

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

В. І. Кубіч

**ГІБРИДНІ СИЛОВІ УСТАНОВКИ
ЛЕГКОВИХ АВТОМОБІЛІВ**

Навчальний посібник

Запоріжжя • НУ «Запорізька політехніка» • 2021

УДК 629.1.02:629.113
К 88

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного університету «Запорізька політехніка»
(Протокол № 8/21 від 01.03.2021 р.)*

Рецензенти:

Сахно В. П. – д.т.н., професор, завідувач кафедри автомобілів Національного транспортного університету м. Києва, академік Транспортної академії України, Заслужений працівник освіти України, Відмінник освіти України, Почесний працівник транспорту України.

Диха О. В. – д.т.н., професор, завідувач кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства Хмельницького національного університету.

Кубіч В. І.

К88 Гібридні силові установки легкових автомобілів : навчальний посібник. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 193 с.
ISBN 978-617-529-282-2

Навчальний посібник містить відомості про особливості компонування елементів гібридних силових установок з електричними, інерційними маховиковими, пневматичними накопичувачами енергії та їх застосування в конструкції легкових автомобілів. Частково розкриваються питання здійснення робочих процесів в трансмісії автомобіля з узгодженням видів енергій та потужностного балансу при його русі. Наведені деякі методи порівняльного аналізу гібридних силових установок.

Посібник призначений для студентів, магістрантів, аспірантів спеціальностей «Галузеве машинобудування» та «Автомобільний транспорт». Наведені свідчення можуть використовуватися співробітниками технічних служб, які працюють у галузі конструювання та експлуатації колісних ТЗ.

УДК 629.1.02:629.113

ISBN 978-617-529-282-2

© Кубіч В. І., 2021
© Національний університет
«Запорізька політехніка», 2021

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ.....	7
1 Терміни та їх визначення.....	10
2 Конструктивні схеми гібридних силових установок з використанням електричної енергії.....	17
2.1 Загальні положення.....	17
2.2 Класифікація гібридних систем.....	22
2.3 Послідовна схема гібридної силової установки.....	25
2.4 Паралельна схема гібридних силових установок.....	33
2.4.1 Типи паралельних гібридних трансмісій.....	39
2.4.2 Режими роботи паралельної схеми гібридної силової установки.....	41
2.4.3 Управління потоками потужності в паралельних гібридних силових установках.....	41
2.5 Послідовно-паралельна схема гібридної силової установки.....	43
2.6 Особливості конструкції транспортного засобу з мотор-генератором.....	51
2.7 Мотор-генератор гібридної силової установки.....	52
2.8 Акумуляторні батареї гібридних силових установок.....	56
2.9 Інвертори гібридних силових установок.....	59
2.10 Гібридні енергетичні силові установки квадріциклів...	63
2.10.1 Загальні відомості.....	63
2.10.2 Послідовна компонувальна схема гібридної енергетичної силової установки.....	67
2.10.3 Паралельна компонувальна схема гібридної енергетичної силової установки.....	69
3 Конструктивні схеми гібридних силових установок з використанням теплової енергії відпрацьованих газів.....	74
3.1 Гібридна силова установка компанії Honda.....	74
3.2 Гібридна силова установка фірми BMW.....	75
3.3 Гібридна силова установка конструкції ІрДТУ.....	77
4 Схеми гібридних силових установок з двигунами внутрішнього згорання в деклараційних документах на корисні моделі та винаходи.....	80
4.1 Гібридний автомобіль з двома двигунами внутрішнього згорання.....	80

4.2 Гібридний автомобіль з мехатронним накопичувачем енергії.....	85
4.3 Пристрій для перетворення силового агрегату автомобіля з розташованим поперечно двигуном внутрішнього згорання в гібридний силовий агрегат.....	87
4.4 Схема гібридного привода автомобіля.....	91
4.5 Комбінована енергетична установка гібридного автомобіля.....	95
5 Використання поршневого пневматичного двигуна у складі автомобільної гібридної силової установки.....	101
5.1 Загальні положення.....	101
5.2 Пневмодвигун для автомобільної гібридної силової установки.....	105
5.3 Гібридна силова установка з поршневим пневматичним двигуном.....	108
5.4 Силова установка гібридної мобільної машини з додатковою функцією пневматичного двигуна.....	113
5.5 Конвертація штатного ДВЗ в поршневий пневмодвигун.....	116
6 Гібридні силові установки з використанням інерційних маховикових накопичувачів енергії.....	121
6.1 Загальні відомості про інерційні маховикові накопичувачі енергії.....	121
6.2 Застосування інерційних накопичувачів енергії в конструкції автомобілів (історична довідка).....	122
6.3 Гібридний силовий агрегат з маховиком і варіатором	132
6.4 Використання маховикових накопичувачів енергії для підвищення прийомистості дизельного двигуна в складі автомобіля.....	134
6.5 Керування маховиковим акумулятором.....	138
6.6 Механічні накопичувачі енергії в деклараційних документах на винаходи.....	142
6.6.1 Рекуператор механічної енергії зі здвоєними планетарними рядами і фрикційними муфтами.....	142
6.6.2 Пристрій рекуперації енергії гальмування машини із змінним передавальним відношенням.....	146
6.6.3 Рекуперативна механічна саморегульована безступінчаста передача з маховиковим накопичувачем енергії.....	149

7 Методи порівняльного аналізу гібридної силової установки.....	156
7.1 Використання статистичних коефіцієнтів оцінки енергетичних параметрів гібридної силової установки.....	156
7.2 Математичне моделювання динаміки системи «гібридна силова установка – автомобіль – дорога» з урахуванням керуючих і збуджуючих впливів.....	161
7.3 Математичне моделювання енергетичного балансу автомобіля при його русі у випробувальному міському циклі.....	166
7.4 Математичне моделювання діагностичного параметра оцінки технічного стану гібридної силової установки автомобіля.....	170
7.4.1 Основні несправності систем гібридної силової установки і закони їх розподілу.....	170
7.4.2 Загальні відомості про параметри робочих процесів у системі енергопостачання.....	171
7.4.3 Алгоритм процесу діагностування гібридних автомобілів за параметрами робочих процесів.....	172
7.4.4 Математична модель оцінки потужності у ланцюзі високовольтної батареї.....	174
Перелік посилань.....	180
Додаток А.....	185
Додаток Б.....	186
Додаток В.....	187
Додаток Г.....	189

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СУ	– силова установка
ГСУ	– гібридна силова установка
ГЕСУ	– гібридна енергетична силова установка
ДВЗ	– двигун внутрішнього згорання
ККД	– ККД
АКБ	– акумуляторна батарея
ХНАДУ	– Харківський національний автомобільно-дорожній університет
КЕУ	– комбінована енергетична установка
ЕМ	– електрична машина
ДГУ	– двигун-генераторна установка
ТЗ	– транспортний засіб
ГТЗ	– гідридний транспортний засіб
ІрДТУ	– Іркутський державний технічний університет
ICE	– Internal Combustion Engines (двигун внутрішнього згорання)
HEV	– Hybrid Electric Vehicle (гібридні електромобілі)
PHEV	– Plug-in Hybrid Electric Vehicle (плагін-гібриди, гібридний електромобіль, що підключається)
REEV	– Range Extended Electric Vehicle (електромобілі зі збільшеним запасом ходу, наприклад, з допоміжним двигуном внутрішнього згорання)
FCEV	– Fuel Cell Electric Vehicle (електромобілі на паливних елементах, наприклад, на водневих)
BEV	– Battery Electric Vehicle (електромобілі акумуляторні)

ВСТУП

Отримання системних знань та розумінь щодо застосування елементарних деталей машин в конструкціях складових частин колісних ТЗ, які забезпечують реалізацію комплексу їх експлуатаційних властивостей якості при використанні за призначенням, представляються як очікувані результати навчання. При цьому процес формування у студентів фахових компетенцій, наприклад, за освітніми програмами спеціальностей Галузеве машинобудування, Автомобільний транспорт та споріднених спеціальностей, передбачає здатність демонструвати:

- знання та розуміння принципів будови і функціонування конструкцій складових частин автомобільних ТЗ;

- типові й оригінальні технічні рішення, які пропонуються та застосовуються у вітчизняному і закордонному автомобілебудуванні, будуванні нових концептуальних зразків рухомих транспортних енергетичних засобів;

- розуміти і враховувати тенденції розвитку окремих складових конструкцій, до яких, у тому числі, відноситься гібридні енергетичні установки та окремі механізми та агрегати трансмісії легкових автомобілів.

Особливості конструктивного виконання компоувальних схем гібридних силових установок легкових автомобілів багато у чому визначає їх експлуатаційні властивості під час використання за призначенням з урахуванням вимог сучасності. Тому це питання заслуговує окремої уваги при здобутті сучасного освітнього рівня.

За основну мету при складанні навчального посібника ставилося збір, систематизація та цілісне представлення науково-технічних даних стосовно розвитку схем компоування гібридних силових установок, що повинно надати допомогу зацікавленим особам освітнього процесу при їх вивченні. Викладений матеріал носить, у більшій мірі, описовий характер свідчень з різних джерел інформації і не містить результатів власних пошукових досліджень за тематикою, що розглядається.

Автор на підставі аналізу отриманих даних представив варіанти існуючих послідовної, паралельної, послідовно-

паралельної схем гібридних силових установок, в яких використовується хімічна енергія вуглеводних палив у двигунах внутрішнього згорання, електрична енергія, енергія пару та інерційні накопичувачі енергії. Також автором зібране та наведено деякі методики дослідників, за якими можливо здійснювати аналіз компонувальних схем та робочих процесів, що протікають у системах постачання енергій для руху легкових гібридних автомобілів.

Наведене у посібнику має досить багатий ілюстративний матеріал складових частин легкових автомобілів, що відображає особливості їх конструкції.

Під час складання посібника використовувалися сучасні наукові, інформаційно-технічні та патентні ресурси.

Наведені в навчальному посібнику відомості представляються:

– по-перше, академічними, так як спрямовані на формування у студентів розширених уявлень та знань про гібридні силові установки, що розглядаються відповідно до ознак їх класифікації і особливостям їх конструктивного виконання;

– по-друге, науково-пізнавальними, оскільки базуються на результатах досліджень, відображених в деклараційних документах на винаходи і корисні моделі, та можуть стати відправною точкою для формування своїх поглядів на вирішення тієї чи іншої проблемної задачі.

Поданий матеріал пропонується як додаткова література, яка рекомендується до використання під час самостійної підготовки для студентів, які навчаються за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (освітні програми «Колісні та гусеничні транспортні засоби», «Двигуни внутрішнього згорання») до розгляду і вивчення тем:

– модуль «Загальні відомості про автомобілі», «Трансмісія» робочої програми дисципліни «Автомобілі. Основи конструкції»;

– модуля «Будова складових частин машин» робочої програми дисципліни «Машини з двигунами внутрішнього згорання».

Посібник може використовуватися в процесі навчання студентами інших спеціальностей галузевого машинобудування та автомобільного транспорту.

Автор не претендує на істину в першій інстанції та буде вдячний усім, хто знайде можливість висловити свої зауваження і побажання щодо викладеного матеріалу.

Автор висловлює щиру вдячність співробітникам кафедри «Автомобілі» Білостоцькій А.О., Решетняк О.В. та Даниленко О.М. за активну участь у перекладі матеріалу, корегуванні тексту та оформленні видання.

1 ТЕРМІНИ ТА ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ

Бортове джерело енергії (*on board energy source*) – складова частина силової установки, що включає, як мінімум, накопичувач (накопичувачі) енергії, а також, можливо, в деяких випадках перетворювач (перетворювачі), трансмісію (трансмісію), допоміжні пристрої. Бортове джерело енергії забезпечує силовий привід енергією для створення тягового зусилля [1].

Баланс заряду батареї (*charge balance of battery*) – зміна заряду батареї в процесі випробувань, зазвичай виражається в $A \cdot \text{год}$ [6].

Приклади.

1. У ТЗ з електричною тягою (електромобілі) бортове джерело енергії може складатися з наступних компонентів [1]:

- накопичувача: електрохімічна акумуляторна батарея;
- системи передачі енергії: бортова силова електрична мережа;
- допоміжного обладнання: система регулювання температурного режиму батареї, бортовий пристрій зарядки батареї, система електричного захисту.

2. У гібридному ТЗ із силовою установкою послідовного типу незворотне джерело енергії може складатися з наступних компонентів [1]:

- накопичувача;
- системи передачі енергії: двигун-генераторна установка (ДГУ), що включає двигун внутрішнього згорання, генератор і електричний перетворювач;
- допоміжного обладнання: електронні контролери і система охолодження.

Гібридна силова установка – схема конструкції, в якій використовується кілька джерел енергії. Узагальнено до складу автомобіля з ГСУ входять: первинне джерело енергії; тяговий електропривод; електрогенератор; трансмісія; буферний накопичувач енергії; мікропроцесорна система управління [5].

Гібридний ТЗ (*electric hybrid (road) vehicle*) – ТЗ, в якому один з оборотних джерел енергії виробляє електричну енергію [1].

Гібридний ТЗ – ТЗ, що приводиться в рух гібридним силовим приводом [2].

Гібридний ТЗ без зовнішньої зарядки – гібридний ТЗ, зарядка накопичувача електричної енергії якого можлива тільки за допомогою агрегатів або пристроїв самого ТЗ.

Гібридний ТЗ із зовнішньою зарядкою – гібридний ТЗ, зарядка джерела електричної енергії якого можлива як за допомогою агрегатів або пристроїв самого ТЗ, так і від зовнішніх джерел електроенергії (електромережа, зовнішня акумуляторна батарея).

Примітка. До цієї ж категорії відносяться ТЗ, конструкція яких дозволяє швидко заміну розрядженої акумуляторної батареї на заряджену в рамках спеціалізованої мережі зарядних/обмінних станцій [2].

Гібридний режим (для гібридних ТЗ) (*hybrid mode (for an electric hybrid vehicle)*) – режим, що відрізняється від обраного водієм вручну режиму електричної тяги і режиму тяги від теплового двигуна. У цьому режимі всі бортові джерела енергії можуть давати енергію для руху ТЗ, працюючи відповідно до алгоритму управління енергоустановкою. Гібридний режим включає і режим електричної тяги, якщо останній вибирається автоматично системою управління [1].

Гібридний ТЗ з тепловим двигуном (*thermal electric hybrid vehicle*) – гібридний ТЗ, силова установка якого включає тепловий двигун [1].

Примітка. ТЗ, обладнані електромашинами, які є допоміжним обладнанням теплового двигуна (наприклад, стартер) або регуляторами навантаження двигуна, або служать для живлення іншого електрообладнання автомобіля, не належать до гібридних, оскільки використовувані в них електромашини не створюють тягове зусилля.

Гібридний ТЗ із силовою установкою послідовного типу (*series electric hybrid vehicle*) – гібридний ТЗ, в якому всі бортові джерела енергії виробляють електричну енергію [1].

Гібридний ТЗ із силовою установкою паралельного типу (*parallel electric hybrid vehicle*) – гібридний ТЗ, в якому тягове зусилля створюється електричним силовим агрегатом і (або) бортовим джерелом енергії неелектричного типу, який виробляє механічну енергію, через трансмісію, яка може бути загальною або роздільною для електричного і неелектричного силових агрегатів [1].

