

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### «Експлуатаційні аспекти використання гібридних та електричних транспортних засобів»

Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
Галузь знань 27 Транспорт  
Спеціальність 274 Автомобільний транспорт  
Освітня програма Автомобільний транспорт

Шифр КвРАТ. 22110.01.09.00

Виконав студент 4 курсу група АТ-22-1



Підпис

Олександр ЗАБУДЬКО

Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ



Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

Нормоконтролер к.т.н., доцент каф. ТАМ



Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:  
Завідувач кафедри ТАМ

10.06.2026 р.

Дата




Підпис

Олександр ДИХА

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства  
Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
Галузь знань 27 Транспорт  
Спеціальність 274 Автомобільний транспорт  
Освітня програма Автомобільний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ТАМ

  
15.04 Диха О.В.  
2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Забудько Олександр Михайловичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: **Експлуатаційні аспекти використання гібридних та електричних транспортних засобів.**

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 20.01.2026 р. № 7 (Д 26)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.06.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали курсових проектів, робіт, практики.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Автомобілі на електричній тязі.

2) Основні аспекти розрахунку гібридних силових установок.

3) Результати тягово-динамічного і паливно-економічного розрахунків гібридних систем.

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 15.04 2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	Автомобілі на електричній тязі	28.05.2026	вик
2	Основні аспекти розрахунку гібридних силових установок	8.06.2026	вик
3	Результати тягово-динамічного і паливно-економічного розрахунків гібридних систем	12.06.2026	вик
4	Оформлення роботи, висновки.	14.06.2026	вик
5	Захист кваліфікаційної роботи	16.06.2026	

Студент

  
Підпис

Олександр ЗАБУДЬКО

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

## РЕФЕРАТ

Судент групи АТ-22-1: Забудько О.М.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Кваліфікаційна робота на тему «**Експлуатаційні аспекти використання гібридних та електричних транспортних засобів**» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 19 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 16 сторінках. Роботу викладено на 81 сторінках, з них 72 сторінки основного тексту, на яких розміщено 23 рисунки і 10 таблиць.

У роботі розглянуто сучасні тенденції розвитку автомобільного транспорту в умовах посилення екологічних, енергетичних та економічних викликів. Проаналізовано обмеження традиційних транспортних засобів із двигунами внутрішнього згоряння, зокрема їх негативний вплив на навколишнє середовище, високе споживання палива та залежність від обмежених природних ресурсів.





Особливу увагу приділено альтернативним типам силових установок – електромобілям і гібридним транспортним засобам. Визначено їх основні переваги, зокрема підвищену енергоефективність, зменшення викидів шкідливих речовин та зниження експлуатаційних витрат. Розглянуто також ключові проблеми впровадження електромобілів, серед яких висока вартість акумуляторів, обмежений запас ходу, недостатній розвиток зарядної інфраструктури та складність утилізації.

Обґрунтовано доцільність використання гібридних силових установок як компромісного рішення, що поєднує переваги електричного та традиційного приводу. Показано, що застосування ГСУ дозволяє підвищити ефективність використання енергії, знизити витрати палива та покращити екологічні показники транспортних засобів.

*Ключові слова:* ГІБРИДНА СИЛОВА УСТАНОВКА, ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, ДВИГУН ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ, ТЯГОВО-ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПАЛИВНА ЕКОНОМІЧНІСТЬ, ЇЗДОВИЙ ЦИКЛ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ВИТРАТА ПАЛИВА, ЕЛЕКТРИЧНА МАШИНА, ТРАНСПОРТНІ ЗАСОБИ.

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АВТОМОБІЛІ НА ЕЛЕКТРИЧНІЙ ТЯЗІ	8
1.1 Аналіз сучасного ринку автомобілів на електричній тязі.	8
1.2 Класифікація автомобілів з електричною тягою.	11
1.2.1 Транспортні засоби системи BEV.	13
1.2.2 Транспортні засоби системи PHEV.	16
1.2.3 Транспортні засоби системи «plug-in hybrid».	20
1.2.4 Транспортні засоби системи HEV.	22
1.2.5 Транспортні засоби системи REEV.	24
1.3 Основи взаємодії ДВЗ та електродвигуна.	28
1.3.1 Послідовна взаємодія.	28
1.3.2 Паралельна взаємодія.	29
1.3.3 Послідовно-паралельна взаємодія.	30
1.4 Представники розглянутих систем.	32
1.5 Ефективність гібридних електромобілів.	33
Висновки до розділу 1.	36
2. ОСНОВНІ АСПЕКТИ РОЗРАХУНКУ ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК	38
2.1 Оцінка динамічних характеристик.	38
2.2 Аналіз енергетичних витрат.	39
2.3 Стандартизовані їздові цикли та тягово-динамічний розрахунок.	40
2.3.1 Тягово-динамічний розрахунок із послідовною гібридною схемою.	42
2.3.2 Тягово-динамічний розрахунок із паралельною гібридною схемою.	44

КвРАТ. 22110.01.09.00				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Забудько		
Перевір.		Посонський		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Диха		
Експлуатаційні аспекти використання гібридних та електричних транспортних засобів			Літера	Арквш
			4	81
ХНУ, АТ-22-1				

2.4 Паливно-економічний розрахунок гібридних систем.	46
Висновки до розділу 2.	49
<b>3. РЕЗУЛЬТАТИ ТЯГОВО-ДИНАМІЧНОГО І ПАЛИВНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗРАХУНКІВ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ</b>	<b>51</b>
3.1 Результати тягово-динамічного розрахунку.	51
3.2 Результати паливно-економічного розрахунку.	73
Висновку до розділу 3.	77
<b>ВИСНОВКИ</b>	<b>78</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>79</b>
<b>ДОДАТКИ</b>	<b>81</b>

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку автомобільного транспорту характеризується суттєвими змінами, зумовленими глобальними екологічними, економічними та енергетичними викликами. Традиційні транспортні засоби, оснащені двигунами внутрішнього згоряння, протягом тривалого часу залишалися основою автомобільної галузі, проте їх подальше використання супроводжується значним негативним впливом на навколишнє середовище, високим рівнем споживання викопного палива та обмеженістю природних ресурсів.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розвиток альтернативних видів силових установок, серед яких провідне місце займають електромобілі та гібридні транспортні засоби. Вони дозволяють суттєво підвищити енергоефективність, зменшити викиди шкідливих речовин та оптимізувати витрати на експлуатацію транспорту. Активний розвиток технологій акумулювання енергії, силової електроніки та електроприводів сприяє поступовому зростанню частки електрифікованого транспорту у світовому автопарку.

Незважаючи на значний прогрес у цій галузі, існує низка проблем, що стримують широке впровадження електромобілів, зокрема висока вартість акумуляторних батарей, обмежений запас ходу, недостатній розвиток інфраструктури заряджання та складність утилізації енергетичних компонентів. У зв'язку з цим особливу роль відіграють гібридні силові установки, які поєднують переваги електричного та традиційного приводу, забезпечуючи компроміс між економічністю, екологічністю та автономністю.

Гібридні силові установки поєднують у собі двигун внутрішнього згоряння та електричну машину, що дозволяє ефективно використовувати переваги кожного з джерел енергії. Завдяки цьому досягається зниження витрат палива, підвищення коефіцієнта корисної дії силової установки та

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

покращення екологічних показників автомобіля. Разом із тим, складність конструкції та взаємодії компонентів ГСУ вимагає розробки вдосконалених методів їх аналізу та розрахунку.

Актуальність роботи полягає у необхідності підвищення точності оцінювання тягово-динамічних і паливно-економічних характеристик автомобілів із різними типами силових установок, зокрема гібридних. Традиційні методики, що застосовуються для автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння, не враховують у повній мірі особливості роботи електричних машин та алгоритмів керування енергетичними потоками.

Метою роботи є аналіз сучасних тенденцій розвитку електромобілів та застосування методик розрахунку тягово-динамічних і паливно-економічних показників автомобілів із гібридними силовими установками, а також порівняльний аналіз їх ефективності відносно традиційних транспортних засобів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1) проаналізувати основні типи електрифікованих транспортних засобів та їх особливості;
- 2) розглянути існуючі методики оцінювання динамічних характеристик і паливної економічності;
- 3) виконати розрахунок і порівняльний аналіз отриманих показників.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1. АВТОМОБІЛІ НА ЕЛЕКТРИЧНІЙ ТЯЗІ

Актуальність переходу від двигунів внутрішнього згорання до електричних силових установок обґрунтовується низкою факторів. Одним із найбільш наочних є порівняння коефіцієнта корисної дії: електродвигуни характеризуються значно вищою енергоефективністю, ніж традиційні ДВЗ. Це підтверджується практикою використання електроприводів у промисловості, зокрема у вантажопідйомних механізмах і важкій техніці, де вони забезпечують ефективне перетворення енергії в механічну роботу.

## 1.1 Аналіз сучасного ринку автомобілів на електричній тязі.

Однією з ключових проблем впровадження електротранспорту є забезпечення ефективного автономного живлення. Акумуляторні батареї залишаються дорогими, що істотно впливає на вартість електромобілів і стримує їх масове поширення.

Попри посилення екологічних вимог до традиційних видів палива, повного переходу на електричний транспорт у світі поки що не відбулося. Водночас обмеженість запасів нафти та пов'язані з цим економічні ризики стимулюють пошук альтернативних джерел енергії та розвиток нових технологічних рішень у транспортній галузі.

В Україні ринок електромобілів перебуває на стадії формування, проте демонструє позитивну динаміку. Очікується, що в перспективі значна частина міського транспорту буде електрифікована. Сучасні двигуни внутрішнього згорання практично досягли межі свого розвитку з точки зору економічності та екологічності, і подальше їх удосконалення потребує значних ресурсів при відносно незначному ефекті.

Натомість технології електродвигунів та акумуляторних систем мають значний потенціал для розвитку. Це створює передумови для поступового

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

скорочення частки автомобілів з ДВЗ та зростання кількості електричних і гібридних транспортних засобів.

Окремої уваги заслуговує сегмент гібридних автомобілів, який зазнав суттєвих змін. У сучасних моделях ДВЗ дедалі частіше виконує допоміжну функцію, тоді як основну роль відіграє електродвигун. Багато таких автомобілів мають можливість заряджання від зовнішніх джерел, що зменшує залежність від використання традиційного палива.

Разом із тим, серед фахівців відсутній єдиний підхід до визначення поняття «електромобіль». Деякі включають до цієї категорії лише транспорт із повністю електричним приводом, тоді як інші враховують також підзаряджувані гібриди. Незважаючи на це, загальна тенденція розвитку ринку є очевидною – спостерігається стійке зростання обсягів продажу.

Основними факторами, що стримують поширення електромобілів, сьогодні є не стільки ємність акумуляторів, скільки недостатній розвиток інфраструктури. До них належать обмежена кількість зарядних станцій, значна тривалість заряджання та недостатній рівень сервісного обслуговування. Водночас у багатьох країнах запроваджуються державні стимули, які разом із нижчими експлуатаційними витратами поступово підвищують привабливість електротранспорту.

Розвиток ринку електромобілів має нерівномірний характер у різних регіонах світу. Такі країни, як США та Китай, демонструють стрімке зростання, тоді як у менш розвинених державах електромобілі залишаються мало поширеними. Проте загальна динаміка свідчить про експоненційне зростання цього сегмента, рис. 1.1.

В Україні частка електромобілів у світовому ринку залишається незначною. До 2014 року обсяги продажів були мінімальними, однак у подальші роки, особливо після 2021 року, спостерігається активізація ринку. Важливим чинником стало зниження вартості вживаних електромобілів, що імпортуються з країн Європейського Союзу.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Водночас суттєвим обмеженням залишається ресурс акумуляторних батарей, який зазвичай становить 8–10 років. Після цього виникає потреба у їх заміні, причому вартість нової батареї може досягати значної частки ціни самого автомобіля, що впливає на економічну доцільність експлуатації.

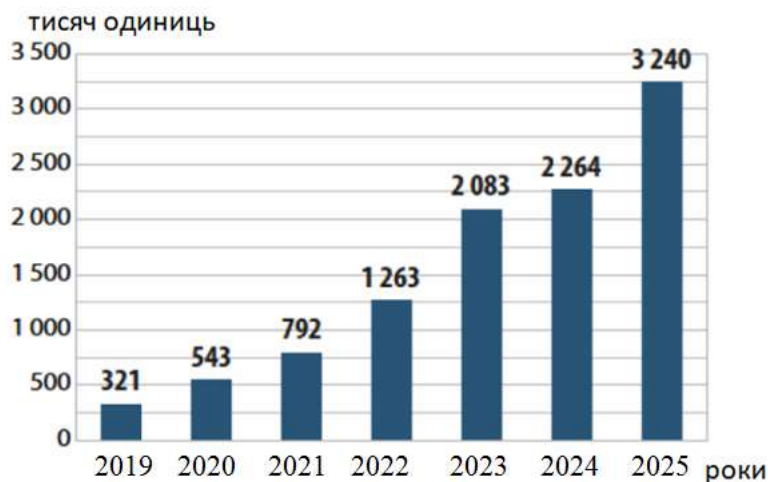


Рисунок 1.1 – Кількість електромобілів на світовому ринку.

Поширення електромобілів в Україні значною мірою стимулюється зростанням зацікавленості з боку бізнес-середовища. Зокрема, електротранспорт дедалі активніше впроваджується у корпоративні автопарки великих логістичних компаній, служб таксі, операторів каршерингу та інших організацій, що прагнуть зменшити експлуатаційні витрати та підвищити екологічність своєї діяльності.

Показовим прикладом інтеграції електрифікованого транспорту є використання гібридних автомобілів у підрозділах Національної поліції України. Так, у 2015 році автопарк патрульної поліції столиці було поповнено автомобілями Toyota Prius, які стали основою службового транспорту під час запуску нової поліції. Загалом, починаючи з 2013 року, правоохоронні органи отримали понад півтори тисячі таких автомобілів.

Подальше оновлення автопарку відбулося у 2017 році, коли було закуплено гібридні кросовери Mitsubishi Outlander PHEV. Ці транспортні

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

засоби належать до класу підзаряджуваних гібридів (PHEV), що поєднують електричний привід із двигуном внутрішнього згорання та мають можливість заряджання від електромережі. Використання таких автомобілів дозволяє суттєво скоротити викиди шкідливих речовин – до 70 % порівняно з традиційними транспортними засобами.

Варто зазначити, що автомобілі Toyota Prius не були прямою безоплатною допомогою Україні. Їх постачання відбулося в рамках механізмів Кіотський протокол. Згідно з цими домовленостями, Україна передала Японії частину невикористаних квот на викиди парникових газів, отримавши натомість сучасні транспортні засоби.

У свою чергу, закупівля автомобілів Mitsubishi Outlander PHEV здійснювалася на пільгових умовах, що дозволило зменшити їх вартість приблизно на 13 %. Це забезпечило суттєву економію бюджетних коштів, яка в сукупності склала понад 100 мільйонів гривень. При цьому повна вартість одного такого автомобіля перевищувала півтора мільйона гривень.

Таким чином, впровадження електрифікованого транспорту в державному секторі стало важливим кроком у розвитку ринку електромобілів в Україні та створило передумови для подальшого розширення їх використання як у державних, так і в приватних структурах.

## 1.2 Класифікація автомобілів з електричною тягою.

Для кращого розуміння перспектив розвитку електротранспорту доцільно розглянути сутність електромобіля, його основні різновиди та роль у майбутньому автомобільної галузі.

Електромобіль являє собою транспортний засіб, у якому рух забезпечується одним або декількома електродвигунами. Джерелом енергії для їх роботи виступають автономні системи живлення, такі як акумуляторні батареї, суперконденсатори або паливні елементи. Важливою ознакою є

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відсутність використання двигуна внутрішнього згорання як основного джерела тяги.

Слід чітко розмежовувати електромобілі та інші види транспорту з електричними компонентами. Зокрема, вони відрізняються від автомобілів із електричною трансмісією, у яких енергія генерується ДВЗ, а також від міського електротранспорту (трамваїв і тролейбусів), що отримує живлення від зовнішньої електромережі. У випадку електромобіля електрична енергія накопичується у внутрішньому джерелі та використовується для приводу ведучих коліс.

Таким чином, під електромобілем зазвичай розуміють автомобіль, у якому електрична енергія, накопичена в хімічних або інших джерелах струму, безпосередньо використовується для створення тягового зусилля.

Основні типи електромобілів, що існують на сьогодні, як правило, класифікуються залежно від типу силової установки та джерела енергії (рисунок 1.2) [5].



Рисунок 1.2 –Типи електромобілів.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

### 1.2.1 Транспортні засоби системи BEV.

BEV (Battery Electric Vehicle) – це транспортні засоби, які повністю працюють на електричній енергії, що накопичується в акумуляторних батареях. У таких автомобілях відсутній двигун внутрішнього згоряння, а вся енергія для руху забезпечується виключно електродвигунами. Зарядження батарей здійснюється від зовнішніх джерел електроенергії, зокрема через зарядні станції або побутову електромережу.

До представників електромобілів цього типу (рисунок 1.3) належать:

1. Volkswagen e-Golf — електрична версія популярного хетчбека, представлена у 2013 році. Автомобіль поєднує практичність і комфорт, оснащений сучасними системами безпеки та допомоги водієві, серед яких електрорегулювання сидінь, світлодіодна оптика, системи контролю тиску в шинах, паркувальні асистенти, клімат-контроль та мультимедійний комплекс.



Рисунок 1.3 – Представники електромобілів BEV:

а) – Volkswagen e-Golf; б) – Nissan LEAF; в) – Tesla Model 3.

