

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ»  
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра тракторів, автомобілів та енергетичних засобів**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**НА ТЕМУ:**

**«ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ  
МОДЕРНІЗАЦІЇ АВТОМОБІЛІВ З КОМБІНОВАНОЮ  
ЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ»**

**Виконав:**

здобувач освітнього ступеня «Магістр»  
освітньо-професійної програми  
«Агроінженерія» спеціальності  
208 «Агроінженерія»  
денної форми навчання

**МЕЛЬНИК Олексій Станіславович**

**Керівник:**

к.т.н., доцент

**ПУКАС Віталій Леонідович**

**Оцінка захисту:**

Національна шкала \_\_\_\_\_

Кількість балів \_\_\_\_\_

Шкала ECTS \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025р.

**Допускається до захисту:**

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025р.

Гарант освітньо-професійної програми «Агроінженерія»  
спеціальності 208 «Агроінженерія»,

к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ **ДУГАНЕЦЬ Василь Іванович**

м. Кам'янець-Подільський, 2025

## ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	5
АНОТАЦІЯ.....	6
РЕФЕРАТ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАПРЯМІВ ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АВТОМОБІЛІВ.....	10
1.1. Енергетична ефективність та енергетична економічність автомобіля. Визначення понять та критерії оцінювання.....	10
1.2. Динаміка розгону автомобіля й методи її оцінювання.....	15
1.3. Аналіз відомих методів оцінювання енергетичної ефективності автомобілів.....	17
1.4. Аналіз існуючих схем комбінованої енергетичної установки автомобілів.....	18
1.5. Вплив використання комбінованої енергетичної установки на енергетичну ефективність та динамічні властивості автомобілів.....	23
1.6. Постановка проблеми та завдання дослідження.....	25
Висновки до розділу.....	26
РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ СХЕМ КОМБІНОВАНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ АВТОМОБІЛІВ.....	28
2.1. Схема комбінованої енергетичної установки автомобіля без тягових електродвигунів на колесах.....	28
2.2. Схема комбінованої енергетичної установки автомобіля з тяговими електродвигунами на задні колеса та комбінованим приводом на передні колеса.....	30
2.3. Схема комбінованої енергетичної установки автомобіля з тяговими електродвигунами на усі колеса.....	34
Висновки до розділу.....	39
РОЗДІЛ 3. НАУКОВІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ Й ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АВТОМОБІЛІВ.....	42
3.1 Оцінка ефективної роботи двигуна внутрішнього згорання при розгоні автомобіля на різних передачах.....	42
3.2 Раціональна характеристика розгону автомобіля.....	45
3.3 Оцінка часу розгону автомобіля до заданої швидкості при різних законах керування прискоренням.....	46
Висновки до розділу.....	50

РОЗДІЛ 4. НАУКОВІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМОБІЛІВ З КОМБІНОВАНОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ.....	51
4.1 Дослідження кінематики та динаміки запропонованої комбінованої енергетичної установки автомобіля.....	51
4.2 Оцінка зниження енергетичних втрат автомобіля з комбінованою енергетичною установкою.....	53
Висновки до розділу.....	55
РОЗДІЛ 5. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРУВАННЯ РУХОМ АВТОМОБІЛІВ З КОМБІНОВАНОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ НА НЕСТАЛОМУ РЕЖИМІ.....	58
5.1 Керування рухом автомобільної колони з безпілотними автомобілями...58	
5.3 Оцінка ефективної роботи двигуна внутрішнього згоряння при розгоні на різних передачах, на прикладі сімейства вантажних автомобілів КраЗ.....	61
Висновки до розділу .....	66
РОЗДІЛ 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АВТОМОБІЛІВ...68	
6.1. Мета та задачі експериментальних досліджень енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів.....	68
6.2 Об'єкт експериментальних досліджень.....	69
6.3 Умови та місце проведення експериментальних досліджень.....	69
6.4 Матеріально-технічне забезпечення експериментальних досліджень.....	69
6.5 Програма-методика проведення експериментальних досліджень.....	74
6.6 Обробка експериментальних даних.....	75
6.7 Порівняльний аналіз експериментальних даних щодо визначення ефективної роботи двигуна внутрішнього згоряння вантажного автомобіля КраЗ з теоретичними.....	78
6.8 Порівняльні експериментальні дослідження енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів з механічною, комбінованою та електричною енергетичною установкою.....	80
Висновки до розділу.....	86
РОЗДІЛ 7. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	87
7.1 Загальні відомості.....	87
7.2. Заходи безпеки при вантажно-розвантажувальних роботах і витягуванні застряглого автомобіля.....	88
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	90
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	92
Додаток А.....	107

ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»  
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра тракторів, автомобілів та енергетичних засобів  
Освітній ступінь «Магістр»  
Спеціальність 208 - «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри,  
професор \_\_\_\_\_ Віктор ДУГАНЕЦЬ  
„\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025 року

З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
Здобувачу МЕЛЬНИКУ Олексію Станіславовичу

1. Тема роботи: «ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ МОДЕРНІЗАЦІЇ АВТОМОБІЛІВ З КОМБІНОВАНОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ»
2. Керівник роботи: ПУКАС Віталій Леонідович, доцент  
Затверджено наказом Закладу вищої освіти «Подільський державний університет» від «04» квітня 2025 року № 355с.  
Строк подання здобувачем закінченої роботи 26 листопада 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи:
  1. Матеріали дипломного проекту з освітнього ступеня "Бакалавр".
  2. Науково-технічна література.
  3. Результати досліджень та випробувань енергетичних властивостей автомобілів.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

Вступ

  1. Аналіз напрямів покращення енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів.
  2. Синтез схем комбінованої енергетичної установки автомобілів.
  3. Наукові основи формування енергетичної ефективності й динамічних властивостей автомобілів.
  4. Наукові основи формування динамічних та енергетичних характеристик автомобілів з комбінованою енергетичною установкою.
  5. Теоретичні дослідження керування рухом автомобілів з комбінованою енергетичною установкою на не сталому режимі.
  6. Експериментальні дослідження енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів.
  7. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Загальні висновки по роботі.  
Список використаних джерел.  
Додатки.

## 5. Перелік ілюстративного матеріалу:

1. Титульний аркуш.
2. Мета і завдання досліджень.
3. Основні характеристики двигунів внутрішнього згорання.
4. Структурні схеми комбінованих енергетичних установок.
5. Схема комбінованої енергетичної установки автомобіля без тягових електродвигунів.
6. Динамічна модель.
7. Загальний вигляд автомобільного шасі КрАЗ-63221-016-02.
8. Загальний вигляд бортового вантажного автомобіля КрАЗ-5233BE-016-000.
9. Технічні характеристики бортового вантажного автомобіля КрАЗ-5233BE-016-000.
10. Схема сил, що діють на двовісний автомобіль при гальмуванні на прямому ході.
11. Схема сил, що діють на тривісний автомобіль при гальмуванні.
12. Вантажні автомобілі КрАЗ, які використовувались під час проведення експериментальних досліджень.
13. Загальний вигляд датчика прискорення.
14. Параметри, що визначаються за допомогою мобільного реєстраційно-вимірювального комплексу.
- 15, 16. Обробка результатів експериментальних досліджень.
- 17, 18. Обробка результатів експериментальних досліджень.
19. Загальні висновки по роботі.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Консультант з нормоконтролю	ПУКАС В.Л., доцент		

7. Дата видачі завдання 04 квітня 2025р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділів роботи	Строк виконання розділів роботи		Підпис керівника
		планово	фактично	
	Вступ	20.04.2025р.	20.02.2023р.	
1.	Аналіз напрямів покращення енергетичної ефективності та динамічних властивостей.	25.05.2025р.	25.03.2023р.	
2.	Синтез схем комбінованої енергетичної установки автомобілів.	03.06.2025р.	03.04.2023р.	
3.	Наукові основи формування енергетичної ефективності й динамічних властивостей.	20.07.2025р.	20.05.2023р.	
4.	Наукові основи формування динамічних та енергетичних характеристик автомобілів з комбінованою енергетичною установкою.	12.08.2025р.	12.06.2023р.	
5.	Теоретичні дослідження керування рухом з комбінованою енергетичною установкою.	12.09.2025р.	12.07.2023р.	
6.	Експериментальні дослідження енергетичної ефективності автомобілів.	12.10.2025р.	12.08.2023р.	
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.	20.10.2025р.	10.09.2023р.	
	Загальні висновки по роботі.	10.11.2025р.	10.10.2023р.	
	Список використаних джерел.	20.11.2025р.	10.11.2023р.	
	Додатки.	26.11.2025р.	25.11.2023р.	

Здобувач  
Керівник

Олексій МЕЛЬНИК  
Віталій ПУКАС

## АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній роботі магістра запропоновано варіанти конструкції комбінованої енергетичної установки автомобіля з різним ступенем «гібридизації». Запропоновані схеми комбінованої енергетичної установки автомобіля: без тягових електродвигунів; з тяговими електродвигунами на задні колеса та комбінованим приводом на передні колеса; з тяговими електродвигунами на усі колеса.

Отримано метод оцінювання впливу конструктивних параметрів і параметрів, що характеризують опір руху, на ефективну роботу ДВЗ при розгоні автомобіля, який дозволяє оцінювати її на всьому діапазоні змін кутових швидкостей колінчастого вала двигуна. Запропонований метод оцінювання ефективної роботи ДВЗ при розгоні на різних передачах. Проведені експериментальні дослідження енергетичних витрат на розгін, наприкладі, автомобіля КраЗ-6322, що виконані з використанням методу парціальних прискорень, показали, що різниця між ними і результатами теоретичних досліджень складають від 1,3% (на 1-й передачі) до 16,8% (на 3-й передачі).

## SUMMARY

In the master's thesis the variants of a design of the combined power plant of the car with various degree of "hybridization" are offered. The schemes of the combined power plant of the car are offered: without traction electric motors; with traction motors on the rear wheels and a combined drive on the front wheels; with traction electric motors on all wheels.

The method of estimating the influence of structural parameters and parameters that characterize the resistance to motion on the effective operation of the internal combustion engine during vehicle acceleration, which allows to evaluate it over the entire range of changes in angular velocities of the engine crankshaft. A method for evaluating the effective operation of the internal combustion engine during acceleration in different gears is proposed. Experimental studies of energy consumption for acceleration, for example, the car KrAZ-6322, performed using the method of partial acceleration, showed that the difference between them and the results of theoretical studies is from 1.3% (in 1st gear) to 16, 8% (in 3rd gear).

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки, виконаної машинописним способом на 90 аркушах формату А4, яка вміщує 7 розділів 12 таблиць, 63 рисунки, 67 найменувань використаних джерел і презентаційного матеріалу на 19 аркушах.

Метою роботи є розробка наукових основ створення машин з комбінованою енергетичною установкою шляхом узагальнення і розвитку теорії автомобіля, що покращує його енергетичну ефективність та динамічні властивості.

В процесі виконання кваліфікаційної роботи використовувались математичні методи розв'язання диференціальних рівнянь, енергетичні, методи парціальних прискорень та мобільного реєстраційно-вимірювального комплексу, методи дослідження складного руху механізмів та систем, а також методи натурних випробувань, електричного вимірювання неелектричних величин, теорії ймовірностей та математичної статистики. У результаті проведених досліджень запропонований метод оцінювання ефективної роботи ДВЗ при розгоні на різних передачах, який дозволив визначити, що зі збільшенням передаточного числа трансмісії рівень вказаної роботи збільшується.

Проведені експериментальні дослідження енергетичних витрат на розгін на прикладі автомобіля КраЗ-6322, виконані з використанням методу парціальних прискорень, показали, що різниця між ними і результатами теоретичних досліджень складає від 1,3 % (на 1-й передачі) до 16,8 % (на 3-й передачі). Це свідчить про достатньо високу ступінь збіжності отриманих результатів.

Ключові слова: КОМБІНОВАНА ЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, ПРИСКОРЕННЯ, АВТОМОБІЛЬ, ЕКОНОМІЯ ЕНЕРГІЇ, ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ДИНАМІЧНА ВЛАСТИВІСТЬ.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** В сучасних умовах забезпечення енергетичної ефективності та підвищення динамічних характеристик автомобілів нерозривно пов'язане із розробкою нових енергозберігаючих силових установок. До таких установок відносяться комбіновані електромеханічні силові передачі, що забезпечують привід ведучих коліс як від двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), так і від електродвигунів. Використання комбінованої енергетичної установки (КЕУ) дозволяє зменшити додаткові втрати енергії (потужності) двигуна завдяки зниженню амплітуди коливань тягової сили на ведучих колесах. Крім того, застосування комбінованого електромеханічного приводу практично подвоює потужність на колесах, що є критично важливим для руху автомобілів в умовах бездоріжжя. Наявність електроприводу ведучих коліс також підвищує маневреність автомобілів завдяки спрощенню системи керування поворотом динамічним способом, можливості руху «крабом», а також забезпечує додаткові переваги при експлуатації безпілотних транспортних засобів.

Водночас, на сьогодні відсутній системний підхід до оцінки енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів з КЕУ, що ускладнює визначення їх раціональних характеристик. Це обумовлює необхідність вирішення актуальної наукової проблеми щодо формування теоретичних основ створення автомобілів із комбінованою енергетичною установкою.

**Мета і завдання дослідження.** Метою курсово-робочої моделі (КРМ) є розробка наукових основ створення автомобілів із комбінованою енергетичною установкою шляхом узагальнення та розвитку теорії автомобіля з метою підвищення його енергетичної ефективності та динамічних характеристик.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- запропонувати конструктивні схеми комбінованої енергетичної установки автомобіля;
- узагальнити наукові основи формування енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів;
- дослідити наукові основи формування енергетичної ефективності та динамічних характеристик автомобілів саме з комбінованою енергетичною установкою;

- провести теоретичні дослідження керування рухом автомобіля з КЕУ в несталіх режимах;
- виконати експериментальні дослідження енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів.

**Об'єкт дослідження** – енергетична ефективність та динамічні характеристики автомобілів із комбінованою енергетичною установкою.

**Предмет дослідження** – вплив характеристик комбінованої енергетичної установки на енергетичну ефективність і динамічні властивості автомобілів.

**Методи дослідження.** Під час виконання КРМ застосовувалися математичні методи розв'язання диференціальних рівнянь, енергетичні методи, методи парціальних прискорень, мобільний реєстраційно-вимірювальний комплекс, методи дослідження складного руху механізмів і систем, натурні випробування, електричні вимірювання неелектричних величин, а також методи теорії ймовірностей і математичної статистики.

**Практичне значення одержаних результатів.** У результаті виконання КРМ запропоновано конструктивні схеми та обґрунтовані практичні рекомендації для створення автомобілів із комбінованою енергетичною установкою, що можуть бути використані при проектуванні нових та модернізації існуючих машин. Розроблено методику оцінки можливості підвищення маневреності автомобільних колон за рахунок використання безпілотних автомобілів із КЕУ.

Основні положення теоретичних та експериментальних досліджень застосовуються у навчальному процесі Подільського державного університету під час вивчення дисципліни «Трактори і автомобілі» студентами інженерно-технічного факультету за спеціальністю «Агроінженерія».

**Апробація результатів.** Основні положення теоретичних і експериментальних досліджень обговорювались на засіданні кафедри під час попереднього захисту кваліфікаційної роботи.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ НАПРЯМІВ ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АВТОМОБІЛІВ

#### **1.1 Енергетична ефективність та енергетична економічність автомобіля.**

##### **Визначення понять та критерії оцінювання**

Будь-який рух, включаючи стан спокою, є відносним. Щоб визначити, чи знаходиться тіло в спокої або рухається, а також описати його характер руху, необхідно вказати, відносно яких тіл розглядається рух.

Тіло, що перебуває у стані рівноваги, знаходиться або в стані спокою, або рухається рівномірно і прямолінійно, відповідно до першого закону Ньютона. Спокій є відносним, оскільки оцінюється відносно інших тіл, тоді як рух можна вважати абсолютним.

Рівномірний прямолінійний рух тіла відбувається тоді, коли рушійні сили врівноважені силами опору руху. Це означає, що в будь-який момент часу різниця потужностей рушійних сил і сил опору дорівнює нулю. У такому випадку тіло рухається з постійною швидкістю, а його кінетична енергія залишається сталою. Величина кінетичної енергії характеризує енергетичний рівень тіла, що рухається.

Для забезпечення рівномірного руху необхідно підтримувати стабільність як рушійних сил (потужностей), так і сил опору руху. Проте підтримувати нульову різницю між ними в кожен момент часу складно. Баланс рушійних сил і опору є динамічним, тобто допускає періодичні коливання. У режимі динамічної рівноваги як рушійні сили, так і сили опору, а також кінетична енергія тіла періодично змінюються. Рух у такому режимі є сталим: швидкість і кінетична енергія тіла змінюються періодично, а умовою сталого руху є рівність роботи рушійних сил і сил опору за певний проміжок часу, який відповідає періоду коливань швидкості. Таким чином, рівномірний рух – це рух з постійною миттєвою швидкістю, а сталий рух – з постійною середньою швидкістю.

Для автомобілів реалізувати ідеальний рівномірний рух неможливо через неможливість підтримувати сталість тягових сил і сил опору руху. У практичних

умовах автомобіль рухається переважно в режимі сталого руху, тоді як рівномірний режим є «ідеальним» і нереалізованим. Рівномірний рух автомобіля є оптимальним з точки зору високої енергетичної ефективності та економічності переміщення від початкової до кінцевої точки маршруту. Будь-яка зміна швидкості супроводжується зміною кінетичної енергії, частина якої втрачається і потребує додаткової роботи двигуна для відновлення.

Коливання швидкості автомобіля можуть містити багато гармонік, що обумовлено нерівномірністю крутного моменту двигуна, неточностями виготовлення зубчастих коліс трансмісії та коливаннями непідресорених і підресорених мас. Тому процес переміщення автомобіля слід розглядати як сталий, оскільки на протязі всього маршруту різниця роботи рушійних сил і сил опору дорівнює нулю.

Несталий режим руху визначається на обмеженому проміжку часу, меншим за період коливань швидкості. Такий режим є частиною сталого руху на відрізок часу, коротшому за період коливань швидкості.

Сталий рух автомобіля можна розглядати як складний рух, що включає переносний рух – рівномірний рух із середньою швидкістю – та відносний рух. Відносний рух складається з компонент, які зумовлені коливаннями швидкості автомобіля відносно її середнього значення. Це формує модель багатоконпонентного складного руху, де кожна компонента відносного руху відповідає певній гармоніці, зумовленій конкретним фактором.

У підсумку швидкість автомобіля можна представити як суму переносного та відносного рухів, що враховує проекцію вектору швидкості на напрямок руху.

$$V_a = V_a + \sum_{i=1}^n V_{\text{від } i}, \quad (1.1)$$

де  $V_a$  – середня (переносна) швидкість автомобіля;

$V_{\text{від } i}$  –  $i$ -а компонента відносної швидкості (викликаної  $i$ -ою гармонікою коливань);

$n$  – число гармонік коливань швидкості.

Переносний рух автомобіля є ідеальним з точки зору енергоефективності, оскільки середня швидкість  $\overline{V}_a = const$  при сталому русі. Тому задача щодо підвищення енергоефективності автомобіля зводиться до

зниження величини  $\sum_{i=1}^n V_{\text{від } i}$ . В ідеальному випадку

$$\sum_{i=1}^n V_{\text{від } i} = 0. \quad (1.2)$$

Таким чином, для підвищення енергетичної ефективності та економічності автомобілів доцільно застосовувати модель багатокomпонентного складного руху.

Поява транспортних засобів з новими, альтернативними традиційним, енергетичними установками спонукала авторів роботи [68] запропонувати термін «енергетична економічність» замість відомого «паливна економічність». Нове поняття «енергетична економічність» охоплює витрати не лише теплової енергії рідкого чи газоподібного палива, а й енергії з інших джерел, що дозволяє порівнювати економічність автомобілів з ДВЗ та електромобілів. При однакових зовнішніх силах опору руху автомобілі з електричним приводом ведучих коліс витрачають менше енергії, ніж автомобілі з ДВЗ. Це зумовлено нерівномірністю крутного моменту двигуна внутрішнього згорання, що призводить до додаткових втрат енергії, раніше недостатньо вивчених.

Критеріями оцінки енергетичної економічності автомобіля є:

зменшення запасу енергії джерела за час проходження контрольної ділянки; відстань, яку автомобіль може пройти при витрачанні визначеної кількості енергії джерела.

Енергетична ефективність характеризує раціональне використання потужності двигуна та витрату запасів енергетичних ресурсів. Раціональне використання потужності передбачає досягнення максимальних показників динамічності автомобіля при мінімальних витратах енергії. Джерелами енергії можуть бути:

рідке або газоподібне паливо;

механічні або електричні акумулятори енергії (маховики та батареї);

електричні генератори, які отримують механічну енергію від двигунів внутрішнього згоряння.

Всі витрати енергії при русі автомобіля можна класифікувати на зовнішні та внутрішні, корисні (продуктивні) та додаткові (непродуктивні, шкідливі).

Зовнішні витрати енергії пов'язані з роботою сил опору руху автомобіля. Внутрішні витрати виникають у двигуні, трансмісії та інших агрегатах і системах (привід додаткових механізмів, втрати в підвісці та рульовому управлінні). Погіршення технічного стану транспортного засобу призводить до збільшення як зовнішніх, так і внутрішніх втрат енергії.

До корисних втрат енергії двигуна відносяться ті, що витрачаються на подолання зовнішніх сил опору при рівномірному русі автомобіля на прямолінійних ділянках дороги з твердим покриттям. Усі внутрішні втрати енергії двигуна відносяться до непродуктивних. Зниження зовнішніх і внутрішніх втрат енергії підвищує динамічні характеристики автомобіля та його енергетичну ефективність.

Наукові дискусії щодо визначення коефіцієнта корисної дії автомобіля зосереджуються на проблемі визначення продуктивної роботи. Якщо визначення витраченої енергії не викликає сумнівів, то підхід до оцінки корисної роботи різниться. Так, Подригало Н.М. пропонує визначати ККД автомобіля через коефіцієнт втрат, тобто як відношення сумарних непродуктивних витрат енергії до витраченої потужності двигуна. Додаткові втрати виникають у трансмісії та при розгляді зовнішньої динаміки через нерівномірність крутного моменту ДВЗ, що забезпечує сталий (з постійною середньою швидкістю), а не рівномірний рух автомобіля.

Сталий рух характеризується середньою швидкістю, амплітудою та частотою коливань миттєвої швидкості. Менші амплітуди та коливання швидкості зменшують зміну кінетичної енергії за цикл і, відповідно, додаткові втрати енергії. Використання комбінованої енергетичної установки знижує амплітуду коливань тягової сили та швидкості, що зменшує додаткові втрати і підвищує енергетичну ефективність автомобіля.

Енергетична ефективність і висока динамічність є ключовими характеристиками, що визначають технічний рівень та споживчу привабливість

автомобілів. Поліпшення енергетичної ефективності актуальне у зв'язку з ростом інтенсивності дорожнього руху та вимогами щодо зменшення шкідливого впливу транспорту на навколишнє середовище. Поява електромобілів та автомобілів із комбінованою енергетичною установкою (електромеханічний привід ведучих коліс) сприяє цьому. Наявність електроприводу ведучих коліс дозволяє раціонально керувати розгоном автомобіля, забезпечуючи закон зміни прискорення, що мінімізує витрати енергії (потужності) двигуна.

Під час розгону автомобіля на несталому режимі роботи ДВЗ відбуваються максимальні втрати енергії палива. Тому динаміка розгону та методи її оцінки є важливими для підвищення енергетичної ефективності транспортного засобу.

## **1.2 Динаміка розгону автомобіля й методи її оцінювання**

Автомобіль, який керується водієм, є рухомою фізичною системою, що поєднує виробництво механічної енергії та її використання під час транспортного процесу. Тому питання енергетики автомобіля є особливо актуальним. Для забезпечення високих динамічних показників транспортного засобу необхідно реалізовувати максимальну ефективність при мінімальних витратах енергії (потужності) двигуна.

У режимі розгону доцільно здійснювати керування рухом автомобіля за допомогою електричної частини приводу. Використання автомобілів із комбінованою енергетичною установкою, зокрема з електромеханічним приводом ведучих коліс, дозволяє значно підвищити динамічність машини, оптимізуючи витрати енергії двигуна під час прискорення.

Застосування електричної частини приводу в режимі розгону забезпечує більш точне і раціональне регулювання прискорення, що дозволяє зменшити додаткові втрати енергії та підвищити енергетичну ефективність транспортного засобу.

Розгін автомобіля від швидкості  $V_a$  до швидкості  $V_a + \Delta V_a$  буде відбуватись до настання нової рівноваги (тягового балансу).

Для оцінки тягово-швидкісних характеристик автомобілів у наукових дослідженнях пропонується застосовувати метод парціальних прискорень.

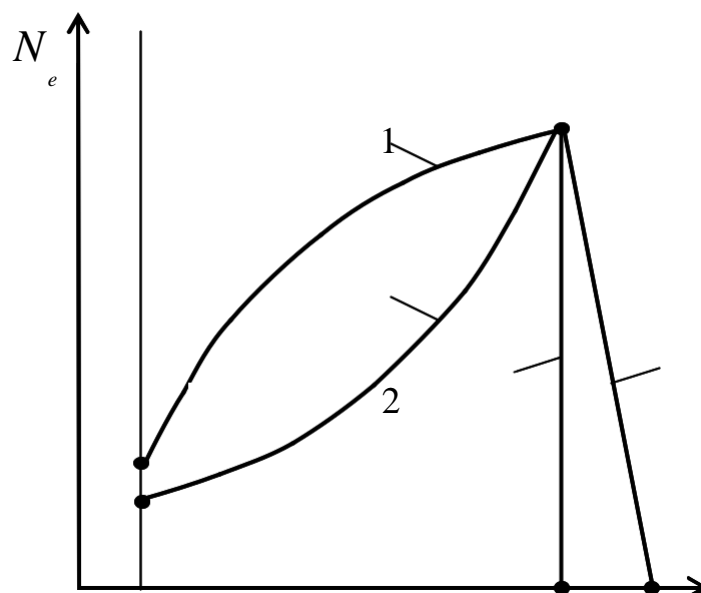
Питома потужність автомобіля є показником його енергонасиченості та використовується для оцінки динамічних можливостей транспортного засобу. У різних науково-технічних джерелах містяться рекомендації щодо вибору значення питомої потужності вже на етапі проектування автомобіля, з урахуванням його типу, класу та призначення.

Очевидно, що зміна маси автомобіля в процесі експлуатації спричинює зміну  $N_{num}$ . Тому вказаний показник є функцією ступеня завантаженості автомобіля. При розробленні уніфікованого ряду автомобілів, основою якого модульний принцип побудови, питома потужність буде мати різні значення для різних зразків, що входять до типорозмірного ряду.

Під безступінчастими передачами розуміють лише несаморегульовані передачі, які мають зовнішній орган керування і не здатні у широкому діапазоні самостійно змінювати передаточне відношення [68]. До таких передач належать гідروоб'ємні, фрикційні та передачі зі змінною амплітудою коливань (імпульсні) [68].

Хоча імпульсні передачі не отримали широкого застосування у самохідних машинах, останнім часом з'явилися автомобілі з комбінованою енергетичною установкою, зокрема з електромеханічним приводом коліс, що забезпечує плавну зміну передаточного відношення трансмісії. Важливим етапом розробки автоматичних безступінчастих передач є оптимальний вибір регуляторних характеристик двигуна внутрішнього згоряння.

У наукових джерелах [68] виділяють чотири основні характеристики, які визначають роботу всіх поршневих двигунів внутрішнього згоряння (рис. 1.1).