Гібридний електричний силовий привід – силовий привід, який для забезпечення механічного переміщення використовує енергію двох накопичувачів – моторне паливо та електричну енергію (акумуляторну батарею, суперконденсатор, електромеханічний маховик/генератор) [2].

Гібридний силовий привід – привід, який має не менше двох різних перетворювачів енергії та двох різних накопичувачів енергії (на борту ТЗ) для приведення ТЗ у рух [2].

Електричний силовий привід – силовий привід, що включає один або кілька накопичувачів електроенергії (наприклад, акумуляторну батарею, електромеханічний маховик/генератор або суперконденсатор), одне або кілька пристроїв перетворення енергії в одну або кілька електричних машин, що перетворюють електроенергію накопичувача в механічну енергію, передану на колеса для приведення ТЗ у рух [2].

Електричний силовий агрегат (*electric drive train*) – електричний двигун (двигуни) і його силовий перетворювач (перетворювачі), які використовують для створення тягового зусилля [1].

Електричний силовий привід (*electric power train*) – привід, в якому електрична енергія, отримана від бортового джерела енергії, перетворюється в механічну енергію і передається до ведучих коліс для створення тягового зусилля [1].

Електрична силова установка (*electric traction system*) – комбінація електричного силового приводу і бортового джерела електричної енергії [1].

Енергетичний баланс батареї (*energy balance of battery*) – баланс заряду батареї, помножений на її номінальну напругу і зазвичай виражається в Вт·год.

Примітка. Дане визначення лише приблизно відображає реальний баланс енергії, що спостерігається на практиці [6].

Квадріцикл (мотоколяска)* – чотирьохколісний механічний ТЗ, що має наступні характеристики [33]:

легкий квадріцикл:

– суха маса – менше 350 кг, не включаючи масу батарей у випадку електричних ТЗ;

– максимальна конструктивна швидкість – не більше 45 км/год;

– робочий об'єм двигуна – не більше 50 см³ для двигунів з примусовим запалюванням або максимальна афективна потужність – не більш 4 кВт для двигунів інших типів;

квадріцикл інакший, ніж легкий:

– суха маса – не більше 400 кг (550 кг для ТЗ, що призначені для перевезення вантажів), не включаючи масу батарей у випадку електричних ТЗ;

– максимальна ефективна потужність – не більше 15 кВт.

*Термін «мотоколяска» застосовують як дублюючий для квадріциклів з кузовом.

Квадріцикл – чотирьохколісний мотоТЗз максимальною конструктивною швидкістю не менше 25 км/год, максимальною потужністю двигуна не більше 15 кВт, знярядженою масою не більше 400 кг (550 кг для ТЗ, призначених для перевезення

вантажів) без маси батареї у випадку електричних ТЗ, призначених для експлуатації на дорогах загальної сеті [33].

Оборотне (вторинне) бортове джерело електричної енергії (*on board secondary electric energy source*) – вторинне бортове джерело електричної енергії, що є оборотним. Він зберігає електричну енергію в хімічній або електростатичній формі. На вхід вторинного джерела подається електрична енергія; на виході джерела виходить теж електрична енергія [1].

Незворотне (первинне) бортове джерело електричної енергії (*on board primary electric energy source*) – система, яка зберігає енергію і передає електричну енергію незворотнім шляхом [1].

Приклади.

1. Електрохімічний генератор (паливні елементи), паливо для якого може бути рідким або газоподібним (кисень або повітря). На виході з генератора виходять електрична енергія і продукти хімічних реакцій.

2. ДГУ, паливо для якої зберігається в паливному баку і може бути рідким або газоподібним, що включає тепловий двигун і генератор. На виході ДГУ виходить електрична енергія.

Режим роботи, що обирається водієм (*driver selected operating mode*) – режим роботи силової установки ТЗ, який водій може вибрати за допомогою перемикачів на панелі приладів або інших засобів [6].

Накопичувач енергії, що підзаряджається, накопичувач (*rechargeable energy storage system; RESS*) – система, яка зберігає енергію з метою її подальшої віддачі у вигляді електроенергії і електроенергії, яка є тією, що підзаряджається. Приклад, батареї або конденсатори [6].

Режим тяги від теплового двигуна (*pure thermal mode*) – у гібридному ТЗ з тепловим двигуном – режим, який обирається водієм, при якому рух ТЗ забезпечується тільки одним неелектричним бортовим джерелом енергії, до складу якого

входить тепловий двигун. В цьому випадку вторинне (оборотне) електричне джерело енергії не використовується зовсім, навіть для рекуперації енергії [1].

Режим електричної тяги (*pure electric mode*) – режим роботи силової установки, в якому тільки вторинне (оборотне) бортове джерело електричної енергії забезпечує рух ТЗ. Режим електричної тяги може включатися водієм вручну або автоматично системою управління енергоустановкою [1].

Режим електромобіля (*electric vehicle operating mode. EV operating mode*) – режим роботи ТЗ з гібридним електроприводом характеризується тим, що для руху і, якщо необхідно, для живлення додаткових систем використовують тільки енергію з накопичувача, що підзаряджається [6].

Рекуперативне гальмування (*regenerative braking*) – часткове повернення енергії, яка зазвичай розсіюється в механічних гальмах, з передачею її у вигляді електрики в накопичувач [6].

Силовий привід – комбінація, що складається з накопичувача (накопичувачів) енергії, перетворювача (перетворювачів) енергії і трансмісії (трансмісій), яка перетворює енергію накопичувача в механічну енергію, передану на колеса для приведення ТЗ в рух [2].

Силова установка – сукупність двигуна та допоміжного обладнання, необхідних для отримання механічної енергії за рахунок використання первинних природних енергетичних ресурсів – палива, води, вітру тощо. За родом використовуваної енергії СУ підрозділяють на теплові, гідравлічні, ядерні (атомні) та ін. Вони можуть бути стаціонарними і пересувними, змонтованими на ТЗ. Широке застосування отримали транспортні СУ – авіаційні, суднові, тепловозні та ін., що створюють силу тяги [3].

Силова установка – енергетичний комплекс, що містить тепловий двигун (рідше гідравлічний двигун, вітроподвигун), машини – перетворювачі енергії, наприклад, електрогенератори і електродвигуни, споживачі механічної енергії. Залежно від призначення СУ і числа проміжних елементів між двигуном і споживачем енергії СУ бувають транспортні, пересувні і стаціонарні; прості і складні. До простих можна віднести автомобільні, тракторні, одновинтові суднові, одномоторні авіаційні тощо; до складних – багатовинтові суднові, багатомоторні авіаційні, СУ космічних кораблів, термоядерні та ін. В СУ ТЗ основним споживачем механічної енергії є рушій. У стаціонарних і пересувних СУ споживачами механічної енергії є насоси, компресори, робочі органи бензопил, газонокосарок тощо [4].

Ступінь зарядки батареї; SOC батареї (*battery state of charge: battery SOC*) – доступна залишкова частина заряду батареї, яка зазвичай виражається у відсотках від її повної енергоємності [6].

ТЗ на електричній тязі (*electrically propelled road vehicle*) – ТЗ, в якому електрична енергія перетворюється електричною машиною (машинами) в механічну енергію для створення тягового зусилля [1].

2 КОНСТРУКТИВНІ СХЕМИ ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

2.1 Загальні положення

Гібридна силова установка (ГСУ) представляє собою технічну систему, яка поєднує в собі двигун внутрішнього згорання (ДВЗ) або двигун-генераторні установки і тягові накопичувачі електричної енергії, які сумісно з комбінованими електромеханічними трансмісіями будуються за принципом послідовної або паралельної, а також послідовно-паралельної архітектури, остання має назву «спліт» [7]. При цьому такі складові частини ГСУ як генератор, акумулятор, перетворювач напруги і інвертор утворюють її контур рекуперації електричної енергії.

ТЗ з гібридною силовою установкою (гібридні транспортні засоби), або, як їх ще називають, з комбінованою енергоустановкою, представляють собою щось середнє між автомобілем (ТЗ, що приводиться в рух тепловим двигуном) і електромобілем (транспортний засіб, що приводиться в рух електродвигуном, який живиться від джерела електроенергії [8].

Основною перевагою ГСУ є можливість забезпечення роботи ДВЗ в певній області на багатопараметровій характеристиці (рис. 2.1), яка обумовлена мінімальною питомою витратою палива [22]. У традиційному автомобілі цього досягти неможливо, так як робоча точка на характеристиці залежить від моменту ДВЗ, що розвивається (залежить від ступеня відкриття дроселя), і його обертів, які залежать, в свою чергу, від обраної передачі і швидкості руху. Співвідношення цих параметрів залежить від графіка руху і стилю водіння. Таким чином, при русі традиційного автомобіля задіється практично вся область багатопараметрової характеристики. При цьому значення питомої витрати палива на характеристиці істотно різняться в залежності від моменту і оборотів ДВЗ. Так, значення мінімальної питомої витрати палива (≈ 250 г/кВт·год) для більшості ДВЗ відповідають області максимального моменту при обертах близько 3000 хв^{-1} [22].

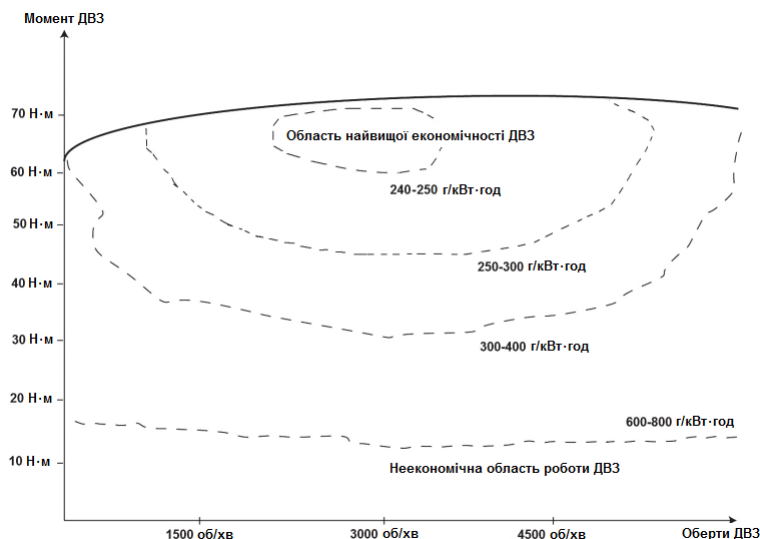


Рисунок 2.1 – Багатопараметрова характеристика ДВЗ

У місті автомобіль з ДВЗ розвиває максимальний момент не часто, а зона роботи ДВЗ відповідає приблизно 10–20% максимального значення. При таких моментах питома витрата палива дорівнює близько 600–800 г/кВт·год, що в три рази вище теоретично можливого. Тому, забезпечивши роботу ДВЗ тільки в економічній зоні, можна було б в три рази скоротити витрату палива в міському режимі. Самим же неекономічним режимом є рівномірний рух з невеликою швидкістю на першій або другій передачі, що спостерігається в міських заторах. Потужність, необхідна від ДВЗ при рівномірному русі автомобіля, мінімальна. Так, для легкового автомобіля масою близько тонни при русі зі швидкістю 60 км/год від ДВЗ потрібно усього 10 г/кВт·год, 15 к.с. На підставі рисунку 2.1 можна переконатися, що задіяна область роботи ДВЗ в цьому випадку – вкрай неекономічна [22].

ДВЗ – єдине джерело механічної енергії гібридного автомобіля, його конструкція практично не відрізняється від двигуна бензинового автомобіля, за винятком меншого робочого об'єму. Так, наприклад, на автомобілі Toyota Prius застосовується двигун 2ZR-FXE (табл. 2.1), що працює по циклу Аткинсона-

Міллера (цикл з високим ступенем розширення, тобто такт розширення більше такту стиснення) з системою регулювання фаз газорозподілу (рис. 2.2) [16].

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики двигунів 2ZR-FXE, 1NZ-FXE

Модель	ZVW30	NHW20	
Двигун	2ZR-FXE	1NZ-FXE	
Число та розташування циліндрів	4-рядне розташування		
Система газорозподілу	16-клап., DOHC, ланцюговий привід, з VVT-i		
Робочий об'єм, см ³	1798	1497	
Діаметр циліндра·хід поршня, мм	80,5·88,3	75,0·84,7	
Ступінь стиснення	13,0		
Максимальна потужність, кВт (к.с.) при хв ⁻¹	73 (98) при 5200	57 (76) при 5000	
Максимальний крутний момент, Н·м при хв ⁻¹	142 при 4000	111 при 4200 115 при 4000	
Порядок роботи циліндрів	1 – 3 – 4 – 2		
Марка оливи	API SL, SM або ILSAC	API SJ, SL, EC або ILSAC	
Заправочна ємність оливи, л	суха	4,7	4,1
	з масляним фільтром	4,2	3,7
	без масляного фільтра	3,9	3,4

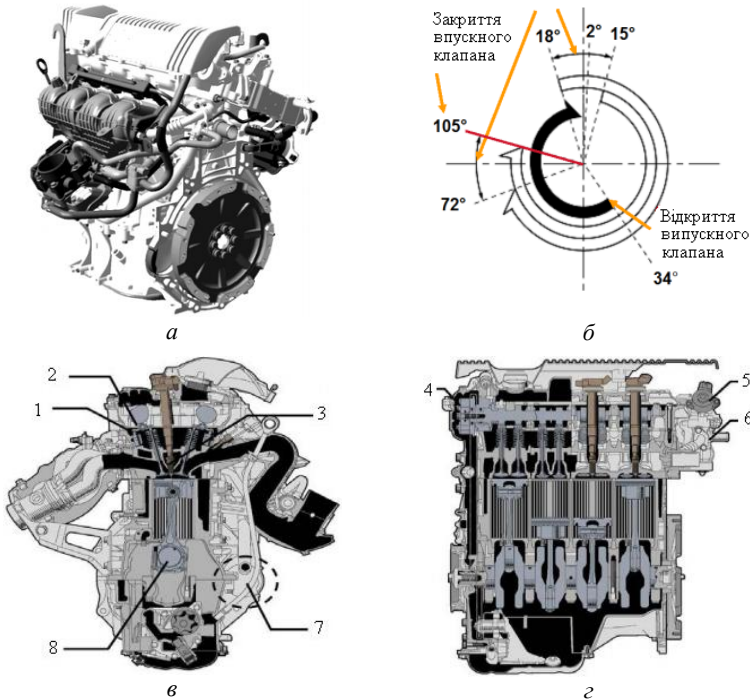


Рисунок 2.2 – Двигун 2ZR-FXE: *а* – загальний вигляд; *б* – фази газорозподілу; *в* – поперечний розріз; *г* – подовжній розріз; 1 – гідравлічний компенсатор клапанного зазору; 2 – коромисло з підшипником; 3 – свічка запалювання збільшеної довжини з іридєвим електродом; 4 – система VVT-і для впускних клапанів; 5 – охолоджувач системи EGR; 6 – електромагнітний клапан системи EGR; 7 – електричний рідинний насос; 8 – зміщений колінчастий вал

Існують гібридні автомобілі з дизельними двигунами, однак до частих запусків і зупинок вони пристосовані гірше. Максимальна потужність і крутний момент двигуна підбираються для найбільших навантажень, таких як інтенсивний розгін, рух на підйом з повним навантаженням, рух з максимальною швидкістю. У даних умовах автомобіль працює рідко і нетривалий час.