2. Nissan Leaf — один із перших масових електромобілів, серійне виробництво якого розпочалося у 2010 році. Особливістю конструкції є розміщення акумуляторної батареї в нижній частині кузова, що сприяє зниженню центра мас і покращенню стійкості. Автомобіль оснащений сучасними системами допомоги водієві, включаючи круговий огляд, функцію E-Pedal, підігрів елементів салону та інтеграцію зі смартфонами.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

3. Tesla Model 3 — сучасний електричний седан, представлений у 2016 році. Модель побудована на новій платформі та вирізняється мінімалістичним інтер'єром із центральним сенсорним дисплеєм, який замінює традиційну панель приладів. У базовій комплектації передбачені розвинені системи безпеки, адаптивний круїз-контроль, мультимедійна система та інші функції комфорту.

Характеристики зазначених моделей наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри електромобілів.

Характеристики	Volkswagen e-Golf	Tesla Model 3	Nissan LEAF
Пробіг автомобіля без підзарядки, км	300	350-520	270-389
Ємність літій-іонної батареї, кВт.	36	62/75	40
Потужність електродвигуна, к.с.	136	473/412/283	150
Час прискорення з 0 до 100 км/год., с.	9,6	3,3-5,8	7,9
Максимальна швидкість, км/год	150	250	144
Роки виробництва:	з 2017 до сьогодні	з 2016 до сьогодні	з 2010 до сьогодні
Привід	передній	задній/повний	передній
Тривалість заряду від розетки (220В):	18	29-32	21
Об'єм багажника, л.	340	561-594	435

Акумуляторні електромобілі функціонують виключно за рахунок накопиченої електроенергії. До основних елементів їх конструкції належать високовольтна тягова батарея, електродвигун (або декілька двигунів) та система керування силовою електронікою.

Однією з ключових переваг електродвигуна є здатність забезпечувати високий крутний момент у широкому діапазоні швидкостей, починаючи з

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

нульових значень. Завдяки цьому більшість електромобілів не потребує складних багатоступневих коробок передач. Трансмсія таких транспортних засобів є значно простішою порівняно з автомобілями, оснащеними двигунами внутрішнього згорання, що позитивно впливає на надійність та ефективність роботи.

Електромобілі типу BEV можуть мати конкурентну собівартість порівняно з автомобілями, оснащеними двигунами внутрішнього згорання, хоча при їх виробництві часто застосовуються дорожчі матеріали та компоненти. Водночас конструкція таких транспортних засобів є значно простішою, оскільки відсутні окремі вузли та системи, характерні для ДВЗ, зокрема стартер, коробка передач складної будови та система відведення відпрацьованих газів.

Експлуатаційні витрати електромобілів також є нижчими. Згідно з дослідженнями, проведеними німецьким науково-дослідним інститутом у місті Гайслінген-ан-дер-Штайге, витрати на технічне обслуговування електромобілів можуть бути приблизно на третину меншими порівняно з традиційними автомобілями. Це пояснюється меншою кількістю рухомих частин та відсутністю складних механічних систем.

Процес заряджання електромобілів здійснюється від електричної мережі, при цьому ефективність зарядних пристроїв зазвичай знаходиться в межах 58–88 %. Сам електродвигун характеризується високим коефіцієнтом корисної дії, який може досягати 84–96 % у широкому діапазоні режимів роботи. Перетворення електроенергії з постійного струму акумулятора в змінний струм для живлення двигуна здійснюється за допомогою інвертора з ефективністю близько 94 %. У результаті сумарний ККД електромобіля перевищує 68 %, що значно вище за показники автомобілів із ДВЗ, ефективність яких зазвичай не перевищує 20 %, а для сучасних дизельних двигунів може досягати близько 40 %.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні електромобілі BEV за своїми експлуатаційними характеристиками, рівнем комфорту та безпеки практично не поступаються традиційним автомобілям. Серед популярних моделей можна виділити Nissan Leaf та Renault Zoe, які конкурують із такими представниками ринку, як Tesla Model S, Chevrolet Bolt, Jaguar XJ, BMW 7 та Mercedes-Benz S-Class. Багато автовиробників використовують вже існуючі платформи або адаптують попередні технологічні рішення для створення електромобілів, що дозволяє скоротити витрати на розробку.

З екологічної точки зору електромобілі мають суттєві переваги. Безпосередньо під час експлуатації вони не утворюють викидів вуглекислого газу. Проте слід враховувати, що викиди CO<sub>2</sub> можуть виникати на етапі виробництва електроенергії, яка використовується для заряджання батарей. Незважаючи на це, загальний рівень викидів упродовж життєвого циклу електромобіля залишається на 45–50 % нижчим порівняно з автомобілями з двигунами внутрішнього згорання.

### 1.2.2 Транспортні засоби системи PHEV.

Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) – це транспортний засіб, що поєднує електродвигун і двигун внутрішнього згорання. Основною особливістю таких автомобілів є можливість заряджання акумуляторної батареї від зовнішніх джерел електроенергії. Зазвичай батареї PHEV мають більшу ємність, ніж у традиційних гібридів, що дозволяє забезпечити більший запас ходу як у повністю електричному режимі, так і в комбінованому.

До характерних особливостей плагін-гібридів можна віднести:

1) можливість підзарядки від зовнішніх електромереж або автономних енергетичних установок;

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

2) використання енергетичних систем, що можуть базуватися на відновлюваних джерелах енергії;

3) застосування сучасних технологій керування зарядом, зокрема алгоритмів типу MPPT (Maximum Power Point Tracking), які оптимізують ефективність роботи як сонячних, так і вітрових джерел енергії;

4) поєднання двох джерел енергії, що забезпечує гнучкість у використанні транспортного засобу.

Принцип роботи плагін-гібридного автомобіля наведено на рисунку 1.4. Такі транспортні засоби можуть рухатися як за рахунок електродвигуна, так і за допомогою ДВЗ, або ж використовувати обидва джерела енергії одночасно для досягнення максимальної ефективності.

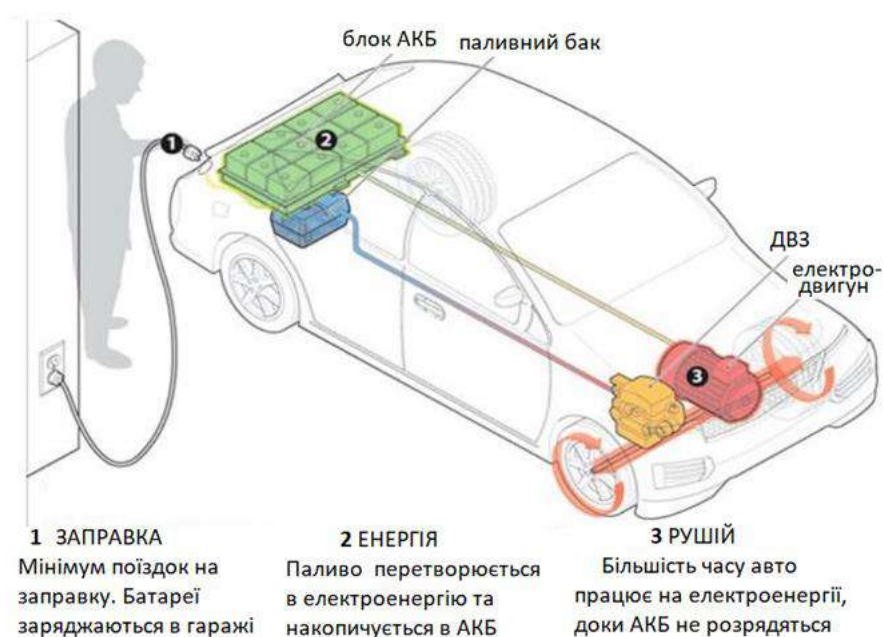


Рисунок 1.4 – Принцип роботи плагін гібридного автомобіля та його основні вузли [4].

До прикладів автомобілів цього типу (рисунок 1.5) належать:

1. Range Rover P400e – плагін-гібридний позашляховик, у якому поєднано бензиновий двигун об'ємом 2,0 л та електродвигун потужністю близько 105 кВт. Сукупна потужність силової установки перевищує 400 к.с.,

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

що забезпечує високі динамічні характеристики при відносно низькій витраті палива. Автомобіль здатний долати до кількох десятків кілометрів виключно на електротязі, що дозволяє значно знизити рівень шкідливих викидів.

2. Toyota Prius Plug-in Hybrid XW50 – представник другого покоління плагін-гібридів на базі популярної моделі Prius. Автомобіль має покращені технічні характеристики, зокрема збільшений запас ходу в електричному режимі та знижену витрату палива. Досягнення високої ефективності стало можливим завдяки вдосконаленню двигуна внутрішнього згорання, зменшенню маси, оптимізації аеродинаміки та модернізації тягової батареї. Цікавою особливістю є те, що генератор у певних режимах може виконувати функцію електродвигуна, підсилюючи тягу під час розгону.



а)

б)

Рисунок 1.5 – Представники електромобілів BEV:

а) – Range Rover PHEV P400e; б) – Toyota Prius XW50 Plug-in Hybrid

Характеристики зазначених моделей наведено у таблиці 1.2.

Останніми роками інтерес до плагін-гібридів значно зріс. Вони активно проходять випробування як у державному, так і в комерційному секторі, особливо у США. Провідні автомобільні компанії регулярно презентують нові концепти та серійні моделі на міжнародних виставках, а також оголошують про запуск їх масового виробництва.

Попри це, широке розповсюдження PHEV серед приватних користувачів поки що обмежується високою вартістю таких транспортних

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

засобів. Водночас технологія продовжує активно розвиватися, і кількість доступних моделей поступово зростає.

Таблиця 1.2 – Параметри PHEV автомобілів.

Характеристики	Range Rover PHEV P400e	Toyota Prius PHEV XW50
Пробіг автомобіля:		
- без підзарядки (на електродвигуні), км	48	60
- без дозаправки, км	827	1150
Потужність електродвигуна + ДВЗ, к.с.	404	122
Час прискорення з 0 до 100 км/год, с.	6,8	10,6
Максимальна швидкість, км/год	210	180
Об'єм ДВЗ, літрів	2,0	1,8
Тип палива	бензин	бензин
Витрата палива на 100 км, л.	2,8	3,3
Роки виробництва:	2019 - 2022	2011-2016
Об'єм багажника, л.	472	502
Тип кузова: 5-ти дверний	позашляховик	хетчбек
Привід	повний	передній

Питання ефективності витрати палива плагін-гібридів також активно досліджується. Зокрема, організація California Cars Initiative ще у 2005 році продемонструвала можливість досягнення дуже низьких показників витрати пального. У рамках експерименту було модифіковано автомобіль Toyota Prius 2004, який після переобладнання у плагін-гібрид зміг подолати значну відстань із мінімальними витратами палива. Результати дослідження підтвердили перспективність даного напрямку розвитку транспортних технологій.

На сучасному етапі спостерігається зростання кількості підприємств, що займаються розробкою, виробництвом та модернізацією плагін-гібридних автомобілів. Значна частина таких транспортних засобів орієнтована на

використання у корпоративних та державних автопарках, проте вони також стають дедалі доступнішими для приватних споживачів.

### 1.2.3 Транспортні засоби системи «plug-in hybrid».

Основою плагін-гібридного автомобіля є комбінована силова установка, що включає електродвигун і двигун внутрішнього згорання. У більшості режимів руху провідну роль відіграє саме електромотор, який забезпечує початковий розгін і рух на невеликих швидкостях. Двигун внутрішнього згорання підключається у випадках інтенсивного прискорення, високих навантажень або при розрядженні акумуляторної батареї.

Завдяки такій схемі роботи плагін-гібриди мають низку суттєвих переваг:

- 1) зменшене споживання палива на одиницю пробігу;
- 2) збільшений загальний запас ходу за рахунок використання двох джерел енергії;
- 3) підвищений рівень екологічності порівняно з традиційними автомобілями з ДВЗ;
- 4) економія експлуатаційних витрат;
- 5) зниження викидів вуглекислого газу в атмосферу.

Сучасні виробники пропонують широкий вибір моделей та технічних рішень у сегменті плагін-гібридів. Значну роль у їх ефективності відіграє тип акумуляторної батареї, яка визначає запас ходу, масу автомобіля та його вартість.

Основні типи акумуляторів, що використовуються у PHEV:

- 1) Свинцево-кислотні акумулятори – характеризуються низькою вартістю та доступністю, однак мають обмежену енергоємність (близько 2,5–3 кВт·год) і невисокий ресурс роботи. Для досягнення необхідної потужності потребують значних габаритів, що є їх основним недоліком.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2) Нікель-металогідридні акумулятори – забезпечують більш збалансоване співвідношення вартості та енергоємності (приблизно 4–5 кВт·год). Вони відзначаються достатньою надійністю та довговічністю, хоча їх продуктивність залишається середньою.

3) Літій-іонні акумулятори – є найсучаснішим і найбільш ефективним рішенням. Вони мають високу енергоємність (приблизно від 9 кВт·год і більше), що дозволяє збільшити запас ходу на електротязі до 60–70 км. До їх переваг належать невелика маса, висока енергоефективність та довговічність, проте суттєвим недоліком залишається висока вартість.

Плагін-гібридні автомобілі поєднують у собі сильні сторони електромобілів та транспортних засобів із двигунами внутрішнього згорання. При щоденних поїздках на короткі відстані вони можуть працювати виключно на електричній енергії, що дозволяє повністю уникнути витрат палива. У разі потреби ДВЗ забезпечує додаткову потужність або виступає основним джерелом енергії.

До основних переваг PHEV можна віднести:

- 1) можливість руху на альтернативних видах палива, таких як біодизель або етанол;
- 2) суттєву економію пального – у середньому вдвічі меншу витрату порівняно з аналогічними бензиновими автомобілями;
- 3) зниження залежності від традиційних енергоресурсів;
- 4) універсальність використання в різних умовах експлуатації.

Світова автомобільна промисловість активно рухається у напрямку електрифікації транспорту. Протягом останнього десятиліття більшість провідних автовиробників розпочали серійний випуск плагін-гібридних моделей. На українському ринку вже представлені різні покоління таких автомобілів, серед яких Lexus RX450h, Toyota Camry Hybrid, Lexus RX400h, Honda Civic Hybrid та Toyota Prius.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загалом, розвиток плагін-гібридних технологій є важливим етапом переходу до повністю електричного транспорту, оскільки вони забезпечують поступову адаптацію користувачів до нових енергетичних рішень.

#### 1.2.4 Транспортні засоби системи HEV.

Гібридний електромобіль (HEV – Hybrid Electric Vehicle) є транспортним засобом, у якому поєднуються два типи силових установок: електрична та двигун внутрішнього згорання. Така комбінація дозволяє підвищити загальну ефективність роботи автомобіля та знизити витрати палива за рахунок використання електричної тяги в оптимальних режимах.

Одним із найвідоміших представників цього класу є Toyota Prius, який став одним із перших масових гібридних автомобілів і демонструє високі показники паливної економічності серед транспортних засобів із ДВЗ.

До основних переваг гібридних автомобілів можна віднести:

- 1) підвищений коефіцієнт корисної дії силової установки;
- 2) стабільну роботу двигунів у оптимальних режимах;
- 3) зменшення витрат палива;
- 4) можливість спрощення конструкції трансмісії у порівнянні з традиційними автомобілями.

Разом із тим, гібридні автомобілі мають і певні недоліки:

- 1) втрати енергії під час багатоетапного перетворення;
- 2) висока вартість і значна маса акумуляторних батарей.

Прикладом сучасного гібридного автомобіля є Audi A6 Hybrid, який поєднує високі динамічні характеристики з економічністю та сучасним дизайном. Для таких автомобілів характерні значні показники потужності, висока максимальна швидкість та порівняно невелика витрата палива.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Принцип роботи гібридного автомобіля наведено на рисунку 1.6. Він базується на взаємодії двигуна внутрішнього згорання, електрогенератора, електродвигуна та акумуляторної батареї.

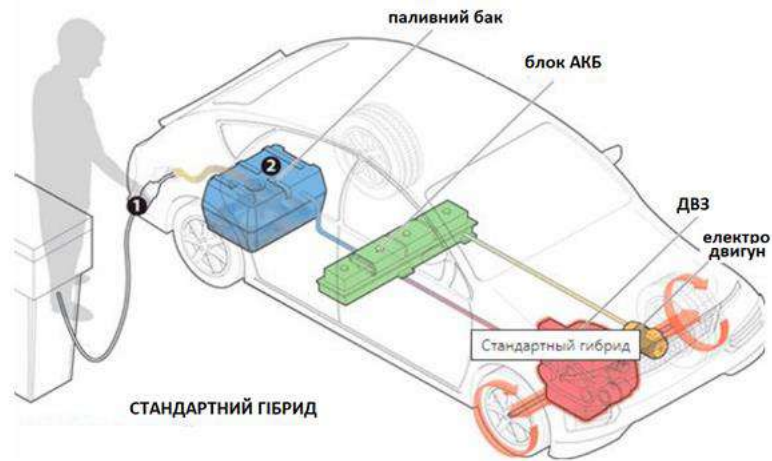


Рисунок 1.6 – Принцип роботи гібридного автомобіля, його основні вузли та агрегати [4]

Застосування електричної трансмісії обумовлене особливостями роботи двигунів внутрішнього згорання, які мають обмежений діапазон ефективної роботи та досягають максимального ККД лише при певних обертах. Для компенсації цього недоліку у традиційних автомобілях використовуються механічні коробки передач, що, у свою чергу, призводить до додаткових втрат енергії.

На відміну від ДВЗ, електродвигун забезпечує рівномірну характеристику крутного моменту в усьому діапазоні швидкостей. Він може миттєво запускатися, зупинятися та змінювати напрямок обертання, що дозволяє відмовитися від зчеплення і значно спростити конструкцію трансмісії. У деяких конструкціях електродвигуни можуть розміщуватися безпосередньо в колесах, що додатково підвищує ефективність системи.