## В

1 – швидкісна характеристика; 2 – гвинтова характеристика (для авіаційних та судових двигунів); 3 – навантажувальна характеристика при  $\omega_e = \omega_{ном} = const$ ; 4 – регуляторна характеристика при  $\omega_e \neq const$ ;  $N_e$  – ефективна потужність ДВЗ;  $\omega_e$  – кутова швидкість колінчастого валу;  $\omega_{min}$ ,  $\omega_{ном}$  – мінімально стійка і номінальна кутові швидкості колінчастого валу;  $\omega_{max}$  – максимальна кутова швидкість колінчастого валу

Рисунок 1.1 – Основні характеристики ДВЗ

Навантажувальна характеристика 3 (пряма  $AD$  на рис. 1.1) використовується в стаціонарних і тепловозних двигунах. Регуляторна характеристика 4 (пряма  $AE$  на рис. 1.1) при зменшенні подачі палива допускає збільшення максимальної кутової швидкості колінчастого валу  $\omega_{max}$  на 5 – 10%. За зазначеної характеристики частину часу працюють тракторні двигуни та автомобільні дизелі, оснащені регуляторами. Це дає змогу використовувати переваги безступінчастих передач та здійснювати розгін автомобіля за рахунок плавного зменшення передаточного числа трансмісії, замість розгону й гальмування колінчастого вала двигуна на кожній передачі при зміні умов швидкості. Такий підхід дозволяє покращити як динамічні, так і енергоекономічні показники автомобілів. Відповідно, необхідно розглядати можливість підвищення динамічних властивостей транспортних засобів через оцінку та зменшення витрат енергії (потужності) двигуна на розгін, визначення та реалізацію оптимальної характеристики розгону, а також застосування безступінчастої автоматичної трансмісії.

### 1.3 Аналіз відомих методів оцінювання енергетичної ефективності автомобілів

Вимоги до енергетичної ефективності автотранспортних засобів постійно зростають у всьому світі. У країнах із розвиненим автомобілебудуванням та високим рівнем експлуатації транспорту ці стандарти регулярно переглядаються і уточнюються [75–79]. У роботі [79] представлено огляд американського досвіду щодо нормування показників енергетичної економічності автомобілів,

включаючи методи визначення питомих витрат енергії та оцінки ефективності двигунів і трансмісій. У більшості країн основним показником паливної економічності є витрата палива  $Q_s$ , що вимірюється у літрах на 100 кілометрів пройденого шляху. Для оцінки ефективності (економічності) транспортної роботи використовується питомий показник  $Q_{np}$ . Цей показник являє собою відношення фактичної витрати палива до виконаної транспортної роботи. Крім зазначених показників для оцінки паливної економічності використовується часова  $Q_t$  і питома  $g_e$  витрата палива.

Встановлено також такі основні характеристики та показники паливної економічності автомобіля:

контрольна витрата палива;

витрата палива у магістральному їздовому циклі на дорозі;

витрата палива у міському їздовому циклі на дорозі;

паливна характеристика усталеного руху;

паливно-швидкісна характеристика на магістрально-горбистій дорозі.

Виконання зазначених вимог можливо лише при зменшенні непродуктивних витрат енергії двигуна на рух автомобіля. За даними Агентства Охорони Навколишнього Середовища США (US Environmental Protection Agency), розподіл витрат енергії від згоряння палива складає: трансмісія – 5,6%; двигун – 62,4%; аеродинамічний опір – 2,6%; опір коченню коліс – 4,2%; розгін – 5,8%.

Використання комбінованої енергетичної установки дозволяє знизити додаткові втрати енергії (потужності). Для зменшення втрат у трансмісії, викликаних коливаннями крутного моменту двигуна внутрішнього згоряння, у роботах [84–86] запропоновано механічний безступінчастий трансформатор, який виконує функцію механічного «випрямляча».

Цільові заходи, що впливають на розвиток сучасних технологій у автомобільній галузі, дедалі частіше використовуються розробниками енергетичної політики в ЄС для досягнення цілей щодо підвищення енергоефективності, впровадження відновлюваних джерел енергії, адаптації до змін клімату та забезпечення енергетичної безпеки. Проте у цих дослідженнях не вирішено проблему визначення взаємозв'язку між максимальним приростом швидкості автомобіля та мінімальним збільшенням потужності його двигуна.

#### **1.4 Аналіз існуючих схем комбінованої енергетичної установки автомобілів**

Аналіз автомобільного ринку демонструє зростання продажів нових моделей, особливо економічних та екологічно чистих транспортних засобів, до яких належать автомобілі з комбінованою енергетичною установкою (КЕУ).

Проведені маркетингові дослідження показують підвищений попит на такі синергетичні автомобілі, особливо в останні роки. Попередниками автомобілів з КЕУ були машини з багатопоточною трансмісією, що використовували диференціальні механізми для розподілу та сумування потоків потужності, або гідравлічні та фрикційні передачі.

У сучасних автомобілях з КЕУ для підвищення енергоефективності та екологічної чистоти застосовують високовольтні акумуляторні батареї та тягові електродвигуни (ЕД), які можуть повністю замінювати або частково підтримувати двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) у різних режимах роботи. Під час гальмування або руху за інерцією електричні машини працюють у режимі генератора, заряджаючи акумулятор через перетворювач напруги (інвертор). Крім того, замість стандартного генератора встановлюють високовольтний стартер-генератор, який під час роботи ДВЗ заряджає акумулятор через інвертор і забезпечує автоматичний пуск двигуна при необхідності.

Наразі існує кілька концептуальних схем побудови автомобілів з КЕУ. Конструктивно їх можна поділити на чотири основні структурні схеми, що відрізняються як схемними рішеннями, так і потужністю використаних електродвигунів.

Перша схема комбінованої енергетичної установки (рис. 1.3) передбачає використання оберненої електричної машини (стартер-генератора) малої потужності (2–4 кВт). До автомобілів із цією схемою належать Toyota Crown та Ford Fiesta. Такі автомобілі оснащені системою «Stop-Start», яка автоматично вимикає ДВЗ при зупинці, а під час гальмування або руху за інерцією акумуляторна батарея заряджається при відключеному ДВЗ. Економія палива у цих автомобілів складає до 10 % порівняно з аналогічними моделями з традиційним ДВЗ. На схемах (рис. 1.2–1.5) потоки механічної енергії позначені подвійною стрілкою, а потоки електричної енергії — одинарною.

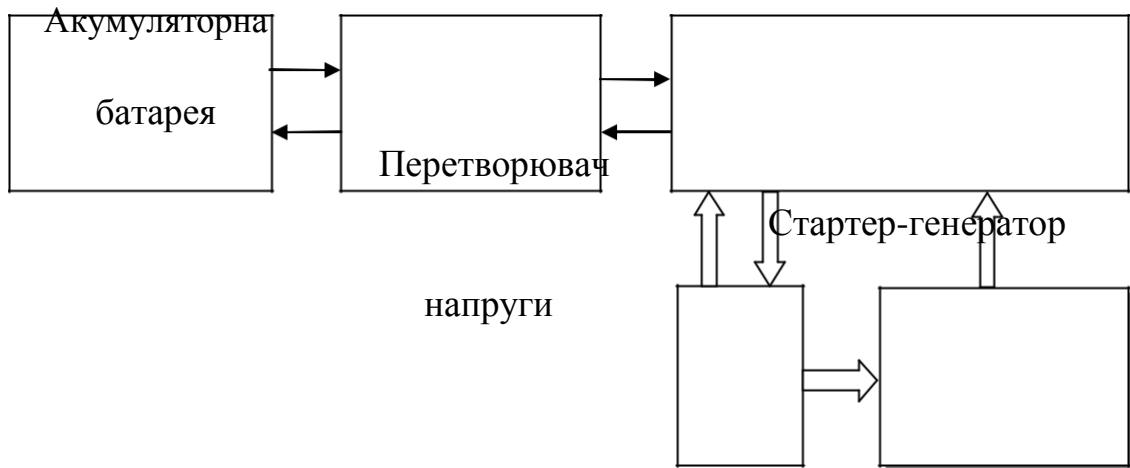


Рисунок 1.2 – Структурна схема комбінованої енергетичної установки зі стартер-генератором потужністю від 2 до 4 кВт

Комбінована енергетична установка за другою структурною схемою (рис. 1.3) передбачає використання тягового електродвигуна потужністю до 25 кВт, який виробляє механічну енергію паралельно з ДВЗ. Таким чином формується еквівалентна потужність, що являє собою суму потужностей ДВЗ та електродвигуна [58, 59].

Ця схема проявляє максимальну ефективність на старті та під час інтенсивного розгону автомобіля, коли крутний момент електродвигуна досягає свого піку. На подібному принципі побудований автомобіль Honda Civic з електродвигуном потужністю до 15 кВт, що дозволяє економити до 25 % палива та скорочувати викиди шкідливих речовин до 80 % порівняно з традиційними аналогами.

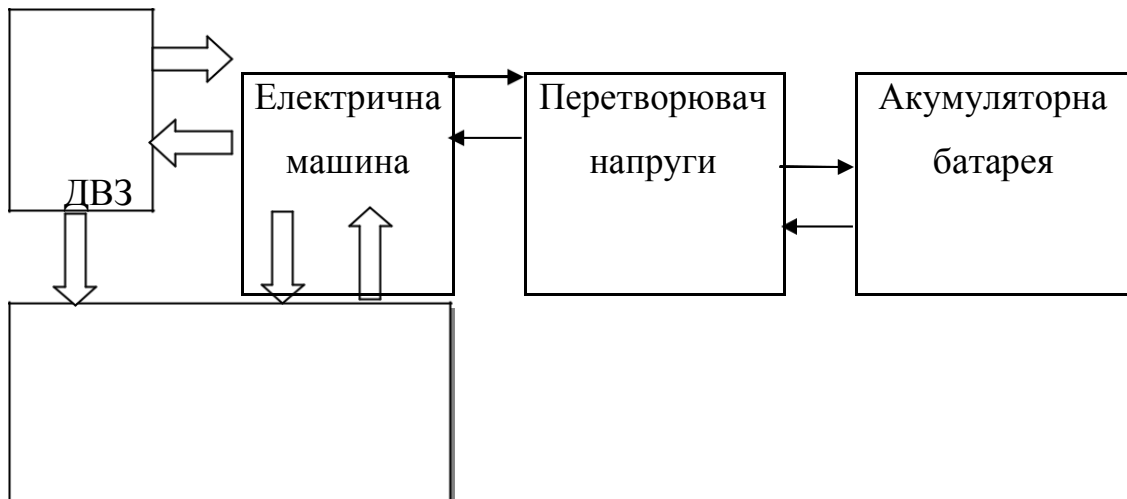


Рисунок 1.3 – Структурна схема комбінованої енергетичної установки з електричною машиною потужністю до 25 кВт

Третій принцип побудови автомобілів з комбінованою енергетичною установкою (рис. 1.3) передбачає застосування електродвигунів потужністю від 30 кВт. Це дозволяє транспортним засобам працювати в різних режимах: виключно на енергії ДВЗ, на електротязі або в комбінованому режимі, коли одночасно використовується енергія ДВЗ та електродвигуна. Такий підхід не лише підвищує динамічні характеристики автомобіля, а й покращує його надійність [58].

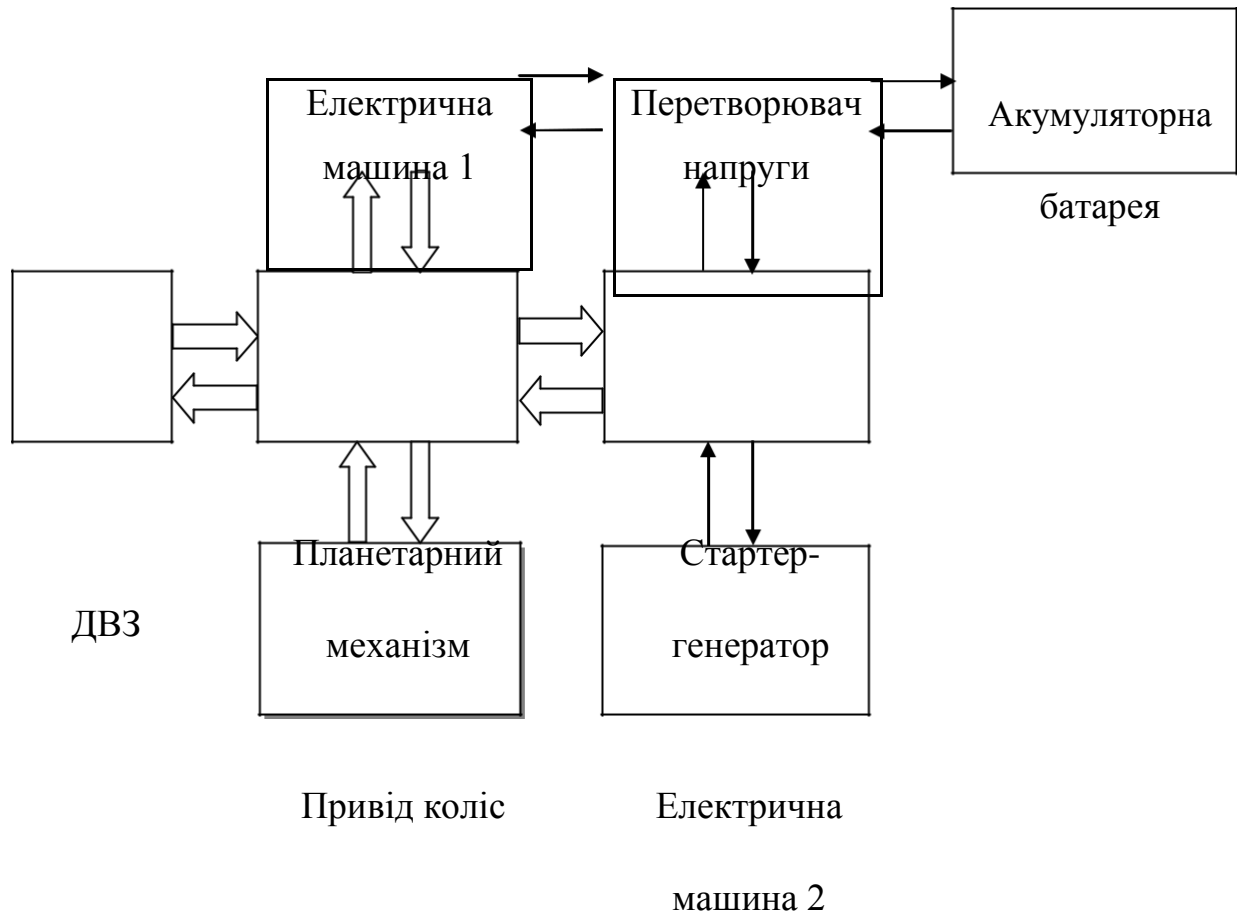


Рисунок 1.4 – Структурна схема комбінованої енергетичної установки з двома тяговими електричними машинами

У цьому випадку перерозподіл механічної енергії до ведучих коліс автомобіля здійснюється або механічно за допомогою планетарного механізму, або електрично. Для узгодження роботи в усіх режимах використовується перетворювач напруги та керуючий комп'ютер. Автомобіль Toyota Prius II, створений за цим принципом, скорочує шкідливі викиди в атмосферу до 90 % та забезпечує значну економію палива порівняно з аналогічними моделями з ДВЗ [58]. Завдяки цим перевагам Toyota Prius II знайшов застосування як патрульний автомобіль у Національній поліції України.

Четверта схема комбінованої енергетичної установки передбачає повну відсутність механічного зв'язку між двигуном внутрішнього згоряння та ведучими колесами. У цій конфігурації (рис. 1.5) механічна енергія, вироблена ДВЗ, перетворюється генератором у електричну, яка надходить до тягового електродвигуна коліс і одночасно використовується для підзарядки акумуляторної батареї [58, 59].

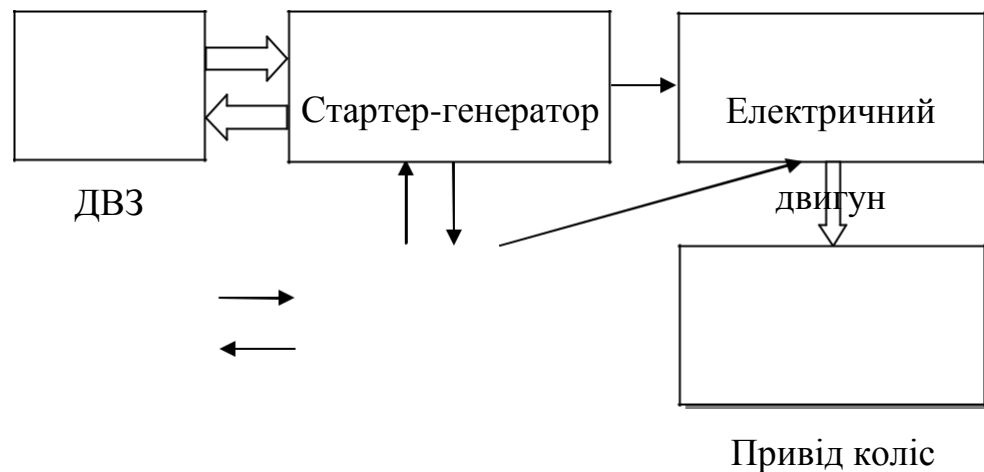


Рисунок 1.5 – Структурна схема комбінованої енергетичної установки без кінематичного зв'язку ДВЗ з ведучими колесами

За цією схемою побудовані великовантажні кар'єрні самоскиди, наприклад БелАЗ, у яких потужний дизель-генератор забезпечує подачу електроенергії безпосередньо до мотор-колес. Перевагами такого підходу є: відсутність традиційної механічної трансмісії; зниження питомої витрати палива та рівня токсичності відпрацьованих газів завдяки стабільній роботі ДВЗ за потужністю та частотою обертання; а також можливість електронного керування кожним колесом окремо. Серед недоліків цієї схеми слід відзначити: зменшення загального ККД через подвійне перетворення енергії (з механічної енергії ДВЗ у електричну генератора та назад у механічну через електродвигуни); збільшення маси, що не підресорена, через інтегровані електродвигуни в колесах, що негативно впливає на керуваність автомобіля [58, 59].

Аналіз існуючих конструктивних схем комбінованих енергетичних установок дозволяє зробити наступні висновки:

Будь-який автомобіль з КЕУ демонструє вищу енергоефективність, економічність і екологічність порівняно з аналогічним транспортним засобом, оснащеним традиційною механічною установкою.

Недоліком першої схеми є малопотужний електродвигун (2–4 кВт), який не використовується для додаткової тяги разом із ДВЗ, що обмежує надійність установки.

У другій схемі електродвигуни великої потужності (до 25 кВт) не використовуються для автономного руху автомобіля, що обмежує економічні та екологічні показники, особливо в умовах міського руху.

Третя схема вважається однією з найперспективніших, оскільки забезпечує високі показники енергетичної економічності та екологічності, а також поліпшену потужність і динаміку розгону у порівнянні з автомобілями з традиційними установками.

Четверта схема також є перспективною, завдяки гнучкому електронному керуванню і оптимальному розподілу енергетичних потоків, забезпечуючи високі економічні та екологічні характеристики [58, 59].

У наявній літературі відсутні комплексні узагальнення щодо створення автомобілів із комбінованими енергетичними установками. Це обумовлює потребу подальших досліджень у галузі кінематики та динаміки таких транспортних засобів.

### **1.5 Вплив використання комбінованої енергетичної установки на енергетичну ефективність та динамічні властивості автомобілів**

Поява нових альтернативних енергоустановок — таких як електродвигуни, водневі ДВЗ, гібридні системи та інші джерела енергії (акумулятори, маховики) — обумовила необхідність розширення традиційного поняття «паливна економічність». До нього слід включати витрати не лише теплової енергії палива, а й електричної та механічної енергії.

Найбільший інтерес викликає оцінка додаткових енергетичних витрат при використанні комбінованого електромеханічного приводу ведучих коліс

автомобіля. При цьому слід враховувати також втрати, пов'язані з деформацією елементів трансмісії та ходової частини автомобіля.

Автомобілі з комбінованою енергетичною установкою мають ряд істотних переваг порівняно з машинами з традиційним механічним приводом. Серед них — додатковий запас тягової сили, що дозволяє забезпечити необхідне прискорення при русі у колоні. Це сприяє підвищенню динамічних властивостей окремих автомобілів та колони в цілому.

Крім того, застосування штучного інтелекту для керування рухом безпілотних автомобілів з комбінованою енергетичною установкою відкриває можливості для оптимізації руху автомобільної колони. Використання таких транспортних засобів дозволяє:

- підтримувати стабільну довжину колони незалежно від швидкості руху;
- підвищувати маневреність і керованість колони при виконанні різних маневрів;

- забезпечувати безпечний розгін колони послідовно від автомобіля-лідера до замикаючого та безпечне гальмування у зворотному порядку.

Таким чином, підвищення динамічних характеристик автомобілів у складі колони може бути досягнуте завдяки використанню комбінованої енергетичної установки з електромеханічним приводом ведучих коліс. Одночасно постає задача вдосконалення системи керування рухом автомобільної колони для забезпечення її максимальної ефективності та безпеки.

## **1.6 Постановка проблеми та завдання дослідження**

Проблема підвищення енергетичної ефективності та динамічних властивостей сучасних автомобілів тісно пов'язана зі створенням нових енергозберігаючих силових установок. До таких установок належать комбіновані електромеханічні приводи, які забезпечують передачу потужності на ведучі колеса як від двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), так і від електродвигунів.

Використання комбінованої енергетичної установки дозволяє зменшити додаткові енергетичні втрати двигуна за рахунок зниження амплітуди коливань

тягової сили на колесах. Крім того, електромеханічний привід дає можливість практично подвоїти потужність на колесах, що особливо важливо для руху автомобілів у складних дорожніх умовах, включаючи бездоріжжя. Наявність електроприводу ведучих коліс також покращує маневреність автомобілів завдяки спрощенню системи керування поворотом, забезпечує можливість руху «крабом» та відкриває перспективи для використання безпілотних транспортних засобів.

Наразі відсутній системний підхід до оцінювання енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів із комбінованою енергетичною установкою, що ускладнює визначення їх оптимальних характеристик. Це підкреслює актуальність наукової проблеми та необхідність формування наукових основ створення таких транспортних засобів.

Для вирішення поставленої проблеми слід реалізувати наступні завдання:

Розробити та запропонувати схеми комбінованої енергетичної установки для автомобіля.

Узагальнити наукові основи формування енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів.

Узагальнити наукові основи формування енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів із комбінованою енергетичною установкою.

Виконати теоретичні дослідження керування рухом автомобіля із комбінованою енергетичною установкою в несталому режимі.

Провести експериментальні дослідження щодо оцінки енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів.

### **Висновки за розділом**

Аналіз літературних джерел показав, що сучасні автомобілі, обладнані переважно двигунами внутрішнього згоряння з механічним приводом ведучих коліс, мають низку недоліків: обмежений запас тягової сили, високу нерівномірність крутного моменту, що спричиняє непродуктивні енергетичні витрати, а також низькі показники динамічності, маневреності та енергетичної

ефективності. У цілому існуючий автопарк не відповідає сучасним вимогам щодо динамічних характеристик та енергетичної ефективності і потребує модернізації.

На основі аналізу відомих методів оцінювання динаміки розгону встановлено, що для підвищення динамічних властивостей автомобіля доцільно: знижувати енергетичні витрати двигуна під час розгону, визначати та реалізовувати оптимальні динамічні характеристики, а також застосовувати безступінчасті автоматичні трансмісії.

Дослідження методів оцінювання енергетичної ефективності показало, що при однакових значеннях зовнішніх сил опору автомобілі з електричним приводом ведучих коліс витрачають менше енергії, ніж транспортні засоби з ДВЗ. Це пояснюється нерівномірністю крутного моменту ДВЗ, що призводить до додаткових витрат енергії, які раніше не враховувалися.

Встановлено, що зменшення додаткових енергетичних витрат двигуна можливе за рахунок зниження нерівномірності крутного моменту в трансмісії, що досягається застосуванням комбінованої енергетичної установки з електромеханічним приводом ведучих коліс.

Аналіз існуючих схем комбінованих енергетичних установок показав, що:

будь-який тип комбінованої установки забезпечує вищу енергетичну ефективність, економічність та екологічність порівняно з традиційними механічними установками;

недоліком першого принципу побудови є те, що електродвигуни малої потужності (2–4 кВт) не використовуються для додаткової тяги в комбінованому режимі, що знижує надійність установки;

недоліком другого принципу є відсутність використання потужних електродвигунів (до 25 кВт) для автономного руху, що могло б підвищити економічні та екологічні показники, особливо в міських умовах;

третьій принцип побудови є найбільш перспективним, оскільки поєднує високу енергетичну економічність та екологічність із кращою потужністю і динамікою розгону, порівняно з традиційними автомобілями;

четвертий принцип також перспективний завдяки можливості ефективного електронного керування та оптимального розподілу енергетичних потоків при високих економічних і екологічних характеристиках.

Відомості про комплексні дослідження створення автомобілів із комбінованою енергетичною установкою у літературі відсутні, що визначає необхідність подальших досліджень.

Використання комбінованої енергетичної установки з електромеханічним приводом ведучих коліс дозволяє:

- зменшити додаткові витрати енергії під час руху;

- спростити керування безпілотними транспортними засобами в колоні;

- забезпечити рух «крабом»;

- реалізувати тихий («безшумний») рух автомобіля.

## РОЗДІЛ 2

### СИНТЕЗ СХЕМ КОМБІНОВАНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ АВТОМОБІЛІВ

Аналіз існуючих концептуальних схем автомобілів з комбінованою енергетичною установкою, проведений у підрозділі 1.4, показав, що найбільш перспективними є схеми, представлені на рис. 1.4 та 1.5. Виходячи з цього, запропоновано ряд варіантів схем, які можуть бути застосовані при проектуванні та створенні автомобілів з комбінованою енергетичною установкою.

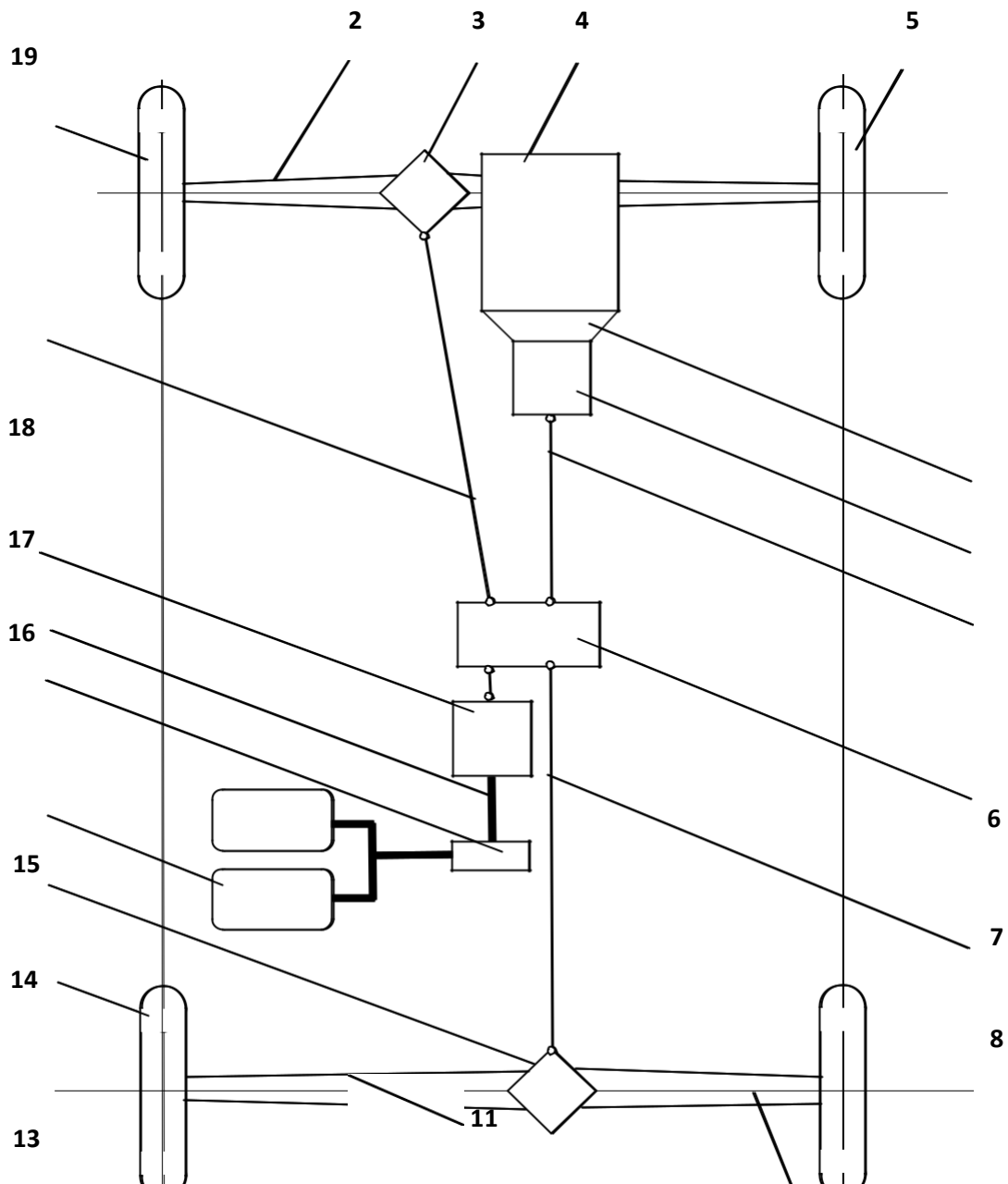
#### **2.1 Схема комбінованої енергетичної установки автомобіля без тягових електродвигунів на колесах**

В якості прикладу реалізації комбінованої енергетичної установки було обрано повнопривідний автомобіль КрАЗ-5233 ВЕ. На рис. 2.1 представлена схема запропонованого варіанту автомобіля з комбінованою енергетичною установкою, що не передбачає наявності тягових електродвигунів на колесах.