Робота двигуна на часткових навантаженнях призводить до збільшеної витрати палива і підвищення викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах.

Високу економічність ДВЗ може забезпечити тільки у вузькому діапазоні частоти обертання колінчастого вала. У складі ГСУ він працює майже завжди при оптимальному середньому навантаженні, а в разі виходу за межі номінального режиму включається мотор-генератор. Навантажувальні характеристики ДВЗ і мотор-генератора сильно відрізняються. Так, ДВЗ має максимальний крутний момент при середній частоті обертання, а мотор-генератор може забезпечити його вже на початку обертання ротора.

Спільна робота ДВЗ і мотор-генератора дозволяє забезпечити високі динамічні властивості гібридного автомобіля при використанні ДВЗ меншої потужності. Характеристика крутного моменту при спільній роботі ДВЗ і мотор-генератора показана на рисунку 2.3.

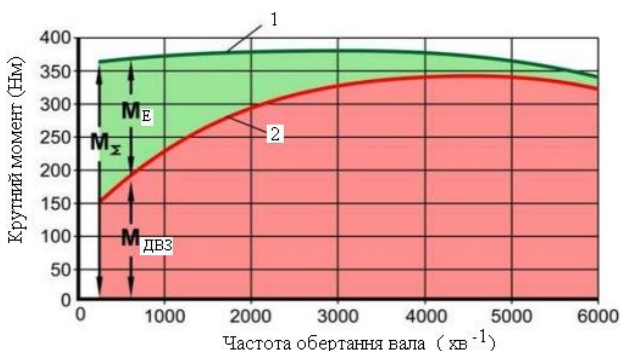


Рисунок 2.3 – Крутний момент ГСУ: 1 – сумарний крутний момент від ДВЗ і електродвигуна; 2 – крутний момент від ДВЗ

Центральним елементом ГСУ є комбінована мікропроцесорна система керування, яка забезпечує роботу ДВЗ на постійному режимі мінімальної питомої витрати палива при всіх швидкісних і навантажувальних режимах ТЗ шляхом регулювання роботи електроагрегатів і механічних вузлів силової установки [7]. Виходячи з цього слід вважати, що невід’ємною частиною ГТЗ є мехатронні системи у вигляді тягового електроприводу.

2.2 Класифікація гібридних систем

У теперішній час відомі різноманітні схеми побудування ГТЗ (автомобілів) з мехатронними системами, які забезпечують суттєву економію палива.

Існують наступні ознаки класифікації гібридних автомобілів [5, 7, 9–12]:

- за дизайном (паралельні, гібрид «через дорогу», гібриди серії, розділений за потужністю або послідовно-паралельний);
- за ступенем гібридизації (мікрогібрид, м'який гібрид (*mild hybrids*), повний гібрид (*full hybrids*), «плагін» гібридний, що підзаряджаються (*plugin hybrids*)) (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Характерні ознаки типів гібридів

Тип	Режим роботи			
	Система «старт-стоп»	Регенеративне гальмування	Електричне підвищення	Режим виснаження заряду. Режим перезаряджання
Мікрогібрид	+	–	–	–
М'який гібрид	+	+	–	–
Повний гібрид	+	+	+	–
Плагін гібридний	+	+	+	+

Паралельні гібридні системи мають як ДВЗ, так і електродвигун, які одночасно через муфти і(або) диференціал з'єднуються з ведучими колесами автомобіля. При цьому автомобіль може приводитись до руху як індивідуально окремо електродвигуном, так і обома джерелами енергії (ДВЗ+електродвигун) спільно, забезпечуючи силовий привід коліс. Це найпоширеніша гібридна система з 2016 року. Паралельні гібриди можуть бути додатково класифіковані балансом між різними двигунами при забезпеченні рушійної сили: ДВЗ ІСЕ може бути домінуючим, і задіяти електродвигун тільки в певних обставинах або навпаки. В той час як в інших обставинах ІСЕ можуть працювати тільки на електричній

системі. Але оскільки поточні паралельні гібриди не можуть забезпечити режими тільки з електричним приводом або з використанням ДВЗ, вони часто класифікуються як м'які гібриди (див. нижче).

Паралельні гібриди більше покладаються на регенеративне гальмування і ICE також може виступати в якості генератора для додаткової підзарядки. Це робить їх більш ефективними в міських умовах «стоп-старт». Такі гібриди використовують меншу батарею, ніж інші гібриди. Гібриди Honda Insight, Civic і Accord є прикладами паралельних гібридів виробництва General Motors Parallel Hybrid Truck (PHT) і BAS Hybrids. Гібриди Saturn VUE і Aura Greenline і Chevrolet Malibu, також використовують паралельну гібридну архітектуру.

Альтернативним паралельним гібридом є тип «через дорогу». У цій системі звичайна трансмісія живить одну вісь. При цьому електродвигун і ДВЗ не замикаються на привід однієї вісі автомобіля, що фактично обумовлює резервне джерело електричної енергії. Це дозволяє спростити підхід до керування електроживленням. Однак, за необхідністю може здійснюватись повний привід коліс, наприклад, привід передніх коліс – трансмісією, а задніх – електродвигуном (електродвигунами). Такий дизайн реалізований в автомобілях Audi 100 Duo II, Subaru VIZIV і Peugeot 307 Hybrid HDi, PSA Group Peugeot 3008, Peugeot 508, 508 RXH, Citroen DS5 – усі з використанням системи HYbrid4, а також Volvo V60, BMW 2 Series Active Tourer, BMW i8 і другого покоління Honda NSX [11].

Гібриди серії також називаються електромобілями розширеного діапазону (EREV) або електромобілями з розширеним діапазоном (REEV). Гібриди серії з особливими характеристиками класифікуються як розширений за тривалістю акумуляторний електромобіль (BEVx). Серія «гібридні системи» забезпечують більш плавне прискорення, уникаючи перемикання передач. Серійні гібриди можуть бути оснащені суперконденсатором або маховиком для зберігання енергії регенеративного гальмування, що може підвищити ефективність за рахунок відновлення енергії, інакше втрачається в результаті тепла через гальмівну систему. Гібрид серії не має механічного зв'язку між ICE і колесами [11]. ICE може працювати з

постійною і ефективною швидкістю незалежно від швидкості ТЗ, досягаючи більш високу ефективність – 37%, а не середнього значення ICE 20%. При низьких або змішаних швидкостях це може привести до збільшення загальної ефективності на 50% (19% проти 29%). Lotus запропонувала дизайн двигуна/генератора, який працює на двох швидкостях, забезпечуючи 15 кВт електроенергії при 1500 хв⁻¹ і 35 кВт при 3500 хв⁻¹ через вбудований електричний генератор, який використовується в концепції Nissan Infiniti Emerge.

Мікрогібрид – це загальний термін, який використовується для ТЗ, які використовують деяку систему запуску-зупинки для автоматичного відключення двигуна при холостому ході. Мікрогібриди не є справжніми гібридними автомобілями, тому що вони не мають двох різних джерел енергії.

М'які гібриди по суті є звичайними автомобілями з деяким гібридним обладнанням, але з обмеженими гібридними характеристиками. Допоміжне джерело енергії виступає тільки в ролі асистента. Як правило, вони представляють собою паралельний гібрид з пуском-зупинкою або, можливо, з помірними рівнями підтримки двигуна або рекуперативного гальмування. М'які гібриди зазвичай не можуть забезпечити повністю електричне рух. М'які гібриди, такі як General Motors 2004–2007 Parallel Hybrid Truck (PHT) і гібриди Honda Eco-Assist, оснащені трифазним електродвигуном, встановленим всередині корпусу між ДВЗ і трансмісією. Електродвигун дозволяє вимикати ДВЗ всякий раз, коли автомобіль зупиняється, гальмується або зупиняється, але швидко перезавантажується, щоб забезпечити живлення. Елементи приводу (трансмісії) можуть продовжувати працювати на електроенергії при вимкненому ДВЗ. При цьому, як і в інших гібридних конструкціях рекуперативне гальмування повертає енергію. М'які гібриди іноді називають силовими гібридами, оскільки вони використовують ICE для первинної потужності, з електродвигуном, що підвищує крутний момент за рахунок механічного підключення до звичайної силової передачі.

Повний гібрид (іноді також званий сильним гібридом) – це автомобіль, який може працювати тільки на двигуні, батареях або їх комбінації. Повні гібриди здатні деякий час рухатися тільки на

допоміжному джерелі енергії. До повних гібридів відносяться автомобілі Toyota Prius, Toyota Camry Hybrid, Ford Escape Hybrid, Mercury Mariner Hybrid, Ford Fusion Hybrid, Lincoln MKZ Hybrid, Mercury Milan Hybrid, Ford C-Max Hybrid, Kia Optima Hybrid та ін. Ці транспортні засоби мають розділений потік потужності, який забезпечує більшу гнучкість в трансмісії шляхом взаємного перетворення механічної і електричної потужності. Щоб збалансувати сили з кожної частини, транспортні засоби використовують диференціальний зв'язок між ДВЗ і іншим джерелом енергії (електродвигун), підключеним до первинного валу коробки передач.

Гібридний електромобіль з плагінами (PHEV) має дві визначальні характеристики:

- може бути підключений до електричної розетки для зарядки;

- може переміщатися тільки від акумулятора.

Повні гібриди здатні працювати від акумулятора. Вони забезпечують більшу ємність акумулятора і можливість перезарядки з мережі, можуть бути паралельними або серійними. Вони також називаються гібридними гібридами. Їх основна перевага полягає в тому, що вони можуть бути незалежними від бензину на значні відстані, з розширеним діапазоном ICE для більш тривалих поїздок.

Прототипи PHEV з великими батареями, які можна перезаряджати з енергосистеми, були побудовані в США, особливо в гібридному центрі Енді Франка в Каліфорнійському університеті в Девісі. Одне провадження PHEV, Renault Kangoo, надійшло в продаж у Франції в 2003 році. Daimler Chrysler побудував PHEV на базі Mercedes-Benz Sprinter van. Легкі вантажівки пропонують Micro-Vett SPA так званий Daily Bimodale.

2.3 Послідовна схема гібридної силової установки

Розрізняють наступні схеми ГСУ послідовної архітектури [14]:

- ДВЗ передає енергію тільки генератору (потужність ДВЗ повинна дорівнювати потужності генератора);

- з мотор-генератором – керований гібрид (*Direct Hybrid*).

При першій послідовній схемі ДВЗ працює тільки на генератор, при цьому вибирається режим мінімальної витрати палива [9]. Енергія, що виробляється генератором, подається або на тяговий електродвигун, або в накопичувач енергії (акумулятор) і на тяговий двигун, або тільки в накопичувач енергії (акумулятор). Тяговий електродвигун через трансмісію передає необхідний обертовий момент на колеса та забезпечує весь необхідний силовий і швидкісний діапазон руху ТЗ, а при його сповільненні працює в режимі генератора, забезпечуючи рекуперацію енергії гальмування (рис. 2.4) [9, 14].

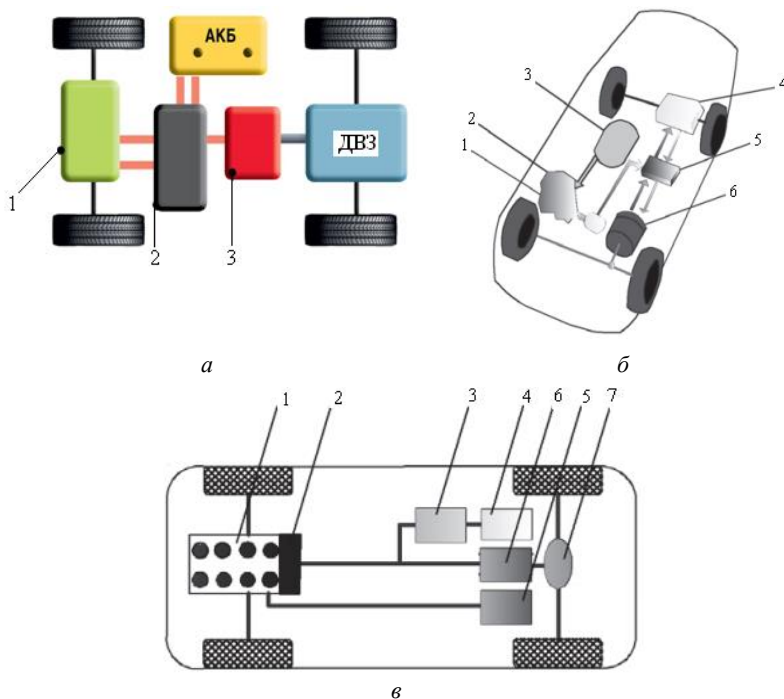


Рисунок 2.4 – Послідовна схема ГСУ: *а* – при поздовжньому розташуванні ДВЗ: 1 – електродвигун; 2 – модуль керування; 3 – генератор; *б* – з електроприводом на передню вісь: 1 – ДВЗ; 2 – генератор; 3 – паливний бак; 4 – акумуляторна батарея; 5 – інвертор; 6 – електродвигун; *в* – з електроприводом на задню вісь: 1 – ДВЗ; 2 – генератор; 3 – перетворювач; 4 – акумуляторна батарея; 5 – паливний бак; 6 – зворотна електромашина; 7 – диференціал

Такі гібриди маркуються аббревіатурою REEV (*range-extended electric vehicle*) або EREV (*extended-range electric vehicle*) [9].

Переваги схеми очевидні: в силу ідеальної характеристики електромотора, він на будь-яких оборотах в змозі видати максимальну потужність. Електромотор може бачь розміщений безпосередньо в колесі. Його крутний момент майже по експоненті зростає з падінням оборотів, прагнучи до нескінченності при нульових оборотах (насправді, нескінченності не буде, оскільки в моторі все ж є крім реактивного опору, який і створює, власне, крутний момент, і активний – опір проводів) [10].

Перевагами послідовної схеми є:

- можливість роботи первинного двигуна (ДВЗ) на постійному режимі мінімальної витрати палива;

- простота керування установкою та відсутність спеціальних вузлів трансмісії;

- можливість виключення з приводу коробки передач, зчеплення і карданного валу дозволяє істотно знизити інерційні маси і загальну масу силового обладнання. Це позитивно впливає на динаміку руху автомобіля і його витрата палива. При цьому знижується потужність, необхідна для розгону автомобіля;

- середня потужність сталого руху автомобіля в 3–5 разів менше потужності необхідної для забезпечення динаміки розгонів;

- широкі компоувальні можливості, які дозволяють легко скомпонувати установку у підкапотному просторі існуючого автомобіля.

Недоліком послідовної схеми вважається малий ККД системи перетворення енергії від ДВЗ до ведучих коліс. Має місце подвійне перетворення одного виду енергії в інший – механічної в електричну і надалі електричної в механічну.

Така конструкція використана в моделі автомобіля BMW і3 REX, спорткупе Cadillac ELR і Chevrolet Volt 2015 модельного року, а також в автобусах з ГСУ, наприклад, Toyota Coaster Hybrid.

Другим варіантом послідовної схеми ГСУ є схема, яка наведена на рисунку 2.5, в якій передбачається наявність в трансмісії коробки передач.