У разі використання електричної трансмісії двигун внутрішнього згорання може виконувати функцію приводу генератора, який виробляє

						КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			23

електроенергію. Ця енергія через систему керування передається на електродвигуни, що забезпечують рух автомобіля. Така схема роботи фактично нагадує мобільну електростанцію, інтегровану в транспортний засіб.

Гібридні автомобілі також оснащуються акумуляторною батареєю, яка має меншу ємність порівняно з повністю електричними автомобілями, що дозволяє зменшити масу транспортного засобу. Загальна ефективність таких систем є вищою, ніж у традиційних автомобілів із ДВЗ, і може досягати 75–92 %, тоді як для звичайних автомобілів цей показник становить близько 30–45 %.

Гібриди частково усувають основні недоліки електромобілів, зокрема значну масу акумуляторів, тривалий час заряджання, недостатньо розвинену інфраструктуру зарядних станцій та обмежений запас ходу. У процесі експлуатації автомобіль може працювати як електромобіль на коротких дистанціях, а після зниження рівня заряду автоматично активується двигун внутрішнього згоряння, який забезпечує подальший рух і підзарядку акумуляторів. Після відновлення заряду цикл повторюється.

Таким чином, гібридні електромобілі поєднують у собі переваги двох типів силових установок і є ефективним перехідним етапом до повної електрифікації транспорту.

#### 1.2.5 Транспортні засоби системи REEV.

REEV (Range Extended Electric Vehicle) — це різновид електромобілів із розширеним запасом ходу, в яких основним джерелом тяги є електродвигун, а додаткове вироблення електроенергії здійснюється за допомогою невеликого двигуна внутрішнього згоряння, що працює як генератор. Принцип роботи та складові елементи таких транспортних засобів наведені на рисунку 1.7.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

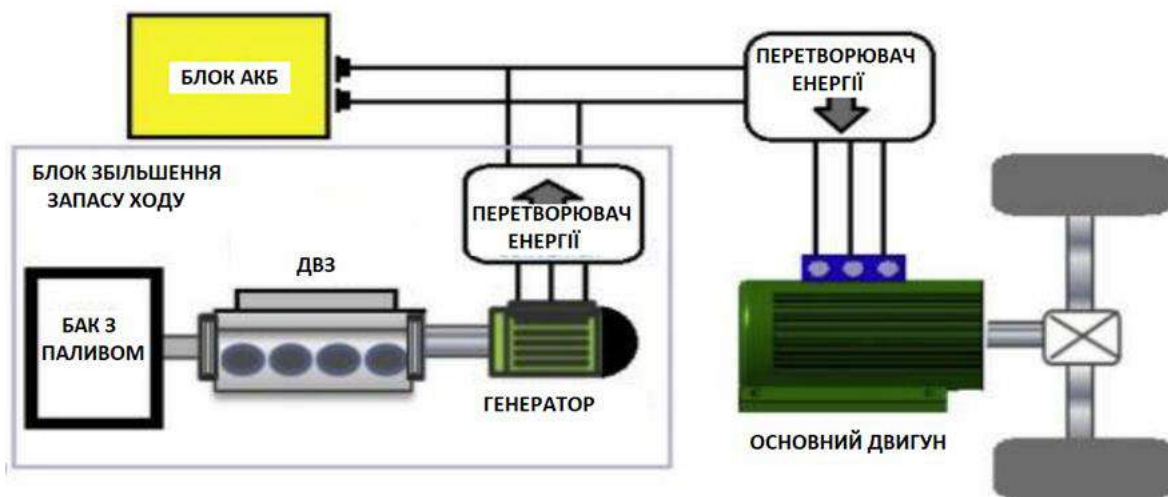


Рисунок 1.7 – Принцип роботи електромобіля зі збільшеним запасом ходу REEV, його основні вузли та агрегати [10]

На сучасному етапі розвитку транспортних технологій REEV розглядаються як ефективна альтернатива традиційним автомобілям із ДВЗ. Вони дозволяють зберегти звичний рівень мобільності та комфорту, водночас зменшуючи споживання палива і рівень шкідливих викидів. Подібно до плагін-гібридів, такі автомобілі можуть використовуватися як повністю електричні транспортні засоби при експлуатації на коротких дистанціях.

Електромобіль типу REEV фактично є повністю електричним за принципом руху, оскільки колеса приводяться в дію виключно електродвигуном. Двигун внутрішнього згоряння не бере безпосередньої участі у створенні тяги, а використовується лише для генерації електроенергії, яка подається на електродвигун або використовується для підзарядки акумуляторної батареї.

Конструктивно такі автомобілі можна розглядати як електромобілі з акумулятором підвищеної ємності (приблизно 15–20 кВт·год) та додатковим генератором. При зниженні рівня заряду батареї до певного значення автоматично активується ДВЗ, який запускає генератор. Вироблена електроенергія забезпечує живлення електродвигуна та частково відновлює

										Арк.
										25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

заряд акумулятора. Така схема дозволяє усунути обмеження запасу ходу, характерне для класичних BEV.

На коротких дистанціях REEV функціонує як звичайний електромобіль із нульовими локальними викидами. При збільшенні відстані руху підключається генераторна установка, що значно знижує споживання палива у порівнянні з традиційними автомобілями. Це пояснюється двома основними факторами:

1) використання менш потужного двигуна внутрішнього згорання, який працює лише для покриття середнього навантаження, тоді як пікові режими забезпечуються акумулятором;

2) робота ДВЗ у стабільному режимі обертів, близькому до оптимального, що підвищує його ефективність.

Ключовим елементом системи REEV є так званий «розширювач запасу ходу» (Range Extender) — допоміжна енергетична установка, яка приводить у дію генератор для підзарядки акумулятора. Найчастіше в цій ролі використовується двигун внутрішнього згорання, однак можливе застосування й інших джерел енергії, зокрема паливних елементів.

Однією з головних переваг REEV є зменшення так званої «тривоги запасу ходу», що є одним із ключових бар'єрів для широкого впровадження електромобілів. Завдяки наявності додаткового джерела енергії транспортний засіб зберігає високу автономність навіть після розрядження основної батареї.

У конструктивному плані REEV мають спрощену трансмісію, оскільки відсутня потреба у традиційній коробці передач. Крім того, двигун-генератор підбирається відповідно до середніх, а не пікових навантажень, що дозволяє підвищити загальну енергоефективність системи.

Робота електромобіля REEV починається з повністю зарядженої акумуляторної батареї. На початковому етапі рух здійснюється виключно за рахунок електротяги. Під час гальмування частина енергії повертається в

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

батарею завдяки рекуперації. Після зниження рівня заряду до визначеного значення система автоматично переходить у режим підтримання заряду, в якому ДВЗ періодично вмикається для забезпечення необхідного рівня енергії. Різні режими роботи таких систем наведені на рисунку 1.8.

Яскравим прикладом електромобіля цього типу є Chevrolet Volt, розроблений компанією General Motors. Даний автомобіль оснащений літій-іонною батареєю ємністю близько 16 кВт·год і бензиновим двигуном, який використовується як генератор. У повністю електричному режимі він здатний подолати приблизно 40–80 км, після чого переходить у режим розширеного запасу ходу.

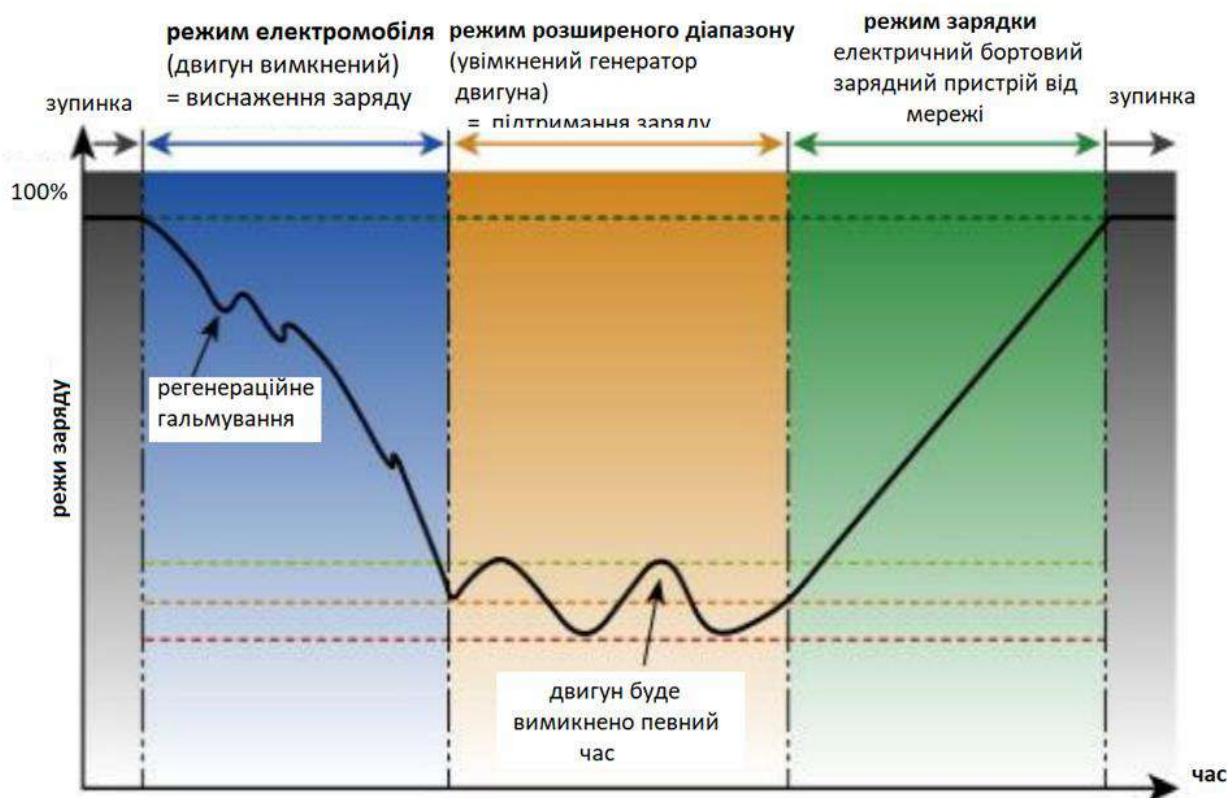


Рисунок 1.8 – Різноманітні режими роботи REEV [3]

У такому режимі двигун внутрішнього згоряння забезпечує вироблення електроенергії для живлення електродвигуна та підтримання заряду батареї. При цьому електродвигун залишається єдиним джерелом механічної енергії

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

для приводу коліс. Використання побутових електромереж для заряджання (120–230 В) робить експлуатацію таких автомобілів зручною та доступною.

Загалом, електромобілі типу REEV поєднують переваги BEV і гібридних транспортних засобів, забезпечуючи високу енергоефективність, екологічність та значний запас ходу, що робить їх перспективним напрямком розвитку сучасного автомобілебудування.

### 1.3 Основи взаємодії ДВЗ та електродвигуна.

У науковій літературі описано різні варіанти побудови гібридних силових установок, які відрізняються способом взаємодії електричної та теплової енергії. Узагальнено їх можна класифікувати на дві основні групи: послідовні та паралельні схеми. У першому випадку між двигуном внутрішнього згоряння та електродвигуном відсутній механічний зв'язок – передача енергії здійснюється виключно електричним шляхом. У другому випадку обидва двигуни мають механічне з'єднання та можуть одночасно передавати крутний момент на ведучі колеса.

#### 1.3.1 Послідовна взаємодія.

Послідовна схема є логічним розвитком концепції електромобіля, доповненого генераторною установкою для збільшення запасу ходу. У такій системі рух транспортного засобу забезпечується виключно електродвигуном, тоді як двигун внутрішнього згоряння використовується лише для приводу генератора (рисунок 1.9).

Генератор виробляє електроенергію, яка або безпосередньо подається на електродвигун, або накопичується в акумуляторній батареї. Таким чином, ДВЗ не має прямого механічного зв'язку з колесами.

До основних переваг послідовної схеми належать:

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

- спрощена трансмісія, яка не потребує складної коробки передач;
- можливість роботи двигуна внутрішнього згоряння в оптимальному режимі обертів і навантаження;
- відносно проста система керування.



Рисунок 1.9 – Послідовна схема гібридної силової установки.

Водночас така схема має і певні недоліки:

- багатоетапне перетворення енергії (механічна → електрична → механічна), що знижує загальний ККД;
- збільшення маси та вартості системи через наявність декількох енергетичних перетворювачів;
- необхідність використання акумулятора великої ємності.

Подібна схема застосовується, зокрема, в автомобілях BMW із REx, Cadillac ELR, Chevrolet Volt 2015, а також у гібридних автобусах, наприклад Toyota Coaster Hybrid.

### 1.3.2 Паралельна взаємодія.

Паралельна схема є еволюційним розвитком традиційних автомобілів із двигуном внутрішнього згоряння, у яких електродвигун виконує допоміжну функцію (рисунок 1.10).

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

У такій конфігурації обидва джерела енергії – електродвигун і ДВЗ – можуть передавати крутний момент на колеса як окремо, так і спільно. Це забезпечує гнучкість у роботі силової установки залежно від умов руху.



Рисунок 1.10 – Паралельна схема гібридної силової установки

Переваги паралельної схеми:

- можливість використання двигунів меншої потужності за рахунок їх спільної роботи;
- менші вимоги до ємності акумуляторної батареї;
- нижча вартість у порівнянні з послідовною схемою.

Недоліки:

- складніша система керування, що забезпечує узгоджену роботу двох двигунів;
- ускладнення конструкції трансмісії додатковими механізмами.

### 1.3.3 Послідовно-паралельна взаємодія.

Послідовно-паралельна схема поєднує елементи обох попередніх типів і є найбільш універсальною (рисунок 1.11). У ній реалізується можливість роботи як у послідовному, так і в паралельному режимах залежно від умов експлуатації.

На малих швидкостях і під час початку руху автомобіль зазвичай використовує електричну тягу. Двигун внутрішнього згоряння у цей момент

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може працювати як привід генератора. При русі на високих швидкостях або при підвищених навантаженнях ДВЗ може безпосередньо передавати крутний момент на колеса.

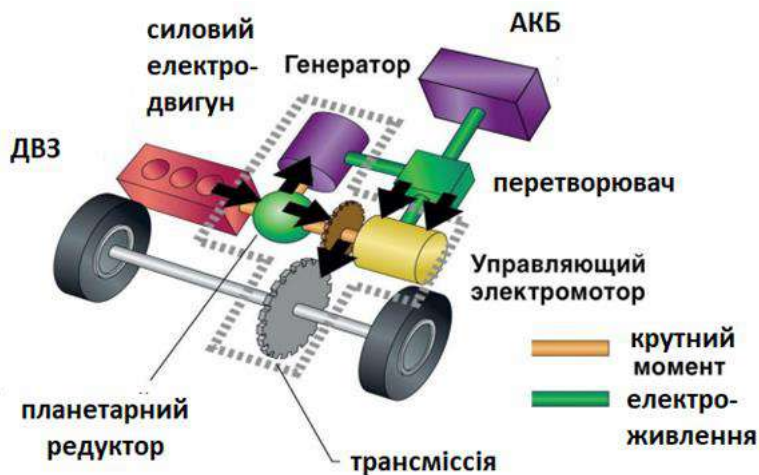


Рисунок 1.11 – Послідовно-паралельна схема гібридної силової установки.

У випадку недостатньої потужності генератора електродвигун додатково живиться від акумуляторної батареї. Система також передбачає використання рекуперативного гальмування для відновлення енергії.

Ключовим елементом такої схеми є планетарний механізм розподілу потужності, який забезпечує оптимальне співвідношення між потоками енергії від двигуна внутрішнього згоряння, генератора та електродвигуна. Управління всіма процесами здійснюється електронною системою керування.

Переваги цієї схеми:

- висока паливна економічність;
- хороші динамічні характеристики;
- гнучкість у виборі режимів роботи.

Недоліки:

- складніша конструкція силової установки;

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- вища вартість через використання додаткових компонентів і складної системи керування.

Таким чином, різні схеми взаємодії електродвигуна та двигуна внутрішнього згоряння дозволяють адаптувати гібридні транспортні засоби до різних умов експлуатації, забезпечуючи оптимальний баланс між ефективністю, економічністю та складністю конструкції.

#### 1.4 Представники розглянутих систем.

Кожен із розглянутих раніше типів гібридних силових установок отримав практичне застосування як у дослідних зразках, так і в серійних моделях транспортних засобів. Доцільно розглянути найбільш поширені та технічно вдалі приклади реалізації таких рішень.

Серед представників послідовної схеми варто відзначити історичну модель Lohner-Porsche, а також сучасний автомобіль Chevrolet Volt. Останній оснащений електродвигуном потужністю близько 120 кВт із крутним моментом приблизно 320 Н·м, а також літій-іонною тяговою батареєю ємністю 16,5 кВт·год. Час повної зарядки від електромережі становить близько трьох годин. Розгін до швидкості 100 км/год займає близько 8 секунд, а максимальна швидкість сягає 190 км/год. Додатково автомобіль обладнаний генераторною установкою на базі трициліндрового двигуна внутрішнього згоряння потужністю близько 53 кВт і робочим об'ємом 1 літр. Завдяки поєднанню паливного бака об'ємом близько 45 літрів і повністю зарядженої батареї запас ходу може досягати приблизно 1000 км.

Що стосується паралельної схеми, то найбільшого поширення у світі набули такі моделі, як Toyota Prius та Honda Insight, які виробляються масово та користуються стабільним попитом.

Автомобіль Toyota Prius є одним із найуспішніших гібридів у світовій практиці. Останні покоління цієї моделі комплектуються бензиновим

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

двигуном об'ємом 1,8 л потужністю близько 73 кВт, а також двома електромашинами сумарною потужністю приблизно 60 кВт. Робота силової установки реалізується через планетарний механізм розподілу потужності. Напруга системи становить близько 650 В, а ємність акумулятора — близько 1,3 кВт·год. Сумарна потужність силового агрегату досягає близько 100 кВт, що дозволяє автомобілю розганятися до 100 км/год приблизно за 10 секунд. Середня витрата палива у змішаному циклі становить близько 4,7 л/100 км.