Схема демонструє двовісний повнопривідний транспортний засіб, який відрізняється від базової моделі встановленням додаткових компонентів: оборотної електричної машини, що може працювати як у режимі генератора, так і як електродвигун; інвертора; акумуляторних батарей.

Ці елементи дозволяють використовувати накопичену в акумуляторах енергію для приводу одного або обох ведучих мостів, проте потребують певної модифікації системи управління розподільчою коробкою. Величина доступної додаткової енергії визначається ємністю та кількістю встановлених акумуляторних батарей.

До основних переваг такої схеми відноситься можливість модернізації наявних автомобілів без істотних змін їх конструкції, шляхом інтеграції лише додаткових елементів, що забезпечують підвищення енергетичної ефективності транспортного засобу.



1 – ліве переднє колесо; 2 – передній міст; 3 – редуктор переднього мосту; 4 – ДВЗ; 5 – праве переднє колесо; 6 – зчеплення; 7 – коробка передач; 8, 10, 19 – карданна передача; 9 – розподільча коробка; 11 – праве заднє колесо; 12 – задній міст; 13 – ліве заднє колесо; 14 – редуктор заднього мосту; 15 – АКБ; 16 – інвертор; 17 – електричний зв'язок; 18 – оборотна електрична машина

Рисунок 2.1 – Схема комбінованої енергетичної установки автомобіля без тягових електродвигунів на колесах

## **2.2 Схема комбінованої енергетичної установки автомобіля з тяговими електродвигунами на задні колеса та комбінованим приводом на передні колеса**

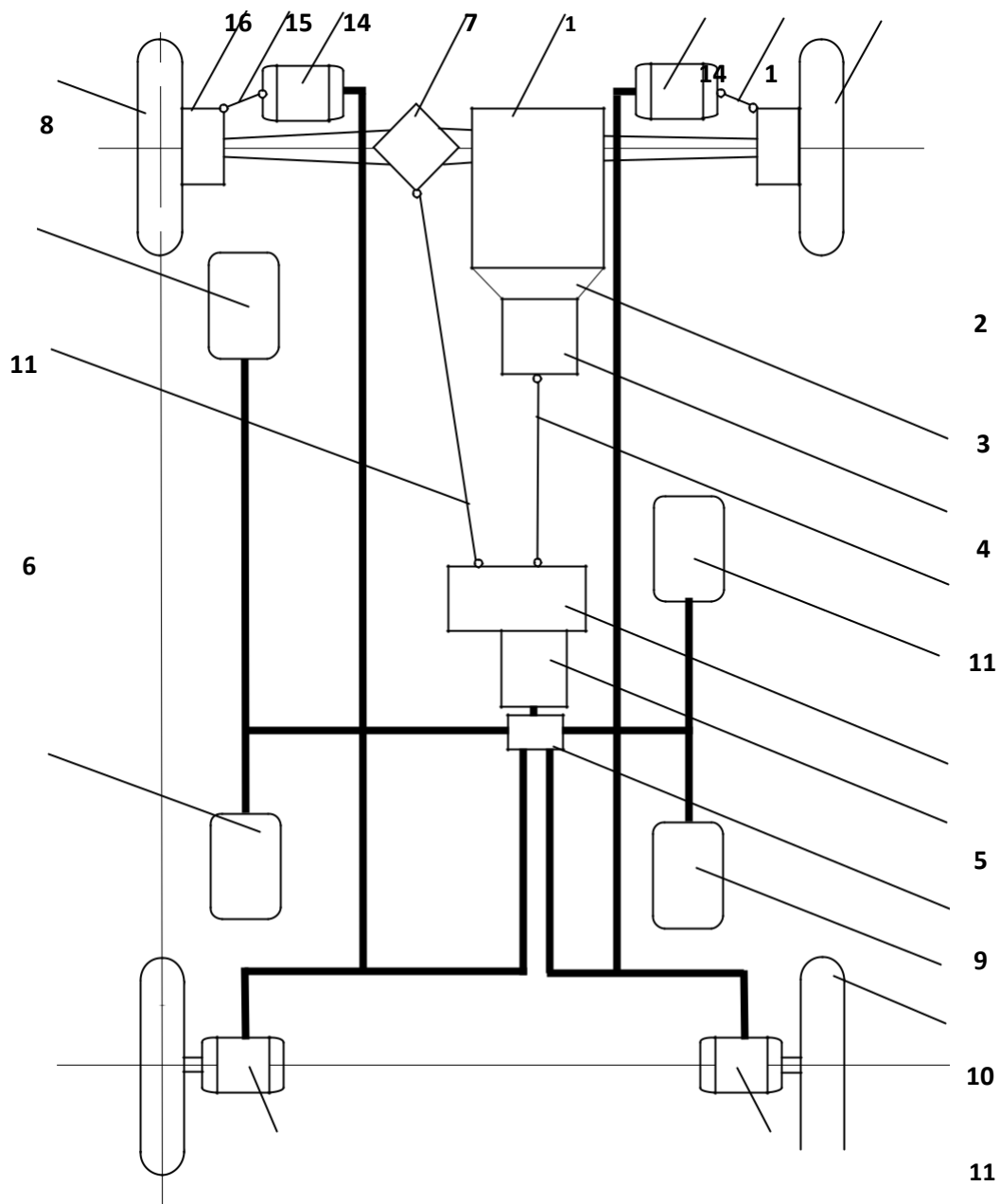
Для усунення обмежень схеми, представленої на рис. 2.1, виникла необхідність її вдосконалення. Основна мета вдосконаленої комбінованої енергетичної установки – підвищення динамічних характеристик автомобіля (швидкості наростання крутного моменту та оперативної зміни тягової сили на колесах за величиною та напрямком) і зниження енергетичних втрат під час розгону та руху.

Ця задача вирішується за рахунок того, що у порівнянні зі схемою на рис. 2.1, трансмісія позбавлена заднього мосту та кінематичного приводу (карданної передачі) до нього. Натомість встановлені тягові електродвигуни (оборотні електричні машини) для приводу всіх коліс: коліс задньої осі та коліс передньої осі з комбінованим приводом через колесний редуктор із планетарним механізмом. На рис. 2.2 наведена відповідна схема комбінованої енергетичної установки.

Технічний ефект від впровадження запропонованої схеми полягає у:  
підвищенні ККД трансмісії;

збільшенні інтенсивності наростання крутного моменту та оперативності зміни тягової сили на колесах за величиною та напрямком, що забезпечує швидку зміну лінійної швидкості руху та виконання складних маневрів (рух «крабом», розворот на місці тощо);

забезпеченні скритного (безшумного) режиму руху завдяки використанню електричного приводу коліс від акумуляторної батареї при відключеному ДВЗ.



1 – тепловий двигун (ДВЗ); 2 – зчеплення; 3 – коробка передач; 4, 6, 15 – карданна передача; 5 – розподільча передача; 7 – редуктор приводу переднього мосту; 8 – передні колеса; 9 – генератор; 10 – блок керування; 11 – акумуляторні батареї; 12 – задні оборотні електричні машини; 13 – задні колеса; 14 – передні оборотні електричні машини; 16 – колісні редуктори з планетарним механізмом

Рисунок 2.2 – Схема комбінованої енергетичної установки автомобіля з тяговими електродвигунами на задні колеса та комбінованим приводом на передні колеса

Запропонована комбінована енергетична установка автомобіля, представлена на рис. 2.2, включає:

тепловий двигун (ТД) 1, наприклад ДВЗ, зі зчепленням 2 та коробкою передач 3;

карданну передачу 4, що передає крутний момент до розподільчої коробки 5;

розподільчу коробку 5, з якої потужність розділяється через карданну передачу 6 до редуктора переднього мосту 7 та коліс 8;

генератор 9, що через електричні сигнали керується блоком управління 10; акумуляторні батареї (АКБ) 11;

оборотні електричні машини (ОЕМ) задніх коліс 12 та передніх 14, які через карданну передачу 15 і колісні редуктори з планетарним механізмом 16 передають крутний момент на передні колеса 8.

Ця установка забезпечує кілька режимів роботи:

Привід тільки на передній міст:

від ТД;

від АКБ при непрацюючому ТД (безшумний режим);

спільно від ТД та АКБ;

при працюючому ТД з приводом тільки на генератор за рахунок заряду АКБ.

Привід тільки на задній міст:

від АКБ при непрацюючому ТД;

при працюючому ТД з зарядкою АКБ через генератор.

Повний (комбінований) привід обох мостів:

передній міст – від ТД, задній міст – від АКБ;

обидва мости – від АКБ при непрацюючому ТД (безшумний режим);

передній міст – спільно від ТД і АКБ, задній міст – від АКБ.

Рух із накопиченням енергії в АКБ: передні колеса приводяться ОЕМ від АКБ, ТД працює лише на генератор для підзарядки АКБ, крутний момент на редуктори переднього мосту не передається.

У режимі 1 крутний момент створюється ТД і передається на передні колеса через зчеплення, коробку передач, карданну передачу та розподільчу коробку. При цьому АКБ заряджаються від генератора та оборотних електричних машин.

У режимі 2 (безшумний) рух забезпечується передніми ОЕМ через карданну передачу та колісні редуктори з планетарним механізмом.

Режим 3 поєднує роботу ТД і ОЕМ для обох мостів, що дозволяє підвищити динаміку розгону.

Режим 4 забезпечує накопичення електроенергії в АКБ за рахунок роботи ТД на генератор без передачі крутного моменту на редуктори.

Переваги запропонованої схеми:

зменшення енергетичних втрат під час розгону;

підвищення ККД трансмісії;

підвищення динамічних характеристик (швидкості наростання крутного моменту та оперативної зміни тягової сили);

можливість керування кожним колесом окремо (реалізація руху «крабом», комбінованого повороту та розвороту на місці);

відсутність циркуляції потужності завдяки колісним редукторам з планетарним механізмом;

забезпечення безшумного режиму руху від АКБ;

зниження висоти платформи та підвищення стійкості, що особливо важливо для військової техніки.

Недоліки:

складність конструкції приводу передніх коліс;

необхідність використання оборотних електричних машин різної потужності для запобігання циркуляції потужності між мостами.

### **2.3. Схема комбінованої енергетичної установки автомобіля з тяговими електродвигунами на усі колеса**

Аналіз схеми, наведеної на рис. 2.2, показав, що наявність механічного приводу на передні колеса обмежує інтенсивність наростання крутного моменту та тягової сили, що негативно впливає на динамічні характеристики автомобіля.

Тому була поставлена задача розробки вдосконаленої комбінованої (електромеханічної) енергетичної установки, яка забезпечує:

підвищення динаміки руху;

швидку та незалежну зміну тягової сили на колесах за величиною та напрямком;

підвищення живучості та надійності для військової техніки.

Для реалізації цих завдань запропонована КЕУ включає:

тепловий двигун (ТД) – ДВЗ, що працює у режимі максимального індикаторного ККД;

оборотну електричну машину (ОЕМ) з безпосереднім кінематичним зв'язком з ТД;

основний блок керування (ОБУ) та блок керування тепловим двигуном (БУТД);

розгалужену електричну мережу, що включає силову лінію та лінію керування;

високовольтну батарею (ВБ), складену з послідовно з'єднаних літій-іонних акумуляторів;

модулі приводу ведучих коліс з електричним приводом;

блок перетворення (БП) – інвертор, що забезпечує накопичення та перетворення електричної енергії.

Силова лінія має резервний контур для підвищення життєздатності системи, а лінія керування забезпечує зв'язок ОБУ та БУТД із блоком перетворення та ВБ. ОЕМ через ОБУ підключена до модулів приводу всіх ведучих коліс, що дозволяє рівномірно розподіляти тягову силу.

Принцип роботи установки

Перед початком руху ОБУ визначає рівень заряду ВБ.

Якщо заряд достатній, рух автомобіля здійснюється від енергії ВБ через електричні приводи коліс.

Якщо заряд ВБ недостатній, привід коліс здійснюється через ОЕМ, яка кінематично зв'язана з ТД.

Під час руху ТД може працювати на генератор для підзарядки ВБ, забезпечуючи безперервну роботу електричної системи.

Основні переваги запропонованої КЕУ:

забезпечення швидкої зміни тягової сили на колесах та підвищення динаміки розгону;

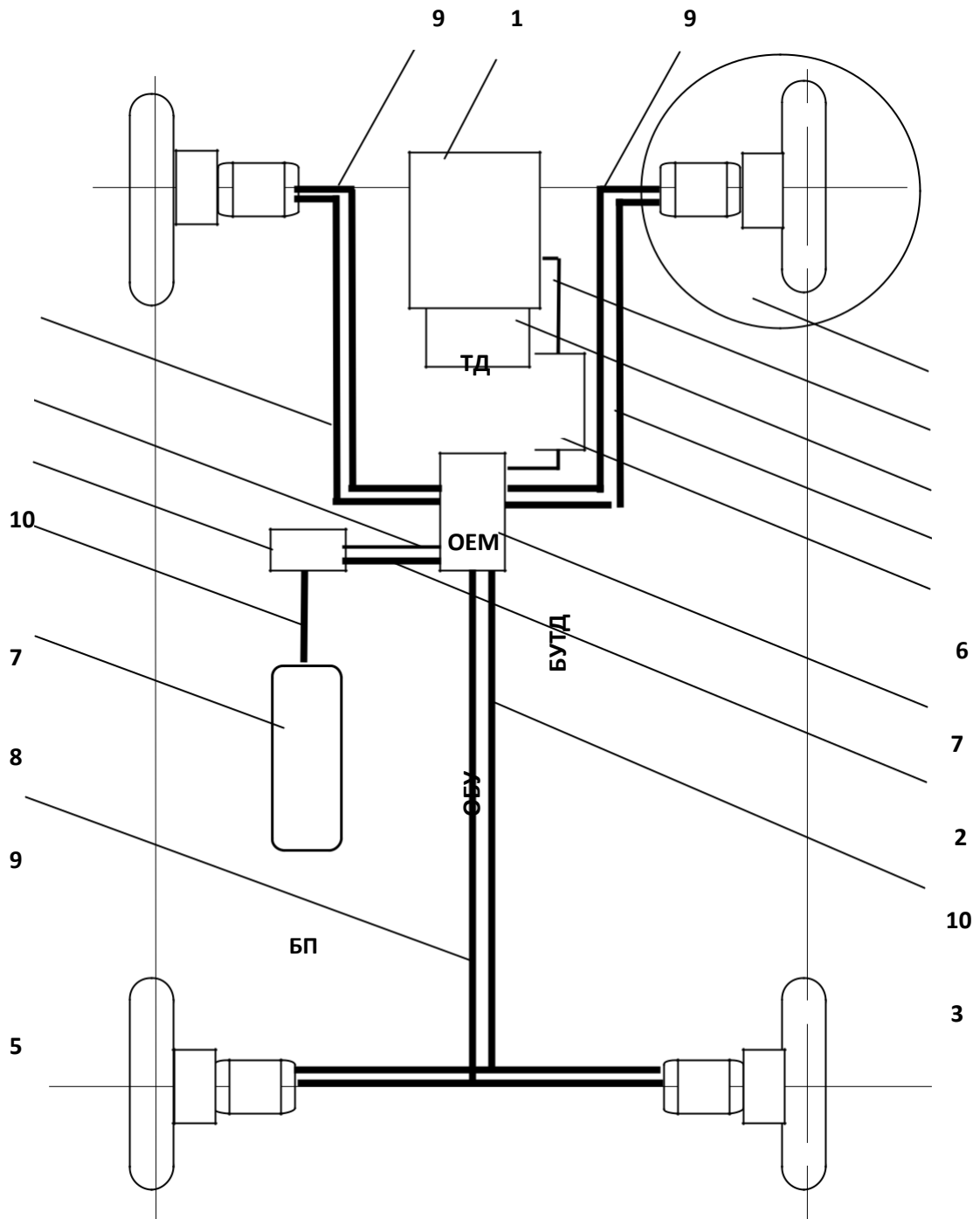
можливість руху від ВБ без роботи ТД (безшумний режим);

підвищена живучість та надійність системи завдяки резервному контуру силової лінії;

рівномірний розподіл крутного моменту на всі колеса, що забезпечує високу маневреність та стабільність автомобіля;

можливість автономного руху при непрацюючому ТД за рахунок накопиченої електроенергії.

Запропонована схема КЕУ з тяговими електродвигунами на всі колеса забезпечує максимальну ефективність енергетичного використання, покращення динамічних властивостей та підвищення керованості автомобіля.



1 – тепловий двигун (ДВЗ); 2 – оборотна електрична машина (ОЕМ); 3 – блок керування тепловим двигуном (БУТД); 4 – основний блок керування (ОБУ); 5 – високовольтна батарея (ВБ); 6 – модуль приводу ведучих коліс; 7 – лінія керування; 8 – блок перетворення (БП); 9 – силова лінія; 10 – резервний контур

Рисунок 2.3 – Схема комбінованої енергетичної установка автомобіля з тяговими електродвигунами на усі колеса

При недостатньому рівні заряду високовольтної батареї (ВБ – 5) основний блок керування (ОБУ – 4) виявляє цю ситуацію та формує відповідний сигнал для блоку керування тепловим двигуном (БУТД – 3). БУТД автоматично запускає тепловий двигун (ТД – 1), який приводить в дію оборотну електричну машину (ОЕМ – 2). В результаті модулі приводу ведучих коліс (6) отримують живлення через силову лінію електричної мережі (9), і автомобіль починає рух.

Маневрування автомобіля забезпечується ОБУ (4), яке в залежності від типу маневру подає незалежні електричні сигнали на кожен модуль приводу ведучих коліс (6), регулюючи величину та напрямок крутного моменту. Одночасно ВБ (5) підживлюється через блок перетворення (БП – 8) та ОБУ від ОЕМ (2). При цьому ТД працює у режимі максимального індикаторного ККД, що забезпечує стабільність роботи ОЕМ та високу якість електроенергії, що передається на модулі приводу коліс [52].

Таким чином, автомобіль з комбінованою енергетичною установкою та електричним приводом на всі колеса може рухатися як від ТД (1), так і від накопиченої електричної енергії ВБ (5). Вибір режиму руху визначається конкретними умовами експлуатації та завданнями транспортної роботи.

У штатній експлуатації рекомендується починати рух від батареї (ВБ – 5), оскільки при малих швидкостях (розгін) енергетичні витрати на електричний привід значно менші, ніж при використанні ТД (1). Навпаки, при русі у колоні з вищою швидкістю ефективніше використовувати ТД, що одночасно дозволяє накопичувати електричну енергію у ВБ для подальшого застосування при потребі створення додаткової тягової сили.

Наявність резервного контуру силової лінії (10) підвищує надійність системи, оскільки у разі пошкодження основної гілки живлення модулів приводу коліс (6) електроживлення може здійснюватися через резервний контур. Для виконання спеціальних завдань, таких як прихований рух у військових умовах, автомобіль може пересуватися виключно від ВБ (5) при непрацюючому ТД, забезпечуючи «безшумний режим».

Таким чином, запропонована схема КЕУ (рис. 2.3) дозволяє досягти поставленої мети – підвищення динаміки руху шляхом інтенсивного наростання

крутного моменту та швидкої, незалежної зміни тягової сили на кожному колесі за величиною та напрямком.

Серед основних переваг схеми слід виділити:

підвищену динаміку руху та інтенсивність наростання крутного моменту на колесах;

швидке та незалежне регулювання тягової сили на кожному колесі за величиною та напрямком;

підвищену енергетичну ефективність за рахунок відсутності механічних агрегатів (зчеплення, коробки передач, розподільної коробки, карданних передач, редукторів мостів);

можливість безшумного руху від електричного приводу;

гнучкість у виборі джерела енергії залежно від умов експлуатації.

Однак відсутність механічних компонентів вимагає створення високоефективної системи керування модулями приводу ведучих коліс для забезпечення стабільності та надійності роботи автомобіля.

### **Висновки за розділом**

Розроблені схеми комбінованої енергетичної установки (КЕУ) автомобілів відрізняються ступенем «гібридизації», тобто співвідношенням механічної та електричної частини приводу. Запропоновані варіанти включають:

КЕУ без тягових електродвигунів;

КЕУ з тяговими електродвигунами на задні колеса та комбінованим приводом на передні;

КЕУ з тяговими електродвигунами на всі колеса.

Аналіз показав такі особливості схем:

#### **1. КЕУ без тягових електродвигунів (рис. 2.1)**

Переваги: дозволяє модернізувати існуючі автомобілі без значних змін конструкції шляхом додавання нових компонентів;

Недоліки: можливість циркуляції потужності при сумісній роботі ТД та ОЕМ; відсутність незалежного керування колесами різних бортів, що знижує маневреність.

2. КЕУ з тяговими електродвигунами на задні колеса та комбінованим приводом на передні (рис. 2.2)

Переваги: зменшення втрат енергії при розгоні завдяки електричній частині приводу; підвищення ККД трансмісії; підвищена динаміка завдяки додатковому запасу енергії у АКБ; можливість незалежного керування колесами, що забезпечує рух «крабом», розвороти на місці та комбінований поворот; відсутність циркуляції потужності завдяки планетарному редуктору; забезпечення безшумного руху від АКБ; зменшення висоти вантажної платформи, що підвищує стійкість.

Недоліки: складність конструкції переднього приводу; необхідність використання ОЕМ різної потужності для передніх та задніх коліс для уникнення циркуляції потужності між мостами.

3. КЕУ з тяговими електродвигунами на всі колеса (рис. 2.3)

Переваги: відсутність механічних агрегатів (зчеплення, коробки передач, редуктори мостів) дозволяє підвищити динаміку та енергетичну ефективність; швидка та незалежна зміна тягової сили на кожному колесі; можливість підзарядки батарей при роботі ТД; високий ступінь керованості та маневреності.

Недоліки: потребує розробки ефективної системи керування модулями приводу ведучих коліс через відсутність механічних елементів.

Запропоновані схеми можуть застосовуватись як для модернізації існуючих автомобілів, так і при проєктуванні нових машин з КЕУ, забезпечуючи підвищення динаміки, енергоефективності та маневреності.

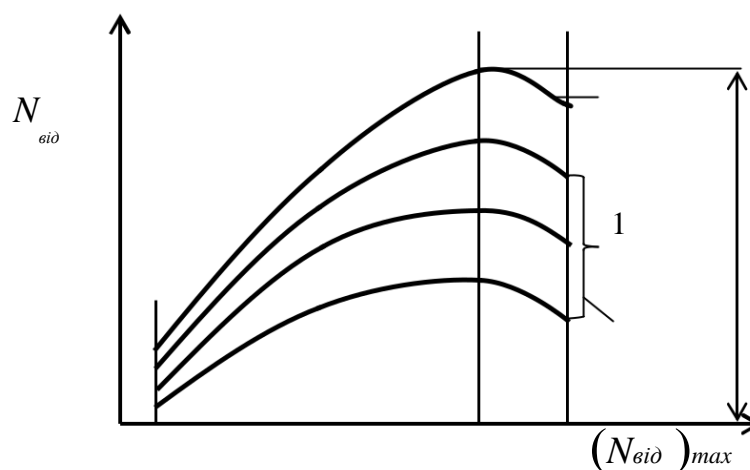
## РОЗДІЛ 3

# НАУКОВІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ Й ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АВТОМОБІЛІВ

### 3.1. Оцінка ефективної роботи двигуна внутрішнього згорання при розгоні автомобіля на різних передачах

Аналіз відомих методів оцінювання динаміки розгону автомобіля, представлений у підрозділі 1.2, показав необхідність комплексного підходу, що передбачає одночасне покращення динамічних властивостей транспортних засобів та зниження витрат енергії двигуна під час розгону.

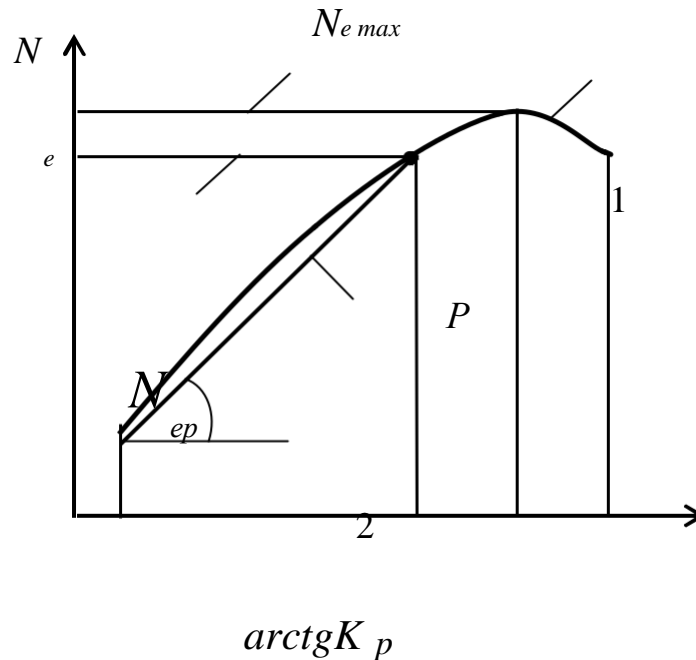
Розгін автомобілів з механічною трансмісією, який відбувається при несталих режимах роботи ДВЗ, супроводжується максимальними втратами енергії палива. Для визначення енергетичної ефективності машини викликає інтерес оцінка ефективної роботи, яку виконує ДВЗ при розгоні колінчастого валу від кутової швидкості  $\omega_{min}$  до  $\omega_{max}$ . Слід зазначити, що процес розгону двигуна не може здійснюватися виключно за зовнішньою швидкісною характеристикою, оскільки він відбувається при поступовому нарощуванні подачі палива до циліндрів.



1 – зовнішня швидкісна характеристика; 2 – часткові швидкісні характеристики

Рисунок 3. 1 – Залежність  $N_{від}(\lambda, K_N)$

При цьому двигун поступово переходить з однієї часткової швидкісної характеристики на іншу, поки при деякій кутовій швидкості  $\omega_p$  колінчастого валу не переходить на зовнішню швидкісну характеристику ДВЗ (рис. 3.2).



1 – робоча ділянка зовнішньої швидкісної характеристики; 2 – ділянка розгінної характеристики при наростанні подачі палива у циліндри двигуна

Рисунок 3. 2 – Розгінна характеристика ДВЗ

В табл. 3.1 наведено результати розрахунку ефективної роботи ДВЗ при розгоні на різних передачах вантажних автомобілів КрАЗ зі спорядженою масою  $m_{сп}$ .

Модель	$A_e$ , МДж								
	Передача								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
КрАЗ-5233BE	10,21	6,26	4,87	3,87	3,4	2,38	1,73	1,22	–
КрАЗ-5401B2	25,13	7,85	4,42	2,78	1,85	1,39	0,93	0,66	0,47
КрАЗ-5401H2	20,54	6,41	3,61	2,27	1,51	1,13	0,76	0,53	0,38
КрАЗ-6322	11,87	7,28	5,66	4,49	3,95	2,77	2,0	1,41	–

KpA3-6446	11,43	6,43	5,0	3,97	3,49	2,44	1,77	1,25	–
KpA3-Fiona	16,56	10,16	7,9	6,27	5,52	3,86	2,79	1,97	–
KpA3-Shrek	14,72	9,03	7,02	5,57	4,9	3,43	2,48	1,75	–
KpA3-63221	10,76	6,6	5,13	4,07	3,58	2,51	1,81	1,28	–
KpA3-6511C4	113,9	20,28	11,79	8,07	5,85	4,05	2,82	2,01	1,45
KpA3-6511H4	87,65	15,6	9,06	6,2	4,5	3,12	2,17	1,54	1,11

В табл. 3.2 наведено результати розрахунку ефективної роботи ДВЗ при розгоні на різних передачах вантажних автомобілів КрАЗ повною масою  $m_{нов}$ .