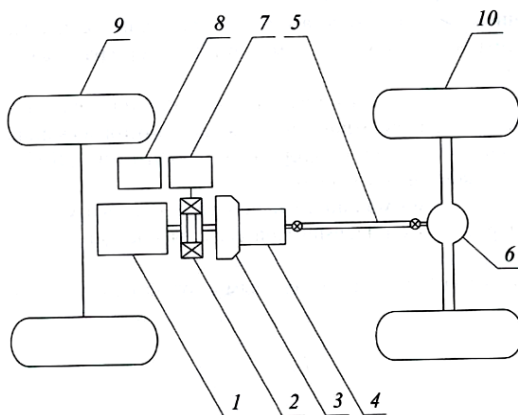


Рисунок 2.5 – Кінематична схема автомобіля з мотор-генератором (послідовна архітектура): 1 – ДВЗ; 2 – мотор-генератор (електромотор-генератор); 3 – зчеплення; 4 – коробка передач; 5 – карданна передача; 6 – головна передача і диференціал; 7 – акумулятор; 8 – інвертор; 9 – переднє колесо; 10 – колесо заднього моста

У цій схемі електропривод може використовуватися в якості мотор-генератора 2, з'єднаного з колінчастим валом ДВЗ. Мотор-генератор дозволяє вимикати ДВЗ при нетривалій зупинки ТЗ, а згодом запускати його по команді водія і забезпечувати початок руху ТЗ (рис. 2.5) [8]. Наприклад, за такою схемою побудовано ГСУ автомобіля Honda Insight (1999 рік випуску першого автомобіля, рис. 2.6).



a

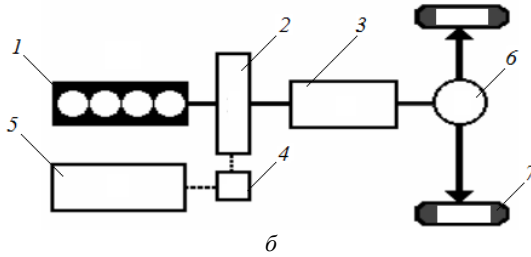
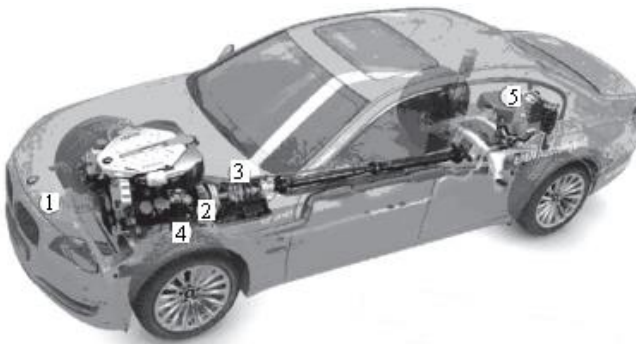


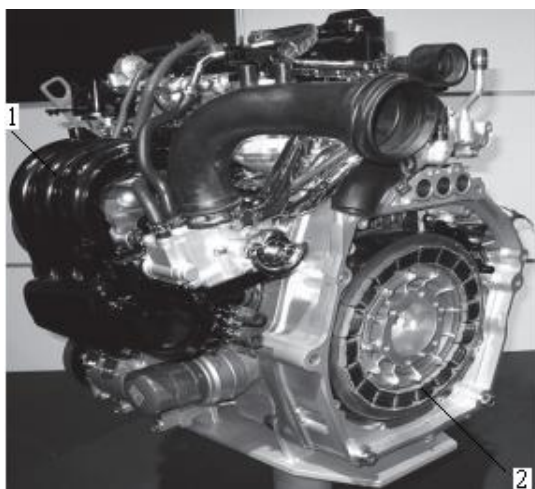
Рисунок 2.6 – ГСУ автомобіля Honda Insight: *a* – загальний вигляд; *б* – схема компонування: 1 – ДВЗ: $V_h=1$ л; $N_e=50$ кВт; 2 – електромотор-генератор, $N_e=10$ кВт; 3 – механічна коробка передач або безступеневий варіатор; 4 – електронний контролер; 5 – блок нікель-металогідридних акумуляторів, $U=144$ В, $m=75$ кг; 6 – головна передача; 7 – колеса

На колінчастому валу ДВЗ замість маховика встановлений електромотор-генератор. При інтенсивних прискореннях електромотор-генератор додає двигуну додатково $N_e=8$ к.с. і обертовий момент $M=12$ Н·м, шляхова втрата палива $Q=3,4$ л/100 км. Крім того, електродвигун виконує функції стартера. При цьому ці функції виконуються частіше, оскільки при зупинці автомобіля, електроніка автоматично зупиняє двигун.

На рисунку 2.7 наведено схему механічного послідовного приводу гібридного автомобіля BMW-7, в якому мотор-генератор також встановлений на маховику [14].



a



б

Рисунок 2.7 – Елементи конструкції послідовної схеми ГСУ автомобіля BMW-7:
a – загальний вид: 1 – ДВЗ V-8, $N_e=330$ кВт; 2 – мотор-генератор, $N_e=15$ кВт;
 3 – коробка передач з автоматичним керуванням; 4 – електромотор, $U=120$ В;
 5 –Li-Ion батарея, $U=120$ В; б – двигун: 1 – впускний колектор;
 2 – мотор-генератор

Мотор-генератор доцільно використовувати не тільки для швидкого пуску ДВЗ, а й для створення електротяги при рушанні машини з місця. Ця доцільність витікає з наступного. ДВЗ має високу паливну ефективність і низький рівень викидів в обмеженому діапазоні частот обертання, тому доцільно відбирати від нього потужність тільки після того, як автомобіль вже набере деяку мінімальну швидкість руху. Мотор-генератор дозволяє «згладжувати» пульсації моменту, що розвивається ДВЗ, що сприятливо позначається на зниженні вібрацій, збільшує ресурс роботи вузлів трансмісії. Одночасно мотор-генератор може вирішити проблему дефіциту потужності бортової електромережі, характерну для сучасних ТЗ.

Розвитком кінематичної схеми рисунку 2.5 є схеми з «мотор-мостом» і «мотор-колесами» (рис. 2.8) [8].

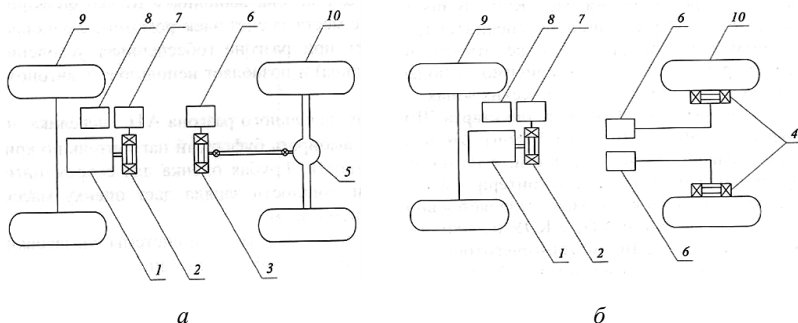


Рисунок 2.8 – Послідовна кінематична схема гібридного автомобіля:
а – схема з «мотор-мостом»; *б* – схема з «мотор-колесами»; 1 – ДВЗ;
 2 – мотор-генератор; 3 – тяговий електродвигун; 4 – мотор-колеса;
 5 – головна передача; 6, 7 – інвертори; 8 – акумуляторна батарея;
 9 – передній міст; 10 – задній міст

Як вже було зазначено, в послідовній схемі кінематичні зв'язки між ДВЗ і ведучими колесами принципово виключаються. Оскільки при цьому ДВЗ не може передавати момент до ведучих коліс, то очевидно, що потужність КЕУ, що передається в буферний накопичувач, повинна бути не менше, ніж середня потужність, необхідна для руху ТЗ. При цьому, потужність і електромагнітний момент тягового електроприводу повинні бути рівними максимальній потужності і максимальному моменту рушіїв.

Число ведучих осей може бути різним. Різним може бути й навантаження на осі. Для деяких ТЗ (тягачі, магістральні автопоїзди й т.д.) перспективно використання багатовісної схеми, з досить великим (а й більше) числом осей, причому всі колеса можуть бути ведучими. В таких умовах використання механічних передач між ДВЗ і ведучими колесами утруднене, і індивідуальний електропривід спрощує проблему.

Вимкнення з приводу коробки передач, зчеплення і карданного валу дозволяє істотно знизити обертові маси і загальну масу силового обладнання. Зниження моменту інерції впливає на процес нерівномірно-поступального руху машини.

Відсутність кінематичного зв'язку ДВЗ з ведучими колесами дозволяє по-новому підійти до проектування ДВЗ і мотор-генератора. У зв'язку з цим обумовлюється можливість

створення вільнопоршневих ДВЗ і мотор-генераторів з лінійним переміщенням ротора.

Послідовна кінематична схема гібридних машин дозволяє застосовувати нові конструкторські рішення, нові компоунвання. У такій схемі існує можливість виключення диференціала, що утрудняє побудову якісної системи управління рухом, що погіршує керованість і прохідність ТЗ. З'являється можливість виключення навіть механічних редукторів, що зв'язують як ДВЗ з мотор-генератором, так і тяговий електропривод з ведучими колесами («прямий» привід генератора і ведучих коліс).

На рисунку 2.9 показана схема з послідовним розташуванням елементів ГСУ (*mild hybrids*), яка застосована на автомобілях марки Chevrolet Volt, Mitsubishi Outlander [16].

Це, по суті, електромобіль, але з вбудованим бензиновим ДВЗ, який при розряді високовольтною батареї або русі з високою швидкістю здатний обертати приводний вал трансмісії. У цій архітектурі мотор-генератори виконують такі функції:

- МГ1 пов'язаний з ДВЗ і перетворює його механічну енергію в електричну;
- МГ2 призначений для створення крутного моменту на ведучих колесах і рекуперації енергії гальмування. Запас ходу на одній електричній тязі до 80 км, з включеним ДВЗ – до 550 км.

ДВЗ під час роботи навантажений опором трансмісії або мотор-генератора (МГ1), що працює в режимі генератора. При достатньому заряді акумуляторів ДВЗ відключається. Основним критерієм економічності є витрата електроенергії і палива.

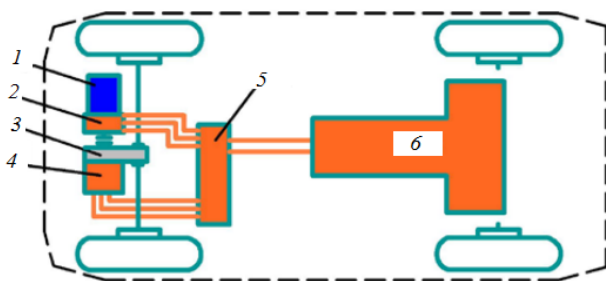


Рисунок 2.9 – Схема гібридної силової установки (*mild hybrids*) послідовного типу (архітектури): 1 – ДВЗ; 2, 4 – мотор-генератори (МГ1, МГ2); 3 – приводний вал трансмісії; 5 – інвертор; 6 – високовольтна батарея

2.4 Паралельна схема гібридних силових установок

Паралельна архітектура ГСУ має ДВЗ і тяговий електромотор, які пов'язані з ведучими колесами автомобіля. Електромотор живиться від акумуляторної батареї та використовується в режимах старту, малих навантажень та прискорення (рис. 2.10) [9, 14].

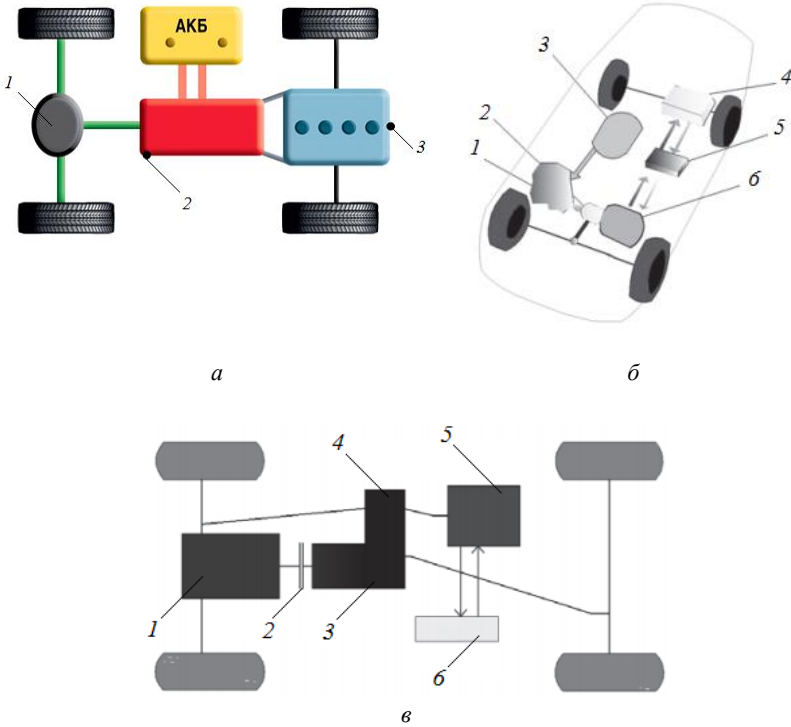


Рисунок 2.10 – Паралельна архітектура ГСУ: *а* – загальний вид: 1 – головна передача і диференціал; 2 – електромотор-генератор; 3 – ДВЗ; *б* – з приводом на передній міст: 1 – ДВЗ; 2 – коробка передач; 3 – паливний бак; 4 – акумуляторна батарея; 5 – інвертор; 6 – генератор-електродвигун; *в* – схема автомобіля УАЗ-3153: 1 – ДВЗ; 2 – зчеплення; 3 – коробка передач; 4 – роздавальна коробка; 5 – мотор-генератор; 6 – накопичувач

У паралельній схемі ГСУ (*mild hybrid*) (рис. 2.11, [10]) ДВЗ, як і в традиційному автомобілі, з'єднаний з валом механічної трансмісії, а мотор-генератор встановлено між ними і грає роль маховика. Електричний привід складається з мотор-генератора, інвертора і високовольтної батареї.