Модель Honda Insight виступає прямим конкурентом Toyota Prius. Перше покоління цього автомобіля тривалий час займало провідні позиції у рейтингах економічності серед транспортних засобів із двигунами внутрішнього згоряння. Сучасні версії оснащуються бензиновим двигуном об'ємом 1,3 л і потужністю близько 73 кВт. Додаткову тягу на малих обертах забезпечує електродвигун потужністю близько 10 кВт, який встановлюється на колінчастому валу. Живлення здійснюється від акумулятора ємністю приблизно 0,58 кВт·год. Автомобіль обладнаний варіаторною трансмісією, забезпечує розгін до 100 км/год за близько 10,3 секунди, а середня витрата палива становить близько 5,6 л/100 км.

Таким чином, аналіз сучасних світових розробок свідчить про ефективне впровадження різних схем гібридних силових установок у серійне виробництво. Кожна з них має свої технічні особливості та переваги, що визначають сферу їх застосування та перспективи подальшого розвитку.

### 1.5 Ефективність гібридних електромобілів.

Однією з ключових переваг гібридних транспортних засобів є суттєве зниження витрати палива. Це пояснюється тим, що під час руху в міських умовах, особливо при розгоні та на малих швидкостях, автомобіль часто використовує електричну тягу, що дозволяє скоротити споживання пального приблизно на 25–35 %. У деяких випадках гібридні моделі здатні

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

пересуватися виключно на електроприводі на відстань до 80 км зі швидкістю до 50–60 км/год, що значно зменшує потребу в частих заправках.

У замських умовах ефективність також залишається високою: кількість зупинок для заправки може зменшуватися майже вдвічі. Наприклад, гібридний автомобіль Toyota Prius здатний подолати близько 1000 км на одному баку пального об'ємом 45 літрів.

Ще однією важливою перевагою є підвищення енергоефективності силової установки. Завдяки поєднанню електродвигуна та двигуна внутрішнього згорання досягнення необхідної потужності можливе при використанні меншого за об'ємом і потужністю ДВЗ. У результаті загальна економія потужності традиційного двигуна може становити 30–50 %. Водночас електродвигуни мають високий коефіцієнт корисної дії (до 90–95 %), що позитивно впливає на загальну ефективність системи.

Сукупність зазначених факторів забезпечує значне зниження витрат пального: для автомобілів середнього класу витрата у міському циклі становить приблизно 5–6 л/100 км, тоді як аналогічні моделі з виключно двигуном внутрішнього згорання споживають у середньому 11–12 л/100 км. Зменшення витрати палива безпосередньо пов'язане зі скороченням викидів шкідливих речовин. Гібридні автомобілі характеризуються значно нижчим рівнем викидів твердих частинок і вуглеводнів (до 90 % менше), а також оксидів азоту (приблизно на 50 % менше). Найбільш відчутний екологічний ефект досягається при експлуатації в помірних режимах руху.

Додатковою перевагою є відсутність викидів під час простою, наприклад у заторах, оскільки в таких умовах автомобіль працює від акумуляторної батареї. Електродвигун забезпечує швидкий запуск і зупинку без потреби в холостому ході, що також дозволяє спростити конструкцію трансмісії, зокрема відмовитися від традиційного зчеплення.

Разом із перевагами гібридні автомобілі мають і певні недоліки. Основним стримуючим фактором залишається їхня вартість. У порівнянні з

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

традиційними автомобілями аналогічного класу гібриди зазвичай дорожчі на 15–20 %. Економічна доцільність їх придбання проявляється лише в довгостроковій перспективі, оскільки окупність за рахунок економії пального може становити від чотирьох до семи років залежно від умов експлуатації.

Ще одним суттєвим недоліком є проблема утилізації акумуляторних батарей. Хоча сучасні батареї мають значно більший ресурс (порівняно з ранніми моделями), з часом вони втрачають свої характеристики та потребують заміни. Процес утилізації або переробки таких елементів залишається складним і потребує спеціалізованих технологій.

Таким чином, гібридні автомобілі поєднують у собі високий рівень економічності та екологічності, проте їх поширення обмежується високою початковою вартістю та питаннями, пов'язаними з життєвим циклом акумуляторів.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновки до розділу 1.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що сучасний розвиток автомобільного транспорту характеризується поступовим переходом від традиційних транспортних засобів із двигунами внутрішнього згорання до електрифікованих силових установок. Основними чинниками цього процесу є необхідність зменшення залежності від викопного палива, підвищення енергоефективності та зниження негативного впливу на довкілля.

Дослідження сучасного стану ринку електромобілів показало, що, незважаючи на нерівномірність розвитку в різних країнах, спостерігається стійка тенденція до зростання частки електричного та гібридного транспорту. В Україні цей сегмент перебуває на етапі активного становлення, проте вже демонструє позитивну динаміку, зумовлену як економічними, так і екологічними факторами.

Встановлено, що існує кілька основних типів електромобілів, зокрема BEV, HEV, PHEV та REEV, кожен з яких має свої конструктивні особливості, принципи роботи та сферу застосування. Найбільш екологічно чистими є повністю електричні автомобілі (BEV), тоді як гібридні варіанти (HEV, PHEV, REEV) забезпечують компроміс між екологічністю та автономністю руху.

Аналіз принципів роботи гібридних силових установок показав, що їх ефективність значною мірою залежить від обраної схеми взаємодії електродвигуна та двигуна внутрішнього згорання (послідовної, паралельної або комбінованої). Кожна зі схем має свої переваги та недоліки, що визначають доцільність її використання залежно від умов експлуатації транспортного засобу.

Огляд світових зразків автомобілів підтвердив практичну реалізацію різних типів гібридних і електричних силових установок у серійному виробництві. Провідні автомобільні виробники активно впроваджують

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

інноваційні технології, спрямовані на підвищення ефективності, зниження витрат палива та покращення екологічних показників.

Визначено, що основними перевагами електромобілів і гібридів є висока енергоефективність, зниження витрат палива, зменшення викидів шкідливих речовин та покращення умов експлуатації в міському середовищі. Водночас до основних недоліків належать висока вартість транспортних засобів, обмеження, пов'язані з інфраструктурою заряджання, а також проблеми утилізації акумуляторних батарей.

Таким чином, електрифікація автомобільного транспорту є одним із ключових напрямів розвитку сучасної транспортної галузі. Подальше вдосконалення технологій акумулявання енергії, розширення інфраструктури заряджання та зниження вартості виробництва сприятимуть більш широкому впровадженню електромобілів у майбутньому.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2. ОСНОВНІ АСПЕКТИ РОЗРАХУНКУ ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК

### 2.1 Оцінка динамічних характеристик.

Наявні експериментальні результати досліджень дослідних і серійних зразків, а також аналітичні огляди існуючих схем гібридних силових установок (ГСУ), не забезпечують достатньої інформаційної бази для повноцінної оцінки та зіставлення характеристик автомобілів при розробці нових конструкцій. Це ускладнює вибір оптимальної конфігурації ГСУ та параметрів її складових елементів.

У класичній теорії автомобіля для транспортних засобів із двигуном внутрішнього згоряння оцінювання здійснюється за показниками тягово-швидкісних властивостей. До основних із них належать максимальна швидкість руху, час розгону та здатність долати підйоми певної крутизни. Для визначення цих параметрів традиційно застосовується тягово-динамічний розрахунок, який передбачає визначення повної маси автомобіля, вибір шин, побудову зовнішньої швидкісної характеристики двигуна, розрахунок передавальних чисел трансмісії, формування тягових і динамічних характеристик, а також оцінку показників розгону.

Разом із тим класичний підхід не може бути безпосередньо використаний для автомобілів із ГСУ. Це пояснюється тим, що він базується на припущенні роботи двигуна внутрішнього згоряння за зовнішньою швидкісною характеристикою та передбачає перемикання передач при досягненні максимальної частоти обертання колінчастого вала, що не відповідає реальним умовам функціонування гібридних систем.

Існує також удосконалений метод тягово-динамічного розрахунку, який враховує процес перемикання передач і особливості керування двигуном. Незважаючи на усунення частини недоліків традиційного підходу,

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

він також не придатний для адекватного опису роботи автомобілів із гібридними силовими установками.

Окремо слід відзначити методику визначення основних показників тягово-швидкісних властивостей транспортних засобів із комбінованими енергетичними установками. У ній наведено алгоритм розрахунку та приклади його реалізації. Проте дана методика також характеризується рядом обмежень: розрахунки виконуються для режимів руху, які не повною мірою відображають реальні умови експлуатації, а вплив системи керування не враховується. Крім того, розрахунок швидкісної характеристики ГСУ розглядається лише для окремого випадку – паралельної схеми з використанням узгоджувального редуктора з фіксованим передатним числом.

Таким чином, існуючі підходи до тягово-динамічного аналізу потребують подальшого вдосконалення з урахуванням специфіки роботи гібридних силових установок, зокрема взаємодії джерел енергії та алгоритмів керування.

## 2.2 Аналіз енергетичних витрат.

У сучасних умовах оцінка динамічних характеристик транспортного засобу нерозривно пов'язана з аналізом енергетичних витрат, необхідних для їх досягнення. Для автомобілів із двигуном внутрішнього згорання таким узагальнюючим показником виступає паливна економічність.

З огляду на різноманітність режимів руху автомобіля нормативні документи виділяють окремі показники паливної економічності, серед яких: витрата палива в міському циклі, витрата на заміському (магістральному) режимі, а також витрати на окремих усталених режимах руху. Визначення цих показників у нормативній практиці здійснюється переважно експериментальними методами, що базуються на вимірюванні викидів шкідливих речовин.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак застосування експериментальних методів є обмеженим на стадії проектування автомобіля, оскільки не дозволяє отримати необхідні показники без наявності реального зразка. Тому широко використовуються розрахункові підходи, викладені в теорії автомобіля, які передбачають визначення годинної витрати палива з подальшим перерахунком у показник витрати на 100 км пробігу.

При оцінюванні витрати палива в міському та магістральному циклах нормативні документи чітко регламентують форму їздових циклів і вимоги до точності їх відтворення під час випробувань. Водночас теоретичні розрахунки часто ґрунтуються на припущенні, що під час розгону двигун працює за зовнішньою швидкісною характеристикою, а витрата палива визначається через його питому витрату в цих умовах. Такий підхід не повністю відповідає реальним умовам експлуатації, що призводить до розбіжностей із нормативними даними, зокрема щодо часу розгону та фактичного рівня витрат пального, які зазвичай виявляються завищеними.

Для автомобілів із гібридною силовою установкою розрахунок паливної економічності є більш складним і потребує врахування додаткових факторів. До них належать витрати палива на зарядження акумуляторних систем, коефіцієнти корисної дії електричних машин у режимах роботи генератора та двигуна, а також втрати енергії в електричних компонентах системи.

### 2.3 Стандартизовані їздові цикли та тягово-динамічний розрахунок.

Для експериментального визначення показників паливної економічності застосовуються стандартизовані їздові цикли, що відтворюють характерні режими руху транспортних засобів у міських, заміських і змішаних умовах.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Їздовий цикл являє собою функціональну залежність швидкості руху автомобіля від часу, яка відображає послідовність режимів розгону, руху з постійною швидкістю та гальмування. Перші подібні цикли були розроблені у 1970-х роках у США з метою уніфікації оцінювання токсичності відпрацьованих газів і паливної економічності транспортних засобів в умовах енергетичної кризи.

На сьогодні існує значна кількість їздових циклів, що застосовуються в різних країнах і регіонах. Їх прийнято класифікувати за географічною ознакою (європейські, американські, японські), а також за характером зміни швидкості:

- 1) модельні цикли, які передбачають тривалий рух із постійною швидкістю;
- 2) неусталені цикли, що характеризуються частими змінами швидкісного режиму.

Серед найбільш поширених їздових циклів можна виділити такі.

JC08 – японський їздовий цикл, що набув чинності у 2010 році. За своєю структурою він близький до американського аналога, передбачає випробування як при холодному, так і при прогрітому двигуні, але відрізняється меншою кількістю ділянок із постійною швидкістю, що не завжди повністю відповідає реальним умовам експлуатації.

FTP-75 (Federal Test Procedure) – американський цикл, розроблений для оцінювання викидів і витрати палива. Характеризується значною кількістю перехідних режимів, включаючи часті прискорення та уповільнення, а також окремі фази для холодного та прогрітого двигуна.

NEDC (New European Driving Cycle) – європейський цикл, запроваджений наприкінці 1990-х років на основі раніше існуючих методик. Він включає послідовність міських режимів із повторюваними фазами розгону, руху та гальмування, а також заміський етап зі ступінчастими змінами швидкості.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, існуючі їздові цикли дозволяють стандартизувати процес оцінювання паливної економічності, проте кожен із них має свої обмеження щодо відтворення реальних умов руху автомобіля.

Традиційний підхід до тягово-динамічного розрахунку автомобіля передбачає послідовне виконання низки етапів, серед яких: визначення повної маси транспортного засобу, вибір шин, підбір двигуна внутрішнього згоряння з подальшим формуванням його зовнішньої швидкісної характеристики, розрахунок передавальних чисел трансмісії, визначення тягово-динамічних параметрів, а також оцінювання показників розгону (прискорення, часу та шляху прискорення).

При застосуванні даної методики до автомобілів із гібридною силовою установкою необхідне її адаптування. Це пов'язано з необхідністю врахування взаємодії двигуна внутрішнього згоряння та електричної машини, особливостей їх компонування, а також специфіки побудови трансмісії.

Залежно від принципу побудови гібридної системи виділяють два основних типи взаємодії силових агрегатів: послідовну та паралельну. Кожна з цих схем має власні особливості, які повинні бути враховані при виконанні тягово-динамічного розрахунку. При цьому окремі етапи розрахунку, що не залежать від типу силової установки, можуть виконуватися за класичною методикою для автомобілів із ДВЗ.

2.3.1 Тягово-динамічний розрахунок із послідовною гібридною схемою.

Для автомобілів із послідовною гібридною схемою тягово-динамічний розрахунок фактично зводиться до розрахунку електромобіля, оскільки рушійною силою виступає електрична машина. У цьому випадку визначаються її швидкісні характеристики, параметри трансмісії, тяговий баланс, а також показники розгону транспортного засобу.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальний алгоритм розрахунку включає такі етапи:

1. визначення повної маси автомобіля;
2. вибір коліс і шин;
3. підбір електричної машини та побудова її зовнішньої швидкісної характеристики;
4. визначення передавальних чисел трансмісії;
5. розрахунок тягово-динамічних параметрів;
6. оцінка прискорення;
7. визначення часу та шляху розгону.

Порівняно з класичним підходом, основні відмінності полягають у виборі силового агрегату (електродвигуна) та визначенні параметрів трансмісії.

Підбір електричної машини здійснюється за аналогією з вибором двигуна внутрішнього згорання. При цьому визначається необхідна потужність, яка забезпечує досягнення заданої максимальної швидкості руху автомобіля з урахуванням дорожніх і аеродинамічних опорів, а також коефіцієнта корисної дії трансмісії. Для забезпечення надійної роботи вводиться коефіцієнт запасу потужності, який визначає номінальну потужність електродвигуна.

Після вибору електричної машини формується її зовнішня швидкісна характеристика. У більшості випадків вона задається виробником. Якщо ж доступні лише окремі параметри (максимальний момент, потужність тощо), характеристику необхідно визначити розрахунковим шляхом. Її форма залежить від типу електродвигуна, але для тягових машин зазвичай характерна так звана «м'яка» механічна характеристика, при якій у зоні малих швидкостей забезпечується сталий максимальний крутний момент, а зі зростанням частоти обертання відбувається перехід до режиму сталої потужності.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Розрахунок виконується з припущенням, що система накопичення енергії здатна забезпечити електродвигун необхідною потужністю в усіх режимах роботи.

Визначення передавальних чисел для послідовної схеми зазвичай зводиться до розрахунку передавального числа головної передачі або бортових редукторів. Воно встановлюється з урахуванням максимальної частоти обертання електродвигуна, радіуса коліс і необхідної максимальної швидкості автомобіля.

Таким чином, методика тягово-динамічного розрахунку для послідовної гібридної схеми базується на принципах розрахунку електромобіля, але потребує врахування специфіки енергетичної системи та умов її функціонування.

### 2.3.2 Тягово-динамічний розрахунок із паралельною гібридною схемою.

Розрахунок тягово-динамічних характеристик автомобіля з паралельною гібридною силовою установкою має низку принципових відмінностей порівняно з класичними підходами. Це зумовлено необхідністю одночасного врахування роботи двох джерел енергії – двигуна внутрішнього згоряння та електричної машини. У межах даної методики визначаються їх зовнішні швидкісні характеристики, формується сумарна характеристика силової установки, розраховуються параметри трансмісії, а також оцінюються тягово-динамічні показники і параметри розгону.

Послідовність розрахунку для автомобіля з паралельною схемою ГСУ включає такі етапи:

1. визначення повної маси транспортного засобу;
2. вибір коліс і шин;

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. встановлення необхідної максимальної потужності силової установки;
4. підбір двигуна внутрішнього згорання та побудова його швидкісної характеристики;
5. вибір електричної машини з визначенням її характеристик;
6. розрахунок узгоджувального механізму;
7. визначення передавальних чисел трансмісії;
8. обчислення тягово-динамічних параметрів;
9. оцінка прискорення;
10. визначення часу та шляху розгону.

Слід зазначити, що конкретна послідовність виконання окремих етапів може змінюватися залежно від компоновки гібридної системи та способу з'єднання її елементів.