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку ефективної роботи двигуна при розгоні на різних передачах сімейства вантажних автомобілів КрАЗ з повною масою  $m_{нов}$

Модель автомобіля	$A_e$ , МДж								
	Передача								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
КрАЗ-5233BE	16,0	9,82	7,64	6,06	5,34	3,74	2,7	1,91	–
КрАЗ-5401B2	55,79	17,43	9,81	6,17	4,11	3,09	2,07	1,45	1,04
КрАЗ-5401H2	57,32	17,9	10,08	6,34	4,22	3,18	2,13	1,49	1,07
КрАЗ-6322	23,18	14,23	11,06	8,78	7,72	5,41	3,91	2,76	–
КрАЗ-6446	25,07	14,11	10,98	8,71	7,66	5,36	3,88	2,74	–
КрАЗ-Fiona	19,32	11,86	9,22	7,31	6,44	4,5	3,26	2,3	–
КрАЗ-Shrek	16,56	10,16	7,9	6,27	5,52	3,86	2,79	1,97	–
КрАЗ-63221	23,09	14,17	11,02	8,74	7,69	5,39	3,9	2,75	–
КрАЗ-6511C4	341,8	60,85	35,36	24,22	17,55	12,17	8,46	6,03	4,34
КрАЗ-6511H4	243,7	43,37	25,21	17,26	12,51	8,67	6,03	4,3	3,1

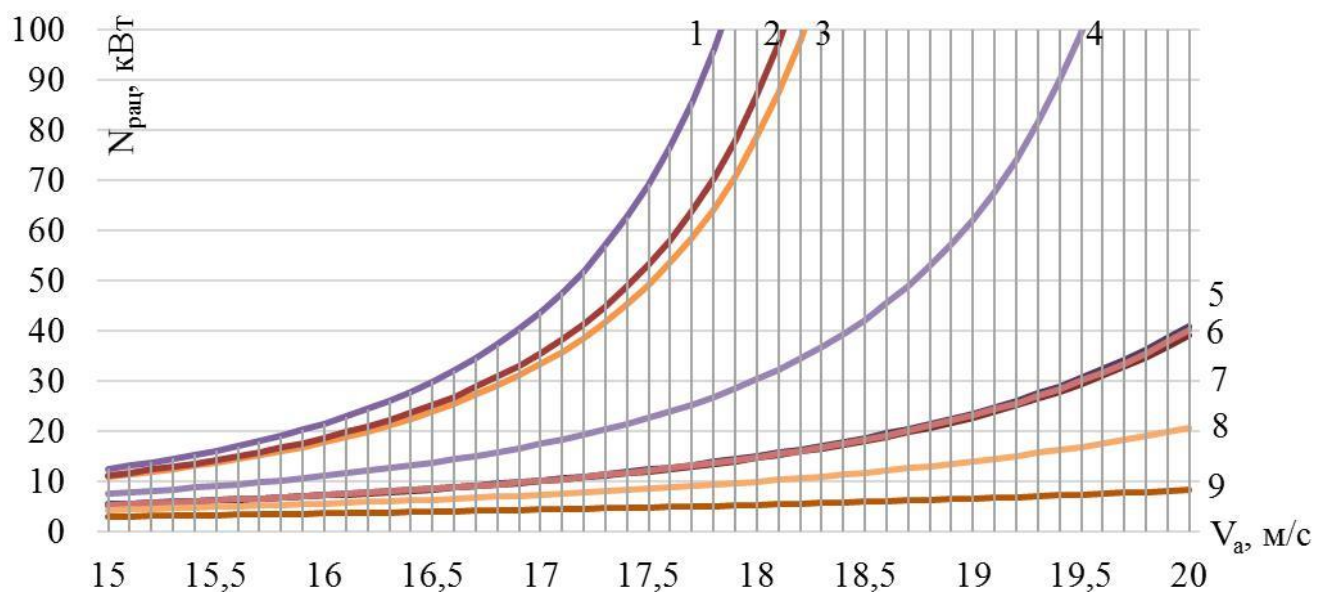
Наведені вирази становлять основу методу оцінювання впливу конструктивних параметрів автомобіля та параметрів, що характеризують опір руху, на ефективність роботи ДВЗ під час розгону. Аналіз результатів розрахунків, представлених у таблицях 3.1 та 3.2, показує, що при переході з нижчих передач на вищі ефективність роботи двигуна під час розгону від мінімальної до максимальної кутової швидкості колінчастого валу зменшується. Для сімейства вантажних автомобілів КрАЗ із повною масою ефективна робота двигуна при розгоні перевищує значення для автомобілів із спорядженою масою, причому максимальна різниця спостерігається на нижчій передачі та поступово зменшується при переході на вищі передачі.

### 3.2. Раціональна характеристика розгону автомобіля

Високі динамічні показники автомобіля доцільно забезпечувати при мінімальних витратах енергії (потужності) двигуна. Використання автомобілів із комбінованою енергетичною установкою дозволяє ефективно вирішити це завдання, зокрема шляхом керування розгоном через електричну частину приводу.

Раціональна характеристика розгону автомобіля визначається як така залежність між швидкістю та прискоренням, при якій досягається максимальне збільшення швидкості при найменших витратах енергії (потужності). Вона дозволяє оптимізувати процес розгону та забезпечує ефективне використання енергетичних ресурсів автомобіля.

На рис. 3.3 наведено графіки залежності  $(\Delta N_e)_{рац} = F(V_a)$  для ділянки  $V_a = 15 - 20$  м/с, що побудовані для різних вантажних автомобілів КрАЗ за умов, що:  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $\psi = 0,02$ ;  $\eta_{мп} = 0,8$ ;  $k = 0,55$ ;  $F = 5,39$ ;  $m_a = m_{повн}$ .



1 – КрАЗ-5233; 2 – КрАЗ-Shrek; 3 – КрАЗ-5401; 4 – КрАЗ-Fiona; 5 – КрАЗ-6446; 6 – КрАЗ-63221; 7 – КрАЗ-6322; 8 – КрАЗ-Hurricane; 9 – КрАЗ-7634

Рисунок 3.3 – Графіки залежності  $(\Delta N_e)_{рац} = F(V_a)$

Таким чином, аналітичні залежності формують основу удосконаленого методу визначення оптимальної «динамічної» швидкості руху автомобіля, що дає змогу побудувати його раціональну характеристику розгону. Для прикладу, що

розглядається (рис. 3.3) визначено, що раціональна характеристика розгону може бути реалізована у всьому діапазоні можливих швидкостей від нуля до  $V_a = 70$  м/с (252 км/год). В інтервалі швидкостей від 10 м/с до 30 м/с максимальні прискорення автомобіля обмежуються граничними зчіпними можливостями ведучих коліс з дорогою. В точці, що відповідає виконанню умови, відбувається розрив функції  $V_a(V_a)$ .

Таким чином, удосконалений метод визначення оптимальної «динамічної» швидкості руху автомобіля дозволяє, на відміну від відомих підходів, отримати раціональний взаємозв'язок між швидкістю руху та прискоренням машини — тобто раціональну характеристику розгону при мінімальних витратах потужності двигуна. Отримана характеристика дає змогу керувати процесом розгону шляхом регулювання прискорення залежно від швидкості руху. Реалізація цієї раціональної характеристики особливо ефективна для автомобілів з комбінованою енергетичною установкою.

### **3.3 Оцінка часу розгону автомобіля до заданої швидкості при різних законах керування прискоренням**

Час розгону автомобіля до заданої швидкості визначається законом зміни прискорення з часом. Особливий інтерес представляє оцінка закону зміни часу розгону для автомобіля з наявною ступінчастою трансмісією ДВЗ, при реалізації граничної сумарної тягової сили на ведучих колесах та при застосуванні запропонованого раціонального закону керування прискоренням. Час розгону до певної швидкості є важливим показником тягово-швидкісних характеристик транспортного засобу.

Існуючий метод керування розгоном базується на сумісному управлінні двигуном і коробкою передач. При цьому розгін двигуна супроводжується значними додатковими витратами енергії (потужності) через високий приведений до ведучих коліс момент інерції рухомих частин двигуна.

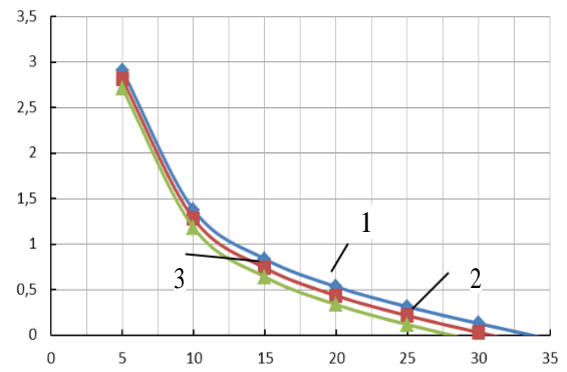
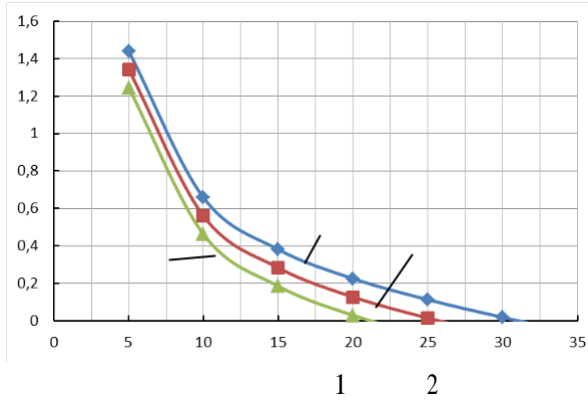
Оскільки питома потужність є показником енергонасиченості автомобіля, виникає питання вибору маси для розрахунку — спорядженої чи повної. Використання спорядженої маси забезпечує максимальне значення питомої потужності автомобіля. На основі відомих технічних характеристик вантажних

автомобілів КрАЗ (рядки 1–5 таблиці 3.3) отримано відповідні характеристики (рядки 6–9 таблиці 3.3).

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики вантажних автомобілів КрАЗ

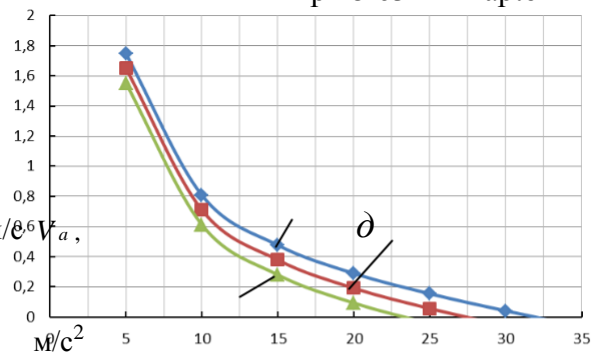
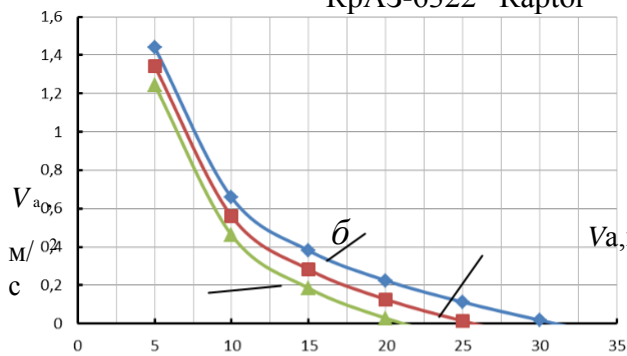
№ пор.		КрАЗ-6322-02	КрАЗ-6322 “Raptor”	КрАЗ-5233-ВЕ
1.	Колісна формула	6x6		4x4
2.	Повна маса автомобіля $m_{анов}$ , т	25,2	25,2	16,25
3.	Допустима маса вантажу, що перевозять (вантажопідйомність) $m_{ван}$ , т	12,3	4,2	5,8
4.	Маса спорядженого автомобіля $m_{асп}$ , т	12,9	21,0	10,45
5.	Максимальна потужність двигуна $N_{e\ max}$ , кВт (к. с.)	243 (330)		
6.	Максимальна питома потужність $N_{питmax}$ , кВт/ т (к. с. /т)	18,84 (25,58)	11,57 (15,71)	23,25 (31,58)
7.	Мінімальна питома потужність $N_{питmin}$ , кВт/ т (к. с. /т)	9,64 (13,09)	9,64 (13,09)	14,96 (20,3)
8.	Питома потужність автомобіля $N_{пит}$ , кВт/ т (к. с. /т)	9,66 (13,11)	9,64 (13,09)	15,29 (20,77)
9.	Коефіцієнт завантаженості $K_{зав}$	0,95	0,2	0,55

Результати розрахунку залежності  $V_a$  від  $V_a$  для різних значень  $\psi$  графічно подано на рис. 3.4.



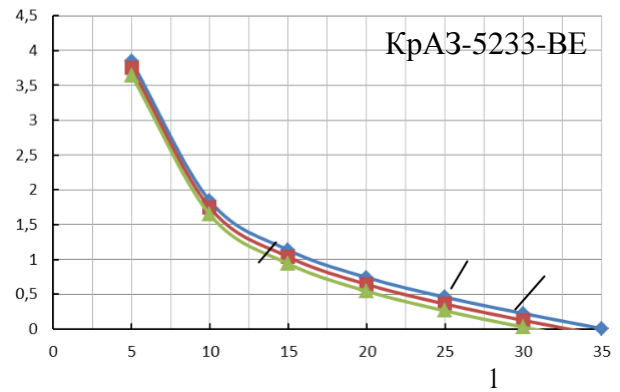
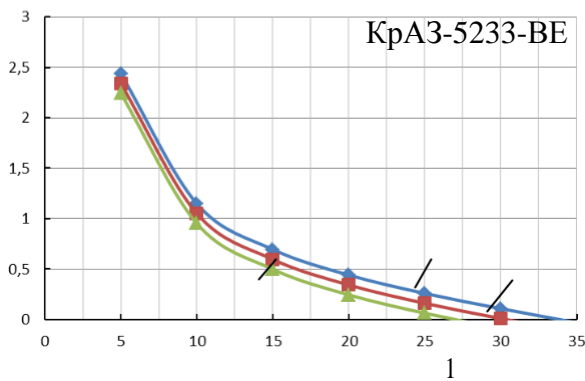
КрА3-6322 "Raptor"

КрА3-6322 "Raptor"



КрА3-5233-BE

КрА3-5233-BE



1 – для  $\psi = 0,01$ ; 2 –  $\psi = 0,02$ ; 3 – для  $\psi = 0,03$

*a, б, в* – при повному завантаженні; *г, д, е* – при спорядженій масі

Рисунок 3.4 – Залежність лінійного прискорення автомобілів від швидкості руху для різних значень сумарного коефіцієнта дорожнього опору

При русі автомобіля по горизонтальній ділянці дороги з твердим покриттям він здатний розвивати максимальне лінійне прискорення. У разі руху по бездоріжжю або пересіченій місцевості головною задачею є подолання

максимального дорожнього опору, при цьому створення значного прискорення не є обов'язковим.

Якщо оцінювати ефективність роботи автомобіля (ККД), то корисною слід вважати роботу, що витрачається на розгін машини. Втрати енергії двигуна на подолання сумарних сил дорожнього та аеродинамічного опору є невикористаними або “шкідливими” втратами.

Застосування методу парціальних прискорень дозволило встановити взаємозв'язок між питомою потужністю автомобіля та його парціальними прискореннями. Отримані аналітичні вирази дають змогу оцінювати тягово-швидкісні та потужнісні показники транспортного засобу на основі питомої потужності.

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку показників зниження витрат енергії автомобілів з безступінчастою коробкою передач при розгоні й  $\omega_e = \omega_{ном} = const$ .

Вид автомобіля та клас	$J_e$ , кгм <sup>2</sup>	$\omega_{max}$ , с <sup>-1</sup>	$\omega_{min}$ , с <sup>-1</sup>	$n$	$m_{анов}$ , кг	$V_{max}$ , км/год	$\Delta W_e$ , кДж	$W_{кин}$ , кДж	$\delta W_e$ , %
легковий 1-й клас	0,076	460	314	4	950	90	17,27	295,96	5,8
легковий 2-й клас	0,147	460	314	4	1290	115	33,40	656,16	5,1
легковий 3-й клас	0,274	460	314	3	1875	130	46,69	1218,75	3,8
вантажний 4-й клас	0,610	440	293	5	9525	90	163,89	2967,40	5,5
вантажний 5-й клас	2,450	356	209	5	14225	75	507,79	3077,52	16,5

Застосування безступінчастих трансмісій у поєднанні з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), обладнаними дворегімічним регулятором, що забезпечує обертання колінчастого валу у вузькому швидкісному діапазоні,

дозволяє підвищити динамічні властивості автомобілів та їх енергетичну ефективність.

Розгін автомобіля з безступінчастою коробкою передач при роботі ДВЗ із постійною кутовою швидкістю колінчастого валу, у порівнянні з традиційними трансмісіями, забезпечує зменшення витрат енергії (потужності) на розгін. Економія енергії становить:

для легкових автомобілів – 3,8–5,8%;

для вантажних автомобілів 4-го класу – 5,5%;

для вантажних автомобілів 5-го класу – 16,5%.

### **Висновки до розділу**

Аналіз існуючих автомобілів показав, що традиційні машини з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) і механічним приводом ведучих коліс характеризуються обмеженими динамічними властивостями та низькою енергетичною ефективністю. Основні проблеми включають: недостатній запас тягової сили, значну нерівномірність крутного моменту, що призводить до непродуктивних витрат енергії на рух, низьку динаміку розгону, маневреність і загальну ефективність транспортного засобу.

Застосування комбінованих енергетичних установок (КЕУ) дозволяє частково або повністю компенсувати ці недоліки. Електрична частина приводу забезпечує додаткову тягу, знижує нерівномірність крутного моменту на колесах, підвищує ККД трансмісії і дозволяє реалізовувати рух «крабом», розворот на місці та безшумний режим.

Розглянуто декілька схем КЕУ:

Без тягових електродвигунів на колесах (рис. 2.1) – дозволяє модернізувати існуючі машини без істотних змін конструкції, додавши генератор, акумуляторні батареї та блок керування. Переваги: простота модернізації. Недоліки: можливість циркуляції потужності і неможливість індивідуального керування колесами.

З тяговими електродвигунами на задні колеса та комбінованим приводом на передні (рис. 2.2) – підвищує ефективність розгону, дозволяє керувати кожним

колесом окремо, підвищує маневреність і забезпечує безшумний режим. Переваги: зменшення втрат енергії на розгоні, збільшення ККД трансмісії, додатковий запас енергії від АКБ, відсутність циркуляції потужності завдяки планетарному редуктору. Недоліки: складність конструкції переднього приводу, необхідність електромашин різної потужності.

З тяговими електродвигунами на всі колеса (рис. 2.3) – електромобіль з можливістю підзарядки високовольтних батарей від ДВЗ. Переваги: підвищена динаміка розгону та незалежна зміна тягової сили на кожному колесі, відсутність механічних агрегатів (зчеплення, коробки передач, карданної передачі, редукторів), що підвищує енергетичну ефективність. Недоліки: складна система керування модулями приводу.

Для оцінки динаміки розгону використано метод парціальних прискорень, який дозволяє визначити залежність питомої потужності автомобіля від його прискорення та оцінити ефективну роботу ДВЗ на різних передачах. Розрахунки для вантажних автомобілів КрАЗ показали, що з переходом з нижчих передач на вищі ефективна робота двигуна зменшується, причому максимальна різниця спостерігається на нижчих передачах.

Введено раціональну характеристику розгону автомобіля, що визначає оптимальне прискорення при кожній швидкості для мінімальних витрат потужності. Це дозволяє керувати процесом розгону через зміну прискорення залежно від швидкості. Використання електричної частини приводу на малих швидкостях забезпечує економію енергії:

для легкових автомобілів – 3,8–5,8%;

для вантажних автомобілів 4-го класу – 5,5%;

для вантажних автомобілів 5-го класу – 16,5%.

Також встановлено, що застосування безступінчастих трансмісій і ДВЗ з дворегімовим регулятором, який забезпечує обертання колінчастого валу у вузькому швидкісному діапазоні, підвищує динамічні властивості та енергетичну ефективність автомобілів.

У підсумку поєднання КЕУ, безступінчастих трансмісій та раціональної характеристики розгону дозволяє:

оптимізувати розгін при мінімальних витратах енергії;

підвищити ККД трансмісії;

забезпечити незалежне керування крутним моментом на кожному колесі;

реалізувати маневри «крабом», розворот на місці і безшумний рух;

накопичувати та використовувати додаткову електроенергію для підвищення динаміки.

Таким чином, запропоновані методи та схеми КЕУ дозволяють створювати автомобілі з високою динамікою, енергоефективністю та маневреністю, адаптовані до різних умов експлуатації.

## РОЗДІЛ 4

# НАУКОВІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМОБІЛІВ З КОМБІНОВАНОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ

### **4.1. Дослідження кінематики та динаміки запропонованої комбінованої енергетичної установки автомобіля**

У розділі 2 були розглянуті різні схеми комбінованої енергетичної установки (КЕУ):

без тягових електродвигунів (рис. 2.1);

з тяговими електродвигунами на задні колеса та комбінованим приводом на передні (рис. 2.2);

з тяговими електродвигунами на всі колеса (рис. 2.3).

Найбільш складною конструктивно є схема з тяговими електродвигунами на задні колеса та комбінованим приводом на передні. Тому для детального дослідження кінематики та динаміки автомобіля доцільно обрати саме цю схему.

#### **4.1.1. Дослідження кінематики комбінованої енергетичної установки автомобіля**

Пропонуються два конструктивних варіанти електромеханічного приводу ведучого колеса (рис. 4.1):

Варіант 1 (рис. 4.1а) – електричний двигун розташований асиметрично відносно планетарного механізму приводу колеса.

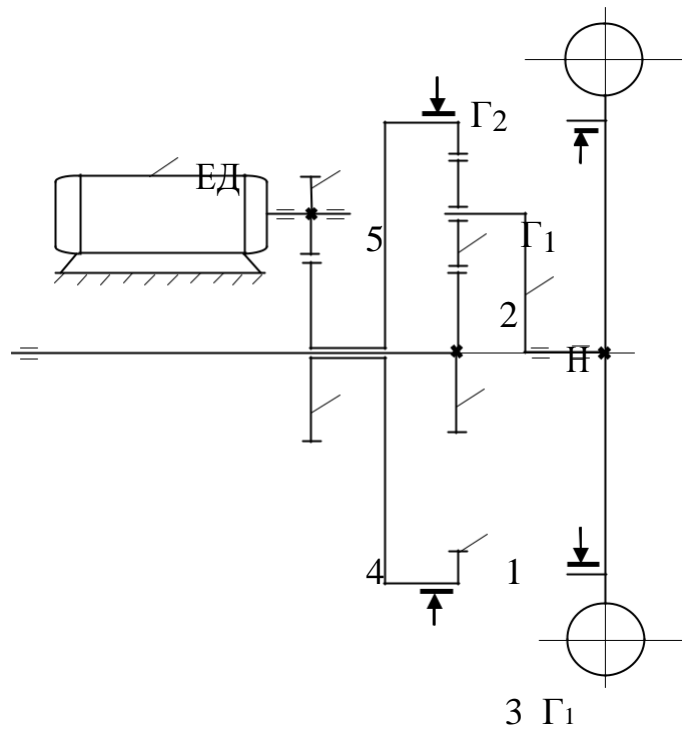
Варіант 2 (рис. 4.1б) – вал електричного двигуна виконано трубчастим, що дозволяє розмістити двигун співвісно вхідному валу планетарної передачі.

Для проведення кінематичного та динамічного аналізу КЕУ використовується схема планетарного механізму (рис. 4.2).

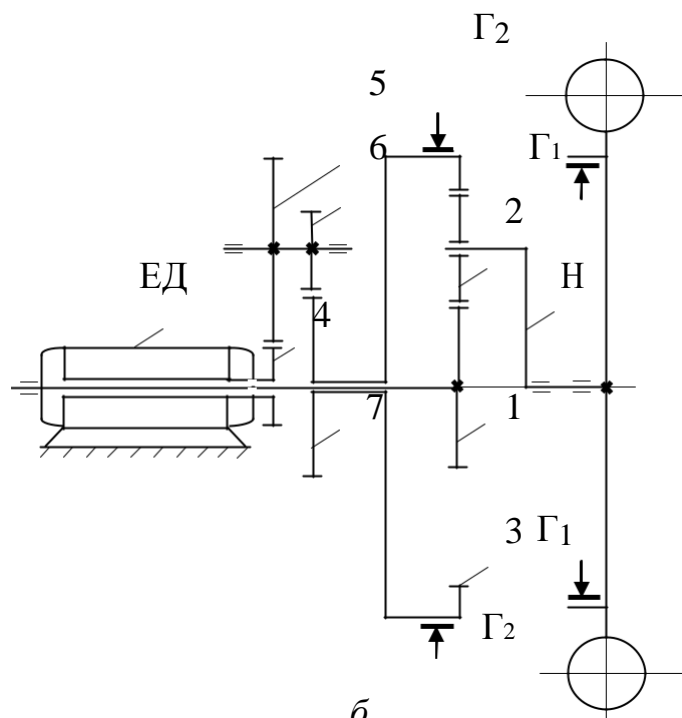
Застосовуючи метод зупинки водила  $H$ , можна записати формулу Вілліса для планетарного механізму Джемса, що дозволяє визначити залежності кутових швидкостей і крутних моментів на всіх валах механізму. Цей підхід є базовим

для подальшого аналізу розподілу потужності між електричною та механічною частинами приводу, а також оцінки динамічних характеристик автомобіля

де  $\omega_1 ; \omega_3 ; \omega_H$  – кутові швидкості 1-го, 3-го зубчастих коліс та водила  $H$ ;  
 $z_1 ; z_3$  – числа зубів 1-го та 3-го коліс.



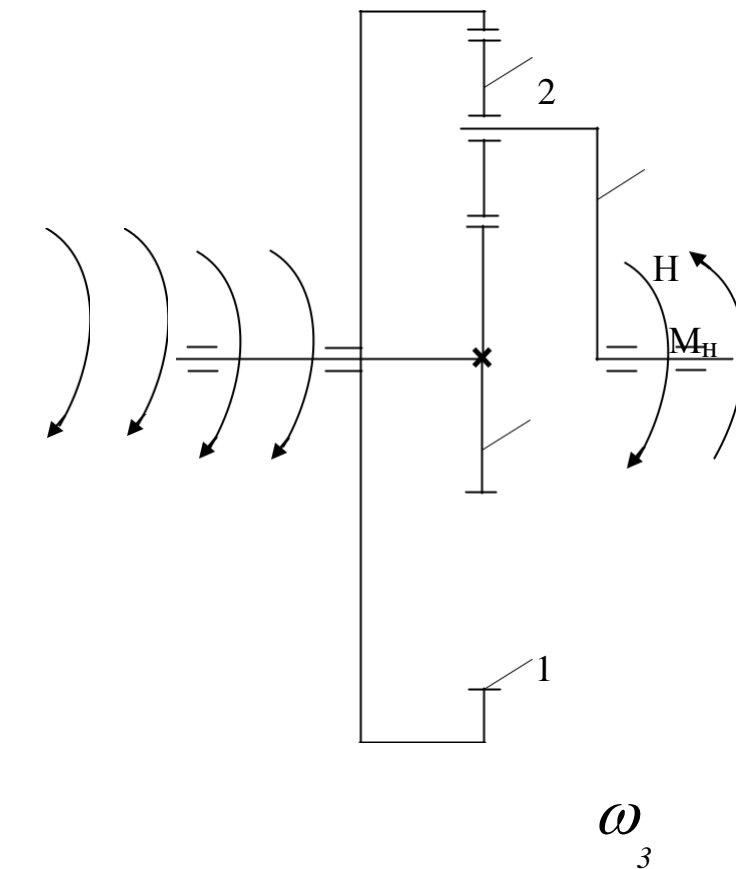
а



б

а – з асиметричним встановленням електродвигуна;  
 б – з співвісним встановленням електродвигуна.