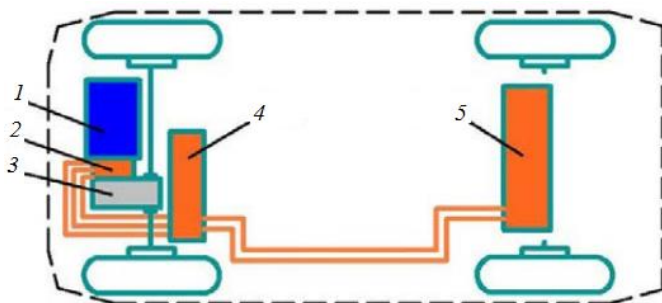


Рисунок 2.11 – Схема гібридної силової установки паралельного типу (архітектури): 1 – ДВЗ; 2 – мотор-генератор; 3 – приводний вал трансмісії; 4 – інвертор; 5 – високовольтна батарея

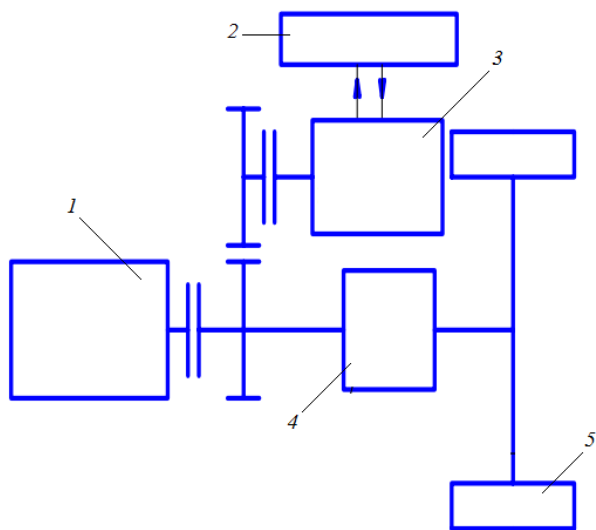
По шосе автомобіль рухається за допомогою ДВЗ, який одночасно через електричний мотор-генератор заряджає високовольтну батарею. При розгоні та інших умовах, коли потрібна максимальна потужність, ДВЗ і мотор-генератор працюють паралельно, їх потужність підсумовується. У режимі гальмування мотор-генератора повертає енергію в накопичувач. Ця схема дозволяє використовувати меншу потужність ДВЗ і знизити витрату бензину.

Під час руху автомобіля ДВЗ працює завжди, а глушиться тільки при зупинках, тобто механічний потік енергії присутній завжди. У режимі електромобіля дана схема працювати не може.

Оскільки обертовий момент від первинного вала може бути напряму передано на колеса автомобіля, то ККД такого гібриду вище. В такій схемі може бути використано один або два електромотора (генератор і тяговий мотор), тобто електромотор може працювати і в режимі генератора, і в режимі тягового двигуна. Однак у цій схемі досить складна конструкція трансмісії, оскільки є необхідність передачі крутного моменту на

колеса автомобіля і від ДВЗ, і від електромотора, що обумовлює певну складність системи керування силовою установкою. Більш того ДВЗ відходить від режиму мінімальної витрати палива при використанні ступеневої механічної трансмісії під час регулюванні швидкості руху автомобіля. Таку конструкцію силових агрегатів мають, наприклад, моделі автомобілів Hybrid: Honda – Civic, CR-Z, Hyundai Sonata, Porsche Cayene, Cadillac Escalade, Mercedes-Benz S-400 Hybrid, BMW 7 –Series Limousine Active Hybrid та інші. Порівняння характеристик автомобілів з ГСУ та їх аналогами (дод. А, табл. А.1) визначає, що гібридні автомобілі мають декілька більшу вагу (від 100 до 170 кг) із-за установки на них додаткових агрегатів, мотор-генераторів і акумуляторних батарей, но їх динамічні і швидкісні якості не нижче аналогів [14].

Принципові схеми варіантів паралельних ГСУ наведено на рисунку 2.12 [8].



a

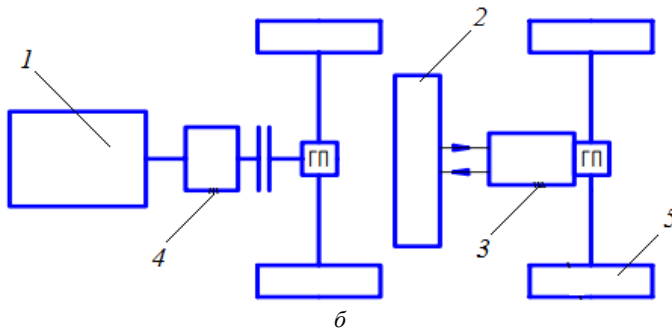


Рисунок 2.12 – Принципіальні схеми паралельних ГСУ: *а* – варіант 1; *б* – варіант 2; 1 – ДВЗ; 2 – накопичувач; 3 – мотор-генератор; 4 – трансмісія; 5 – колеса автомобіля

Кращі результати і велику гнучкість управління дає схема (рис. 2.13) з додатковим (крім мотор-генератора) тяговим електродвигуном з інвертором, редуктором і механічною муфтою (з електронним управлінням), що дозволяє реалізовувати той чи інший вид підведення моменту до ведучих коліс.

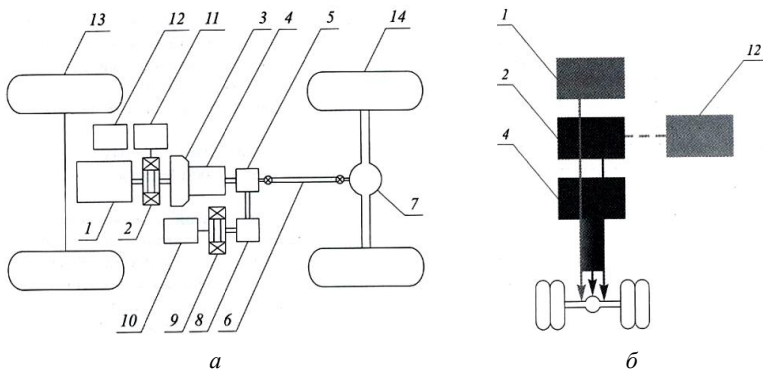


Рисунок 2.13 – Кінематична схема автомобіля з мотор-генератором і тяговим електродвигуном (паралельна архітектура): *а* – схема у загальному вигляді; *б* – схема серійного зразка, що розроблений фірмою Mitsubishi Fuso; 1 – ДВЗ; 2 – мотор-генератор; 3 – зчеплення; 4 – коробка передач; 5 – редуктор; 6 – карданна передача; 7 – головна передача і диференціал; 8 – муфта; 9 – тяговий електродвигун; 10, 11 – інвертор; 12 – акумулятор; 13 – переднє колесо; 14 – колесо заднього моста

Деякі компоувальні рішення ГСУ з паралельними потоками потужності представлені на рисунку 2.14.

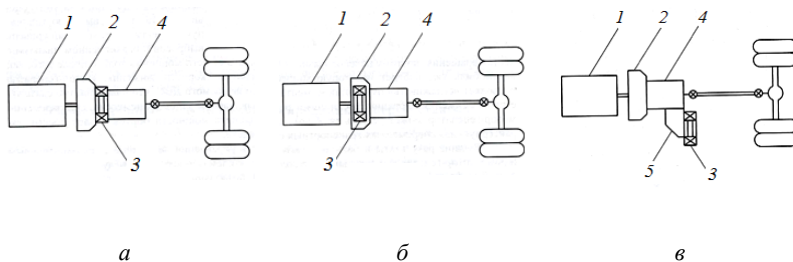


Рисунок 2.14 – Компоувальні рішення для ГСУ з паралельними потоками потужності: *а* – мотор-генератор встановлено на первинний вал коробки передач; *б* – мотор-генератор інтегровано в коробку передач і встановлено на вторинному валу; *в* – мотор-генератор встановлено в окремому корпусі та з'єднано з вторинним валом коробки передач кутовим редуктором; 1 – ДВЗ; 2 – зчеплення; 3 – мотор-генератор; 4 – коробка передач; 5 – кутовий редуктор

Приклад паралельної архітектури силової установки гібридного автомобіля Audi Duo, що розроблений на базі серійної моделі A4 TDI з кузовом універсал, наведено на рисунку 2.15 [7]. Автомобіль може приводитись до дії як двома двигунами одночасно (режим Duo), так і кожним окремо. В режимі роботи ДВЗ електрична машина працює в режимі генератора, заряджає акумуляторну батарею.



а

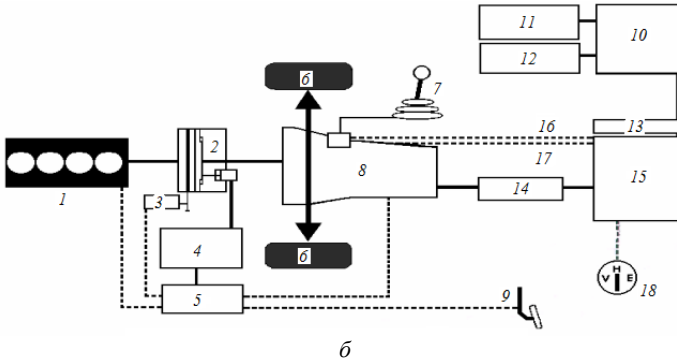


Рисунок 2.15 – Загальний вид та принципова схема гібридного автомобіля Audi Dau: 1 – турбодизельний двигун: $V_h=1,9$ л, $N_e=66$ кВт (90 к.с.) при $n=4000$ хв⁻¹, $M=202$ Н·м при $n=1900$ хв⁻¹; 2 – зчеплення; 3 – стартер; 4 – гідравлічний блок; 5 – керування зчепленням; 6 – колеса; 7 – механічна коробка передач; 8 – редуктор; 9 – датчик положення педалі акселератора; 10 – акумуляторна батарея; 11 – керування акумуляторною батареєю, бортовий зарядний пристрій; 12 – трансформатор; 13 – головний запобіжник; 14 – електродвигун 3-х фазного струму з водяним охолодженням, $N_e=21$ кВт; 15 – керування інвертором; 16 – визначення передач, що включена; 17 – визначення необхідної передачі; 18 – переключення типу привода

Так, на автомобілі VW Touareg Hybrid також використана паралельна архітектура ГСУ (рис. 2.16) [15].

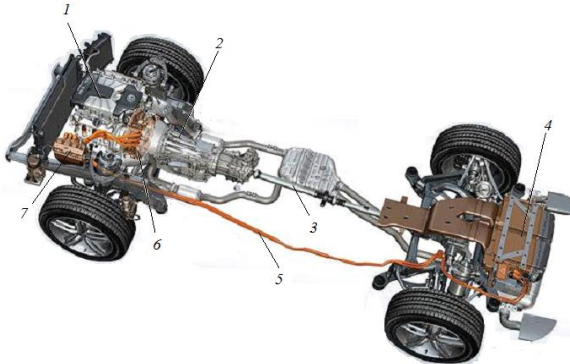


Рисунок 2.16 – Елементи конструкції паралельної схеми ГСУ автомобіля VW Touareg Hybrid: 1 – ДВЗ (V8, $N_e=333$ к.с., $V_h=3$ л); 2 – 8-ми ступенева коробка передач з автоматичним керуванням; 3 – карданна передача; 4 – нікель-металгідридна батарея; 5 – з'єднувальна шина; 6 – електромотор $N_e=46$ к.с.; 7 – інвертор

2.4.1 Типи паралельних гібридних трансмісій

Розрізняють наступні типи паралельних гібридних трансмісій (рис. 2.17) [10]:

- мікрогібрид (старт/стоп);
- середній гібрид (рекуперація/прискорення);
- повний гібрид (рух на повній тязі).

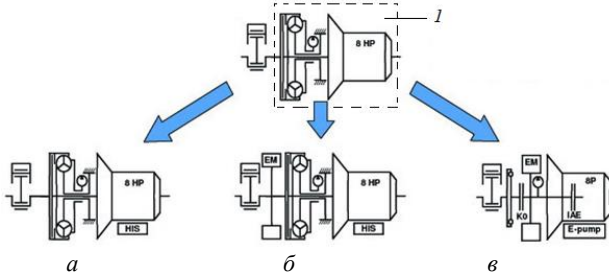


Рисунок 2.17 – Типи паралельних гібридних трансмісій: *a* – мікрогібрид; *б* – середній гібрид; *в* – повний гібрид; *I* – штатна 8-ми ступенева коробка передач з гідротрансформатором

Мікрогібрид здатний забезпечити двигуну лише режим старт-стоп, потрібний для того, щоб глушити двигун на коротких зупинках, наприклад, на світлофорі, щоб він не працював даремно на холостому ходу. Пуском його займається потужний стартер, який часто працює «за сумісництвом» і генератором. Коробка передач при цьому використовується штатна, з одним маленьким доповненням під назвою HIS – Hydraulic Impulse Oil Storage – імпульсний масляний насос. Він потрібний для того, щоб швидше створити тиск трансмісійної оливи в каналах коробки передач при пуску двигуна.

Середній гібрид більш складний (рис. 2.18). Він передбачає наявність електромотора потужністю 30–60 кВт. Такий мотор може допомагати ДВЗ розганяти автомобіль, особливо на малих обертах колінчастого вала, а при гальмуванні здатний запасати електроенергію в акумулятор. Коробка передач в іншому звичайнісінька, серійна, без будь-яких переробок.

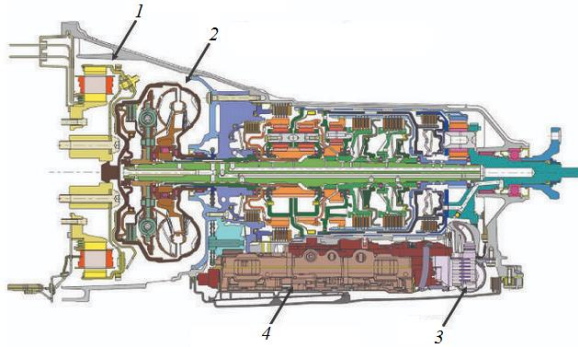


Рисунок 2.18 – Поперечний перетин коробки передач 8HP70, версія «середній гібрид»: 1 – електромотор; 2 – гідротрансформатор; 3 – імпульсний масляний насос; 4 – блок керування гідравлікою

Середні гібриди по суті є звичайними автомобілями з деяким гібридним обладнанням, але з обмеженими гібридними характеристиками. Як правило, вони представляють собою паралельний гібрид з пуском-зупинкою або, можливо, з помірними рівнями підтримки двигуна або рекуперативного гальмування. Середні гібриди зазвичай не можуть забезпечити повністю електричний рух.

Електромотор у повного гібрида (рис. 2.19) ще більшої потужності, 60–100 кВт, а на вантажівках і автобусах – до 250 кВт.

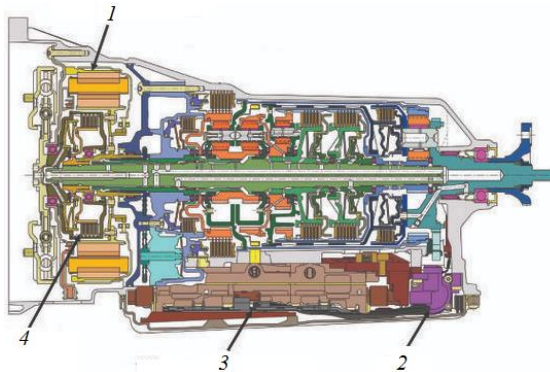


Рисунок 2.19 – Поперечний перетин коробки передач 8HP70, версія «повний гібрид»: 1 – електромотор; 2 – електричний масляний насос (ІЕР); 3 – блок керування гідравлікою; 4 – муфта

У коробці передач немає гідротрансформатора – його роль з успіхом виконує електромотор. Він же використовується і в якості генератора для поповнення заряду АКБ. Режим рекуперації тут теж є. Для руху на електротязі, при вимкненому ДВЗ, передбачена спеціальна фрикційна муфта, яка від’єднує його від коробки передач. Замість імпульсного масляного насоса встановлений електричний – ІЕР – Integrated Electric Oil Pump. Він необхідний для нормальної роботи автоматичної коробки при непрацюючому ДВЗ. Для повноцінної роботи подібного гібрида потрібна батарея великої місткості 400–600 А·год або більше.