Максимальна потужність силової установки визначається з умови забезпечення заданої максимальної швидкості руху автомобіля. При цьому вводиться коефіцієнт запасу, який враховує особливості експлуатації та забезпечує необхідний рівень динамічних характеристик.

Одним із ключових етапів є визначення співвідношення потужностей двигуна внутрішнього згорання та електричної машини. Саме цей параметр значною мірою визначає ефективність роботи гібридної системи, її економічність та динамічні властивості.

Розрахунок узгоджувального механізму залежить від типу пристрою, що забезпечує спільну роботу ДВЗ та електричної машини. Найбільш поширеними варіантами є використання циліндричного редуктора або планетарної передачі, а також їх комбінацій.

У випадку застосування циліндричного редуктора встановлюється взаємозв'язок між крутними моментами та частотами обертання обох силових агрегатів через відповідні передавальні відношення. Це дозволяє визначити узгоджені швидкості обертання валів та забезпечити необхідні

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметри руху автомобіля. На основі цих співвідношень обчислюються передавальні числа, що забезпечують відповідність між частотою обертання двигунів і швидкістю транспортного засобу.

Якщо ж використовується планетарна передача, розрахунок виконується з урахуванням її внутрішнього передавального числа, яке визначає кінематичний зв'язок між елементами передачі. У цьому випадку основним завданням є визначення такого передавального відношення, яке забезпечить оптимальну взаємодію двигуна внутрішнього згорання та електричної машини в різних режимах роботи.

Отже, методика тягово-динамічного розрахунку для паралельної гібридної схеми є більш складною порівняно з послідовною, оскільки потребує узгодження параметрів двох силових джерел та врахування особливостей їх спільної роботи через трансмісію.

#### 2.4 Паливно-економічний розрахунок гібридних систем.

Оцінювання паливної економічності автомобілів із гібридною силовою установкою базується на визначенні показників, встановлених нормативними документами, зокрема міжнародними вимогами Правил ЄЕК ООН №015. До основних належать контрольна витрата палива, витрати в міському та заміському режимах, а також характеристика паливоспоживання при усталеному русі.

Найбільш інформативними вважаються показники витрати палива у міському та магістральному циклах, оскільки вони найближче відображають реальні умови експлуатації транспортних засобів. Для їх визначення використовуються стандартизовані їздові цикли. В Україні застосовується цикл NEDC, який описано в нормативних документах і який включає чотири міські фази та один заміський режим. Цикл задає зміну швидкості автомобіля

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в часі та охоплює такі режими руху, як холостий хід, розгін, рівномірний рух і гальмування.

Наявність у циклі даних про швидкість і прискорення дозволяє, використовуючи рівняння руху автомобіля, визначити силу тяги на ведучих колесах. Вона формується як сума сил опору руху (дорожнього, аеродинамічного) та інерційної складової, що залежить від маси транспортного засобу і його прискорення. Знаючи цю силу, можна визначити крутний момент силової установки та її потужність з урахуванням параметрів трансмісії та радіуса колеса.

За умови відсутності пробуксовування встановлюється зв'язок між швидкістю руху автомобіля, частотою обертання валів і потужністю силової установки. Для традиційних автомобілів це дає можливість визначити режим роботи двигуна в кожний момент часу їздового циклу, а за його паливною характеристикою – миттєву витрату пального. Годинна витрата палива визначається через питому витрату двигуна, після чого інтегруванням по часу знаходиться загальна витрата за цикл і перераховується у значення на 100 км пробігу.

Для автомобілів із послідовною гібридною схемою розрахунок виконується за аналогічним принципом, однак замість режимів роботи ДВЗ аналізується робота тягової електричної машини. Визначається споживана нею потужність з урахуванням коефіцієнта корисної дії, після чого інтегруванням за часом знаходиться сумарне енергоспоживання за цикл. Вважається, що така ж кількість енергії повинна бути вироблена генератором, який приводиться в дію двигуном внутрішнього згорання. При цьому приймається, що як генератор, так і ДВЗ працюють у зоні максимальної ефективності. Це дозволяє оцінити витрату палива, виходячи з мінімальної питомої витрати та відповідної потужності двигуна.

У випадку паралельної гібридної схеми розрахунок ускладнюється необхідністю врахування спільної роботи ДВЗ та електричної машини.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сумарний крутний момент силової установки визначається як сума моментів обох джерел енергії. Залежно від умов руху електрична машина може працювати як у тяговому, так і в генераторному режимі. Якщо потрібний момент не перевищує можливості електродвигуна, рух може здійснюватися виключно за рахунок електротяги. У протилежному випадку частина навантаження покладається на ДВЗ.

Важливим аспектом є забезпечення енергетичного балансу системи накопичення енергії. За результатами проходження їздового циклу витрачена електрична енергія не повинна перевищувати ту, що була вироблена в процесі рекуперації та роботи генератора. Для цього враховується потужність електричної машини в різних режимах і виконується інтегрування енергоспоживання за часом.

Витрата палива двигуном внутрішнього згоряння в паралельній схемі визначається аналогічно традиційному підходу – через питому витрату палива та режим роботи двигуна в кожний момент часу.

Таким чином, запропонована методика дозволяє виконувати розрахунок паливної економічності автомобілів із гібридними силовими установками з урахуванням особливостей їх конструкції та режимів роботи. Вона придатна для різних схем ГСУ і забезпечує можливість оцінювання витрати палива в стандартизованих їздових циклах, що застосовуються в Україні.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновки до розділу 2.

У результаті проведеного аналізу методів розрахунку автомобілів із гібридними силовими установками встановлено, що традиційні підходи, розроблені для транспортних засобів із двигунами внутрішнього згорання, не забезпечують достатньої точності при оцінці їх характеристик. Це пов'язано з особливостями роботи ГСУ, зокрема взаємодією декількох джерел енергії та наявністю систем керування.

Показано, що існуючі методики оцінки динамічних властивостей потребують удосконалення, оскільки не враховують реальні режими руху та алгоритми керування гібридною установкою. Аналогічно, традиційні підходи до визначення паливної економічності не повною мірою відображають специфіку енергетичних процесів у ГСУ.

Обґрунтовано необхідність використання їздових циклів як основи для оцінювання паливної економічності, що дозволяє наблизити результати розрахунків до реальних умов експлуатації. Розглянуті найбільш поширені цикли, серед яких NEDC, FTP-75 та JC08, кожен з яких має свої особливості та обмеження.

Розроблено підходи до тягово-динамічного розрахунку для різних типів гібридних схем. Для послідовної схеми встановлено, що розрахунок фактично зводиться до аналізу електромобіля, тоді як для паралельної — необхідне узгодження параметрів двигуна внутрішнього згорання та електричної машини, а також врахування характеристик узгоджувальних механізмів.

Запропоновано методику паливно-економічного розрахунку, яка базується на аналізі режимів руху в межах стандартизованого їздового циклу. Вона враховує розподіл потужності між джерелами енергії, ефективність електричних компонентів та умови забезпечення енергетичного балансу.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Отже, розроблені методичні підходи дозволяють комплексно оцінювати як динамічні, так і паливно-економічні показники автомобілів із гібридними силовими установками, що є необхідною передумовою для їх подальшого проектування та оптимізації.

					КВРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТЯГОВО-ДИНАМІЧНОГО І ПАЛИВНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗРАХУНКІВ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ

#### 3.1 Результати тягово-динамічного розрахунку.

Відповідно до розроблених методик тягово-динамічного та паливно-економічного аналізу доцільно виконати розрахунок транспортних засобів із різними типами силових установок. При цьому параметри кожного варіанту підбираються таким чином, щоб забезпечити однакову максимальну швидкість руху.

У межах роботи розглядаються такі типи транспортних засобів: автомобіль із двигуном внутрішнього згорання, електромобіль (або транспортний засіб із послідовною гібридною схемою), а також автомобіль із паралельною гібридною силовою установкою. Для останнього варіанту аналізується вплив співвідношення потужностей двигуна внутрішнього згорання та електричної машини в широкому діапазоні значень.

Зокрема, досліджується інтервал співвідношення потужностей від 1 до 15, що відповідає найбільш поширеним практичним реалізаціям гібридних силових установок. Такий підхід дозволяє оцінити вплив розподілу потужності між джерелами енергії на динамічні та економічні показники автомобіля.

#### 1) Визначення ваги електромобіля.

Повна маса транспортного засобу визначається як сума маси спорядженого автомобіля, маси водія та пасажирів, а також маси багажу. Розрахунок виконується за відповідною залежністю:

$$m_a = m_0 + (m_B + m_6), \quad (3.1)$$

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $m_0$  – маса спорядженого автомобіля із заправкою та спорядженням, але без пасажирів та водія. Для нашого проекту приймаємо  $m_0 = 1080$  кг;  $m_B = 70...80$  кг – маса водія чи пасажирів,  $m_B = 75$  кг;  $n$  – кількість місць для сидіння пасажирів,  $n = 5$ ;  $m_6$  - маса багажу,  $m_6 = 10$  кг на одну особу в легкових автомобілях. Таким чином,  $m_a = 1080 + (75 + 10)5 = 1505$  кг.

## 2) Підбір колеса та шин.

Для визначення навантаження на передню вісь скористаємося розважуванням автомобіля-прототипу при повному навантаженні, тобто 59/41.

$$m_1 = 0,59m_a, \quad (3.2)$$

де  $m_1$  - маса, що припадає на передню вісь;  $m_a$  - повна маса автомобіля.

Для розрахунків у роботі  $m_1 = 1530 * 0,59 = 902,7$  кг.

Вибір шин здійснюється за максимальною швидкістю та навантаженням на колесо. Максимальна швидкість автомобіля дорівнює 167 км/год, тоді індекс категорії швидкості T, індекс навантаження на шину – 82. Діаметр ободка колеса виберемо як у прототипу – 14 дюймів.

Нехай шина матиме такий розмір: 175/65R14 82T. Де 175 - ширина профілю шин, мм; 65 - відношення висоти профілю до ширини у відсотках; R – радіальна шина; 14 – внутрішній діаметр шини, відповідний діаметру обода колеса дюймах; 82 – індекс вантажопідйомності; T – індекс швидкості.

Розраховуємо радіус кочення колеса з обраною шиною:

$$r_k = (0,9...0,95)r_c, \quad (3.3)$$

де  $r_c$  - статичний радіус, що визначається за формулою:

$$r_c = 0,5d + H\lambda_{III}, \quad (3.4)$$

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $d$  - Діаметр обода колеса, м;  $\lambda_{III}$  – коефіцієнт, що враховує вертикальну деформацію шини (для стандартних шин  $\lambda_{III} = 0,88.. 0,9$ );  $H$  – висота профілю шини, мм.

Розраховуємо дані для нашого проекту:

$$d = 14 * 2,54 = 0,355 \text{ м}; \lambda_{III} = 0,9; H = 0,102 \text{ м.}$$

Тоді:

$$r_c = 0,5 * 0,355 + 0,9 * 0,102 = 0,28 \text{ м,}$$

$$r_k = 0,95 * 0,28 = 0,266 \text{ м.}$$

3) Вибір максимальної потужності силової установки.

Максимальна потужність силової установки визначається з умови досягнення максимальної швидкості:

$$N_{V_{max}} = \frac{\psi_{V_{max}} G_a V_{max} + k_F V_{max}^3}{1000 \eta_{TP} V_{max}}, \quad (3.5)$$

де  $\psi_{V_{max}}$  - коефіцієнт опору дороги;  $\eta_{TP} V_{max}$  - ККД трансмісії при максимальній швидкості.

$$\psi_{V_{max}} = f = f_0 (1 + k_1 (0,36V)_{max}^2), \quad (3.6)$$

де  $f_0$  - коефіцієнт опору коченню, що відноситься до малих швидкостей; для асфальтобетону 0,012 ... 0,015;  $k_1 = (4...5)10^{-5}$ ;  $G_a = m_q g = 1505 * 9,81 = 14749,3$

$H$  – вага автомобіля;  $V_{max} = 47,25 \text{ м/с}$ ;  $k_F = 0,353 \text{ Нс}^2 / \text{м}^2$ ;  $\eta_{TP} V_{max} = 0,9$ .

Тоді коефіцієнт опору дороги за максимальної швидкості

$$\psi_{V_{max}} = 1018f = 0,013 (1 + 4,5 * 10^{-5} * 1752) = 0,03.$$

А потужність двигуна при вибраній максимальній швидкості дорівнює:

					КВРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$N_{V_{max}} = \frac{0,3 \cdot 14749,3 \cdot 47,25 + 0,353 \cdot 47,25^3}{1000 \cdot 0,9} = 65,3 \text{ кВт}$$

4) Вибір ДВЗ та побудова його зовнішньої швидкісної характеристики.

У разі розрахунку автомобіля з ДВЗ та ГСУ паралельної схеми проводиться вибір ДВЗ з числа вироблених з максимальною потужністю 65 кВт (88 к.с) та 56 кВт (76 к.с) відповідно. Під дані характеристики підходять двигуни автомобілів родини «RENAULT», а саме бензиновий чотирициліндровий рядний двигун «K7M», що має об'єм 1,6 літра, потужність – 88 к.с, та бензиновий чотирициліндровий рядний двигун «D7F», що має об'єм 1,2 літра, потужність – 76 к.с. [19].

Двигун «K7M» встановлюється на таких моделях як Logan, Stepway, Sandero, а двигун «D7F» - на моделях Renault 19, Clio та Laguna.

Для подальших розрахунків необхідно побудувати їх зовнішні швидкісні характеристики, скориставшись емпіричною залежністю:

$$N_m = N_{max} \left[ a \left( \frac{n_m}{n_N} \right) + b \left( \frac{n_m}{n_N} \right)^2 - c \left( \frac{n_m}{n_N} \right)^3 \right], \quad (3.7)$$

де  $N_m$  – поточне значення потужності, кВт;

Коефіцієнти  $a$ ,  $b$  і  $c$  визначаються за такими співвідношеннями для двигунів:

$$a = 2 - \frac{25}{M_3}, \quad (3.8)$$

$$b = \frac{50}{M_3} - 1, \quad (3.9)$$

$$c = \frac{25}{M_3}, \quad (3.10)$$

Для ДВЗ «K7M»:  $v_{min} = 800$  1/с;  $v_{max} = 5600$  1/с; Для ДВЗ «D7F»:  $v_{min} = 800$  1/с;  $v_{max} = 5400$  1/с;

					КВРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Задамо в інтервалі від  $v_{\min}$  до  $v_{\max}$  ще ряд значень  $v_m$ , знайдемо відповідні значення  $N_m$  і побудуємо криву залежності  $N_m = f(v_m)$ , а потім  $M_T = f(v_m)$ , маючи на увазі, що

$$M_m = \frac{1000 N_m}{v_m} N, \quad (3.11)$$

де  $N_m$  - Потужність двигуна, кВт;  $n_m$  – кількість обертів валу двигуна, об/хв;

Розрахунки зведені в таблицю 3.1, 3.2 та відображені у графіках (рисунок 3.1, 3.2).

Таблиця 3.1 – Дані зовнішньої швидкісної характеристики ДВЗ «К7М»

$v, 1/c$	$N, кВт$	$M, Нм$
13,33	6,14	73,34
20	10,61	84,48
26,67	15,74	93,93
33,33	21,29	101,71
40	27,09	107,79
46,67	32,89	112,19
53,33	38,50	114,91
60	43,70	115,94
66,67	48,29	115,29
73,33	52,04	112,95
80	54,75	108,93
86,67	56,21	103,23
90	56,40	95,75

Таблиця 3.2 – Дані зовнішньої швидкісної характеристики ДВЗ «D7F»

$v, 1/c$	$N, кВт$	$M, Нм$
13,33	7,31	87,23
20	12,38	98,49
26,67	18,11	108,08
33,33	24,29	115,99
40	30,72	122,23
46,67	37,17	126,79
53,33	43,45	129,68
60	49,34	130,90
66,67	54,64	130,44
73,33	59,12	128,31
80	62,58	124,51
86,67	64,81	119,02
93,33	65,60	111,87

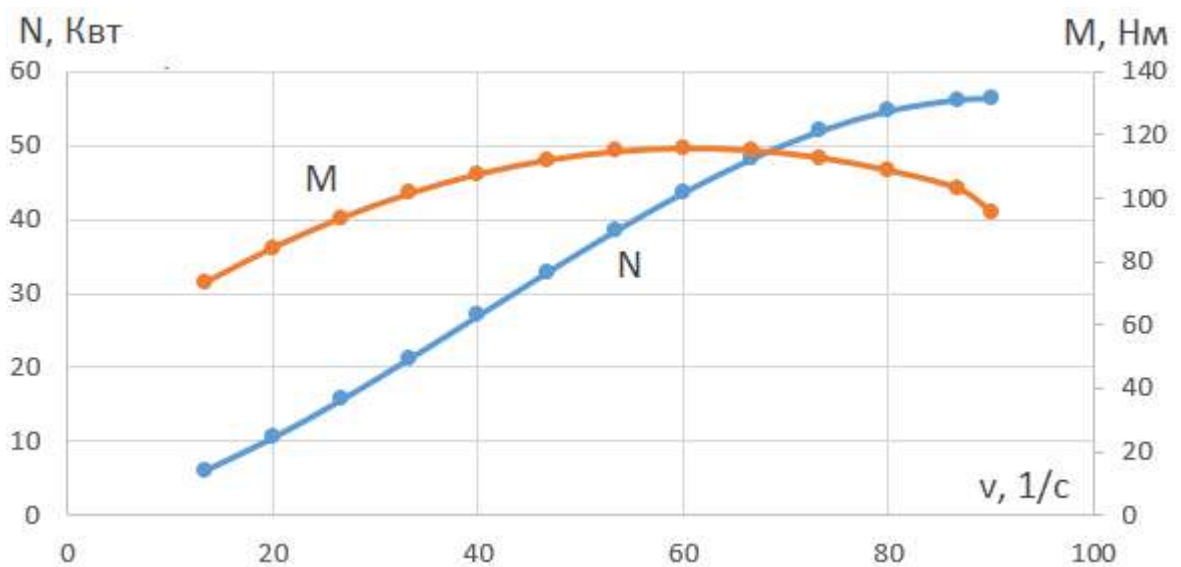


Рисунок 3.1 – Зовнішня швидкісна характеристика ДВЗ «К7М»

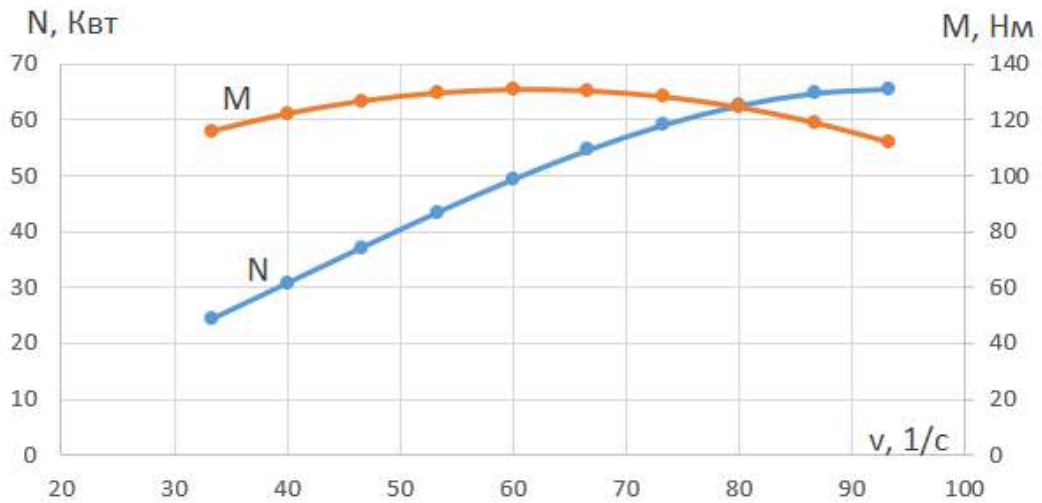


Рисунок 3.2 – Зовнішня швидкісна характеристика ДВЗ «D7F»

5) Вибір ЕМ та побудова його швидкісної характеристики.