Рисунок 4.1 – Схема комбінованого електромеханічного приводу ведучого колеса автомобіля



Н  $\omega_3$   $\omega_1$   $M_1$

3

Рисунок 4.2 – Схема планетарного механізму бортової передачі з двома ступенями свободи

На відміну від традиційного перемикування передач у автомобілів із механічною трансмісією, яке супроводжується загальмуванням транспортного засобу та періодом спрацювання, у даному випадку така затримка відсутня. Внаслідок цього у функції часу пропадає нелінійність, характерна для механічного «зазору», що дозволяє забезпечити безперервне та більш плавне збільшення крутного моменту на колесах.

#### 4.2 Оцінка зниження енергетичних втрат автомобіля з комбінованою енергетичною установкою

При сталому русі автомобіля середній крутний момент на колесі, що підведений від ДВЗ, дорівнює моменту опору руху.

У таблиці 4.1 наведено результати розрахунку показника  $\eta_{\Delta W}$  для комбінованої енергетичної установки автомобіля з різним числом  $i_{\text{ц}}$  циліндрів ДВЗ і коефіцієнті  $K_{e\partial}$ . У результаті проведеного дослідження розроблено метод зменшення непродуктивних втрат енергії (потужності) двигуна внутрішнього згоряння за рахунок зниження амплітуди коливань тягової сили при використанні комбінованої енергетичної установки. Для кількісної оцінки ефективності запропоновано показник – коефіцієнт непродуктивних втрат енергії, який визначається як відношення додаткових витрат енергії до корисної роботи, що виконується для подолання сил зовнішнього опору руху автомобіля.

Таблиця 4.1 – Результати розрахунку коефіцієнту  $\eta_{\Delta W}$  додаткових втрат

$i_{\text{ц}}$	$\eta_{\Delta W}$					
	$K_{e\partial}=0$	$K_{e\partial}=0,2$	$K_{e\partial}=0,4$	$K_{e\partial}=0,6$	$K_{e\partial}=0,8$	$K_{e\partial}=1,0$
1	2,310	1,849	1,386	0,924	0,462	0
2	1,162	0,929	0,697	0,464	0,232	0
4	0,587	0,470	0,352	0,235	0,117	0
6	0,396	0,317	0,237	0,158	0,079	0
8	0,300	0,240	0,180	0,120	0,060	0
10	0,242	0,194	0,145	0,097	0,048	0
12	0,204	0,163	0,123	0,082	0,040	0

Отриманий аналітичний вираз для коефіцієнта непродуктивних втрат енергії автомобіля з комбінованою енергетичною установкою дозволив визначити найбільше значення коефіцієнт непродуктивних втрат енергії має для одноциліндрового двигуна при відсутності електричного приводу ( $K_{e\partial}=0$ ); це значення дорівнює  $\eta_{\Delta W} = 2,31$ ; при числі циліндрів ДВЗ  $i_{\text{ц}} = 12$  коефіцієнт  $\eta_{\Delta W}$  складає 0,204. Застосування комбінованої енергетичної установки дозволяє знизити  $\Delta W$ , наприклад, для шестициліндрового двигуна від 0,396 при  $K_{e\partial} = 0$  до 0,158 при  $K_{e\partial} = 0,6$ , що складає зниження коефіцієнта

непродуктивних втрат енергії майже на 40 %. В таблиці 4.2 наведено результати розрахунку показника  $\delta_{ew}$  при:  $F=1$ ;

$$\eta_{mp} = 0,8; \eta_{zap} = 0,9 \text{ й } \eta_{ел.п} = 0,9 .$$

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку  $(\delta_{ew})_{\max}$ 

$i_{\text{ц}}$	1	2	3	4	6	8	10	12
$(\delta_{ew})_{\max}$	0,70	0,54	0,44	0,38	0,29	0,24	0,20	0,18

Аналіз результатів розрахунків, представлених у таблиці 4.2, показує, що для автомобілів із комбінованою енергетичною установкою в режимі сталого руху максимальна економія енергії палива, залежно від числа циліндрів двигуна внутрішнього згорання, може коливатися в межах від 18% до 70%. Для легкових автомобілів, які мають  $i_{\text{ц}} = 3 - 6$  вказана економія може складати 29% – 44%.

Запропонований метод дозволяє оцінювати економію енергії (палива) автомобіля з комбінованою енергетичною установкою при русі у сталому режимі, забезпечуючи точну кількісну характеристику її ефективності. Проведені розрахунки економії енергії автомобіля з комбінованою енергетичною установкою з  $\eta_{\text{тп}} = 0,8$ ;  $\eta_{\text{зар}} = 0,9$  й  $\eta_{\text{ел.л}} = 0,9$  дозволили визначити наступне: відносне зниження енергії, що затрачується на сталий рух автомобіля в залежності від числа циліндрів двигуна може знаходитись в межах від 18% до 70% (менше значення – при числі циліндрів  $i_{\text{ц}} = 12$ , а більше – при  $i_{\text{ц}} = 1$ ); для легкових автомобілів, які мають  $i_{\text{ц}} = 3 - 6$  вказана економія може складати величину, яка знаходиться у межах 29% – 44%; для вантажних автомобілів з числом циліндрів  $i_{\text{ц}} = 6-8$  відносна економія енергії (палива) складає 24% – 29%.

### **Висновки за розділом**

Запропоновано два варіанти конструкції комбінованого електромеханічного приводу ведучого колеса з симетричним та асиметричним розташуванням електродвигуна відносно планетарного механізму. Це дозволяє здійснювати синтез комбінованої енергетичної установки автомобіля та проводити її кінематичний, динамічний та потужнісний аналіз. Результати досліджень будуть використані для визначення раціональних параметрів електричної частини приводу, що забезпечать мінімальні витрати енергії на рух.

Запропоновано метод оцінювання непродуктивних втрат енергії, зумовлених нерівномірністю крутного моменту ДВЗ, та введено показник – коефіцієнт

непродуктивних втрат енергії, який визначає співвідношення додаткової витрати енергії до роботи сил зовнішнього опору руху. Отримані результати дозволяють обґрунтувати вимоги до створення та модернізації автомобілів з комбінованою енергетичною установкою, забезпечуючи зменшення додаткових енергетичних витрат порівняно з автомобілями з механічним приводом. При  $K_{ed} = 1$  (при повністю електричному приводі) зазначені втрати дорівнюють нулю.

Але зі збільшенням частки  $K_{ed}$  крутного моменту на колесах, що створений електродвигуном, відносні додаткові витрати енергії на рух автомобіля знижуються. При  $K_{ed} = 1$  ці втрати дорівнюють нулю.

Визначено взаємозв'язок показників динамічності автомобіля з комбінованою енергетичною установкою при різних режимах її роботи:

Використання електричної енергії від акумуляторних батарей при працюючому тепловому двигуні та генераторі.

Використання електричної енергії від акумуляторних батарей при не працюючому тепловому двигуні та генераторі (безшумний режим руху).

Використання електричної енергії від генератора для приводу однієї осі (один ведучий міст).

Використання електричної енергії від генератора для приводу всіх осей (усі ведучі мости).

Встановлено, що розгін автомобіля при живленні електродвигунів від генератора відбувається з меншими прискореннями, ніж при роботі від акумуляторних батарей. Розроблено закони керування електродвигунами приводу ведучих коліс, що забезпечують максимальне прискорення машини при реалізації граничних сил зчеплення коліс з дорогою.

Проведено оцінку енергетичної ефективності електричної трансмісії. Встановлено, що збільшення ККД електричного приводу ведучих коліс дозволяє використовувати електричну трансмісію при більшому мінімальному числі циліндрів ДВЗ.

Досліджено динаміку трансмісії автомобіля при:

жорсткому з'єднанні ДВЗ та електродвигуна;

з'єднанні через симетричний диференціал.

При жорсткому зв'язку умова відсутності циркуляції потужності та падіння ККД досягається рівністю потужностей ДВЗ і електродвигунів. При симетричному диференціалі потужність електродвигуна може відрізнятись від потужності ДВЗ.

Запропоновано метод оцінки економії енергії (палива) автомобіля з комбінованою енергетичною установкою у сталому режимі руху, що дозволяє кількісно визначати ефективність використання енергоресурсів.

Проведені розрахунки економії енергії автомобіля з комбінованою енергетичною установкою з  $\eta_{mp} = 0,8$ ;  $\eta_{zap} = 0,9$  й  $\eta_{ел.п} = 0,9$  дозволили визначити наступне: відносне зниження енергії, що витрачається на сталий рух автомобіля залежності від числа циліндрів двигуна може знаходитись в межах від 18% до 70% (менше значення – при числі циліндрів  $i_u = 12$ , а більше – при  $i_u = 1$ ); для легкових автомобілів, які мають  $i_u = 3 - 6$  вказана економія може складати величину, яка знаходиться у межах 29% – 44%; для вантажних автомобілів з числом циліндрів  $i_u = 6 - 8$  відносна економія енергії (палива) складає 24% – 29%.

## РОЗДІЛ 5

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРУВАННЯ РУХОМ АВТОМОБІЛІВ З КОМБІНОВАНОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ НА НЕСТАЛОМУ РЕЖИМІ

#### 5.1. Керування рухом автомобільної колони з безпілотними автомобілями

Динамічне подовження колони обумовлюється накопиченням відносних переміщень окремих автомобілів, що виникають через різницю швидкостей їх руху відносно ведучого транспортного засобу. Зменшення сумарного відносного переміщення автомобілів у колоні дозволяє скоротити її довжину та час проходження маршруту. Чутливість довжини колони до зміни швидкості головного автомобіля можна визначити за наступним виразом:

$$\frac{dL_K}{dV} = \frac{nV}{g\varphi_{x\max}}.$$

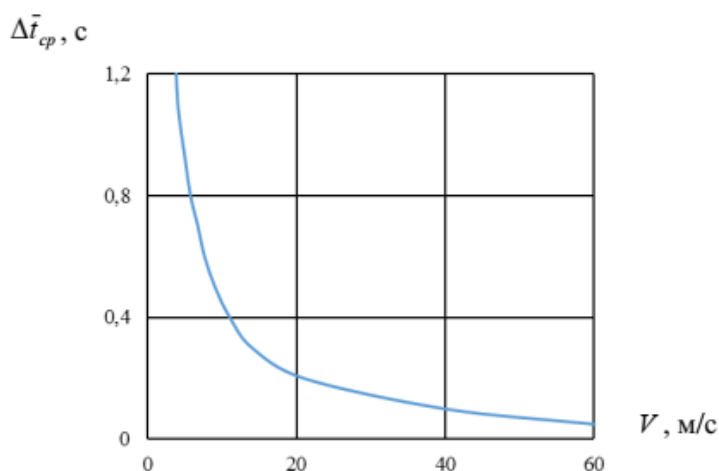
Із виразу видно, що чутливість довжини колони  $L_K$  до зміни швидкості руху пропорційна добутку числа автомобілів у колоні та швидкості її руху.

Автомобілі з комбінованою енергетичною установкою, у разі автоматичної підтримки дистанції між автомобілями  $D_a = l_3 = 5$  м, дозволяють забезпечити рух при більш високих допустимих швидкостях руху колони. Як видно із виразу збільшення середньої швидкості  $V$  дозволяє зменшити час маршу  $T_{mb}$ . Слід звернути увагу на той факт, що гальма кожного наступного автомобіля у колоні повинні спрацьовувати або одночасно з гальмами попереднього автомобіля, або випереджати гальма останнього на час  $\Delta t_{cp}$ . При цьому безпека руху буде забезпечуватись за рахунок шляху запасу  $l_3$  якщо за якоюсь причиною гальма попереднього автомобіля будуть спрацьовувати раніше гальм наступного.

Допустимий час запізнення  $\Delta t_{cp}$  гальм наступного автомобіля по відношенню до гальм попереднього може бути визначена за наступною залежністю

$$\Delta \bar{t}_{cp} = \frac{l_3}{V}.$$

На рис. 5.1 наведено залежність  $\Delta t_{cp}$  від початкової швидкості руху колони  $V$  при  $l_3 = 5$  м.



На рис. 5.2 наведено графік залежності скорочення часу  $\Delta T_m$  здійснення маршруту при використанні безпілотних автомобілів від середньої швидкості  $V$  при різній кількості автомобілів у колоні.

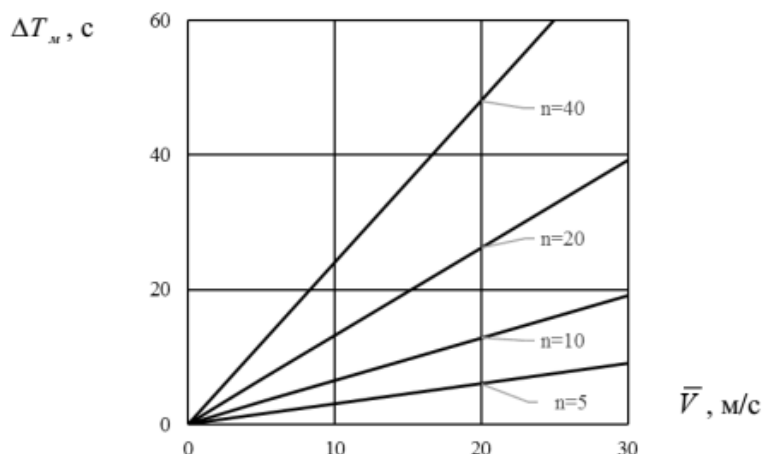


Рисунок 5.2 – Залежність  $\Delta T_m(V)$  при різній кількості автомобілів  $n$  у колоні

Аналіз графіків, що наведені на рис. 5.2, показує, що навіть при швидкості  $V=25$  м/с (90 км/год) скорочення часу здійснення маршруту складає лише (60с) навіть при кількості автомобілів у колоні 40 одиниць. Це скорочення часу актуально при переміщенні на малі відстані, наприклад, при подоланні небезпечної ділянки шляху. Однак, використання безпілотних автомобілів дозволяє скоротити довжину колони (покращити її компактність), або при тій же довжині збільшити

число  $n$  автомобілів у колоні. Скорочення довжини колони знаходимо, використовуючи вираз при  $V = V$

$$\Delta L = L_K - L_{KП} = \frac{n\bar{V}^2}{2g\varphi_{y\max}}$$

На рис. 5.3 наведено графік залежності скорочення довжини  $\Delta L$  колони із 20 машин у випадку застосування безпілотних автомобілів від середньої швидкості  $V$ .

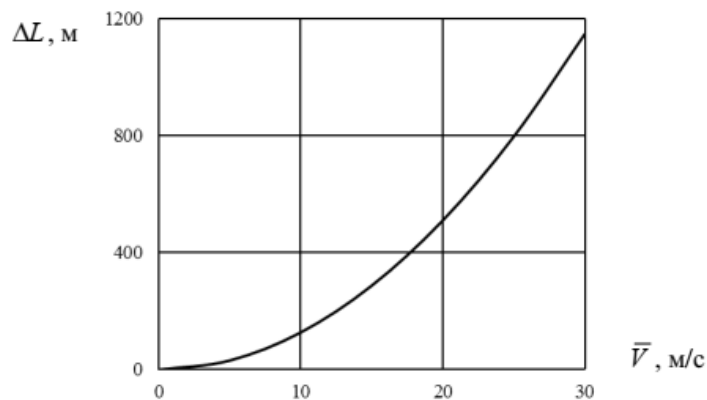


Рисунок 5.3 – Залежність  $\Delta L$  для автомобільної колони при  $n = 20$

Аналіз графіку, наведеного на рис. 5.3, показує, що використання безпілотних автомобілів у колоні при  $n = 20$  дозволяє зменшити довжину останньої на 800 м при швидкості  $L_K = L_{KП} = 25$  м/с (90 км/год).

Застосування безпілотних автомобілів дозволяє при рівній довжині колони збільшити число машин, що входять до неї.

Для колони з безпілотними автомобілями при  $l_2 = 7$  м на рис. 5.4 наведено графік залежності  $\frac{n_6}{n} = F(V)$ .

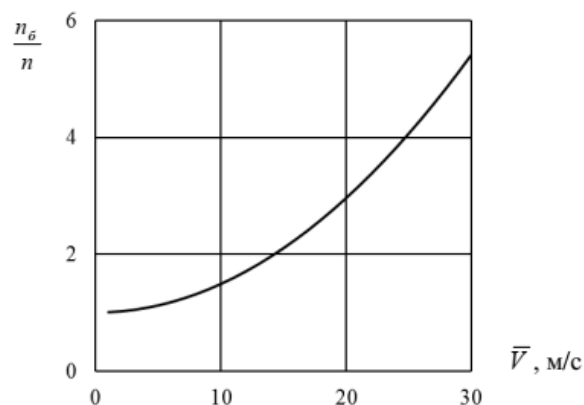


Рисунок 5.4 – Залежність  $\frac{n_6}{n} = F(V)$  при  $l_2 = 7$  м

Із рис. 5.4 видно, що автомобільна колона з безпілотними автомобілями при рівній зі звичайною колоною (з пілотними автомобілями) довжиною при  $l_2=7\text{ м}$  й  $V=25\text{ м/с}$  (90 км/год) може мати у своєму складі у чотири рази більше автомобілів. Таким чином, впровадження системи керування рухом автомобільної колони з безпілотними транспортними засобами, оснащеними комбінованою енергетичною установкою, на відміну від колон, якими керують водії, дозволяє:

- скоротити час проходження коротких ділянок шляху (наприклад, для колони з 40 автомобілів при швидкості 25 м/с (90 км/год) економія часу складе близько 60 с);

- зменшити довжину колони з 20 безпілотних машин, що рухаються зі швидкістю 25 м/с (90 км/год), приблизно на 800 м;

- збільшити кількість автомобілів у колоні в чотири рази при збереженні її довжини та швидкості руху.

- зменшити чутливість довжини автомобільної колони з безпілотними автомобілями до зміни швидкості руху, оскільки дистанція між машинами не визначається гальмівним шляхом і швидкістю, а дорівнює тільки дистанції запасу  $l_3=5\text{ м}$ .

### 5.3 Оцінка ефективної роботи двигуна внутрішнього згоряння при розгоні на різних передачах, на прикладі сімейства вантажних автомобілів КрАЗ

Для визначення ефективності роботи ДВЗ під час розгону на різних передачах вантажних автомобілів сімейства КрАЗ (рис. 5.7) застосуємо запропоновану формулу (3.19).



Рисунок 5.5 – Сімейство вантажних автомобілів КрАЗ

5.3.1. Оцінка ефективної роботи двигуна внутрішнього згоряння при розгоні на різних передачах автомобільних шасі КрАЗ.

Загальний вигляд шасі КрАЗ-5401В2 представлено на рис. 5.6.

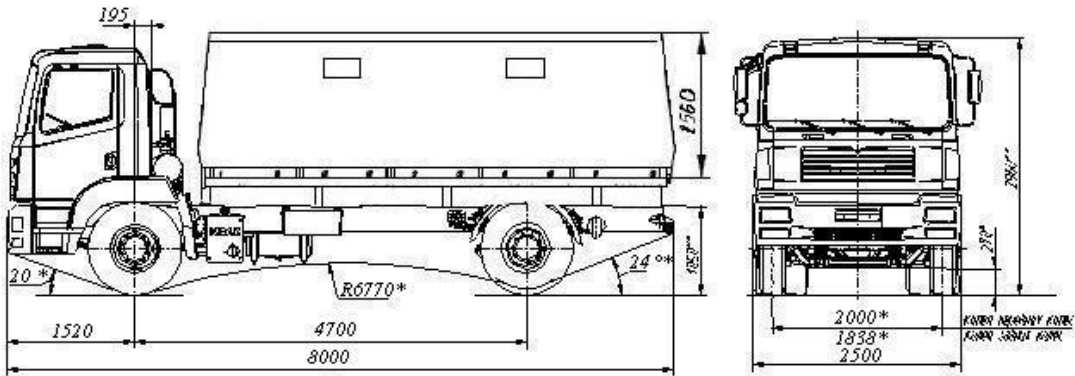


Рисунок 5.6 – Загальний вигляд автомобільного шасі КрАЗ-5401В2

Виходячи з наведених технічних характеристик та використовуючи відповідний вираз, визначено значення ефективної роботи ДВЗ під час розгону на різних передачах автомобільного шасі КрАЗ-5401В2 як для повної, так і для спорядженої маси (рис. 5.7).

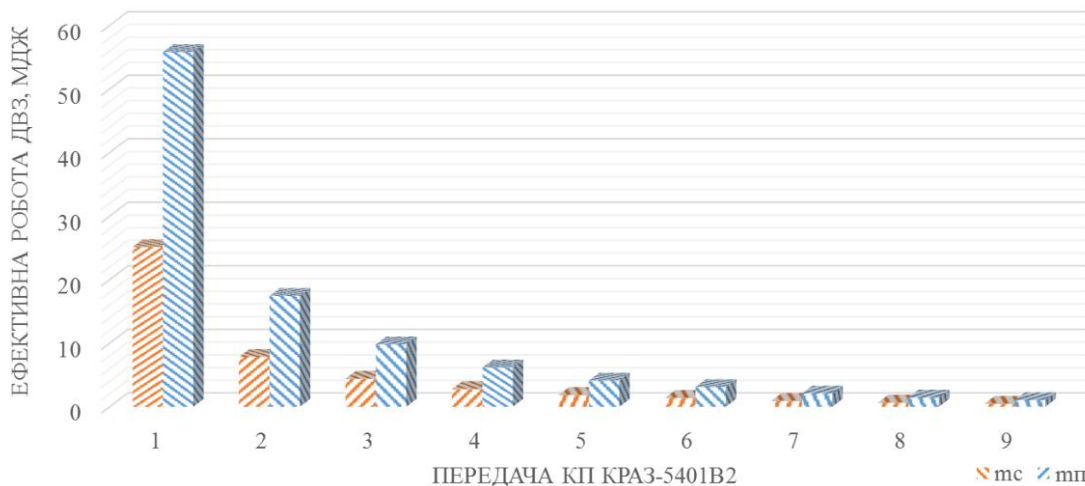


Рисунок 5.7 – Гістограма значень ефективної роботи ДВЗ при розгоні на різних передачах автомобільного шасі КрАЗ-5401В2 з повною та спорядженою масами

Загальний вигляд автомобільного шасі КрАЗ-5401Н2 наведено на рис.

5.8.

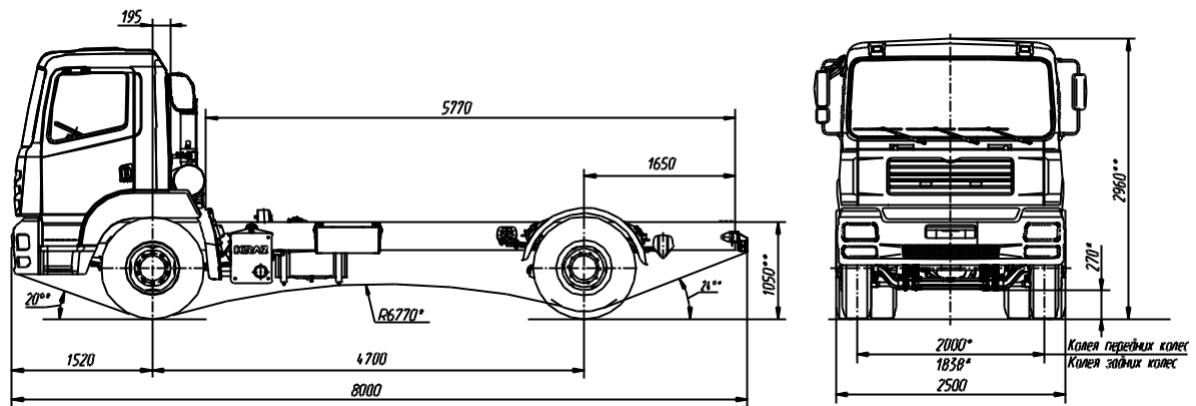


Рисунок 5.8 – Загальний вигляд автомобільного шасі КрАЗ-5401Н2

Виходячи з наведених технічних характеристик та застосування відповідного виразу, визначено значення ефективної роботи ДВЗ під час розгону на різних передачах автомобільного шасі КрАЗ-5401Н2 для повної та спорядженої маси (рис. 5.9).

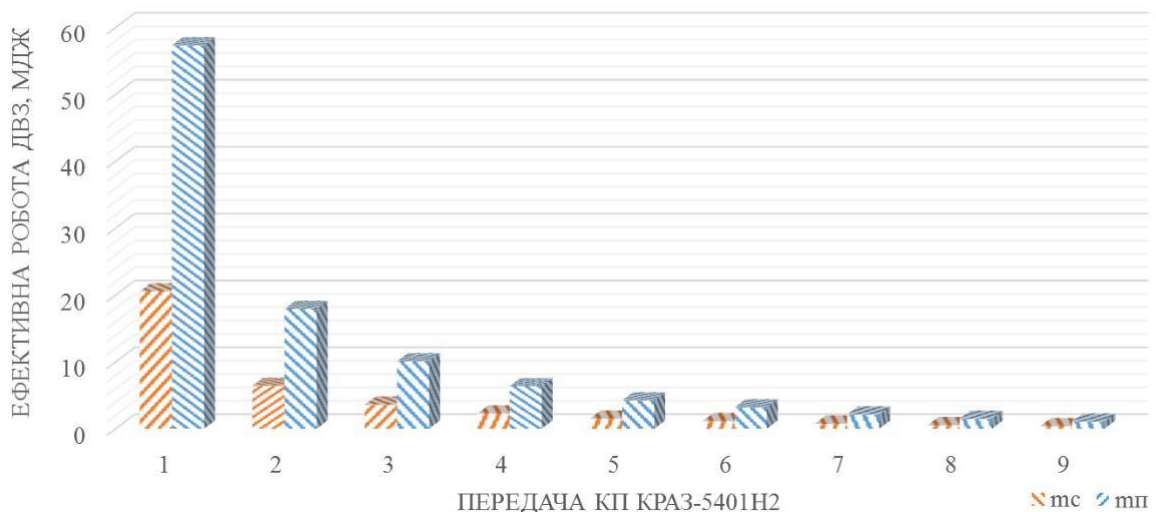


Рисунок 5.9 – Гістограма значень ефективної роботи ДВЗ при розгоні на різних передачах автомобільного шасі КрАЗ-5401Н2 з повною та спорядженою масами

Загальний вигляд автомобільного шасі КрАЗ-63221-016-02 наведено на рис. 5.10.

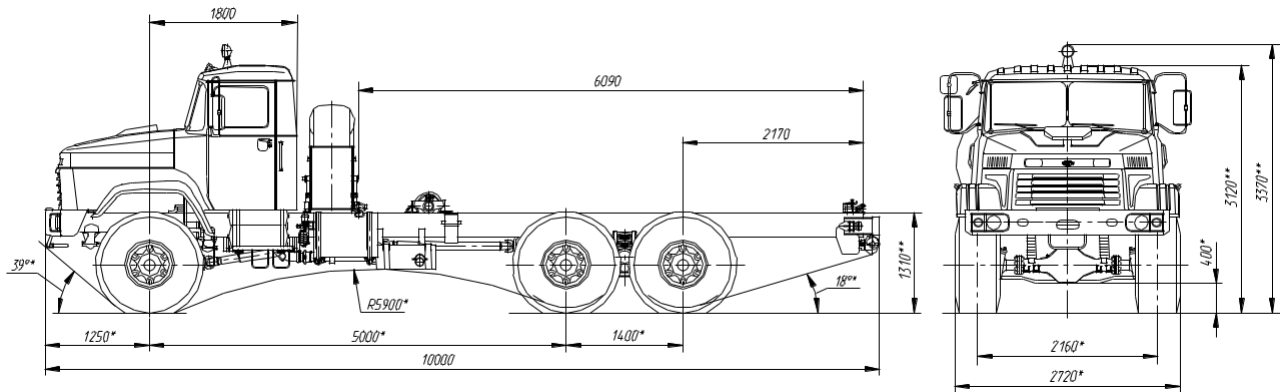


Рисунок 5.10 – Загальний вигляд автомобільного шасі КрАЗ-63221-016-02

Виходячи з наведених технічних характеристик та застосування відповідного виразу, визначено значення ефективної роботи ДВЗ під час розгону на різних передачах автомобільного шасі КрАЗ-63221-016-02 для повної та спорядженої маси (рис. 5.11).