2.4.2 Режими роботи паралельної схеми гібридної силової установки

При роботі ГСУ ТЗ паралельної схеми можливо виділити наступні характерні режими, які наведені на рисунку 2.20 [32]:

- рух ТЗ від електродвигуна (1);
- рух ТЗ від сумісної роботи ДВЗ з електродвигуном (2);
- рух ТЗ від ДВЗ з одночасною зарядкою акумуляторної батареї від електродвигуна, що працює в режимі генератора (3);
- зарядка акумуляторної батареї в режимі рекуперативного гальмування (4).

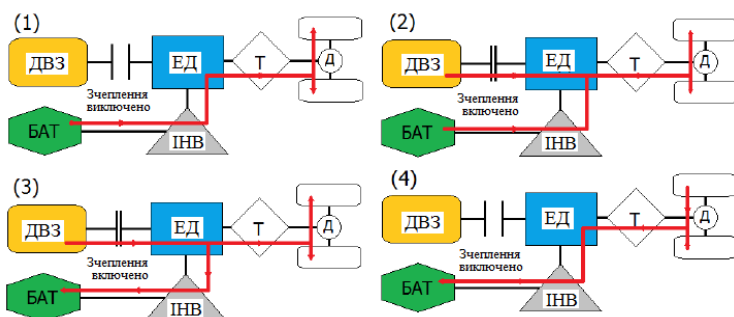


Рисунок 2.20 – Режими роботи паралельної схеми

2.4.3 Управління потоками потужності в паралельних гібридних силових установках

Керування потоками потужності в ГСУ здійснюється системою електронного керування. Ця система контролює стан

всіх інших систем автомобіля, при цьому сприймає команди водія та керує зчепленням, коробкою передач і інвертором, а також живить мотор-генератор. Можливі схеми роботи гібридних ТЗ з паралельним потоком потужності при різних режимах наведено на рисунку 2.21 [8].

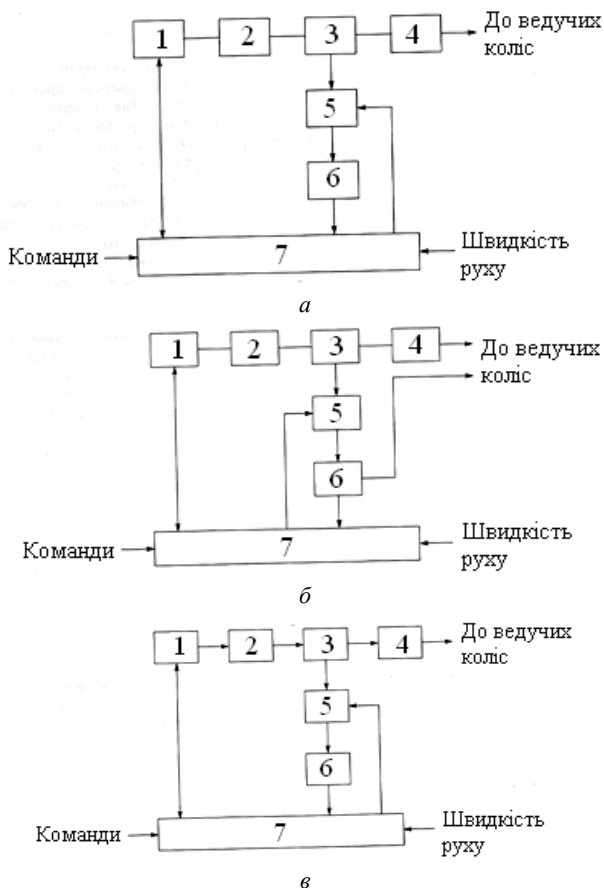


Рисунок 2.21 – Можливі схеми роботи ГСУ з паралельним потоком потужності при різних режимах: *a* – пуск ДВЗ, заряд буферної батареї від ДВЗ; *б* – початковий розгін автомобіля, рекуперативне гальмування; *в* – рух від ДВЗ, заряд буферної батареї від ДВЗ при русі; 1 – ДВЗ; 2 – зчеплення; 3 – мотор-генератор; 4 – коробка передач; 5 – інвертор; 6 – акумулятор; 7 – система керування

2.5 Послідовно-паралельна схема гібридної силової установки

Послідовно-паралельна схема ГСУ або змішана (комбінована) поєднує у собі обидві вищезгадані схеми. При цьому ДВЗ та мотор-генератор «працюють» на планетарну передачу – пристрій розподілу потужності (PSD). Цей пристрій об'єднує мотор-генератор (МГ1), мотор-генератор (МГ2), інвертори Іn1 і Іn2 управління ними і тягову високовольтну батарею (HVB). Наведена схема (архітектура) має назву система «Спліт» (рис. 2.22–2.24) [9, 11, 16].

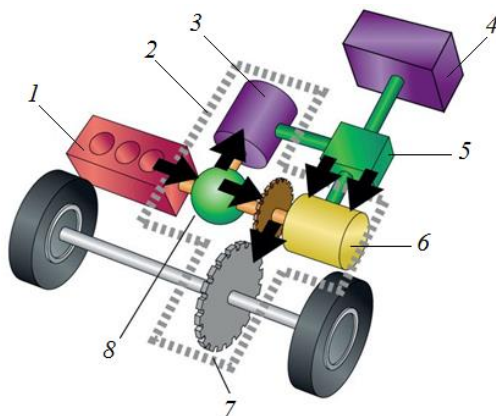


Рисунок 2.22 – Загальна послідовно-паралельна архітектура ГСУ: 1 – ДВЗ; 2 – силовий електродвигун; 3 – генератор; 4 – АКБ; 5 – перетворювач; 6 – керуючий електродвигун; 7 – трансмісія; 8 – планетарний редуктор

У комбінованій схемі отримані переваги обох систем. В даному випадку мається і ДВЗ, і електромотор. В залежності від умов руху машина може їхати або тільки на електротязі (до 1,5–2,0 км), або тільки на тязі від ДВЗ, або рушійну енергію колеса можуть отримувати і від ДВЗ, і від електромотора.

До переваг системи «Спліт» відносяться:

- досить високий ККД при передачі енергії від первинного двигуна до ведучих коліс;

- можливість роботи первинного двигуна на постійному режимі мінімальної витрати палива.

До недоліків відносяться:

– ускладнення механічної частини трансмісії (установка додаткової планетарної передачі);

– ускладнення системи управління автомобілем.

Схема може працювати як послідовна, при малих швидкостях руху, і як паралельна, при різких прискореннях. При цьому пристрій розподілу потужності відповідає за роботу і зміну схеми з'єднання основних елементів.

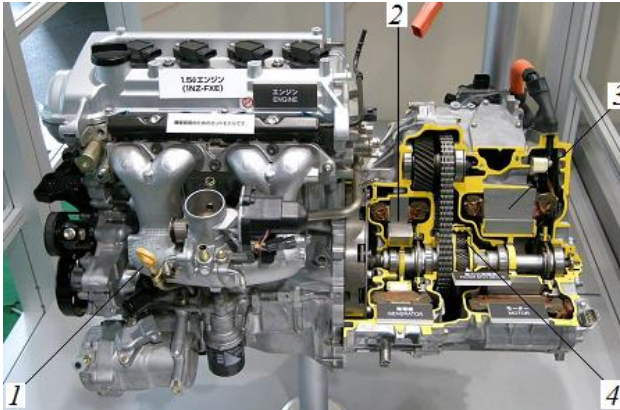


Рисунок 2.23 – ГСУ системи «Спліт»: 1 – ДВЗ; 2 – генератор; 3 – планетарна передача; 4 – електродвигун

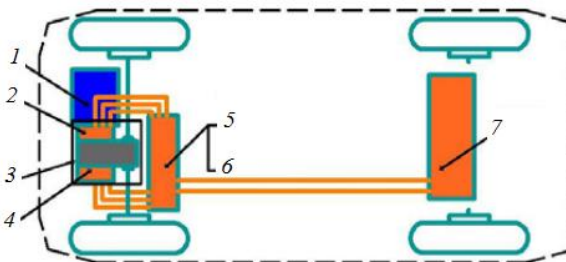


Рисунок 2.24 – Схема ГСУ змішаного типу: 1 – ДВЗ; 2, 4 – мотор-генератор (МГ1, МГ2); 3 – пристрій розподілу потужності (PSD); 5, 6 – інвертори (Ін1, Ін2); 7 – високовольтна батарея

У компанії Toyota в силовій установці Toyota Hybrid System використаний планетарний дільник силового потоку (крутного моменту), який надходить від ДВЗ і може гнучко змінюватися, передаючи одну частину енергії на генератор, а іншу частину – на колеса автомобіля. Електроенергія, яка при цьому виробляється може відразу йти як для живлення силового електродвигуна, так і для підзарядки акумуляторних батарей. Дана конструкція впроваджена в ряді моделей Toyota, в числі яких Prius, Yaris Hybrid, Auris Hybrid, Camry Hybrid, Avalon Hybrid, а також в моделях Lexus – CT 200h, IS 300h, GS 300h, GS 450h.

Режими роботи ГСУ автомобіля «Toyota Prius», який має фірмову назву Hybrid Synergy Drive, наведено на рисунку 2.25 [8]. В цій ГСУ поєднані:

- 1,5 літровий ДВЗ $N_e=43$ кВт при 4000 хв⁻¹, зовнішня кутова характеристика наведена на рисунку 2.25 [17];
- генератор змінного струму, що вбудований в маховик ДВЗ;
- тяговий електродвигун (оборотна електромашинна змінного струму – синхронний мотор-генератор $N_e=30$ кВт);
- акумулятор (змінна нікель-металгідридна батарея із 40 банок на 200 ампер-годин, яка розроблена фірмою Panasonic).

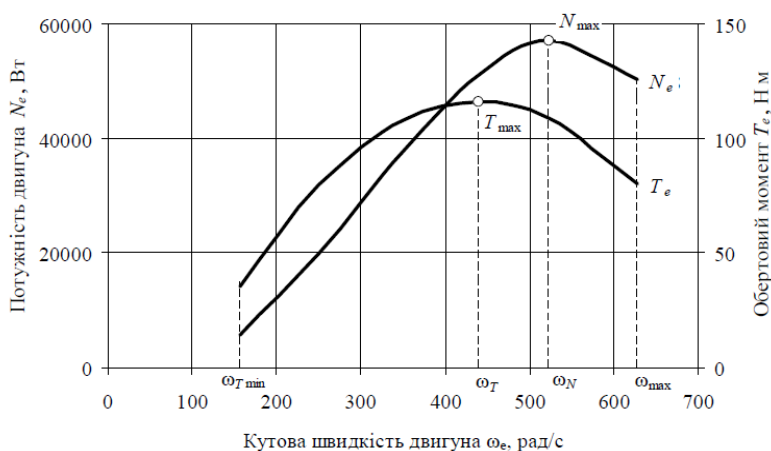


Рисунок 2.25 – Зовнішня кутова характеристика двигуна автомобіля «Toyota Prius»

ДВЗ автомобіля «Toyota Prius» працює не за циклом Отто, як у звичайних автомобілях, а за економнішим циклом Аткинсона із ступенем стискання $\varepsilon=13$ [23]. Основний недолік такого циклу – нестійка робота на низьких обертах. Однак для цього автомобіля цього недоліку не існує, бо наявний планетарний механізм дає двигуну можливість працювати у максимальному ефективному режимі за будь-якої швидкості його руху.

Усього для ГСУ автомобіля «Toyota Prius» існує п'ять режимів роботи (рис. 2.26).

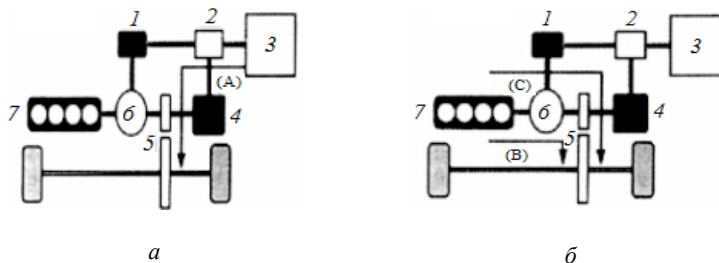
Режим 1 (рис. 2.26 а): початок руху, рушання з місця, рух зі швидкістю не більш 16 км/год здійснюється за рахунок електродвигуна, який використовує енергію накопичувача.

Режим 2 (рис. 2.26 б): нормальний рух – планетарний механізм один потік потужності спрямовує через редуктор до ведучих коліс, а другий – до генератора, який виробляє енергію для електромотора, що передає через редуктор частину крутного моменту до ведучих коліс, акумулятор не діє.

Режим 3 (рис. 2.26 в): розгін з максимальної інтенсивністю, працює такий же алгоритм, що й у *режимі 2*, тільки тепер у дію вступає акумулятор, який віддає додаткову енергію електромотору.

Режим 4 (рис. 2.26 г): сповільнення, накопичена кінетична енергія руху автомобіля перетворюється обертвою електричною машиною, яка працює в режимі генератора, в електричну, що через перетворювач рекуперується у накопичувачі енергії.

Режим 5 (рис. 2.26 д): зарядка високовольтного акумулятора.



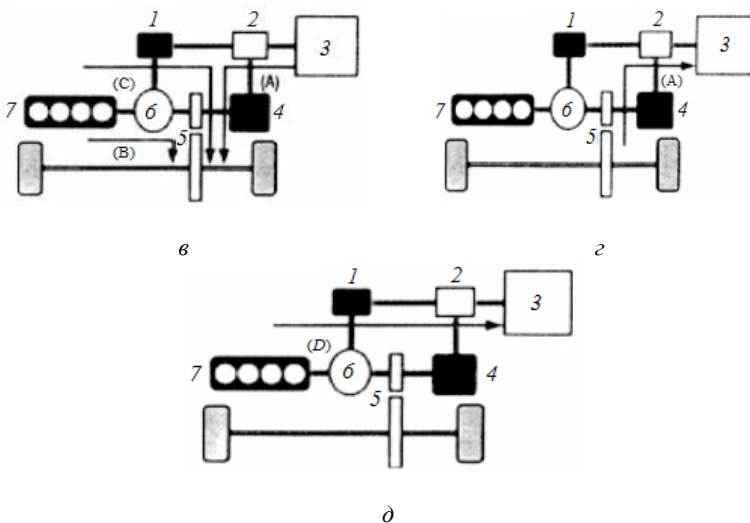


Рисунок 2.26 – Режими роботи ГСУ «спліт»: *a* – режим 1; *б* – режим 2; *в* – режим 3; *г* – режим 4; *д* – режим 5; 1 – генератор; 2 – перетворювач струму; 3 – АКБ (накопичувач електроенергії); 4 – тяговий електродвигун; 5 – редуктор; 6 – планетарний механізм; 7 – бензиновий двигун

В механічній частині ГСУ планетарний механізм виконує важливу функцію. Він регулює напрямок потоків потужності. Передні колеса автомобіля жорстко пов'язані через диференціал і пару шестерень, що підвищує обертовий момент, з мотор-генератором (МГ2) і одночасно із зовнішньою шестернею механізму – епіциклом планетарної передачі 6 (рис. 2.26, 2.27). Кінематичну схему гібридного приводу наведено на рисунку 2.28 [23].

