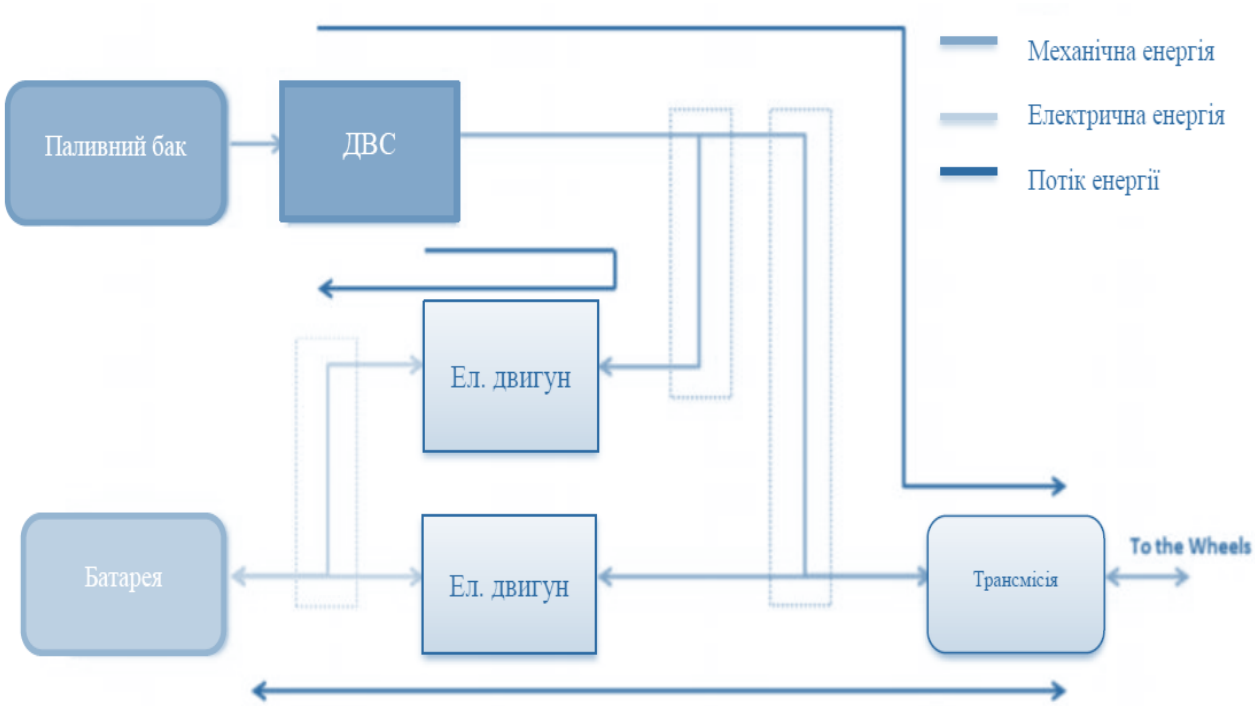
ПОСЛІДОВНА СХЕМА ГТЗ



ПАРАЛЕЛЬНА СХЕМА ГТЗ



КОМБІНОВАНА (ПОСЛІДОВНО-ПАРАЛЕЛЬНА) СХЕМА



ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ГТЗ