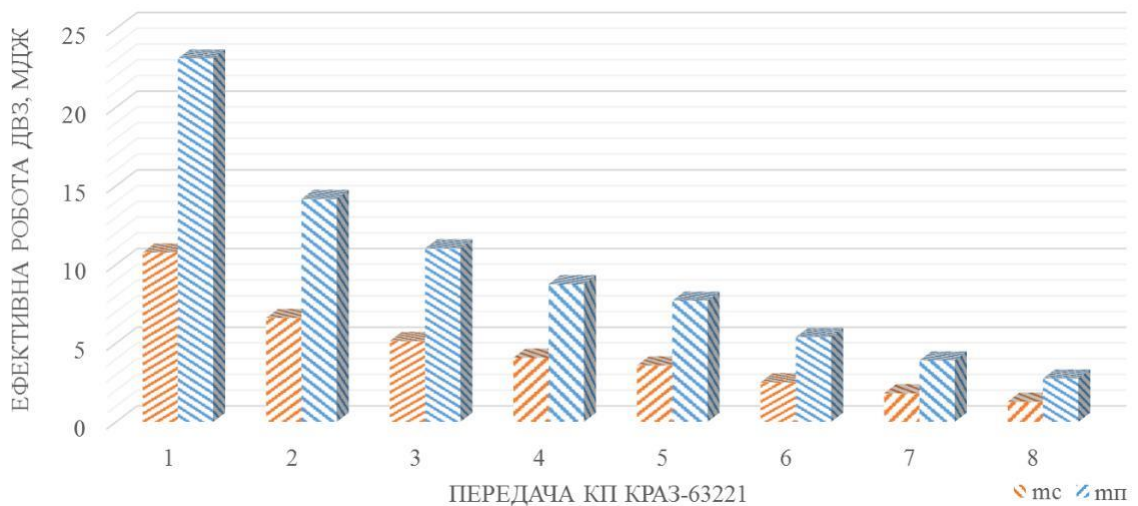


Рисунок 5.11 – Гістограма значень ефективної роботи ДВЗ при розгоні на різних передачах автомобільного шасі КрАЗ-63221-016-02 з повною та спорядженою масами

Загальний вигляд автомобільного шасі КрАЗ-6511Н4-100 наведено на рис. 5.12.

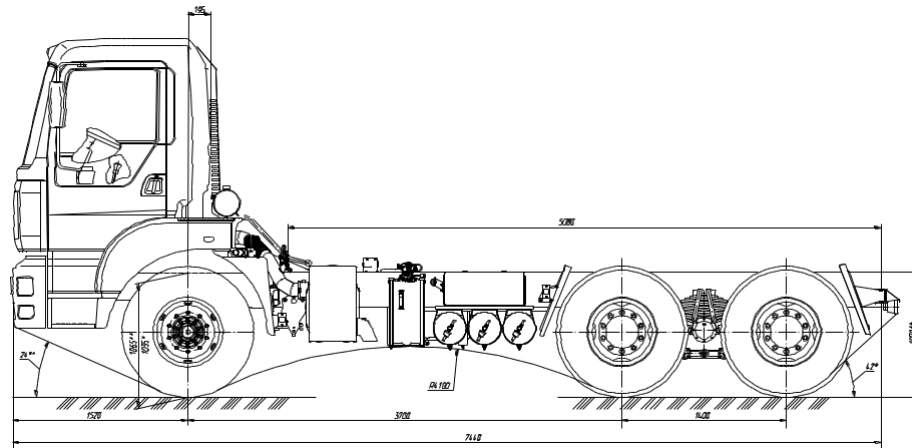


Рисунок 5.12 – Загальний вигляд автомобільного шасі КрАЗ-6511Н4-100

Виходячи з наведених технічних характеристик та застосування відповідного виразу, визначено значення ефективної роботи ДВЗ під час розгону на різних передачах автомобільного шасі КрАЗ-6511Н4-100 для повної та спорядженої маси (рис. 5.13).

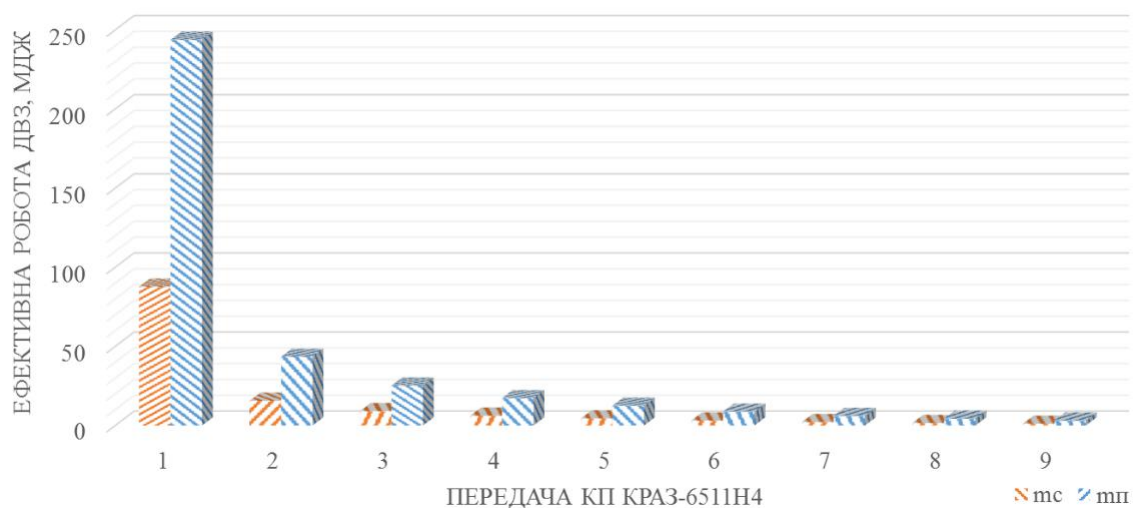


Рисунок 5.13 – Гістограма значень ефективної роботи ДВЗ при розгоні на різних передачах автомобільного шасі КрАЗ-6511Н4-100 з повною та спорядженою масами

## Висновки за розділом

Покращення динамічних показників автомобільної колони, що складається з її складових машин, можливо завдяки застосуванню комбінованої енергетичної установки та реалізації безпілотного способу керування. Використання безпілотних автомобілів із комбінованою енергетичною установкою дозволяє: скоротити час проходження коротких ділянок шляху (наприклад, для колони з 40 машин при швидкості 25 м/с або 90 км/год час економії складе близько 60 с); зменшити довжину колони з 20 безпілотних машин, що рухаються зі швидкістю 25 м/с (90 км/год), на 800 м; збільшити кількість машин у колоні вчетверо без зміни її загальної довжини та швидкості руху. зменшити чутливість довжини автомобільної колони з безпілотними автомобілями до зміни швидкості руху, оскільки дистанція між машинами не визначається гальмівним шляхом і швидкістю, а дорівнює тільки дистанції запасу  $l_z = 5\text{ м}$ .

Розвиток теорії комбінованого способу керування рухом автомобіля «крабом» дозволив, на відміну від відомих методів, виконувати цей маневр з неповоротними задніми колесами завдяки застосуванню комбінованої енергетичної установки.

Встановлено значення ефективної роботи ДВЗ при розгоні на різних передачах сімейства вантажних автомобілів КраЗ як для повної, так і для спорядженої маси. З'ясовано, що максимальні значення ефективної роботи ДВЗ спостерігаються на нижчих передачах, а при переході на вищі передачі ефективність двигуна знижується.

Різниця ефективної роботи ДВЗ між повною та спорядженою масами є найбільшою на нижчих передачах і зменшується при збільшенні передачі. Це дозволяє рекомендувати використання електричної енергії для приводу ведучих коліс на нижчих ступенях передач у вантажних автомобілях з комбінованим електромеханічним приводом.

Аналіз результатів свідчить, що перехід від нижчих до вищих передач супроводжується значним зниженням витрат енергії двигуна на розгін автомобіля. При розгоні у одному й тому ж діапазоні швидкостей двигуна внутрішнього згоряння (від  $\omega_{\min}$  до  $\omega_{\max}$ ) автомобіля КраЗ-5233 енергетичні витрати на I-й передачі складають  $A_e = 16,0$  МДж, а на VIII-ій передачі  $A_e = 2,0$  МДж, тобто у вісім

разів менше. Це обґрунтовує рекомендацію для автомобілів з комбінованою енергетичною установкою здійснювати розгін на нижчих передачах із використанням електричного приводу. При цьому на всіх передачах доцільно застосовувати раціональний закон керування прискоренням автомобіля.

## РОЗДІЛ 6

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АВТОМОБІЛІВ

#### 6.1 Мета та задачі експериментальних досліджень енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів

Мета дослідження: емпірично оцінити динамічні властивості автомобілів, а саме:

підтвердити теоретичні положення щодо визначення енергетичних витрат на розгін автомобілів;

оцінити динамічні характеристики автомобілів у реальних умовах руху.

Задачі дослідження:

визначити залежність прискорення вантажного автомобіля КрАЗ від часу під час інтенсивного розгону та вибігу на горизонтальній ділянці дороги;

визначити залежність пройденого шляху автомобілем від часу при інтенсивному розгоні та вибігу на горизонтальній ділянці дороги;

визначити залежність лінійної швидкості автомобіля від часу під час інтенсивного розгону та вибігу;

визначити залежність потужності двигуна від швидкості руху вантажного автомобіля при інтенсивному розгоні на різних передачах і вибігу на горизонтальній ділянці дороги;

визначити ефективну роботу двигуна вантажного автомобіля при інтенсивному розгоні на різних передачах на горизонтальній ділянці дороги.

На момент проведення експериментальних досліджень вантажні автомобілі КрАЗ мали пробіг, значення якого наведені у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Значення пробігу автомобілів на момент проведення експериментальних досліджень

Марка автомобіля	КрАЗ-6322	КрАЗ-5233BE
Пробіг, км	12840	3122

## 6.2. Об'єкт експериментальних досліджень

У ході експериментальних досліджень застосовувалися вантажні автомобілі марки КрАЗ, а саме: КрАЗ-5233ВЕ; КрАЗ-6322. Їх загальний вигляд та основні компоненти наведено на рис. 6.1.



а



б

а – вантажний автомобіль КрАЗ-5233ВЕ; б – вантажний автомобіль КрАЗ-6322;

Рисунок 6.1 – Вантажні автомобілі КрАЗ, які використовувались під час проведення експериментальних досліджень

## 6.3. Умови та місце проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводились у жовтні 2025 року в умовах Хмельницької області на ділянці дороги між містами Шепетівка – Славута – село Кам'янка. Випробування виконувалися на горизонтальній ділянці дороги з твердим та рівним асфальтобетонним покриттям.

Під час проведення експерименту інтенсивність руху автотранспорту була мінімальною. Поздовжні та поперечні ухили дороги не перевищували 1,5%. Перед початком досліджень двигуни, трансмісія та ходова частина автомобілів були прогріті. Шини автомобілів були чистими, зі зносом протектора не більше 4%.

## 6.4. Матеріально-технічне забезпечення експериментальних досліджень

Під час експериментальних досліджень застосовувалися наступні засоби: вантажні автомобілі КрАЗ-5233ВЕ та КрАЗ-6322; мобільний

вимірювально-реєстраційний комплекс (МВРК), що включав: два акселерометри Freescale Semiconductor MMA7260QT ДЛШ, заводські номери №06085445 та №06085446; персональний комп'ютер Acer ASPIRE 5520G, заводський номер №4104А; кріплення для датчиків прискорень; рулетку P50У3К згідно з ДСТУ 4179-2003; цифрову фотокамеру NIKON Coolpix S2600.

Технічні та експлуатаційні характеристики автомобілів КрАЗ відповідали стандартам документації на ці машини.

#### **6.4.1. Характеристика мобільного вимірювально-реєстраційного комплексу**

МВРК використовувався для збору та обробки даних про рух автомобілів. Комплекс складався з обчислювального блоку, дисплея, клавіатури, блоку живлення та двох акселерометрів MMA7260QT.

Вимірювання виконувалися одночасно у трьох площинах: поздовжній, поперечній та вертикальній. Швидкість руху визначалась без інтегрування сигналів, за рахунок математичної обробки сигналів з датчиків.

Для відображення результатів використовувався дисплей МВРК. Живлення забезпечувалося або від бортової мережі автомобіля, або від автономного джерела через блок живлення.

Акселерометри MMA7260QT містять ємнісно-чутливий елемент G-cell з діапазоном  $\pm 1,5$  g та інтегровану схему вимірювання на основі CMOS-технології (рис. 6.2).



Рисунок 6.2 – Загальний вигляд датчика прискорення

Ємнісний чутливий елемент G-cell є герметичною конструкцією, виготовленою з полікремнію за напівпровідниковою технологією. Він складається з диференціального чутливого елемента, який включає верхню та нижню нерухомі пластини, а також центральну пластину, закріплену за допомогою пружних елементів. Центральна пластина виконує роль сейсмомаси і здатна зміщуватися під впливом прискорення. Крім того, вона забезпечує самотестування механічної та електронної частини датчика.

Вбудований вимірювальний ланцюг елемента побудований на перемикаючихся конденсаторах і містить інтегратор, підсилювач, фільтр низьких частот, систему температурної компенсації та тактовий генератор. Коли центральна пластина знаходиться в нейтральному положенні, вихідний сигнал датчика дорівнює половині напруги живлення. Ланцюг побудований за логотричною схемою, що забезпечує лінійну залежність початкового зміщення і чутливості датчика від напруги живлення.

Під час експерименту МВРК реєструє прискорення вантажного автомобіля у поздовжній, поперечній та вертикальній площинах. Сигнали з акселерометрів перетворюються в цифровий код і надходять до обчислювального блоку для обробки. Результати вимірювань відображаються на дисплеї комплексу.

#### **6.4.2. Встановлення та кріплення датчиків прискорення**

Для отримання достовірних даних за допомогою МВРК необхідно правильно розташувати та закріпити датчики прискорень. При прямолінійному руху всі точки автомобіля мають однакові кінематичні характеристики, тому для визначення поздовжніх прискорень достатньо одного датчика. Для оцінки плоско-паралельного руху автомобіля слід використовувати щонайменше два датчики, встановлені у різних контрольних точках.

Для вантажних автомобілів КрАЗ, які використовувалися в дослідженнях, було обрано схему установки датчиків у паралельній поперечній площині для точного вимірювання лінійних прискорень. Схеми розташування датчиків: КрАЗ-5233BE – рис. 6.3; КрАЗ-6322 – рис. 6.4.

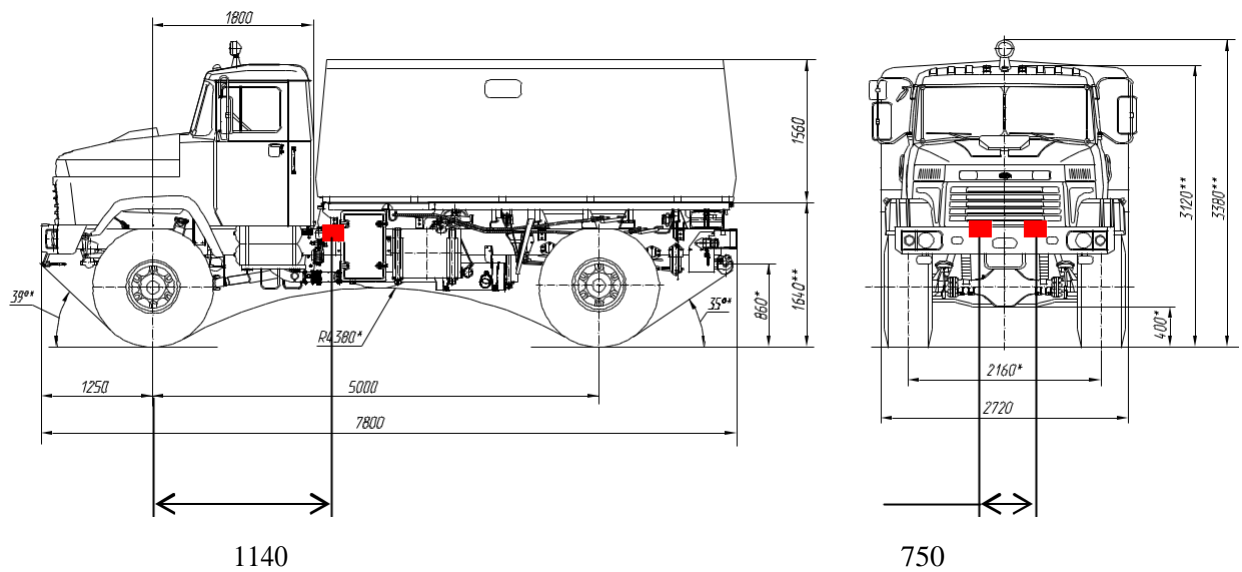


Рисунок 6.3 – Схема установки двох датчиків прискорення паралельно у одній поперечній площині на автомобілі КрАЗ-5233ВЕ

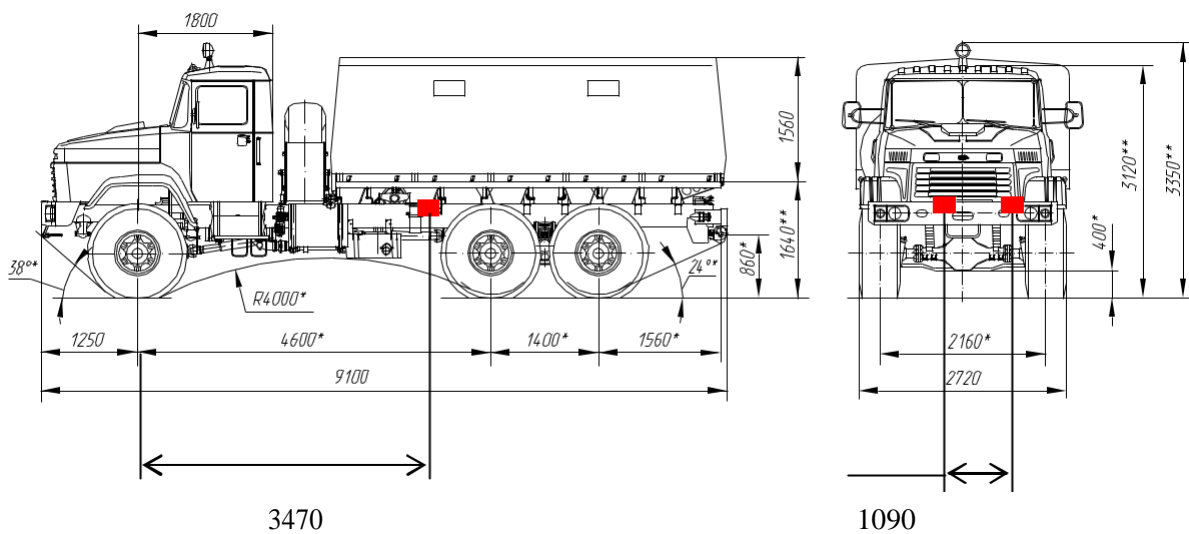


Рисунок 6.4 – Схема установки двох датчиків прискорення паралельно у одній поперечній площині на автомобілі КрАЗ-6322

Під час руху вантажних автомобілів реєструвалися такі параметри:  
 лінійні прискорення (поздовжні, поперечні та вертикальні), м/с<sup>2</sup>;  
 час руху, с;  
 швидкість руху автомобіля, м/с;  
 пройдений шлях після вибігу, м.

Безперервний запис даних з датчиків прискорень здійснювався за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке дозволяло одночасно

зберігати інформацію на жорсткому диску ПЕОМ та візуалізувати процес експерименту. Лінійні прискорення визначалися мобільним вимірювально-реєстраційним комплексом, а швидкість – за методикою вимірювань. Загальна похибка вимірювань прискорень становила до 4 % (1 % – паспортна похибка акселерометрів та до 3 % – похибка установки).

Вимірювання динамічних показників автомобілів КраЗ виконувалися штатними водіями та членами робочої групи шляхом контролю даних контрольно-вимірювальних приладів і МРВК.

### **6.5. Методика проведення експериментальних досліджень**

Експеримент проводився у два етапи:

Перший етап:

Вантажні автомобілі КраЗ розганялися поодиноці до максимальної швидкості, зафіксованої спідометром, при однаковому ступені натискання на педаль газу. Водій послідовно використовував усі передачі коробки передач. Після досягнення максимальної швидкості подача палива припинялася, передача вимикалася, і автомобіль здійснював вибіг до повної зупинки.

Другий етап:

Для усунення впливу ухилів дороги заїзд повторювався у зворотному напрямку. Дані з прискорень реєструвалися одночасно з двох датчиків, що дозволяло підвищити точність експерименту за рахунок усереднення показників. Отримані результати обробки інформації наведено у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Параметри, що визначаються за допомогою мобільного реєстраційно-вимірювального комплексу

Назва	Параметри
Опір руху машин	сумарна сила опору коченню коліс; сила опору повітря; сумарний коефіцієнт дорожнього опору; коефіцієнт обтічності
Стійкість колісних машин	подовжні прискорення колісних машин; бічні прискорення колісних машин; вертикальні прискорення колісних машин; лінійна швидкість
Керованість колісних машин	частота власних коливань у площині дороги; коефіцієнт динамічності коливань; параметри причепом (напівпричепом); кутові швидкості;
Тягово-швидкісні	тягова сила на колесах в режимі реального часу;

характеристики	потужність двигуна, що витрачається на подолання аеродинамічного опору руху автомобіля
Потужнісні показники автомобілів	вільна (яка використовується для розгону)
ККД автомобіля	потужність двигуна; потужність двигуна, що миттєвий ККД автомобіля

### 6.6. Обробка експериментальних даних

Після обробки експериментальних даних побудовано графіки залежності поздовжніх прискорень, пройденого шляху та лінійної швидкості від часу під час розгону та вибігу вантажних автомобілів КрАЗ. На рисунку 6.5 показано залежність поздовжнього прискорення від часу для автомобіля КрАЗ-5233 під час розгону та вибігу.

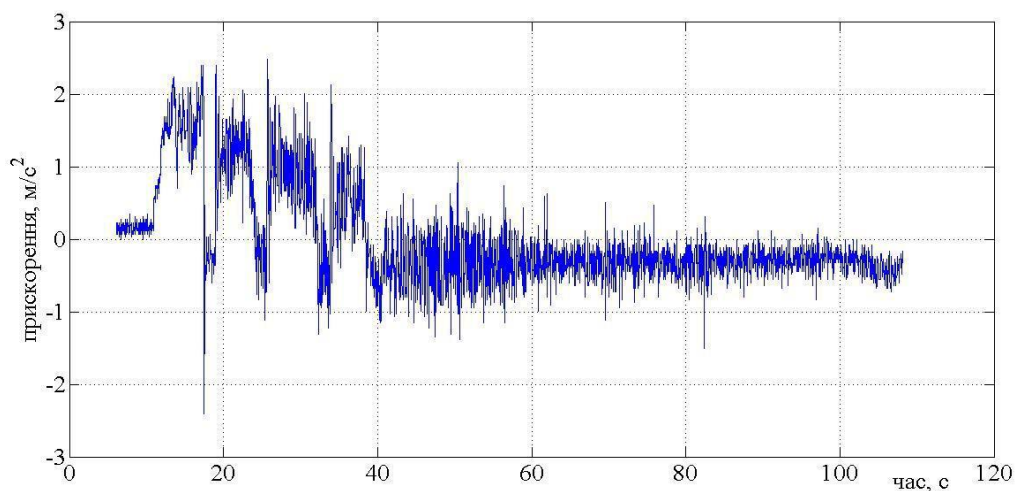


Рисунок 6.5 – Залежність прискорення від часу розгону й вибігу автомобіля КрАЗ-5233

На рис. 6.6 наведено графік зміни шляху від часу розгону й вибігу вантажного автомобіля КрАЗ-5233.

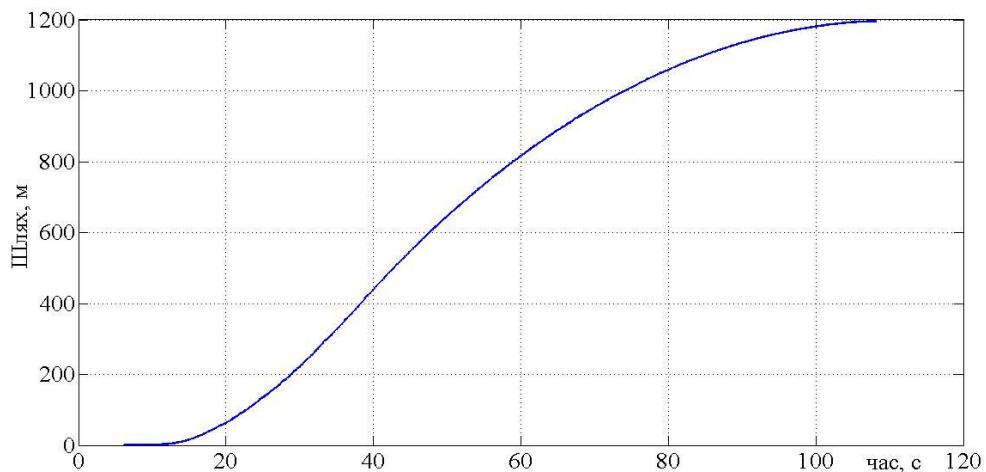


Рисунок 6.6 – Залежність шляху від часу розгону й вибігу автомобіля КрАЗ-5233

На рис. 6.7 наведено графік зміни лінійної швидкості від часу розгону й вибігу вантажного автомобіля КрАЗ-5233.

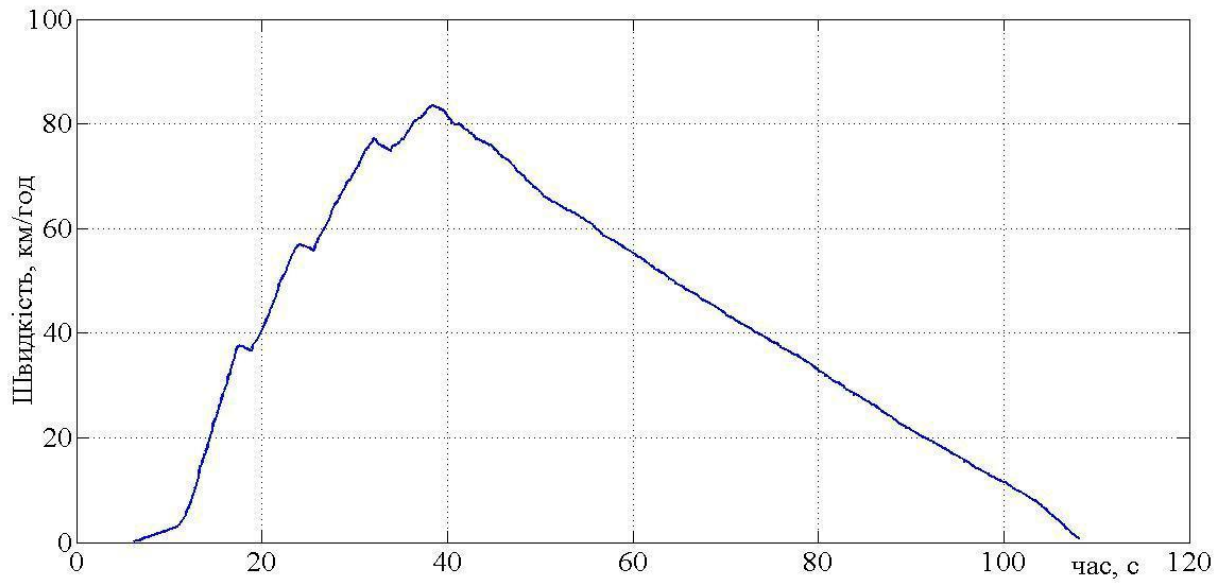


Рисунок 6.7 – Залежність швидкості від часу розгону й вибігу автомобіля КрАЗ-5233

На рис. 6.8 наведено графік зміни поздовжнього лінійного прискорення від часу розгону й вибігу вантажного автомобіля КрАЗ-6322.