Водило 5 сателітів 6 напряму з'єднано з колінчастим валом двигуна через демпфер (рис. 2.27, 2.28). Центральна (мала) сонячна шестерня 4 з'єднана з окремим мотор-генератором (МГ1) (рис. 2.23). Обертовий момент до головної передачі (рис. 2.24) від електромотор-генератора МГ2 підводиться безпосередньо, а від ДВЗ – через планетарний механізм. Розподіл обертового моменту ДВЗ між головною передачею і електромотором-генератором МГ1 визначається параметрами планетарного механізму. В залежності від обставин, кожну кінематичну ланку можливо

зробити нерухомою, зупинив її стрічковим гальмом по команді керуючого контролера.

Мотор-генератори МГ1 і МГ2 (рис. 2.27) функціонують як високоефективні синхронні генератори чи електродвигуни змінного струму, які за необхідності є джерелом рушійної сили. МГ1 заряджає високовольтний акумулятор і постачає електричну потужність для управління МГ2. До того ж шляхом регулювання кількості створюваної енергії (зміною внутрішнього опору і частоти обертання) МГ1 ефектно контролює неперервно-змінну трансмісію ведучого моста, а також використовується як стартер для пуску ДВЗ. Коли МГ1 або МГ2 діє як генератор, інвертор перетворює вироблений ними змінний струм напругою від 201,6 до 500 В у постійний – напругою 201,6 В для зарядки високовольтного акумулятора (рис. 2.26 д) [23].

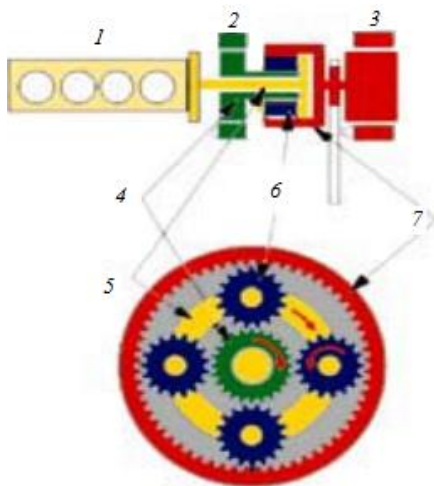


Рисунок 2.27 – Елементи конструкції ГСУ «спліт»: 1 – двигун; 2 – генератор; 3 – електромотор; 4 – центральна (мала) сонячна шестерня; 5 – водило планетарного ряду (ДВЗ); 6 – сателіти; 7 – епіциклічна шестерня планетарного ряду (електромотор, колеса)

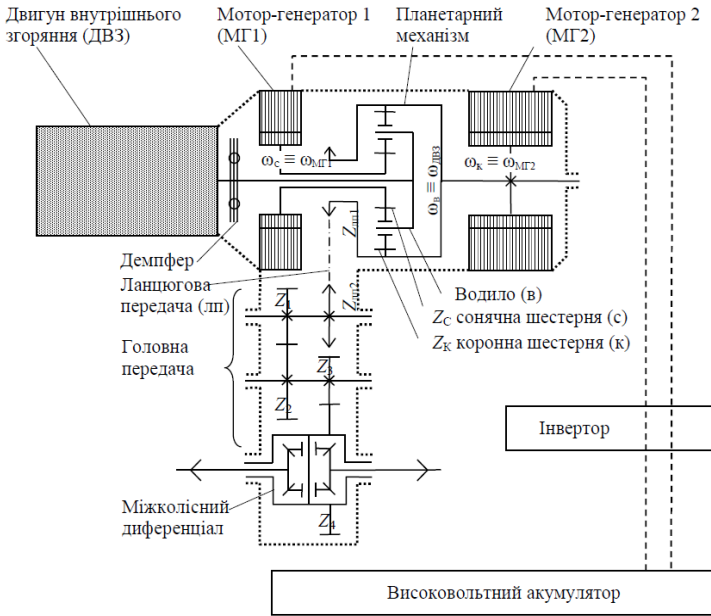


Рисунок 2.28 – Кінематична схема гібридного приводу автомобіля Toyota Prius

Характеристика електромотор-генератора наведена на рисунку 2.29 [23].

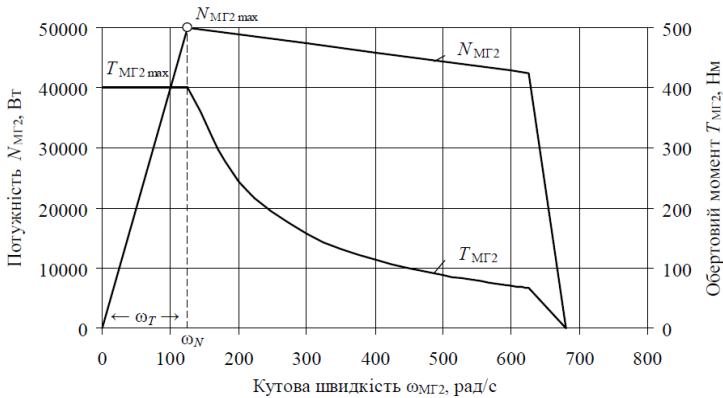


Рисунок 2.29 – Характеристика електромотор-генератора МГ2

Тягова характеристика автомобіля наведена на рисунку 2.30.

Із рисунка 2.30 видно, що, наприклад, максимальну швидкість руху 165 км/год на горизонтальній дорозі $i=0$ можна досягти з приводом тільки від мотор-генератора МГ2.

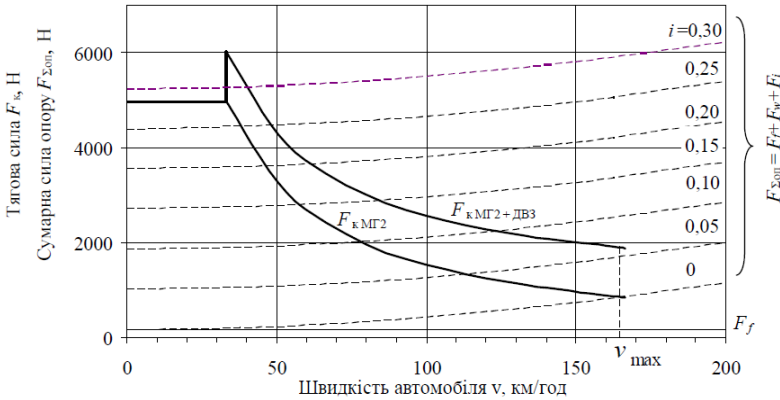


Рисунок 2.30 – Тягова характеристика у координатах тягова сила – швидкість руху автомобіля: i – поздовжній ухил дороги; F_f – сила опору руху колеса

Комбінований гібрид застосовується і в повнопривідних моделях. Але в них колеса передньої осі приводяться в дію вищеописаною комбінованою системою, як у передньопривідних моделей, а для приводу коліс задньої осі використовується окремий електродвигун (рис. 2.31) [12].

Така конструкція значно простіше, без складної трансмісії з карданними передачами і редукторами. Її застосовують в повнопривідних позашляховиках, наприклад, в Toyota Highlander Hybrid і RAV4 Hybrid.

Приклад комбінованої схеми гібридного автомобіля фірми Mitsubishi Fuso представлений на рисунку 2.32 [8].

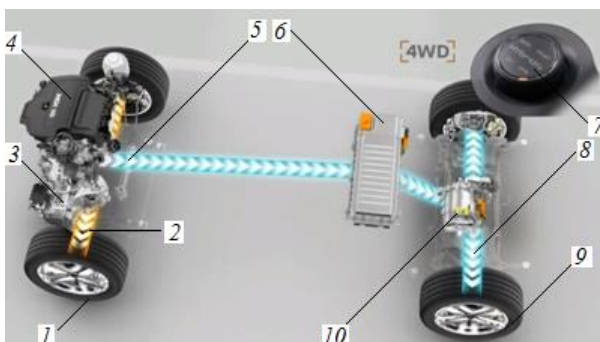


Рисунок 2.31 – Компонування комбінованої ГСУ Peugeot 3008 Hybrid4:
 1 – переднє колесо; 2 – потік потужності, що передається від механічної трансмісії; 3 – коробка передач; 4 – двигун; 5 – потік електричної енергії; 6 – накопичувач електричної енергії; 7 – пристрій включення режиму роботи; 8 – потік енергії, що передається від електродвигуна; 9 – заднє колесо; 10 – електродвигун

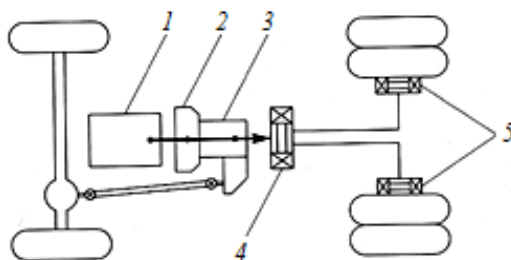


Рисунок 2.32 – Комбінована схема ГСУ фірми Mitsubishi Fuso:
 1 – ДВЗ; 2 – зчеплення; 3 – коробка передач; 4 – генератор; 5 – колісні електромотори

2.6 Особливості конструкції транспортного засобу з мотор-генератором

Особливостями конструкції ТЗ з мотор-генератором є:

– *ДВЗ*: застосовується звичайний дизельний або бензиновий двигун не менше Euro-4 з електронним керуванням подачею палива;

– *коробка передач*: передбачається використовувати звичайну автоматизовану (механічну з автоматичним перемиканням передач). У Volvo це I-Shift, Mitsubishi-Iomat, MAN, IVECO DAF – AS-Tronic;

– *електродвигун*: змінного струму, асинхронний або з постійним магнітом. Потужність від 35 кВт, крутний момент близько 200–250 Нм і більше. Додатково оснащується рідинною системою охолодження;

– *акумуляторна батарея*: літій-іонні або нікель-гідридні елементи. Робоча напруга 350–400 і більше вольт, вага батареї від 90 до 400 і більше кг;

– *перетворювач струму* (інвертор): призначений для перетворення постійного або змінного струму (генератор, мотор) в постійний для АКБ і назад;

– інтегрування мотор-генератора в зчеплення. При установці мотор-генератора на первинний вал коробки передач істотно зростає навантаження на зчеплення, а можливо, і на двигун. Наприклад, при гальмуванні з 60 км/год ДВЗ вимикається. Але первинний вал коробки продовжує обертатися, значить необхідно вимкнути зчеплення. При досягненні певної швидкості – 50 чи 30 км/год, водій натискає педаль акселератора. Зчеплення включається, і необхідно не просто запустити ДВЗ, але «миттєво» розкрутити його до оборотів, відповідних швидкості руху і включеній передачі або забезпечити запізнювання включення зчеплення;

– інтегрування мотор-генератора в коробку передач. При установці мотор-генератора на вторинний вал механічна коробка працює з різними за величиною і характером зміни потужності і крутного моменту ДВЗ і електромоторами. Коробка передач повинна варіювати потоки потужності в межах 0–100% і 100–0% (ДВЗ – електромотор). У застосовуваних автоматованих КП діє механічна частина – пари шестерень з фіксованим передавальним відношенням, підібраним під характеристики ДВЗ. Отже, в процесі варіювання потоків потужності можуть виникати втрати і перевантаження саме в цьому місці. Для цього алгоритм електронного управління повинен згладжувати пікові навантаження.

2.7 Мотор-генератор гібридної силової установки

У діапазоні потужностей мотор-генераторів від 20 до 70 кВт найбільший розвиток отримали [14]:

- асинхронний електропривід;
- електропривід з синхронним двигуном на основі постійних магнітів;

– використання вентильно-індукторного привода (експериментальні розробки).

Електропривід з синхронним двигуном на основі постійних магнітів має деякі переваги у коефіцієнті корисної дії. У синхронному електродвигуні зменшення потужності забезпечується при обмеженні напруги живлення двигуна за рахунок відповідного ослаблення магнітного поля. В синхронному приводі з постійними магнітами поле практично не регулюється, що призводить до необхідності завищення встановленої потужності перетворювача в 3–10 разів. Для приводів ТЗ категорії М1 це прийнятно, але для більш важких автомобілів категорії М2 і N2 це призводить до суттєвого подорожчання системи приводу. ККД таких типів ЕМ досягає 92%, що значно вище інших електричних машин. До їх недоліків слід віднести схильність до поступового розмагнічування ротора, особливо при високій температурі, що вимагає гарного охолодження.

Так, гібридна силова установка має 2 мотор-генератора (МГ1 і МГ2) (рис. 2.28). Вал МГ1 з'єднаний з колінчастим валом ДВЗ через амортизаційний диск і пристроєм розподілу потужності. Вал МГ2 також знаходиться в пристрої розподілу потужності, він з'єднаний з ведучою віссю автомобіля через планетарну передачу і набір зубчастих коліс. МГ1 використовується в режимі генератора для зарядки високовольтної батареї (НВВ) і в режимі електродвигуна для запуску ДВЗ. МГ2 використовується як основна «тягова» сила на початку руху при прискоренні. Він може приводити в рух автомобіль автономно, а може працювати разом з ДВЗ. Планетарний редуктор МГ2 збільшує його крутний момент у 2,64 рази [16]. У режимі генератора він поповнює заряд НВВ. В таблиці 2.3 представлені основні характеристики МГ1 і МГ2 гібридних автомобілів Toyota Prius [16].

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики мотор-генераторів

Модель		ZVW30	NHW20
МГ1	Тип	синхронний зі збудженням від постійних магнітів	
	Макс. напруження	АС 650 В (змін. струм)	АС 500 В (змін. струм)
МГ2	Тип	синхронний зі збудженням від постійних магнітів	
	Макс. потужність	60 кВт (80 к.с.)	50 кВт (67 к.с.)
	Макс. момент	207 Н·м	400 Н·м
		546 Н·м	
Макс. напруження	АС 650 В (змін. струм)	АС 500 В (змін. струм)	
Система охолодження	МГ1	рідинне охолодження	
	МГ2		

Відмінні риси мотор-генераторів різних моделей, що використовуються в ГСУ, показані на рисунку 2.33. У нових моделях мотор-генераторів загальна вага зменшена на 33% за рахунок застосування зосереджених обмоток, а максимальна потужність МГ2 у режимі електродвигуна збільшена з 50 до 60 кВт за рахунок збільшення швидкості обертання ротора.



a



б



б



г

Рисунок 2.33 – Мотор-генератори різних моделей: а – МГ1 моделі МНВ20; б – МГ1 моделі ZVW30; в – МГ2 моделі МНВ20; г – МГ2 моделі ZVW30

Охолодження мотор-генераторів здійснюється спеціальною оливою, яка постійно омиває обмотку. Проходячи через спеціальний масляний контур, олива постійно циркулює і охолоджує мотор генератор, одночасно змащуючи і охолоджуючи деталі трансмісії.

Тяговий електродвигун і мотор-генератор у гібридному автомобілі живляться від силового перетворювача (інвертора), максимальну вихідну частоту якого можливо регулювати і встановлювати у діапазоні до 500 Гц і більше, на відміну від асинхронних двигунів, які живляться від мережі з частотою 50 Гц.

Наведена відмінність є принциповою, оскільки з'являється можливість суттєвого зниження маси тягових двигунів практично без зниження їх ККД. Питання оптимізації електродвигунів для транспортного використання пов'язані не тільки з оптимізацією самого двигуна, але і з його охолодженням, конструкцією, вибором режимів його роботи у всіх областях частот обертання і навантажень.