ЕМ для електромобіля (послідовної ГСУ) визначається за умови досягнення максимальної потужності. А у разі ГСУ паралельної схеми із вибраного співвідношення потужностей ДВЗ та ЕМ. ЕМ потужністю 65 і 9 кВт відповідно.

Зовнішня швидкісна характеристика описується системою рівнянь:

$$M_{кр} = M_{max} \text{ при } 0 \leq v \leq v_x \quad (3.12)$$

$$M_{кр} = \frac{M_{max} v_{max}}{v} \text{ при } v_x \leq v \leq v_{max}, \quad (3.13)$$

де  $M_{max}$  - максимальний крутний момент ЕМ, Нм;  $v_{max}$  – максимальна частота обертання валу ЕМ, 1/с;  $x$  – відношення максимальної частоти обертання до номінальної, що характеризує тип ЕМ.

Значення  $x$  залежить від типу електричної машини, для даної електричної машини  $x = 3$ . Розрахунки зведені в таблицю 3.3 і таблицю 3.4, а

також побудовано графіки крутного моменту та потужності від кутової швидкості (рисунок 3.3, 3.4).

Таблиця 3.3 – Дані зовнішньої швидкісної характеристики ТЕМ.

$\nu$ , 1/с	N, кВт	M, Нм
0	0,02	376,05
4,16	10,95	376,05
8,33	21,88	376,05
12,50	32,81	376,05
16,66	43,74	376,05
20,83	54,67	376,05
25	65,60	376,05
29,17	65,60	322,33
33,33	65,60	282,04
37,50	65,60	250,70
41,66	65,60	225,63
45,83	65,60	205,12
50	65,60	188,03
54,16	65,60	173,56
58,33	65,60	161,17
62,5	65,60	150,42

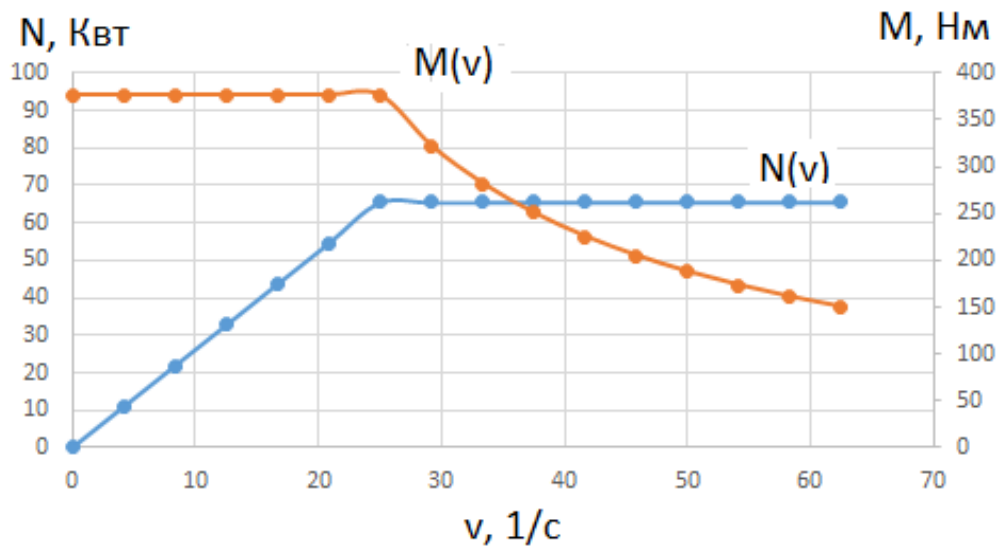


Рисунок 3.3 – Зовнішня швидкісна характеристика ТЕМ

Таблиця 3.4 – Дані зовнішньої швидкісної характеристики ЕМ ГСР-

9000

v, 1/c	N, кВт	M, Нм
0	0	21,48
10,71	1,285	21,48
21,42	2,57	21,48
32,14	3,85	21,48
42,85	5,14	21,48
53,56	6,43	21,48
64,28	7,71	21,48
74,99	9	18,50
85,71	9	16
96,42	9	14
107,13	9	12,50
117,84	9	11,50
128,56	9	10,70
139,27	9	10
149,98	9	9,55

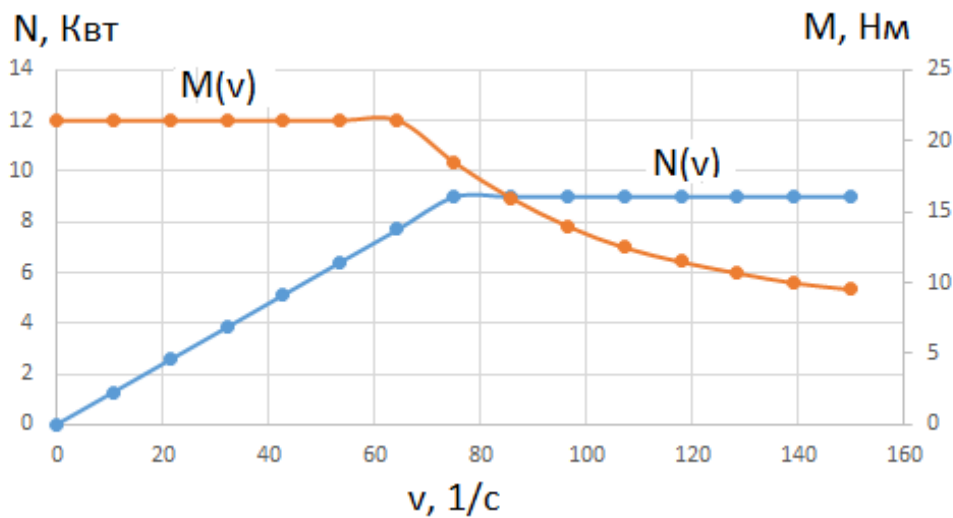


Рисунок 3.4 – Зовнішня швидкісна характеристика ЕМ ГСР-9000

б) Розрахунок узгоджуючого редуктора та побудова зовнішньої швидкісної характеристики ГСУ.

У прийнятій схемі ГСУ для підсумовування потужностей ДВЗ та ЕМ використовувався первинний вал МКПП з підключеним пристроєм включення - відключення ЕМ. Дане з'єднання є муфтою крутного моменту, для розрахунку якої застосовується рівняння:

$$\frac{V}{r_k} i_{тр} = \frac{\nu_{ДВЗ}}{i_{ДВЗ}} = \frac{\nu_{ЕМ}}{i_{ЕМ}}, \quad (3.14)$$

де  $V$  – швидкість руху автомобіля, м/с;  $r_k$  – радіус колеса, м;  $i_{тр}$  – передавальне число трансмісії;  $\nu_{ЕМ}$ ,  $\nu_{ДВЗ}$  – частота обертання ДВЗ та ЕМ, 1/с;  $i_{гп}$ ,  $i_{тр}$ ,  $i_{ДВЗ}$ ,  $i_{ЕМ}$  - передавальні відносини головної передачі, трансмісії, ДВЗ та ЕМ відповідно.

Конструктивною особливістю прийнятої схеми є розташування ДВЗ безпосередньо на валу муфти ( $i = 1$ ), виходячи з цього, можна розрахувати передатне відношення пристрою увімкнення-вимкнення ЕМ.  $i_{ЕМ} = 9000 / 5400 = 1,66$ .

					КВРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Знаючи передавальні числа узгоджувального редуктора можна розрахувати і побудувати за даними розрахунків у таблиці 3.5 зовнішню швидкісну характеристику ГСУ (рисунок 3.5, таблиця 3.5):

$$M = M_{двз} i_{двз} + M_{ем} i_{ем} . \quad (3.15)$$

Таблиця 3.5 – Дані зовнішньої швидкісної характеристики ГСУ.

$v, 1/c$	$N, кВт$	$M, Нм$
0	0	35,66
6,66	1,28	35,66
13,33	8,71	109,00
20	14,46	120,14
26,66	20,87	129,59
33,33	27,72	137,36
40	34,79	143,45
46,66	41,89	142,89
53,33	47,50	141,46
60	52,70	139,17
66,66	57,28	136,03
73,33	61,04	132,04
80	63,75	126,69
86,66	65,20	119,82
93,33	65,19	111,69

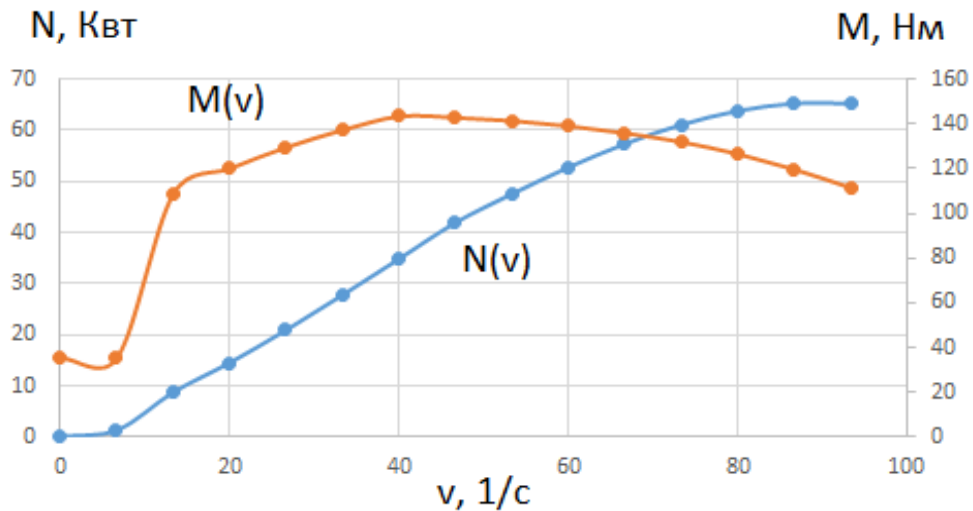


Рисунок 3.5 – Зовнішня швидкісна характеристика ГСУ.

7) Визначення передавальних чисел.

Передатне число головної передачі визначається за умови досягнення максимальної швидкості:

$$i_{гп} = 6,27 \frac{r_k v_{ед}}{i_{кв} v_{max}}, \quad (3.16)$$

де  $v_v$  – частота, що відповідає максимальній швидкості автомобіля; ДВЗ  $v_v = 93,33$  1/с; для ГСУ  $v_v = 90$  1/с; для ЕМ  $v_v = 75$  1/с;  $i_{кв}$  – передавальне число коробки на вищій передачі,  $i_{кв} = 0,784$ ;  $i_{двз} = 3,7$ ;  $i_{гсу} = 3,9$ ;  $i_{ем} = 2,57$ .

8) Розрахунок тягово-динамічних показників.

Тягова та динамічна характеристика являє собою графіки залежностей:  $P_k = f(V)$  та  $D = f(V)$  на всіх передачах, а також  $P_w = f(V)$ ;  $P_\psi = f(V)$  та  $\psi = f(V)$  на горизонтальній дорозі, і розраховуються на підставі наступних залежностей.

Сила тяги на колесі:

$$P_k = \frac{M_T i_{гп} \eta_{гп}}{r_d}. \quad (3.17)$$

Швидкість руху:

$$V = 0,376(r_k n_T) i_{TP}. \quad (3.18)$$

Опір дороги:

$$P_\psi = \psi G_a, \quad (3.19)$$

$$\Psi = f = f_0(1 + k_1 V^2), \quad (3.20)$$

при  $\alpha = 0$ .

Опір повітря:

$$P_w = \frac{k_F V^2}{13} (1 + k_3 \Pi). \quad (3.21)$$

Динамічний фактор:

$$D = \frac{P_k - P_w}{G_a}, \quad (3.22)$$

де  $i_{TP} = i_k i_{0дн}$  – передавальне число трансмісії за наявності коробки передач, додаткової або роздавальної коробки та головної передачі;  $r_d = r_k$  під час руху без пробуксовування;  $\Pi$  – кількість причепів чи напівпричепів;  $k_3$  – коефіцієнт, що враховує вплив причепа або напівпричепа на опір повітря, що надається автопоїзду;  $f_0$  – Табличне значення коефіцієнта опору дороги;  $f_0 = 0,016$  для сухого асфальтобетонного та бетону першої та другої категорій доріг. (Розмірність:  $M$  – Нм;  $n$  – об/хв;  $V$  – км/год;  $r$  – м;  $G_a$  – Н;  $k_F$  – Нс<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;  $k_1 = (4...5) \cdot 10^5$ ).

Кут підйому, який долає автомобіль на кожній передачі при різних значеннях рівномірної швидкості та заданому коефіцієнті опору кочення, визначається за рівнянням:

					КВРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{D-f\sqrt{1-D^2+f^2}}{1+f^2} \right). \quad (3.23)$$

9) Розрахунок прискорення.

Час рівномірного руху автомобіля зазвичай малий порівняно з загальним часом його роботи. Показниками динамічних властивостей автомобіля при нерівномірному русі є величини прискорень, а також шлях і час, необхідний для руху у певному інтервалі зміни швидкості.

Прискорення руху, який може розвивати автомобіль за заданих умов, що характеризує прийомистість автомобіля: чим більше прискорення, тим вище за інших рівних умов середня швидкість руху, а, отже, і продуктивність автомобіля.

Прискорення автомобіля знаходять із формули:

$$a = (D - f)g / \delta. \quad (3.24)$$

При повному навантаженні, високому ККД трансмісії та відсутності буксування можна скористатися наближеним виразом:

$$\delta = 1,03 + k_3 i_k^2 i_{\text{дн}} \quad (3.25)$$

де  $k_4 = 0,06$ . Тоді:  $\delta_1 = 1,824$ ;  $\delta_2 = 1,824$ ;  $\delta_3 = 1,824$ ;  $\delta_4 = 1,824$ ;  $\delta_5 = 1,824$ ;

Обчислені за формулами (3.18) – (3.25) значення занесені до таблиць програми (додаток А), і за цими результатами побудовані графіки залежностей  $P_k = f(V)$  і  $D = f(V)$  на всіх передачах, а також  $P_{\psi} = f(V)$ ;  $P_k = f(V)$ ;  $\alpha = f(V)$  та  $\psi = f(V)$  на горизонтальній дорозі, зображені рисунках 3.6 – 3.9.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

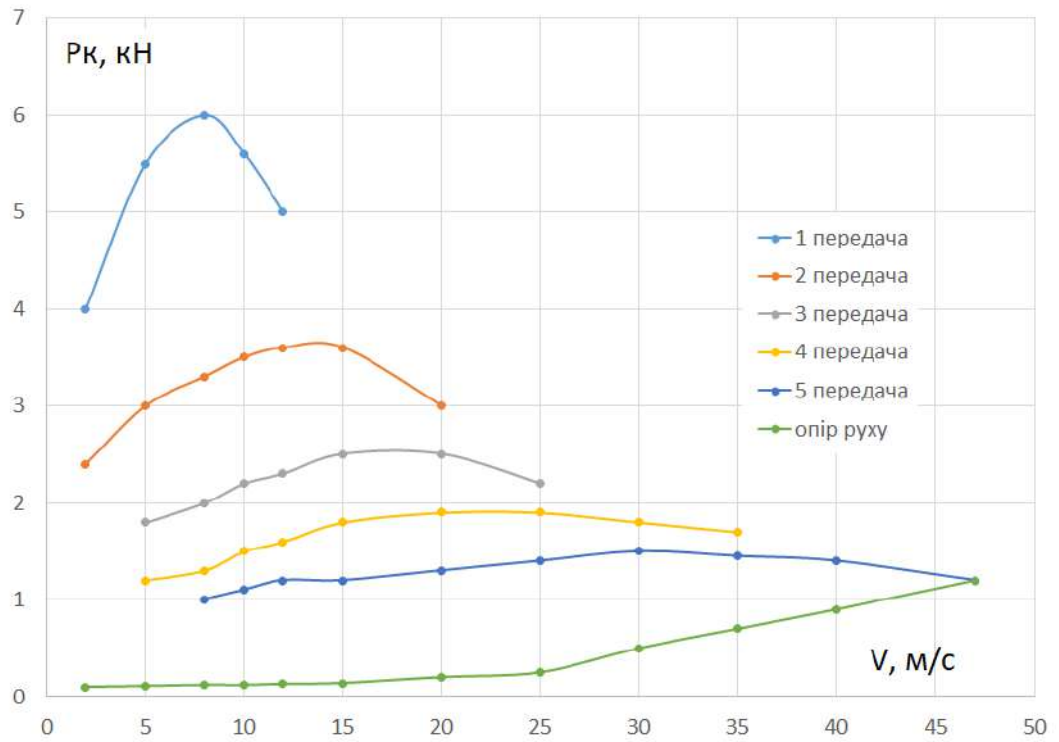


Рисунок 3.6 – Тяговий баланс автомобіля з ДВЗ.