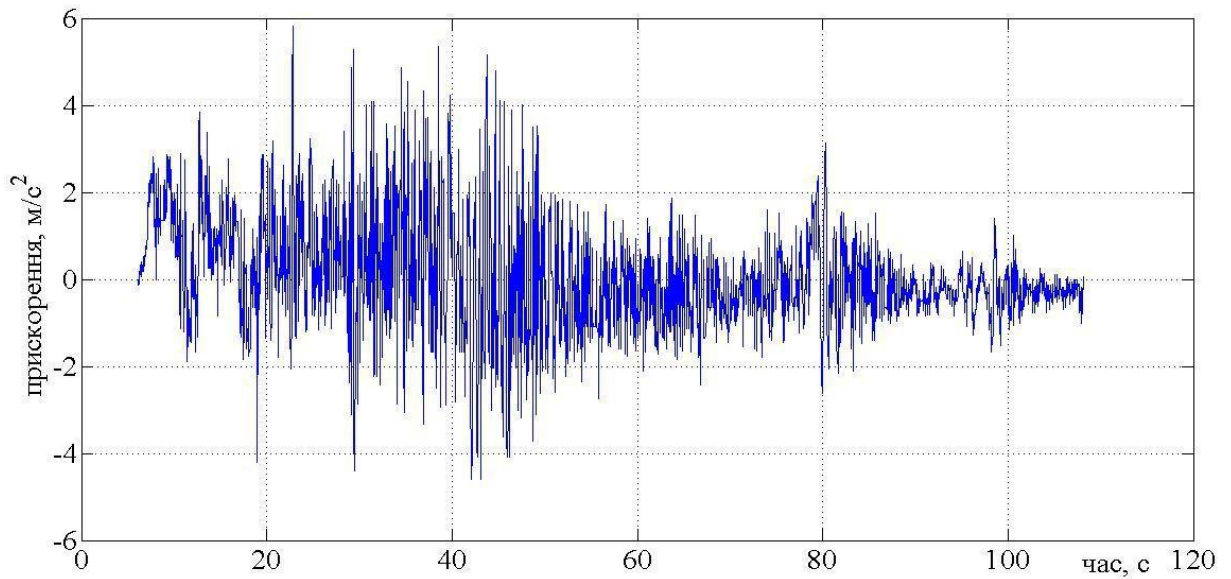


Рисунок 6.8 – Залежність прискорення від часу розгону й вибігу автомобіля КрАЗ-6322

На рис. 6.9 наведено графік зміни шляху від часу розгону й вибігу вантажного автомобіля КрАЗ-6322.

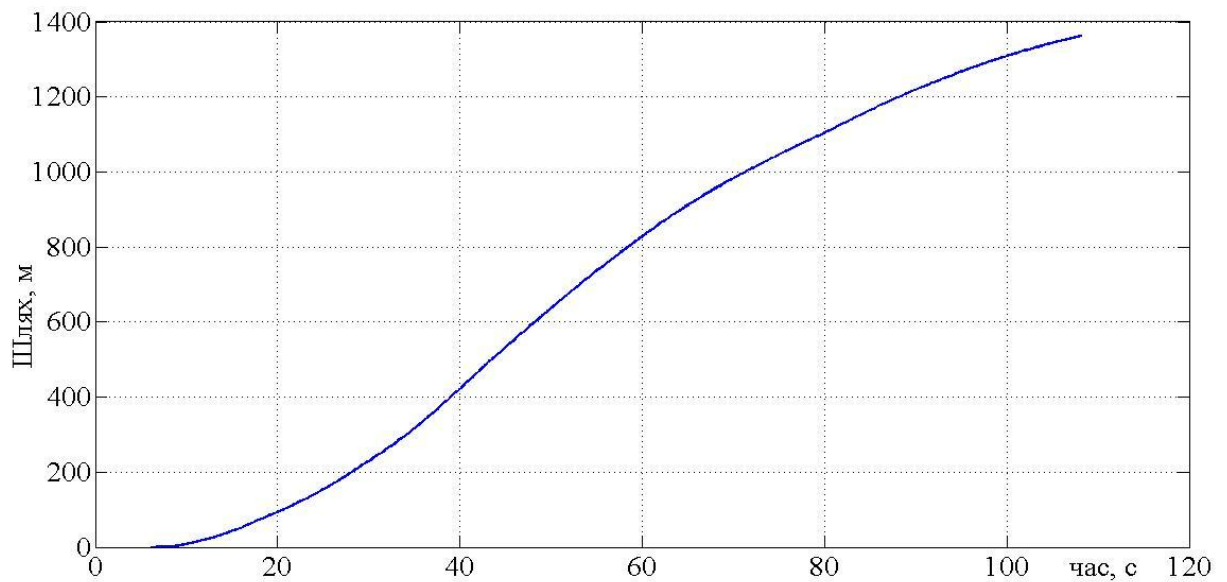


Рисунок 6.9 – Залежність шляху від часу розгону й вибігу автомобіля КрАЗ-6322

На рис. 6.10 наведено графік зміни лінійної швидкості від часу розгону й вибігу вантажного автомобіля КрАЗ-5233.

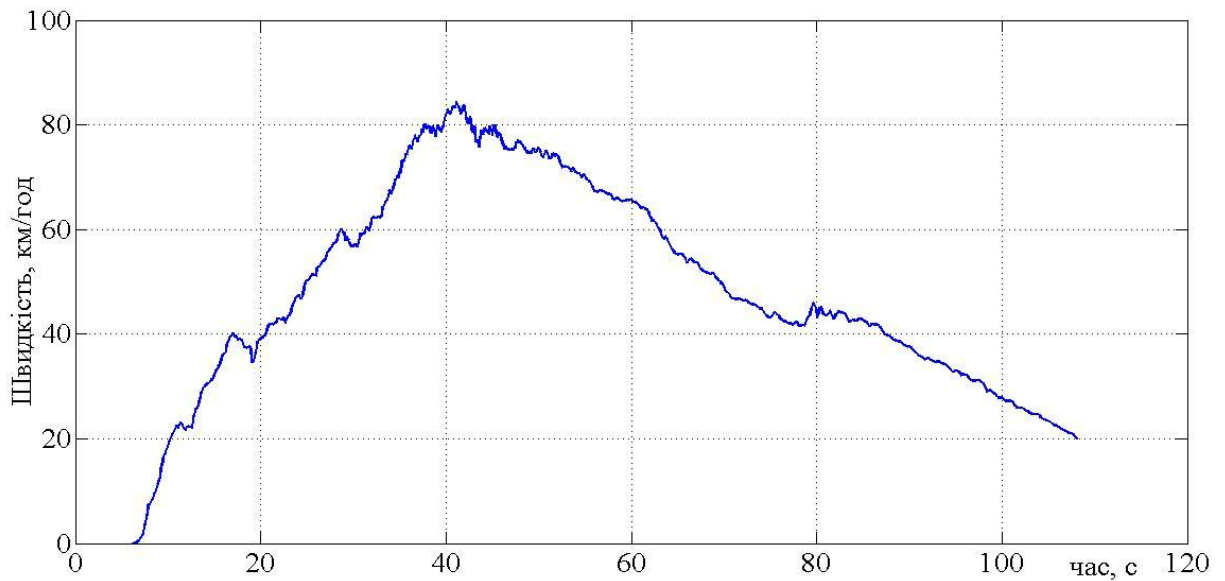


Рисунок 6.10 – Залежність швидкості від часу розгону й вибігу автомобіля КрАЗ-6322

Аналіз графіків поздовжнього прискорення вантажних автомобілів КрАЗ під час розгону та вибігу показує:

максимальне значення прискорення для КрАЗ-5233 становить  $2,2 \text{ м/с}^2$ , для КрАЗ-6322 –  $5,2 \text{ м/с}^2$ ;

загальний діапазон зміни прискорення дорівнює  $4,5 \text{ м/с}^2$ , коливаючись від  $-2,3 \text{ м/с}^2$  до  $2,2 \text{ м/с}^2$ ;

час розгону до швидкості  $82 \text{ км/год}$  складає  $38 \pm 1 \text{ с}$  для КрАЗ-5233 та  $41 \pm 1 \text{ с}$  для КрАЗ-6322.

## 6.7 Порівняльний аналіз експериментальних даних щодо визначення ефективної роботи двигуна внутрішнього згорання вантажного автомобіля КрАЗ з теоретичними

Потужність і роботу двигуна при русі автомобіля визначимо за методом після вибігу, запропонованого авторами роботи [81]. Розмір кроку  $\Delta t$  слід вибрати таким чином, щоб зміна параметрів опору руху автомобіля, що залежать від швидкості, були незначні. Таким чином, рівняння суми парціальних прискорень ми розгорнемо в систему трьох нелінійних рівнянь,

невідомими в яких будуть коефіцієнти  $a_1, a_2, a_3$

$$V_{a1} = -a_1 - a_2 V_{a1} - a_3 V_{a1}^2 \text{ — для часу } t_1; \quad (6.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{a2} = -a_1 - a_2 V_{a2} - a_3 V_{a2}^2 \text{ — для часу } t_2; \\ V_{a3} = -a_1 - a_2 V_{a3} - a_3 V_{a3}^2 \text{ — для часу } t_3. \end{array} \right. \quad (6.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{a2} = -a_1 - a_2 V_{a2} - a_3 V_{a2}^2 \text{ — для часу } t_2; \\ V_{a3} = -a_1 - a_2 V_{a3} - a_3 V_{a3}^2 \text{ — для часу } t_3. \end{array} \right. \quad (6.3)$$

Прискорення автомобіля описується як сума парціальних прискорень, які формують члени степеневого ряду за значеннями швидкості руху. Якщо при вирішенні системи рівнянь (6.1) – (6.3) виявиться, що параметри  $a_1, a_2, a_3$  залежать від швидкості, то, в подальшому, шляхом апроксимації отриманих залежностей стане можливим або уточнити показники ступеня при  $V_a$ , або описати парціальне прискорення, що розглядається більш складнішою залежністю.

Для визначення залежностей коефіцієнтів  $a_1, a_2, a_3$  від швидкості необхідно приймати середнє значення швидкості  $V_a$  на інтервалі  $[t_1; t_3]$ , тобто

$$V = \frac{V_{a1} + V_{a2} + V_{a3}}{3} \quad (6.4)$$

При вибігу з вимкненим зчепленням (відключеним двигуном)  $\delta_{об} = 1,03$  (вираз 6.1). Рішення системи рівнянь (6.1) – (6.3) дозволяє визначити зазначені коефіцієнти  $a_1, a_2, a_3$ .

Визначивши в процесі вибігу автомобіля параметри  $a_1, a_2, a_3$ , які відповідають реальній швидкості  $V_a$ , і внівши їх у пам'ять комп'ютера, можна в подальшому визначати потужність двигуна при русі автомобіля.

Варто відзначити, що застосування запропонованого методу дозволяє оцінювати напрацювання автомобіля на основі виконаної двигуном роботи, що спрощує та підвищує точність оцінки надійності транспортних засобів. Емпірично отримані значення поздовжніх лінійних прискорень вантажного автомобіля КрАЗ-6322 були використані для визначення потужності двигуна під час вибігу. Зміни потужності двигуна залежно від швидкості руху автомобіля наведені на рис. 6.11.

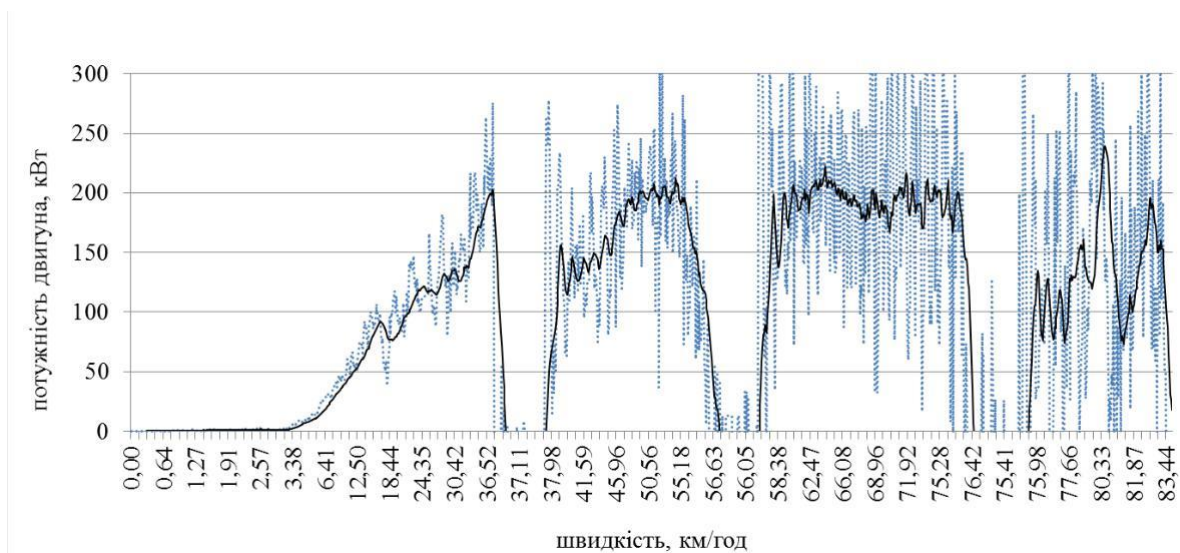


Рисунок 6.11 – Залежність потужності двигуна автомобіля КрАЗ-6322 від швидкості руху

використовуючи вираз та емпірично визначені значення потужності ДВЗ вантажного автомобіля КрАЗ-6322, обчислимо його ефективну роботу  $A_e$  та порівняємо з теоретично отриманими даними. На рис. 6.12 наведена гістограма значень ефективної роботи ДВЗ  $A_e$  на різних передачах, що отримана теоретично та емпірично для вантажного автомобіля КрАЗ-6322

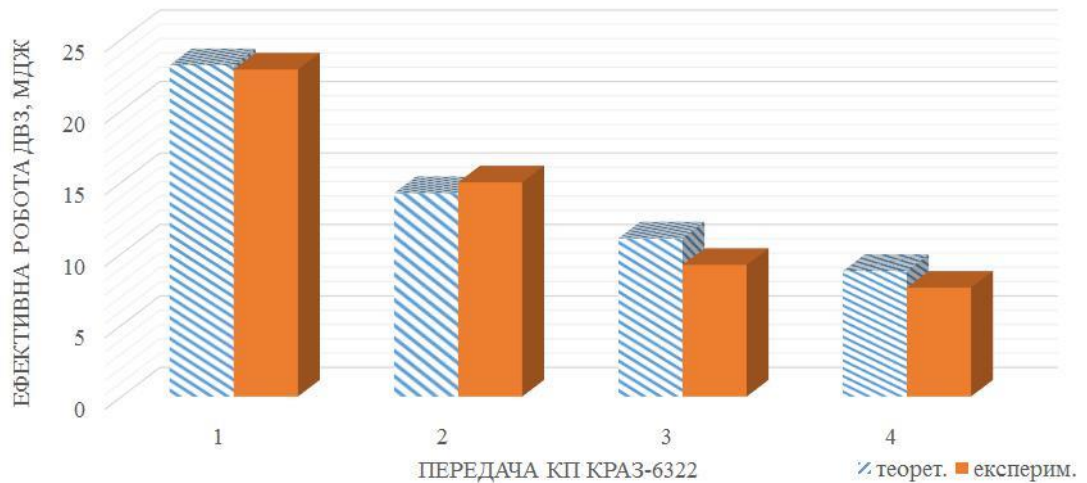


Рисунок 6.12 – Гістограма значень ефективної роботи ДВЗ  $A_e$  на різних передачах, що отримана теоретично та емпірично для вантажного автомобіля КрАЗ-6322

Аналіз гістограми ефективної роботи ДВЗ  $A_e$  на різних передачах вантажного автомобіля КрАЗ-6322, побудованої за теоретичними та експериментальними даними (рис. 6.12), показує, що похибка коливається від 1,3 % на першій передачі до 16,8 % на третій. Це підтверджує адекватність запропонованої моделі та правильність проведення експериментальних досліджень.

## 6.8 Порівняльні експериментальні дослідження енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів з механічною, комбінованою та електричною енергетичною установкою.

6.8.1. Мета та завдання експериментальних досліджень  
 Мета дослідження полягає в емпіричній оцінці енергетичної ефективності та

динамічних характеристик автомобілів з різними типами енергетичних установок, а саме:

- перевірити теоретичні положення щодо визначення витрат енергії на розгін автомобілів;
- дослідити динамічні властивості автомобілів з різними енергетичними системами.

6.8.2. Об'єкт експериментальних досліджень  
У ході експерименту були використані легкові автомобілі різних типів енергетичних установок:

- автомобіль з традиційною механічною установкою – Toyota Corolla;
- автомобіль з комбінованою (гібридною) установкою – Toyota Prius;
- автомобіль з електричною установкою – Daewoo Electro (див. рис. 6.13).



а



б



в

а – легковий автомобіль Toyota Corolla з механічною енергетичною установкою;

б – легковий автомобіль Toyota Prius з комбінованою енергетичною установкою;

в – легковий автомобіль Daewoo Electro з електричною енергетичною установкою;

## Рисунок 6.13 – Легкові автомобілі з різною енергетичною установкою

На час проведення експерименту пробіг легкових автомобілів складав такі значення, які наведені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Значення пробігу легкових автомобілів на момент проведення експериментальних досліджень

Марка автомобіля	Toyota Corolla	Toyota Prius	Daewoo Electro
Пробіг, км	2748	1366	1215

### 6.8.3 Умови та місце проведення експериментальних досліджень

Експериментальні випробування були проведені у вересні 2025 року в місті Хмельницькому. Дослідження виконувалися на горизонтальній ділянці дороги з рівним і твердим асфальтобетонним покриттям. Рух іншого транспорту під час експерименту був мінімальним. Поздовжні та поперечні ухили ділянки не перевищували 1,5 %.

Перед початком випробувань двигуни, агрегати трансмісії та ходова частина автомобілів були прогріті. Шини автомобілів були чистими, з протектором, що мав знос не більше 4 %.

Для фіксації параметрів руху використовувався мобільний вимірювально-реєстраційний комплекс (МВРК), який було описано раніше. Місця розташування акселерометрів на автомобілях та сам вимірювальний комплекс представлені на рисунку 6.14.

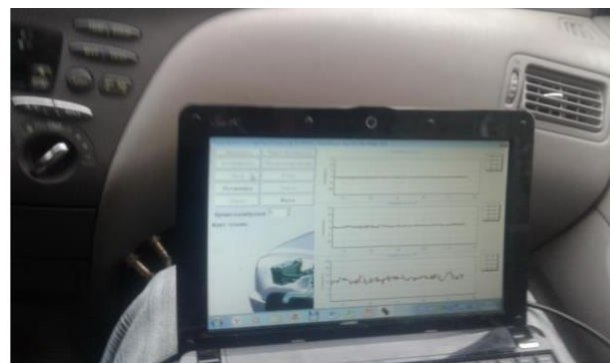


Рисунок 6.14 – Місця встановлення акселерометрів на автомобілях та вимірювальний комплекс

Під час руху легкових автомобілів проводилась реєстрація наступних параметрів: лінійних прискорень у поздовжньому, поперечному та вертикальному напрямках ( $\text{м/с}^2$ ), часу руху (с), швидкості автомобіля ( $\text{м/с}$ ) та пройденого шляху після вибігу (м).

Запис показань датчиків прискорень здійснювався безперервно за допомогою спеціальної програми, яка забезпечувала одночасну фіксацію даних, їх збереження на жорсткому диску ПЕОМ та візуалізацію процесу експерименту.

Лінійні прискорення визначалися мобільним вимірювально-реєстраційним комплексом, а лінійну швидкість – згідно з методикою вимірювань. Похибка визначення прискорень не перевищувала 4 % (з яких 1 % становила паспортна точність акселерометрів і до 3 % – похибка кріплення датчиків).

Динамічні характеристики та енергетичну ефективність легкових автомобілів з різними типами енергетичних установок оцінювали штатні технічні фахівці та члени робочої групи за показниками контрольно-вимірювальних пристроїв і МВРК.

6.8.4. Результати порівняльних експериментальних досліджень  
В цьому розділі наведено результати порівняльної оцінки енергетичної ефективності та динамічних властивостей автомобілів з механічною, комбінованою та електричною енергетичною установкою.

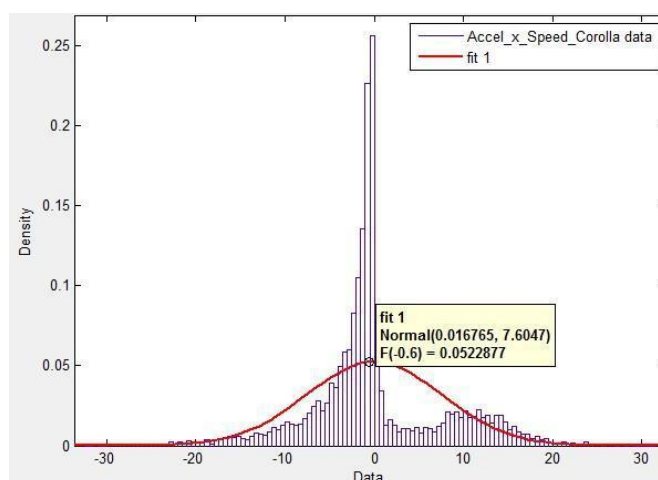


Рисунок 6.15 – Результати експериментальних досліджень автомобіля з механічною енергетичною установкою – Toyota Corolla

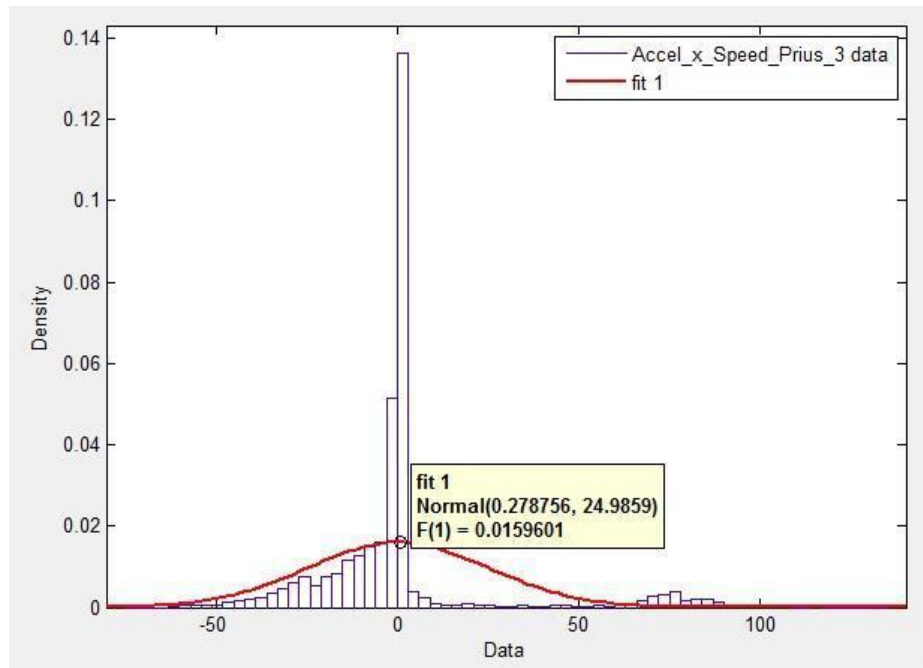


Рисунок 6.16 – Результати експериментальних досліджень автомобіля з комбінованою енергетичною установкою – Toyota Prius

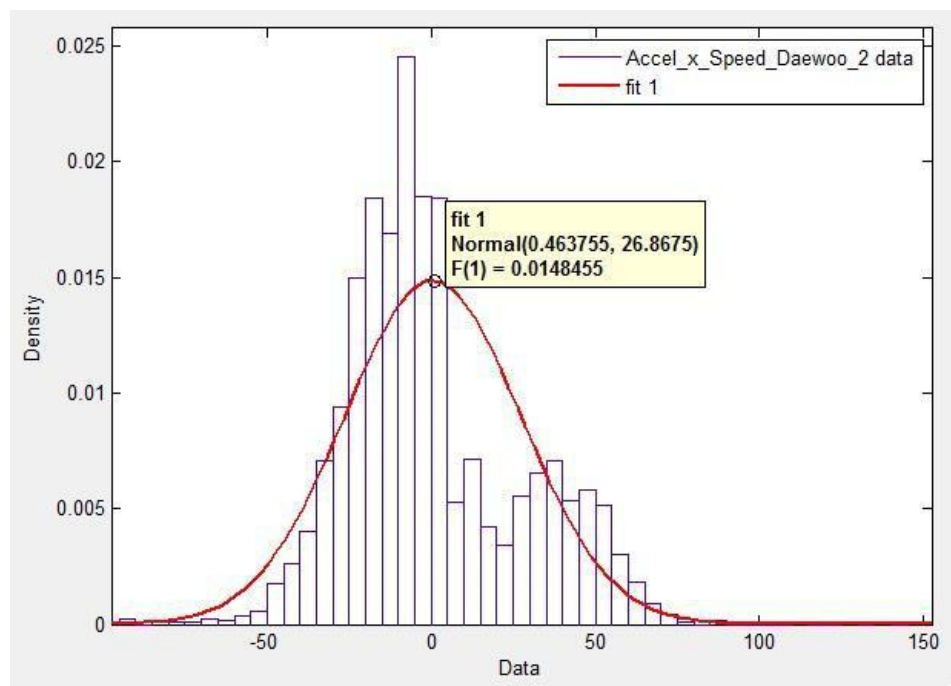


Рисунок 6.17 – Результати експериментальних досліджень автомобіля з електричною енергетичною установкою – Daewoo Electro

Аналіз даних, представлених на рис. 6.15 – 6.17, показує, що добуток прискорення на швидкість автомобілів приймає такі максимальні значення: Toyota Corolla – 0,052; Toyota Prius – 0,015; Daewoo Electro – 0,014.

Найменше значення цього показника свідчить про кращі динамічні характеристики розгону, що відзначається у автомобіля з електричною енергетичною установкою. У той же час, автомобіль з механічною енергетичною установкою демонструє гіршу динаміку, що обумовлено більшими непродуктивними енергетичними втратами під час розгону.

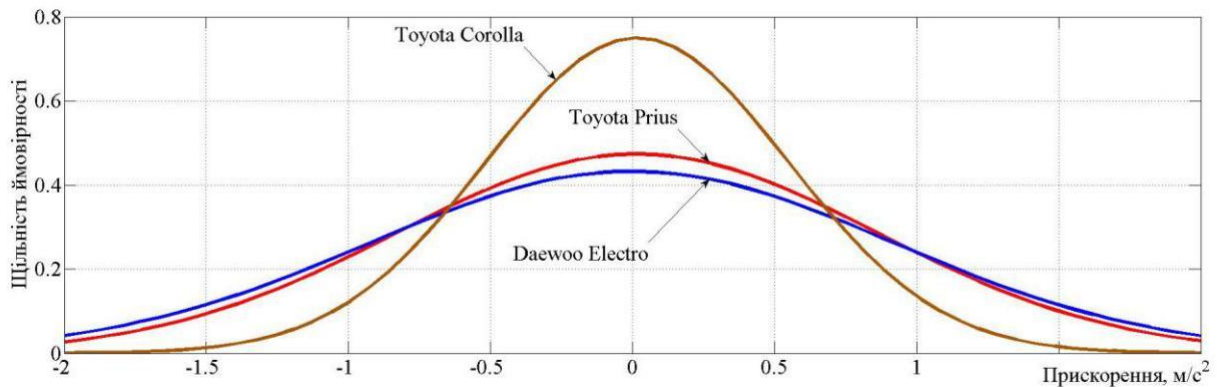


Рисунок 6.18 – Результати статистичної обробки експериментальних досліджень автомобілів: з механічною енергетичною установкою – Toyota Corolla; з комбінованою енергетичною установкою – Toyota Prius; з електричною енергетичною установкою – Daewoo Electro

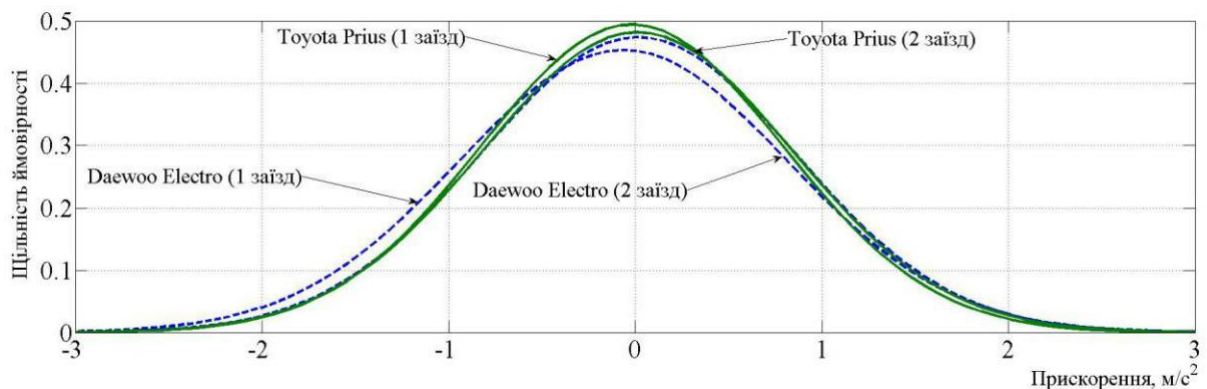


Рисунок 6.19 – Результати експериментальних досліджень автомобілів: з комбінованою енергетичною установкою – Toyota Prius; з електричною енергетичною установкою – Daewoo Electro

Результати експериментальних досліджень, наведені на рис. 6.19, свідчать, що краща динаміка розгону автомобіля спостерігається при меншій кривизні графіка та більшому діапазоні значень прискорень. Крива, що описує розгін автомобіля з комбінованою енергетичною установкою, за формою та величинами наближається до кривої автомобілів з електричною енергетичною установкою, які демонструють найвищу ефективність прискорення.

## Висновки за розділом

Експериментальні дослідження динамічних характеристик вантажних автомобілів під час розгону та вибігу дозволили оцінити зміни прискорення, пройденого шляху та швидкості в залежності від часу. За результатами випробувань встановлено, що максимальні значення прискорення становлять: для КрАЗ-5233 –  $2,2 \text{ м/с}^2$ , для КрАЗ-6322 –  $5,2 \text{ м/с}^2$ ; діапазон змін прискорення складає  $4,5 \text{ м/с}^2$ , варіюючи від  $-2,3 \text{ м/с}^2$  до  $2,2 \text{ м/с}^2$ . Розгін до максимальної швидкості  $82 \text{ км/год}$  здійснюється за  $38 \pm 1 \text{ с}$  для КрАЗ-5233 та за  $41 \pm 1 \text{ с}$  для КрАЗ-6322.

Емпірично отримані дані про прискорення дозволяють оцінювати динамічні властивості автомобілів. Використання методу парціальних прискорень дало змогу визначити залежність потужності двигуна від швидкості руху при інтенсивному розгоні на різних передачах, а також ефективну роботу автомобілів на горизонтальній ділянці.

Теоретичні положення щодо енергетичних витрат на розгін вантажних автомобілів КрАЗ підтверджено. Порівняння теоретичних та експериментальних значень ефективної роботи ДВЗ Ае для КрАЗ-6322 показало похибку від  $1,3\%$  на першій передачі до  $16,8\%$  на третій, що свідчить про адекватність моделі та правильність проведених вимірювань.

Результати порівняльних досліджень ефективності та динаміки автомобілів із різними енергетичними установками показали, що розгін та динаміка автомобілів з електричною або комбінованою установкою перевищують показники машин з механічною установкою, що пояснюється більшими непродуктивними втратами при розгоні автомобілів із механічним приводом.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Результати проведених досліджень свідчать про наступне: Аналіз сучасних наукових робіт з динаміки та енергетичної ефективності автомобілів показав, що використання комбінованих енергетичних установок дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики транспортних засобів відповідно до сучасних стандартів.

Розроблено три варіанти конструкцій комбінованої енергетичної установки (КЕУ), які сприяють зменшенню додаткових енергетичних втрат під час руху, зниженню шуму та покращенню маневреності автомобіля. Крім того, вони спрощують реалізацію безпілотного керування. Запропоновані схеми можуть застосовуватися як при проектуванні нових автомобілів, так і при модернізації існуючих зразків.

Запропонований метод оцінки ефективної роботи двигуна внутрішнього згоряння при розгоні на різних передачах показав, що з підвищенням передаточного числа трансмісії ефективна робота двигуна зростає.

Експериментальні дослідження енергетичних витрат на розгін вантажного автомобіля КрАЗ-6322, виконані за методом парціальних прискорень, показали, що різниця між експериментальними та теоретичними даними коливається від 1,3 % (на першій передачі) до 16,8 % (на третій передачі), що підтверджує високу точність обраного підходу.

Модифікація відомого методу визначення оптимальної «динамічної» швидкості руху дозволила встановити раціональний закон зміни прискорення автомобіля залежно від його швидкості. Використання цього закону забезпечує розгін від початкової до кінцевої швидкості з мінімальними витратами потужності двигуна.

Застосування безступінчастих трансмісій дозволяє економити енергію двигуна за рахунок роботи ДВЗ у постійному швидкісному режимі з підвищенням ефективної потужності від мінімального до максимального значення. Завдяки відсутності додаткових витрат на розгін обертових мас двигуна економія енергії становить: для легкових автомобілів – від 3,8 % до 5,8 %, для вантажних автомобілів 4-го класу – 5,5 %, для вантажних автомобілів 5-го класу – 16,5 %.

Використання запропонованого показника – коефіцієнта непродуктивних витрат енергії  $\eta_{\Delta W}$ , що є відношенням додаткових витрат енергії до роботи сил зовнішнього опору руху, дозволило визначити таке: коефіцієнт  $\eta_{\Delta W}$ , який враховує вплив нерівномірності крутного моменту ДВЗ й тягової сили на ведучих колесах, для існуючих двигунів у межах  $\eta_{\Delta W} = 2,31$  (при числі циліндрів  $i_{\text{ц}} = 1$ ) до  $\eta_{\Delta W} = 0,204$  (при  $i_{\text{ц}} = 12$ ); застосування комбінованої енергетичної установки дозволяє знизити  $\eta_{\Delta W}$ , наприклад, при  $i_{\text{ц}} = 6$ , від 0,396 до 0,158 при співвідношенні крутних моментів, що створюються електричним і механічним приводами, рівному  $K_{\text{ед}} = 0,6$ ; при електричному приводі ведучих коліс  $\eta_{\Delta W} = 0$ .

При розробці автомобілів із комбінованою енергетичною установкою (КЕУ) слід враховувати поздовжню податливість ходової частини, яка характеризується відношенням колової частоти вільних поздовжніх коливань до колової частоти коливань крутного моменту.

Аналіз взаємозв'язку показників динамічності автомобіля з КЕУ для різних режимів її роботи показав, що при використанні електричної енергії від генератора для приводу електродвигунів коліс розгін транспортного засобу відбувається повільніше порівняно з режимом живлення від акумуляторних батарей.

Запропонований метод оцінювання економії енергії автомобіля з комбінованою енергетичною установкою для сталого руху дозволив при ККД трансмісії  $\eta_{\text{тр}} = 0,8$ , ККД зарядки акумуляторів  $\eta_{\text{зар}} = 0,9$  й ККД електроприводу  $\eta_{\text{ел.п}} = 0,9$  отримати такі результати: відносне зниження енергії, що витрачається на сталий рух, знаходиться в межах від 18 % до 70 (менше значення для  $i_{\text{ц}} = 12$ , а більше – для  $i_{\text{ц}} = 1$ ); для легкових автомобілів ( $i_{\text{ц}}$  від 3 до 6) вказана економія може складати 29 % – 44 %; для вантажних автомобілів ( $i_{\text{ц}}$  від 6 до 8) відносна економія енергії складає 24 %–29%. Застосування комбінованої енергетичної установки (КЕУ) розширює можливості оптимального керування як окремим автомобілем, так і колонною рухом. На відміну від традиційних методів маневру «крабом», КЕУ дозволяє виконувати цей маневр із неповоротними задніми колесами. Крім того, у рухомих колонах КЕУ забезпечує підвищену маневреність за рахунок використання безпілотних автомобілів з мінімальною дистанцією між ними. Результати експериментів щодо енергетичної ефективності

та динаміки автомобілів із різними енергетичними установками показали, що прискорення, а отже і динаміка розгону автомобілів з електричною та комбінованою установками перевищує відповідні показники автомобілів з механічною установкою, що пояснюється меншими непродуктивними втратами енергії під час розгону.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Покращення тактико-технічних властивостей засобів транспорту при русі в колоні: монографія / Подригало М. А., Полянський О. С., Кайдалов О. та ін. – Харків : Національна акад. НГУ, 2016. – 281 с.
2. Динаміка колісних машин: монографія / Подригало М. А., Клец Д.М., Кайдалов Р. О. та ін. – Харків : Національна акад. НГУ, 2018. – 185 с.
3. Подригало М. А. Маневреність та керованість автомобільних колон внутрішніх військ МВС України. Визначення понять та критерії оцінювання / М. А. Подригало, Р. О. Кайдалов, А. І. Нікорчук // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. – Харків : АВВ МВСУ, 2012. – Вип. 2(20). – С. 74 – 76.
4. Подригало М. А. Визначення раціональної швидкості руху військових автомобільних колон при подоланні небезпечної ділянки дороги / М. А. Подригало, В. В. Глущенко, Р. О. Кайдалов, А. І. Нікорчук // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – Харків : НА НГУ, 2015. – Вип. 1(25). – С. 26 – 30.
5. Кайдалов Р. О. Анализ путей улучшения эксплуатационных характеристик элементов приводных агрегатов автомобилей повышенной проходимости ПАО «АвтоКРАЗ» / Р. О. Кайдалов, С. В. Дунь, П. Н. Калинин // Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. № 35 (1144). – С. 61 – 66.
6. Кайдалов Р. О. Дослідження кінематики і динаміки гібридного електромеханічного приводу ведучого колеса автомобіля / Р. О. Кайдалов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. № 23 (1195). – С. 59 – 64.
7. Кайдалов Р. О. Дослідження можливості зниження енергетичних втрат автомобіля при використанні гібридного електромеханічного приводу ведучих коліс / Р. О. Кайдалов // Системи обробки інформації. – Харків : ХУПС, 2016. – Вип. № 9. – С. 13 – 17.

8. Подригало М. А. Застосування комбінованого способу керування для здійснення руху автомобіля «крабом» / М. А. Подригало, О. О. Бобошко, О. Кайдалов, А. І. Нікорчук // Вісник Харківського Національного автомобільно-дорожнього університету. – Харків : ХНАДУ, 2016. – Вип. № – С. 134 – 138.

9. Кайдалов Р. О. Оцінка впливу нерівномірності крутного моменту ДВЗ на додаткові втрати енергії при використанні гібридного електромеханічного приводу ведучих коліс / Р. О. Кайдалов // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. №1. – С. 50 – 58.

10. Подригало М. А. Оцінка динамічних властивостей й енергетичної економічності автомобілів з безступінчастою автоматичною трансмісією / М.А. Подригало, Р. О. Кайдалов, О. М. Жовтоног // Наукові нотатки. – Луцьк ЛНТУ, 2017. – Вип. 57. – С. 152 – 160.

11. Кайдалов Р. О. Оцінка енергетичної ефективності застосування електричної трансмісії колісної машини / Р. О. Кайдалов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – Вип. № 25 (1247). – С. 86 – 89.

12. Кайдалов Р. О. Забезпечення стійкості положення гібридних автомобілів з трансформерною ходовою частиною / Р.О. Кайдалов // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – Луцьк : ЛНТУ, 2017. – Вип. 2. – С.50–57.

13. Кайдалов Р. О. Оцінка економії енергії гібридного автомобіля при сталому русі / Р. О. Кайдалов, М. А. Подригало // Механіка машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – Вип. 1. – С. 98 – 105.

14. Подригало М. А. Спосіб підвищення маневреності колісних автомобілів та бойових машин / М. А. Подригало, Р. О. Кайдалов, А. І. Нікорчук // Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах: тези доп. 15 наук.-техн. конф., Чернігів, 17 – 18 верес. 2015р. – Чернігів : ДНВЦ ЗСУ, 2015. – С.136 – 138.

15. Кайдалов Р. О. Застосування фізичної моделі складного руху для оцінки динамічних властивостей автомобільної колони / Р. О. Кайдалов // Новітні шляхи створення, технічної експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів:

тези доп. наук.-практ. конф., Одеса, 08 – 11 верес. 2015 р. – Одеса : Військова академія, 2015. – С. 90 – 91.

16. Подригало М. А. Метод визначення раціональної швидкості руху військових автомобільних колон при подоланні небезпечної ділянки дороги М. А. Подригало, Р. О Кайдалов, А. І. Нікорчук // Новітні технології – для захисту повітряного простору : тези доп. 11 наук. конф., Харків, 08 – 09 квіт. 2015 р. – Харків : ХУПС, 2015. – С. 259 – 260.

17. Кайдалов Р. О. Оцінка зміни парку автомобілів та бойових машин Національної гвардії України та шляхи його удосконалення / Р. О Кайдалов // Новітні технології – для захисту повітряного простору : тези доп. 11 наук. конф., Харків, 08 – 09 квіт. 2015 р. – Харків : ХУПС, 2015. – С. 260 – 261.

18. Кайдалов Р. О. Експериментальні дослідження показників динамічності броньованих автомобілів при визначальних відомчих випробуваннях / Р. О Кайдалов, Ю. В. Тарасов, Г. М. Маренко, О. В. Літвінов, Д. В. Абрамов // Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах : тези доп. 16-ї наук.-техн. конф., Чернігів, 08 – 09 верес. 2016 р. – Чернігів : ДНВЦ ЗСУ, 2016. – С.109 – 110.

19. Подригало М. А. Гібридна трансмісія для базового шасі колісної військової техніки / М. А. Подригало, Р. О Кайдалов, А. І. Нікорчук // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ : тези доп. міжн. наук.-техн. конф., Львів, 18 – 20 трав. 2016 р. – Львів : НАСВ, 2016. – С. 51.

20. Черняк Р. Є. Модернізація броньованих автомобілів КрАЗ за результатами заводських, визначальних відомчих та експлуатаційних випробувань / Р. Є. Черняк, С. В. Дунь, Р. О. Кайдалов // Новітні шляхи створення, технічної експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів : тези доп. наук.-практ. конф., Одеса, 22 – 23 верес. 2016 р. – Одеса : Військова академія, 2016. – С. 189 – 192.

21. Подригало М. А. Конструктивна схема гібридної трансмісії базового шасі колісної військової техніки / М. А. Подригало, Р. О Кайдалов, А. І.

Нікорчук // Новітні технології – для захисту повітряного простору: тези доп. 12-ї наук. конф., Харків, 13 – 14 квіт. 2016 р. – Харків : ХУПС, 2016. – С. 296.

22. Кайдалов Р.О. Перспективи застосування гібридного електро-механічного приводу ведучих коліс для військової колісної техніки Р. О. Кайдалов // Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки : матеріали IV міжнародної наук.-практ. конф. Київ, 12 – 13 жовт. 2016 р. – Київ : ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2016. – С.120 – 122.

23. Подригало М. А. Модернізація військової колісної техніки за рахунок використання гібридного електромеханічного приводу ведучих коліс М. А. Подригало, Р. О. Кайдалов // Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців : наук. пр. міжнародної наук.-практ. та наук.-метод. конф., Харків, 20 – 21 жовт. 2016 р. – Харків : ХНАДУ, 2016. – С. 156 – 157.

24. Подригало М. А. Експериментальні дослідження показників динамічності спеціалізованої техніки КрАЗ / М. А. Подригало, Р. О. Кайдалов, Р. Є. Черняк, С. В. Дунь, О. В. Літвінов // Новітні технології – для захисту повітряного простору : тези доп. 13-ї наук. конф., Харків, 12 – 13 квіт. 2017 р. – Харків : ХУПС, 2016. – С. 344.

25. Подригало М. А. Забезпечення раціонального розподілу нормального навантаження між осями автомобілів з електромеханічним приводом ведучих коліс / М. А. Подригало, Р. О. Кайдалов // Тринадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : Мат-ли симпозіуму. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2017. – С.115.

26. Подригало М. А. Результати експериментальних досліджень при оцінюванні показників динамічності спеціалізованої колісної техніки КрАЗ М.А. Подригало, Р. О. Кайдалов, О. В. Літвінов, Р. Є. Черняк, С. В. Дунь / Наукове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України : тези доп. VII наук.-практ. конф. Харків, 30 берез. 2017 р. – Харків: НА НГУ, 2017. – С. 85 – 86.

27. Подригало М. А. Оцінка динамічних властивостей й енергетичної економічності військової колісної техніки з безступінчастою автоматичною трансмісією / М. А. Подригало, Р. О. Кайдалов // Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки : тези доп. всеукр. наук.-техн. конф., Вінниця, 17 – 19 трав. 2017 р. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – С. 245 – 250.

28. Подригало М. А. Експериментальні дослідження показників динамічності спеціалізованої колісної техніки КраЗ / М. А. Подригало, Р. О. Кайдалов, Р. Є. Черняк, С. В. Дунь, О. В. Літвінов // Новітні технології – для захисту повітряного простору : тези доп. XIII наук. конф., Харків, 12 – 13 квіт. 2017 р. – Харків : ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2017. – С. 344.

29. Кайдалов Р. О. Оцінка додаткових втрат енергії для комбінованого електромеханічного приводу ведучих коліс автомобіля / Р. О. Кайдалов, М. А. Подригало // Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців : наук. пр. міжнародної наук.-практ. конф., Харків, 19 – 20 жовт. 2017 р. – Харків : ХНАДУ, 2017. – С. 169 – 170.

30. Кайдалов Р. О. Оцінка показників динамічності спеціалізованої колісної техніки КраЗ / Р.О. Кайдалов, О. В. Літвінов // Особливості викладання фахових дисциплін технічних спеціальностей – виклики часу та перспективи: матеріали наук. метод. конф., Харків, 23 берез. 2017 р. – Харків ХНАДУ, 2017. – С. 54 – 61.

31. Подригало М. А. Оцінка динамічних властивостей й енергетичної економічності військової колісної техніки з безступінчастою автоматичною трансмісією / М. А. Подригало, Р. О. Кайдалов // Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки : матеріали всеукр. наук.-техн. конф., Вінниця, 17 – 19 трав. 2017 р. – Вінниця ВНТУ, 2017. – С. 245 – 250.

32. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика. О. В. Бажинов, О. П. Смирнов, С.А. Серіков, В.Я. Двадненко. Харків: Вид-во ХНАДУ, 2011. 236 с.

33. Гібридні автомобілі. О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, А.В. Гнатов, А.В. Колесніков. Харків: Вид-во ХНАДУ, 2008. 327 с.

34. Волков В. П. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля. В. Волков. Харків: ХНАДУ, 2003. 292 с.
35. Бажинов О.В. Конверсія легкового автомобіля в гібридний. О.В. Бажинов, В.Я. Двадненко, М. Хакім. Харків: ХНАДУ, 2014. 160 с.
36. Смирнов О. П. Характерні режими роботи гібридної силової установки автомобіля. О. П. Смирнов, В. І. Калмиков. Автомобільний транспорт: зб. наук. пр. Харків: РВВ ХНАДУ, 2006. Вип.18. С. 13 – 15.
37. Смирнов О. П. Шляхи вдосконалення гібридних силових установок автомобілів. О. П. Смирнов, О. І. Репницький. Вестник ХНАДУ, 2010. Вип. № 49. С. 26 – 28.
38. Гутиря С. С. Моделювання частотних характеристики планетарного колісного редуктора. С.С. Гутиря, В.П. Ягліньський, А.М. Чанчін. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць, 2013. Вип. №1 (975). С. 35 – 43.
39. Гутиря С. С. Форми і критерій пов'язаності коливань планетарного колісного редуктора. С. С. Гутиря, В. П. Ягліньський, А. М. Чанчін. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць, 2015. Вип. №35 (1144). С. 347 – 355.
40. А. Подригало, Н. П. Артёмов, Д. В. Абрамов, М.Л. Шуляк. Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць, 2015. Вип. №9 (1118). С. 98 – 107.
41. Бобошко А. А. Підвищення маневреності колісних тракторів і самохідних шасі: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.02. ХНАДУ. Харків, 2002. 19 с.
42. Подригало, Л. Греко, А. Бобошко. Машинознавство. Всеукраїнський щомісячний науково-технічний і виробничий журнал, 1999. Вип. №10. С.55-58.
43. Volvo Mean Green- найшвидший у світі гібридний вантажний автомобіль [Електронний ресурс]. Дата оновлення: 08.05.2012. URL: <http://cikavosti.com/volvo-mean-green-nayshvidshiy-u-sviti-gibridniy-vantazhniy-avtomobil> (дата звернення: 27.09.2015).

44. Вимірювально-реєстраційний комплекс для випробувань мобільних машин і їх елементів ВДВММ 4.001. Паспорт, 2014. 4с.

45. Коробко А. І. Удосконалення методів та метрологічного забезпечення проведення динамічних випробувань автомобілів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.01.02 «Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення». А. І. Коробко. Харків, 2013. 20 с.

46. Подригало М. А. Метрологічне забезпечення динамічних випробувань тягово-транспортних машин. М. А. Подригало, А. І. Коробко, М. Клец, В. І. Гацько. Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. Тракторна енергетика в рослинництві, 2009. Вип. №89. С. 87 – 89.

47. Клец Д. М. Градуировка акселерометров методом постоянного ускорения. Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво), 2012. Вип.2 (32), Т. 1. С. 87 – 92.

48. Артёмов М. П. Динамічні випробування датчиків прискорень на лабораторному вібростенді. М. П. Артёмов, Д. М. Клец. Вібрації в техніці та технологіях, 2012. Вип. № 2 (66). С. 5 – 9.

49. Кондратенко О. П. Гібридні модульні конструкції спеціальних машин для внутрішніх військ МВС України. О.П. Кондратенко, Г.М. Маренко, Р.О. Кайдалов. Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України, 2010. Вип. 2(16). С. 23 – 28. 2р.

50. Дунь С. В. Розвиток модельного ряду броньованих автомобілів КраЗ. С. В. Дунь, Р. О. Кайдалов. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: тези доп. міжн. наук.-техн. конф., Львів, 14 – 15 травня 2015 р. НАСВ, 2015. С. 30 – 31.

51. Подригало М. А. Система підвищення маневреності вантажного автомобіля. М. А. Подригало, Р. О. Кайдалов, С. В. Дунь, А. І. Нікорчук. Новітні шляхи створення, технічної експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів: тези доп. наук.-практ. конф. Одеса, 08 – 11 вересня 2015 р. Військова академія, 2015. С. 189 – 192.

52. Кайдалов Р.О. Результати державних випробувань спеціалізованого броньованого автомобіля «Козак-001». Р. О Кайдалов, Г.М. Маренко, Е.М. Полтавський, А.І. Нікорчук, О.В. Літвінов. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: тези доп. міжн. наук.-техн. конф., Львів, 18 – 20 травня 2016 р. НАСВ, 2016. С. 38.

53. Черняк Р. Є. Результати випробувань броньованих автомобілів КраЗ. Р. Є. Черняк, С.В. Дунь, Р.О Кайдалов. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: тези доп. міжн. наук.-техн. конф., Львів, 18 – 20 травня 2016 р. НАСВ, 2016. С. 64.

54. Кайдалов Р.О. Оцінювання показників динамічності спеціалізованої колісної техніки сил охорони правопорядку при приймальних випробуваннях. Р.О. Кайдалов, О. В. Літвінов. Наукове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: тези доп. VII наук.-практ. конф. Харків, 31 березня 2016 р. НА НГ України, 2016. С.57 – 58.

55. Подригало М.А. Вплив пробігу автомобіля на його тягові властивості. Визначення коефіцієнта падіння потужності на ведучих колесах автомобіля. М.А. Подригало, Р.О. Кайдалов, А.І. Нікорчук. Наукове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: тези доп. VII наук.-практ. конф. Харків, 31 березня 2016 р. НА НГ України, 2016. С. 112 – 113.

56. Черняк Р.Є. Постановка на озброєння НГУ зразків військової автомобільної техніки КраЗ. Р. Є. Черняк, С. В. Дунь, Р. О. Кайдалов. Нікорчук. Наукове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: тези доп. VII наук.-практ. конф. Харків, 31 березня 2016 р. НА НГ України, 2016. С. 153 – 154.

57. Кайдалов Р. О. Оцінка показників динамічності броньованих автомобілів при визначальних випробуваннях. Р. О. Кайдалов, О. В. Літвінов. Актуальні питання матеріально-технічного забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: тези доп. наук.-практ. конф. Харків, 27 жовтня 2016 р. НА НГ України, 2016. С. 55 – 56.

58. Черняк Р. Є. Перспективні шляхи модернізації броньованих автомобілів КраЗ за результатами досвіду їх військової експлуатації та випробувань. Р. Є. Черняк, С. В. Дунь, Р. О. Кайдалов. Актуальні питання матеріально-технічного забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: тези доп. наук.-практ. конф. Харків, 27 жовтня 2016 р. НА НГ України, 2016. С. 131 – 132.

59. Черняк Р. Є. Досвід ремонту та модернізації військових автомобілів КраЗ за результатами їх експлуатації в умовах АТО. Р. Є. Черняк, С. В. Дунь, Р.О. Кайдалов, О. В. Калатинець. Актуальні питання матеріально-технічного забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: тези доп. наук.-практ. конф. Харків, 27 жовтня 2016 р. НА НГ України, 2016. С. 133 – 135.

60. Подригало М.А. Результати державних випробувань бойових колісних машин «Козак-001» та БТР-4К. М. А. Подригало, Р. О Кайдалов, А. І. Нікорчук, О.В. Літвінов. Новітні технології – для захисту повітряного простору: тези доп. 12 наук. конф., Харків, 13 – 14 квітня 2016 р. ХУПС, 2016. С. 295 – 296.

61. Подригало М.А. Визначення коефіцієнта падіння потужності автомобілів, які входять до складу військової автомобільної колони. М. А. Подригало, Р. О Кайдалов, Д. В. Абрамов, А. І. Нікорчук. Новітні технології – для захисту повітряного простору: тези доп. 12 наук. конф., Харків, 13 – 14 квітня 2016 р. ХУПС, 2016. С. 296.

62. Кайдалов Р.О. Оцінка показників динамічності броньованих автомобілів при визначальних випробуваннях. Р. О. Кайдалов, О. В. Літвінов. Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців: наукові праці міжн. наук.-практ. та наук.-метод. конф., Харків, 20 – жовтня 2016 р. ХНАДУ, 2016. С. 140.

63. Подригало М.А. Експериментальне визначення радіусу повороту військової автомобільної техніки при комбінованому способі керування поворотом. М. А. Подригало, Р. О. Кайдалов, А. І. Нікорчук. Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців: наукові праці

міжн. наук.-практ. та наук.-метод. конф., Харків, 20 – 21 жовтня 2016 р. ХНАДУ, 2016. С. 158.

64. Черняк Р.Є. Шляхи модернізації броньованих автомобілів КраЗ за результатами випробувань. Р. Є. Черняк, С. В. Дунь, Р. О. Кайдалов. Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців: наукові праці міжн. наук.-практ. та наук.-метод. конф., Харків, 20 – 21 жовтня 2016 р. ХНАДУ, 2016. С. 184 – 185.

65. Кайдалов Р.О. Оцінка показників динамічності броньованих автомобілів при випробуваннях. Р.О. Кайдалов, Д. В. Абрамов, Ю. В. Тарасов, Г.М. Маренко, О.В. Літвінов. Освітньо-наукове забезпечення діяльності правоохоронних органів і військових формувань України: тези ІХ Всеукраїнської наук.-практ. конф., Хмельницький, 8 грудня 2016 р. НА ДПС , 2016. С.543 – 544.

66. Кайдалов Р. О. Розроблення методів оцінювання показників спеціалізованої колісної техніки під час випробувань. Р. О. Кайдалов, О.В. Літвінов. Актуальні питання розвитку, удосконалення та експлуатації озброєння та військової техніки в Національній гвардії України: тези доп. наук.-практ. конф. Харків, 23 листопада 2017 р. НА НГ України, 2017. С. 30 – 31.

Методичні рекомендації до виконання та оформлення дипломних робіт для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» / Ю.І. Панцир, А.В. Рудь, В.І. Дуганець, В.І. Дуганець, Л.С. Шелудченко, С.М. Грушецький, С.П. Комарніцький. За ред. В.І. Дуганця. – Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2025. - 52с.