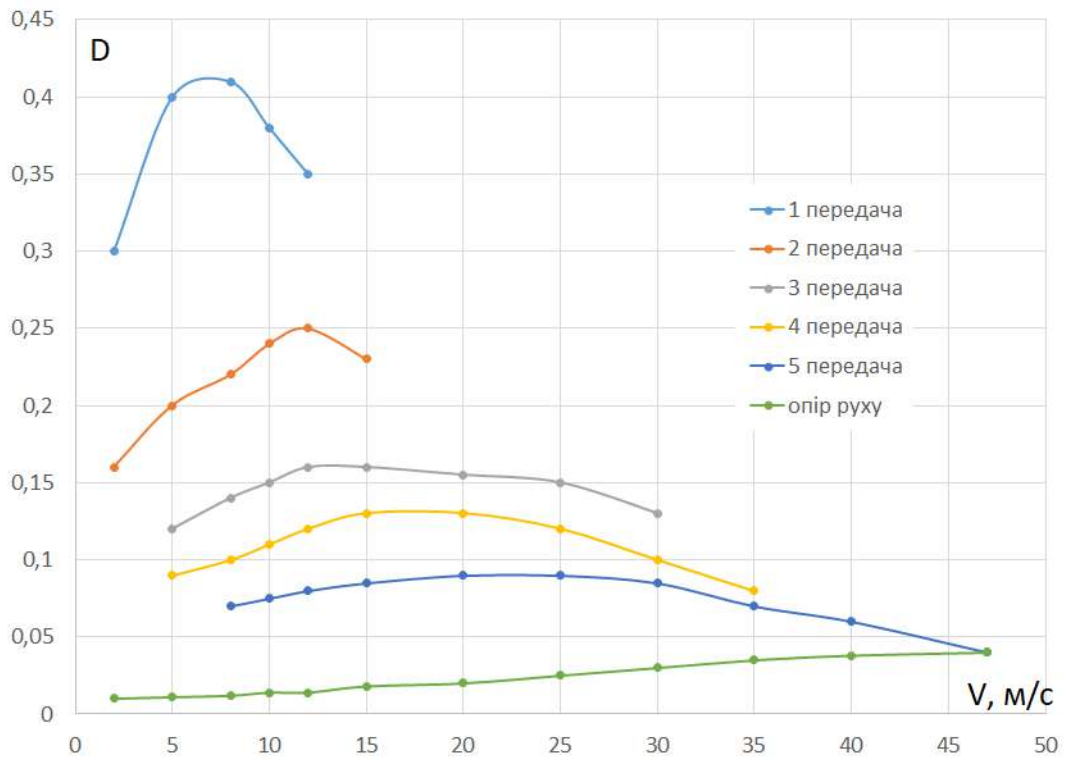


Рисунок 3.7 – Динамічний баланс автомобіля з ДВЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КВРАТ. 22110.01.09.00

Арк.

65

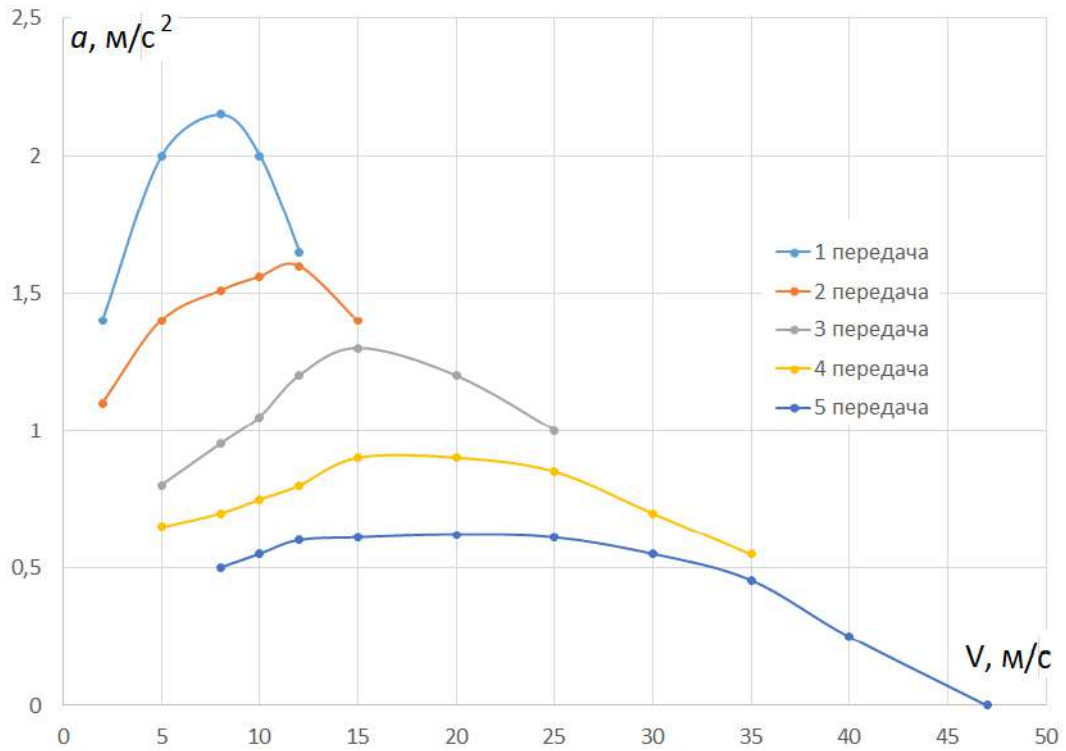


Рисунок 3.8 – Прискорення автомобіля з ДВЗ

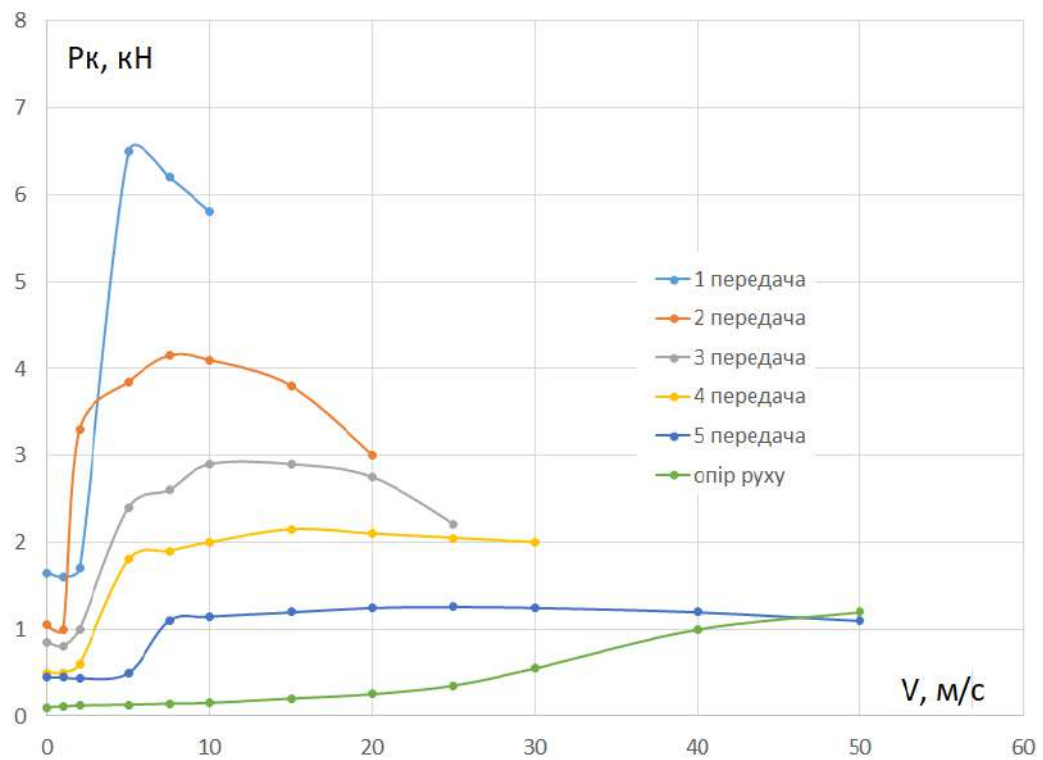


Рисунок 3.9 – Тяговий баланс автомобіля з паралельною ГСУ.

10) Визначення часу, шляху та прискорення.

Прискорення повністю характеризує здатність автомобіля до швидкого прискорення, але не дає достатньо наочного уявлення про прийомистість автомобіля. Тому визначають час та шлях прискорення, які дозволяють виявити прийомистість автомобіля в більш наочній формі і порівняти автомобілі за цими показниками.

Оскільки відсутній аналітичний зв'язок між зворотним прискоренням ( $1/a$ ) та швидкістю ( $V$ ), час прискорення зазвичай визначають графоаналітично. Для побудови залежності часу прискорення від швидкості всю площу під кривою  $1/a=f(V)$  розбивають вертикальними лініями на ділянки з інтервалом 10 км/год. Для спрощення розрахунків площу кожної ділянки замінюють площею рівновеликої ділянки з висотою:

$$\frac{1}{a_{cp}} = \frac{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}}{2}, \quad (3.26)$$

де  $1/a_1$  та  $1/a_2$  – зворотні прискорення на початку та в кінці інтервалу швидкості.

Тоді для ділянки, наприклад, при зміні швидкості від  $V_1$  до  $V_2$  час прискорення:

$$t_1 = \frac{V_2 - V_1}{3,6 \cdot a_{cp}}, \quad (3.27)$$

де  $a$  – прискорення, м/с<sup>2</sup>

Аналогічно визначаємо  $t_2, t_3, t_4 \dots t_n$  по інших ділянках.

Шлях прискорення визначають із співвідношення  $V=dS/dt$ :

$$S = \int_{t_2}^{t_1} V dt. \quad (3.28)$$

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Цей інтеграл вирішують також графоаналітично, використовуючи графік  $t=f(V)$ .

Для побудови графіка  $S=f(V)$  цю площу розбивають горизонтальними лініями на кілька ділянок. Для спрощення підрахунку площа кожної ділянки замінюють площею рівновеликої ділянки з тією самою основою та висотою:

$$V_{\text{cp}} = \frac{V_1 + V_2}{2}, \quad (3.29)$$

де  $V_1$  і  $V_2$  – швидкості відповідно на початку та наприкінці ділянки. При зміні швидкості від  $V_1$  до  $V_2$ .

$$S_1 = (t_2 - t_1) \cdot \frac{V_{\text{cp}}}{3,6}. \quad (3.30)$$

Аналогічно визначаємо  $S_1, S_2, S_3 \dots S_n$ , за іншими ділянками. Дані занесені до таблиць 3.6 – 3.8.

Таблиця 3.6 – Час, шлях та прискорення автомобіля з послідовною ГСУ

$V, \text{ м/с}$	$t, \text{ с}$	$S, \text{ м}$
2,70	1,42	1,91
5,41	2,84	7,68
8,11	4,27	17,34
10,82	5,71	30,95
13,52	7,16	48,61
16,23	8,63	70,43
18,93	10,26	99,09
21,63	12,22	138,84
24,34	14,56	192,61
27,04	17,35	264,41

29,75	20,72	359,96
32,45	24,84	488,09
35,16	30,03	663,68
37,86	36,92	915,21
40,56	46,99	1309,97
43,27	65,79	2098,07

Таблиця 3.7 – Час, шлях та прискорення автомобіля з ДВЗ

V, м/с	t, с	S, м
1,65	0,59	0,48
2,47	1,15	1,63
3,30	1,64	3,06
4,12	2,10	4,75
4,95	2,52	6,70
5,77	2,93	8,89
6,60	3,33	11,34
7,43	3,72	14,08
8,25	4,11	17,13
9,08	4,50	20,55
9,90	4,91	24,38
10,73	5,33	28,73
11,55	5,77	33,70
12,18	6,13	37,92
13,53	6,92	48,09
14,89	7,72	59,51
16,24	8,55	72,41
17,59	9,42	87,12

18,95	10,35	104,12
19,51	10,78	112,35
21,46	12,39	145,28
23,41	14,07	183,09
25,36	15,87	227,09
27,32	17,86	279,33
28,25	18,94	309,42
30,82	22,31	409,07
33,39	26,12	531,38
35,96	30,65	688,24

Таблиця 3.8 – Час, шлях та прискорення автомобіля з паралельною ГСУ

V, м/с	t, с	S, м
0,83	1,54	0,64
1,67	2,53	1,88
2,50	2,97	2,80
3,33	3,37	3,97
4,17	3,75	5,37
5,00	4,10	7,00
5,84	4,45	8,88
6,67	4,80	11,08
7,50	5,16	13,60
8,34	5,52	16,48
9,17	5,89	19,75

10,00	6,28	23,48
8,99	5,78	18,75
10,27	6,44	25,04
11,56	7,10	32,29
12,84	7,78	40,60
14,13	8,49	50,09
15,41	9,22	60,94
14,81	8,84	55,17
16,66	10,13	75,42
18,51	11,46	98,82
20,37	12,85	125,83
22,22	14,32	157,16
21,93	14,06	151,54
24,37	16,49	207,79
26,81	19,09	274,36
29,24	21,94	354,08
32,73	27,81	536,13
36,37	36,57	838,76
40,00	48,22	1283,46
43,64	67,46	2088,40

За знайденими точками будуюмо криві  $S=f(V)$  та  $t=f(V)$ , зображені на рисунках 3.10 – 3.12.

					КВРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

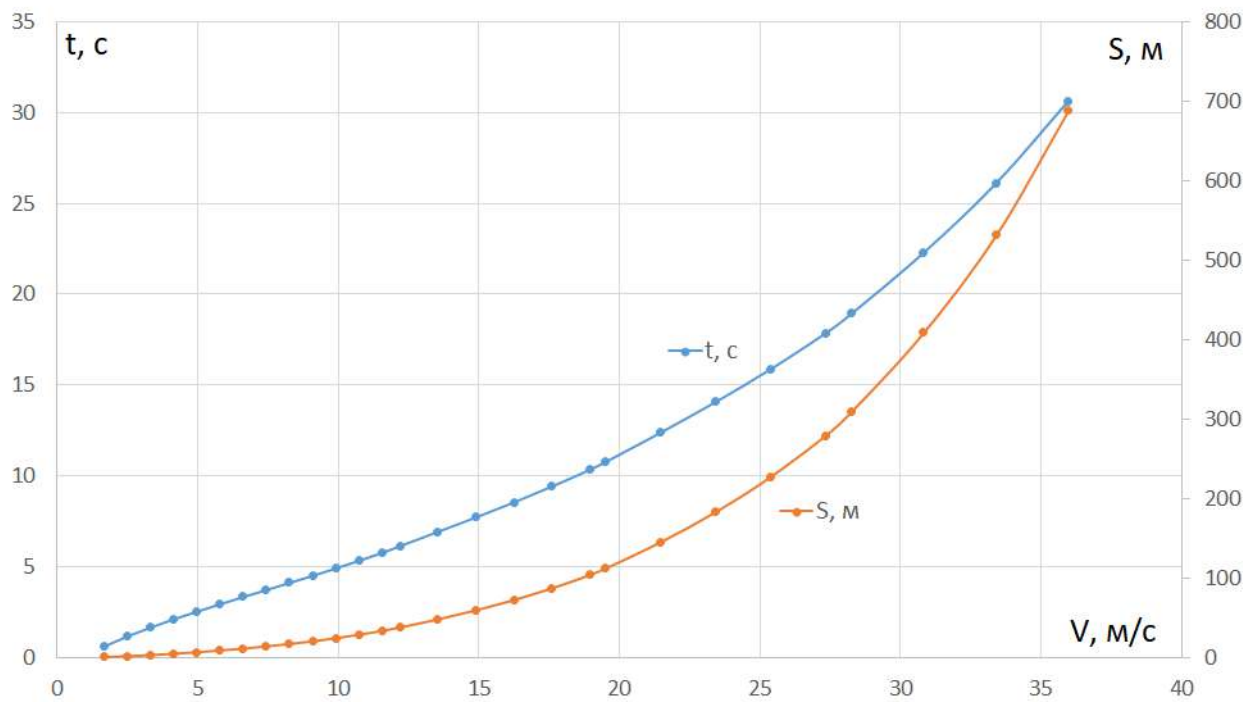


Рисунок 3.10 – Час, шлях та прискорення автомобіля з ДВЗ

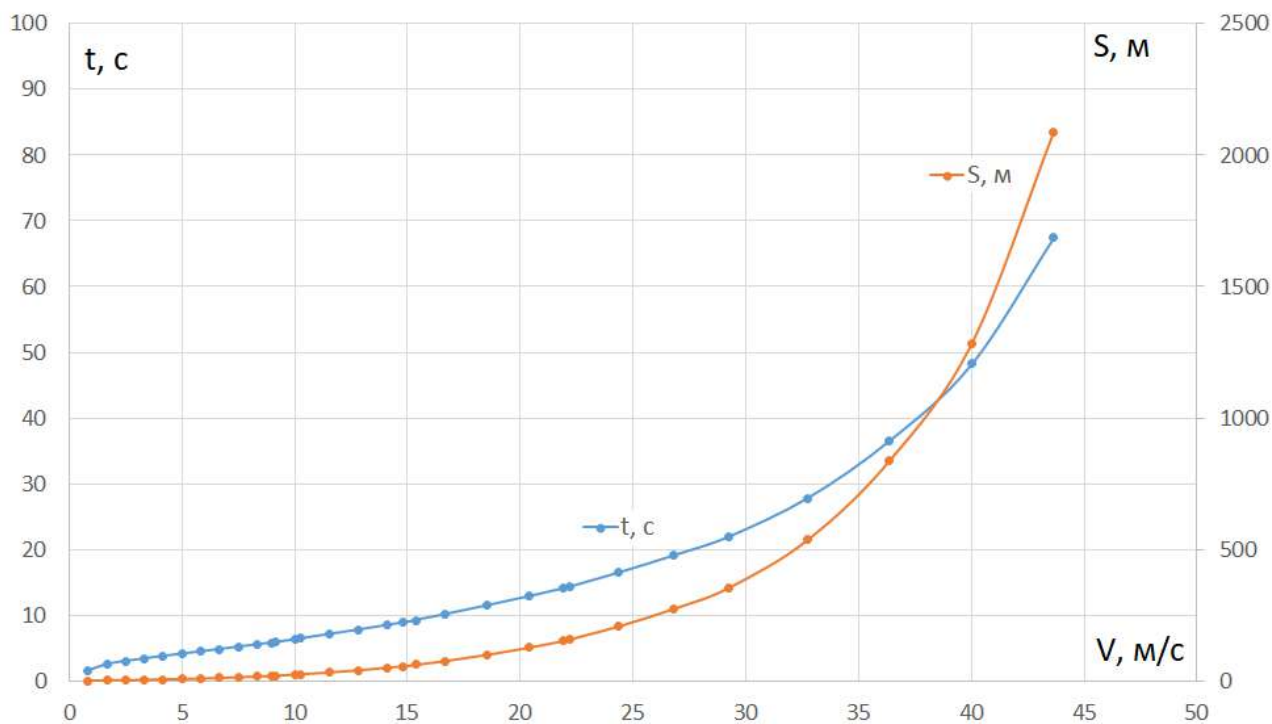


Рисунок 3.11 – Час, шлях та прискорення автомобіля з паралельною ГСУ

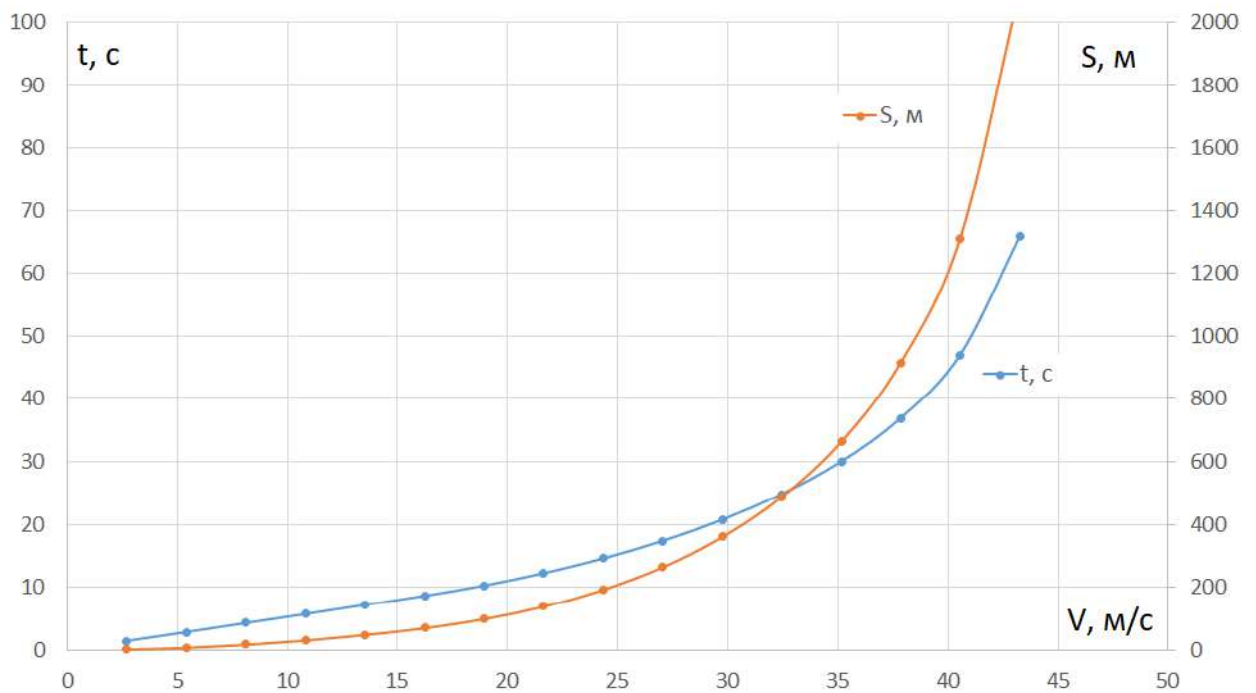


Рисунок 3.12 – Час, шлях та прискорення автомобіля з послідовною ГСУ.

### 3.2 Результати паливно-економічного розрахунку.

Паливно-економічний розрахунок автомобіля з ГСУ зводиться до визначення витрати палива, витрата палива у магістральному та міському циклі NEDC (New European Driving Cycle).

З рівняння руху автомобіля знаходимо силу на привідних колесах автомобіля:

$$P_u = P_k - P_d - P_p, \quad (3.31)$$

де  $P_k$  – сила на колесах;  $P_d$  – сила опору дороги, Н;  $P_p$  – сила опору повітря, Н;  $P_u$  – наведена сила інерції автомобіля.

$$P_k = \frac{M i_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}}}{r_k}, \quad (3.32)$$

$$Pd = \psi mg, \quad (3.33)$$

$$Pp = kFV^2, \quad (3.34)$$

$$Pu = m\delta a, \quad (3.35)$$

$$\frac{M i_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}}}{r_k} = \psi mg + kFV^2 + m\delta a, \quad (3.36)$$

де  $M$  - крутний момент силової установки, Нм;  $i_{\text{тр}}$  - передатне відношення трансмісії, для ДВЗ на кожній передачі:  $i_{\text{тр}1} = 13,34$ ;  $i_{\text{тр}2} = 8,7$ ;  $i_{\text{тр}3} = 6$ ;  $i_{\text{тр}4} = 4,57$ ;  $i_{\text{тр}5} = 3,07$ ; для ЕМ  $i_{\text{тр}} = 2,57$ ;  $\eta_{\text{тр}} = 0,9$  - ККД трансмісії;  $r_k = 0,266$  - радіус колеса, м;  $m = 1000$  - маса автомобіля, кг;  $k_F = 0,45$  - фактор обтічності,  $\text{Нс}^2/\text{м}^2$ ;  $\delta = 1,29$  - коефіцієнт обліку обертових мас.

Таким чином, знаючи передавальні числа трансмісії, крутний момент силової установки у будь-який момент часу:

$$M(t) = \frac{(\psi mg + kFV^2 + m\delta a)r_k}{i_{\text{тр}}\eta_{\text{тр}}}. \quad (3.37)$$

$$v(t) = \frac{Vi_{\text{тр}}}{6,28r_k}, \quad (3.38)$$

$$N(t) = 6,28 Mv. \quad (3.39)$$

Що стосується традиційних автомобілів з ДВЗ це дозволило визначити режим роботи ДВЗ у кожен час. І за паливно-економічною характеристикою розрахувати миттєву витрату палива в кожний момент часу їздового циклу. Взявши припущення, що при негативних значеннях крутного моменту і включеної муфті зчеплення витрата палива дорівнює нулю, так як двигун працює у гальмівному режимі.

Отже, годинна витрата палива у кожний проміжок часу:

					КВРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$G = g_e N, \quad (3.40)$$

Де  $g_e$  - Питома витрата палива двигуна, г/кВтгод.

І шляхова витрата палива за цикл у літрах на 1000 км:

$$Q = \frac{\int G dt}{3,6 \rho_T \int S dv} 10^5, \quad (3.41)$$

де  $\rho = 730$  – щільність палива, кг/м<sup>3</sup>,  $S$  - шлях, пройдений за цикл, км.  $Q = 9,69$  л/100 км.

Для автомобіля з послідовною ГСУ аналогічно автомобілю з ДВЗ, розрахунок паливно-економічних показників за їздовий цикл визначається за режимами роботи тягової ЕМ у кожний момент часу. І за характеристикою ефективності ЕМ розрахувати потужність споживаної електродвигуном.

Витрата енергії за весь їздовий цикл:

$$E_{EM} = \int N dt, \quad (3.44)$$

$E_{EM} = 0,135$  кВтгод.

Така ж кількість енергії повинна виробити генераторна установка на основі ДВЗ:

$$E_{ТЕМ} = E_{ГЕМ}. \quad (3.45)$$

Взявши припущення, що режим роботи генератора проходить у зоні максимальної ефективності, тоді енергія, вироблена ДВЗ, дорівнює:

$$E_{ДВЗ} = E_{Г} \eta_{Г_{\max}}, \quad (3.46)$$

де  $\eta_{Г_{\max}} = 0,9$  максимальний ККД генератора.  $E_{ДВЗ} = 0,15$  кВтгод.

ДВЗ працює також у зоні максимальної ефективності, прииимінімальній питомій витраті з годинною витратою:

$$G_{\min} = g_{\min} N, \quad (3.47)$$

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $g_{\min} = 250$  - мінімальна питома витрата палива, г/кВтгод.  $G_{\min} = 7,5$  кг/год

Тоді шляхова витрата палива автомобіля з послідовною ГСУ дорівнює:

$$Q = \frac{G_{\min} E_{\text{двс}}}{3,6 \rho_1 N_{g_{\min}} \int s dv} 10^5, \quad (3.48)$$

де  $N_{g_{\min}} = 30$  Нт – потужність ДВЗ при мінімальній питомій витраті палива.  $Q = 5,06$  л/100 км.

Для автомобіля з паралельною ГСУ необхідно враховувати спільну роботу ДВЗ та ЕМ. А саме алгоритм їхньої спільної роботи, характеристики злагоджуючого пристрою та відношення потужностей двигунів.

Основним чинником більшості алгоритмів роботи ГС є робота ДВЗ за характеристикою мінімальних питомих витрат  $M = f(n, g)$ . Знаючи значення крутного моменту силової установки, необхідного для руху в їздовому циклі, можна знайти недостатнє значення моменту електричної машини в тяговому або генераторному режимі:

$$M_c = M_{\text{ДВЗ}} + M_{\text{ем}} \quad (3.49)$$

Якщо крутний момент електричної машини в генераторному режимі перевищує своє максимальне значення, значення крутного моменту ДВЗ обчислюється за формулою:

$$M_{\text{ДВЗ}} = M_c - M_{\text{ем max}} . \quad (3.50)$$

Так само якщо крутний момент силової установки менше максимального крутного моменту ЕМ:  $M_c \leq M_{\text{ем max}}$  . Тоді транспортний засіб приводиться в рух лише ЕМ і  $M_{\text{ДВЗ}} = 0$ .

Також необхідно забезпечити підтримку заряду накопичувача енергії за весь їздовий цикл, витрата енергії не повинна бути більшою від виробленої енергії:  $E_{\text{ем}} \leq 0$ .

$$E_{\text{ем}} = \int N dt . \quad (3.51)$$

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Потужність електричної машини в тяговому та генераторному режимі:

$$N_{ТЕМ} = \frac{Mv}{\eta_{ЕМ}}, \quad (3.52)$$

$$N_{ГЕМ} = \frac{Mv}{\eta_{ГЕМ}}. \quad (3.53)$$

А витрата палива ДВЗ за рівняннями 3.40 та 3.41:  $Q = 4,6$  л/100км.

Розраховані автомобілі з силовими установками з ДВЗ, ДСУ та ЕМ однієї максимальної потужності мають схожі динамічні характеристики, час і шлях прискорення. Але їхні паливно-економічні характеристики у міському циклі кардинально відрізняються один від одного, що дозволяє зробити висновок про ефективність використання тієї чи іншої силової установки.

Висновку до розділу 3.

За підсумками проведених розрахунків встановлено, що транспортні засоби з двигуном внутрішнього згорання, а також із послідовною та паралельною гібридними силовими установками однакової максимальної потужності (65 кВт) мають подібні динамічні властивості. Різниця у показниках часу розгону та пройденого шляху не перевищує 5%.

Разом із тим аналіз паливної економічності, особливо в умовах міського руху, показує суттєві відмінності між цими типами силових установок. Так, витрата палива для автомобіля з ДВЗ становить 9,6 л/100 км, для послідовної гібридної схеми – 5,1 л/100 км, а для паралельної – 4,6 л/100 км. Отримані результати підтверджують значно вищу ефективність

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання гібридних силових установок порівняно з традиційними рішеннями.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз основних типів електрифікованих транспортних засобів (BEV, PHEV, HEV, REEV), у ході якого визначено їх конструктивні особливості, а також встановлено ключові переваги та недоліки кожного типу.

2. Сформовано методику тягово-динамічного розрахунку автомобілів із гібридними силовими установками, що охоплює основні варіанти їх компоновки. Запропонований підхід враховує характеристики електричних машин і особливості узгоджувальних механізмів, що дає змогу оцінити динамічні показники транспортного засобу.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Сформовано методику визначення паливної економічності, яка дозволяє розраховувати витрату палива в межах стандартизованого їздового циклу та може застосовуватись для різних типів гібридних систем.

4. За результатами виконаних розрахунків встановлено, що автомобілі з двигуном внутрішнього згорання, а також із послідовною та паралельною гібридними установками однакової максимальної потужності (65 кВт) демонструють близькі динамічні характеристики: відмінності у часі та шляху розгону не перевищують 5%. Водночас показники паливної економічності, особливо в міському режимі, суттєво різняться. Зокрема, витрата палива становить відповідно 9,6 л/100 км для автомобіля з ДВЗ, 5,1 л/100 км – для послідовної ГСУ та 4,6 л/100 км – для паралельної ГСУ, що свідчить про значно вищу ефективність гібридних систем.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електричне та електронне обладнання автомобілів: навчальний посібник (частина I) / Ю.І. Пиндус, Р.Р. Заверуха – Тернопіль: ТНТУ, 2016. – 145 с.
2. Fuhs, A. Hybrid Vehicles: and the Future of Personal Transportation / A. Fuhs. – New–York: CRC Press, 2008. – 504 с.
3. Husain, I. Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals, Second Edition / I. Husain. – New–York: CRC Press, 2010. – 523 с.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

4. Електронний ресурс. Режим доступу:  
<https://www.epravda.com.ua/news>

5. Ehsani, M. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, Second Edition / M. Ehsani, Y. Gao, A. Emadi. – New-York: CRC Press, 2009. – 557 с.

6. Електронний ресурс. Режим доступу:  
<https://autoelectro.ua/elektromobil-volkswagen-e-golf-max.html>

7. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://liga-nissan.km.ua/komplektacii-ta-cini-nissan-leaf/>

8. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://olmaks.ua/tesla-model-3/>

9. Електронний ресурс. Режим доступу:  
[https://uk.wikipedia.org/wiki/Toyota\\_Prius\\_Plug-in\\_Hybrid](https://uk.wikipedia.org/wiki/Toyota_Prius_Plug-in_Hybrid)

10. Кубіч В. І. Гібридні силові установки легкових автомобілів : навчальний посібник / В. І. Кубіч. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 193 с.

11. Транспортні енергетичні установки : навч. посіб. / О. М. Артюх, О. В. Дударенко, В. В. Кузьмін та ін. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 264 с.

12. Транспортні енергетичні установки (традиційні, нетрадиційні та альтернативні), принцип роботи та особливості будови : навч. посіб. / Ю. Ф. Гутаревич та ін. К. : НТУ, 2015. 244 с

13. Міський електромобіль в Україні / В. Б. Павлов, О. В. Попов, В. С. Павленко та ін. // Технічна електродинаміка : наук-техн. журнал. – Київ, 2011. – Темат. вип. (ч. 1). – С. 127–131.

14. Смирнов О.П. Вибір та розрахунок джерела живлення для електромобіля / О.П. Смирнов // Наукові нотатки. – 2012. – № 36. – С. 260-263.

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

15. Hybrid Vehicles, Electric Vehicles, Fuel Cell Electric Vehicles, Kazuki Shimamura, Masatoshi Kuwada, Yoshiyuki Hashimasa, Society of Automotive Engineers of Japan[текст], SAE International, 2013.

16. Defining the General Motors 2-Mode Hybrid Transmission, Tim M. Grewe, Brendan M. Conlon and Alan G. Holmes, General Motors SAE International, 2007.

17. Kazuaki Shingo, Kaoru Kubo, Toshiaki Katsu, and Yuji Hata. Development of Electric Motors for the TOYOTA Hybrid Vehicle "PRIUS"[текст]. Toyota Motor Corporation, 2010.

18. Смирнов О.П. Оцінка економічності електромобілів / О.П. Смирнов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2012. – №9 (180) Частина 1 – С. 30-34.

19. Бороденко Ю.М. Концепція діагностики електропривода гібридного автомобіля / Ю.М. Бороденко, А.В. Черевач // Автомобільний транспорт. – 2012. № 30. – С. 59 – 64.

					КВРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

ДОДАТКИ

					КвРАТ. 22110.01.09.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82