При проектуванні силової установки необхідно враховувати, що співвідношення максимального і мінімального моментів у мотор-генератора по частоті M_{min}/M_{max} складає близько 2, а у ДВЗ – 25%. При цьому максимальний момент у мотор-генератора на відміну від ДВЗ знаходиться на максимальній частоті обертання,

а у ДВЗ у середній зоні швидкісного діапазону роботи. Тобто, передавальне співвідношення приводу повинно узгоджувати характеристики ДВЗ і мотор-генератора.

Режими роботи електродвигунів в тягових приводах і в генераторах суттєво відрізняються, тому оптимальний тип двигуна для мотор-генератора назвати важко. В одних варіантах це асинхронний двигун з коротко замкнутим ротором, в інших – синхронний з постійними магнітами. Дослідження вказують на те, що у асинхронного двигуна маються значні резерви вдосконалення конструкції.

2.8 Акумуляторні батареї гібридних силових установок

На початку 2000-х років застосування отримали *літій-іонні*, а потім і *літійєво-полімерні* (Li-Ion) акумулятори з сухим твердим електролітом. Розробники акумуляторних енергоносіїв у теперішній час продовжують активно вдосконалювати літій-іонні і літійєво-полімерні акумулятори. Для порівняння слід відмітити, що питома енергоємність літій-іонних акумуляторів може у 15 разів перевищувати енергоємність свинцевих акумуляторів. Але чистий літій із-за надмірної активності в акумуляторах не використовують. Для безпеки використовують в батареях з'єднання літію, при цьому енергоємність літій-іонних акумуляторів значно знижується, але вона втричі перевищує енергоємність свинцевих акумуляторів. Li-Ion акумуляторам характерний 5–10% саморозряд, якщо вони не використовуються, кількість їх робочих циклів суттєво залежить від розрядної потужності [14].

У теперішній час в автомобілебудуванні знайшли широке використання *нікель-металгідридні* (Ni-MH) акумулятори, які уступають літійєвим по енергоємності і більшим масогабаритним показникам. В таблиці Б.1 додатку Б наведено характеристики енергоустановок гібридних автомобілів [14].

Так, наприклад, акумуляторна батарея, що встановлена на гібридних автомобілях Lexus, має наступні особливості:

- високовольтна герметична нікель-металгідридна (Ni-MH);
- велика щільність енергії;
- низька маса;

– забезпечує ресурс, який зрівняний з ресурсом гібридного силового агрегату;

– складається з 240 елементів (40 блоків по 6 елементів, які послідовно з'єднанні шиною);

– номінальна напруга $U=288$ В (240 елементів напругою 1 В).

Високовольтна акумуляторна батарея (HVB) розташована в багажному відділенні за задніми сидіннями (рис. 2.34). Вона є джерелом постійного струму високої напруги і при поводженні з нею необхідно дотримуватися особливої обережності [16].

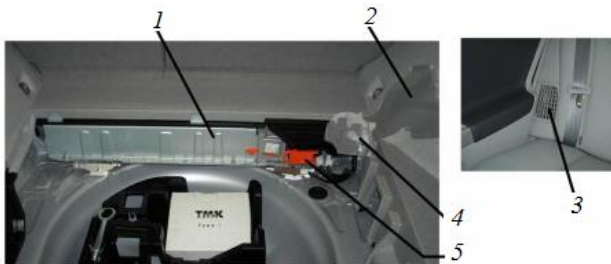


Рисунок 2.34 – Розташування високовольтної батареї:

1 – високовольтна батарея; 2 – впускний повітропровід; 3 – забірник повітря;

4 – вентилятор охолодження високовольтної батареї; 5 – сервісна вилка

Високовольтна акумуляторна батарея складається з основних компонентів, які показані на рисунку 2.35.

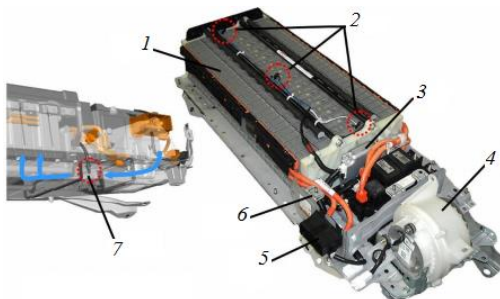


Рисунок 2.35 – Основні елементи високовольтної батареї (HVB): 1 – модуль високовольтної батареї; 2 – датчики температури модулів батареї; 3 – блок управління батареєю; 4 – вентилятор охолодження батареї; 5 – роз'єм сервісної вилки; 6 – блок реле батареї

Конструкція високовольтних Ni-MH акумуляторів показана на рисунку 2.36. Ni-MH акумулятори володіють високою щільністю енергії на одиницю об'єму акумулятора, що економить місце в автомобілі і зменшує його вагу. В Ni-MH призматичних акумуляторах позитивні та негативні електроди розміщені по черзі, а між ними розміщується сепаратор. Блок електродів вставлений в металевий або пластмасовий корпус і закритий герметичною кришкою. На кришці встановлюється датчик тиску 6 [16].

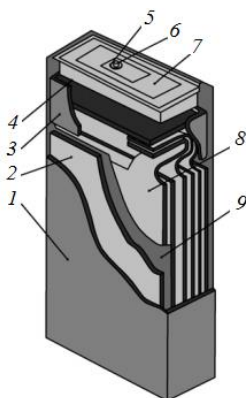


Рисунок 2.36 – Конструкція Ni-MH акумулятора: 1 – корпус; 2 – негативний електрод; 3 – ізолятор; 4 – ізоляційна прокладка; 5 – ковпачок клапана; 6 – датчик тиску; 7 – кришка; 8 – позитивний електрод; 9 – сепаратор

В Ni-MH акумуляторах використовується лужний електроліт, що складається з КОН (ідкий калій) з добавкою гідроксиду літію LiOH. Матеріалом сепаратора в Ni-MH акумуляторах є неткані поліпропілен і поліамід товщиною 0,12–0,25 мм, які оброблені спеціальним просоченням. Позитивний електрод являє собою оксидно-нікелевий пористий шар на пенополімерній основі. Негативний електрод складається з порошку або пасти активної маси, яка має водень абсорбуючі властивості, нанесеної на струмопровідну сітку.

Характеристиками Ni-MH акумулятора, як джерела електричного струму, є: напруга, електрична ємність, внутрішній опір, струм саморозряду і термін служби. Значення напруги

розімкнутого ланцюга $U_{р.л.}$ зарядженого Ni-MH акумулятора знаходиться в інтервалі 1,50–1,35 В. Номінальна розрядна напруга U_p при нормованому струмі розряду $I_p = 0,1-0,2C_{ном.}$ ($C_{ном.}$ – номінальна ємність акумулятора) при 25°C становить 1,2–1,25 В [16].

Для забезпечення надійної роботи Ni-MH акумулятора протягом гарантованого терміну служби слід виконувати рекомендації заводу-виготовлювача: дотримуватися температурного режиму заряду; уникати розрядки (нижче 1 В) і коротких замикань; уникати поєднання вживаних невикористаних акумуляторів; не паяти і не нагрівати контакти акумуляторів.

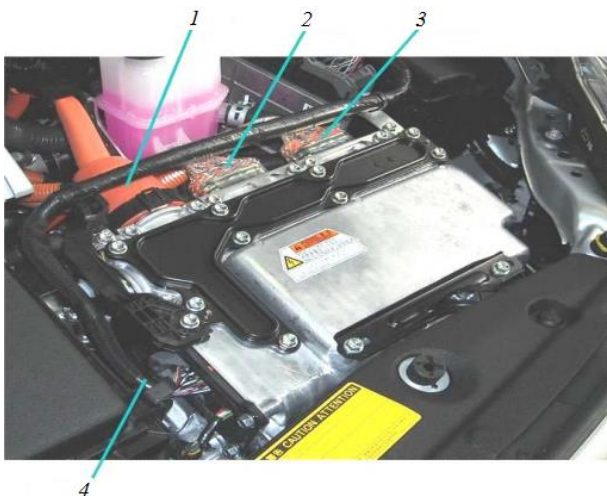
2.9 Інвертори гібридних силових установок

Інвертори призначені для перетворення постійного струму в змінний трифазний для управління швидкістю і обертовим моментом мотор-генераторів. Регульовані параметри струму в трифазній обмотці – це: частота, шпаруватість і напруга. Шпаруватість – це параметр, що відображає ступінь заповнення імпульсів напруги при широтно-імпульсній модуляції напруги. Управління скважністю дозволяє плавно змінювати крутний момент мотор-генератора.

Розташування інверторів в автомобілі показано на рисунку 2.37, а характеристики їх основних компонентів і розміри для різних моделей ГСУ наведені в таблиці 2.4.



а



б

Рисунок 2.37 – Розташування інверторів на автомобілі: а – загальний вид підкапотного простору; б – висновки високовольтних кабелів інвертора:

1 – високовольтний кабель НVB; 2 – високовольтний кабель МГ1; 3 – високовольтний кабель МГ2; 4 – високовольтний кабель електродвигуна компресора кондиціонера

Таблиця 2.4 – Характеристики інверторів різних моделей

Модель		ZVW30	NYW20
Компоненти		Інвертор, підвищувач перетворювач, ЕБУ мотор-генераторів і DC/DC-конвертер	Інвертор, підвищувач перетворювач, DC/DC-конвертер і А/С-інвертор
Система охолодження	Компоновка	SLLC (окремо від системи охолодження двигуна)	
	Принцип дії	Прямого охолодження	Непрямого охолодження
Розміри (для довідки)	Вага, кг	13,5	–
	Об'єм, л	13	26

На рисунку 2.38 показані висновки високовольтних кабелів інвертора та їх призначення.

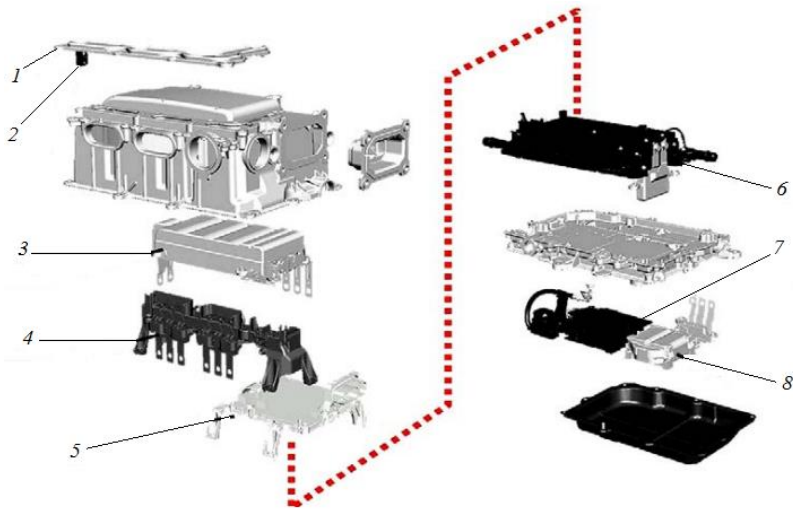


Рисунок 2.38 – Структура блоку інверторів: 1 – кришка інвертора; 2 – блокувальний вимикач; 3 – конденсатор; 4 – датчик струму інвертора; 5 – ЕБУ мотор-генераторів; 6 – інтелектуальні силові ключі; 7 – DC/DC-конвертер; 8 – реактор

Блок інвертора має багатшарову структуру, показану на рисунку 2.38. Вона дозволила знизити вагу і зробити його компактнішим. Основними компонентами є:

- конденсатор;
- інтелектуальні силові модулі;
- реактор;
- ЕБУ мотор-генераторів;
- DC/DC-конвертер.

Функціональний зв'язок інвертора з блоком високовольтної батареї, трансмісією, компресором кондиціонера і допоміжною акумуляторною батареєю приведена в структурній схемі на рисунку 2.39. Електрична взаємодія ГСУ з інвертором і конвертером показано на рисунку 2.39.

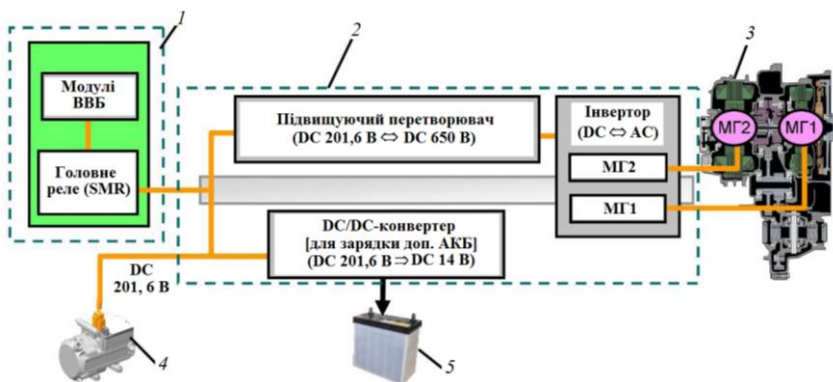


Рисунок 2.39 – Структурна схема блоку інвертора: 1 – блок високовольтної батареї (DC 201,6 В); 2 – інвертор з конвертером у зборі; 3 – трансмісія; 4 – компресор кондиціонера з електроприводом; 5 – допоміжна АКБ

Система охолодження інвертора виконана окремо від системи охолодження двигуна. Конструкція і основні елементи системи охолодження показані на рисунку 2.40.

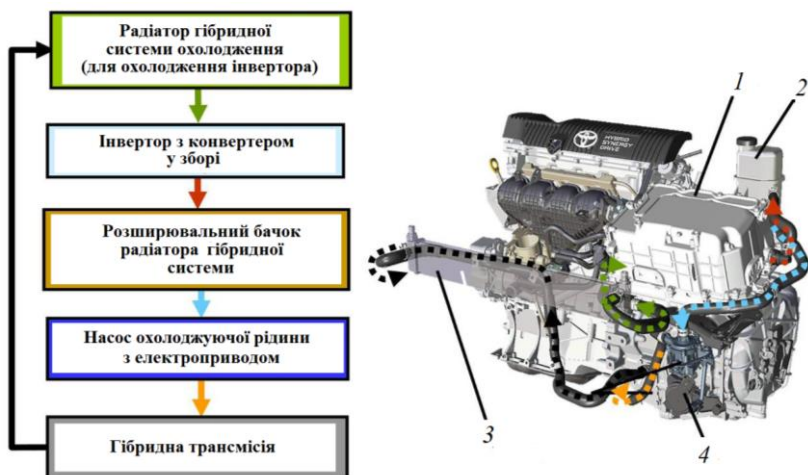


Рисунок 2.40 – Схема системи охолодження інвертора:
1 – інвертор з конвертером в зборі; 2 – розширювальний бачок гібридної системи; 3 – радіатор гібридної системи; 4 – електричний насос

2.10 Гібридні енергетичні силові установки квадріциклів

2.10.1 Загальні відомості

На даний час мікролітражні автомобілі привертають потенційного споживача наступними якостями [24]:

– компактністю, що має практичну цінність в умовах тісного міського руху і проблемної парковки;

– економічністю, досягнув малою витратою палива і меншими податками з власника;

– привабливою ціною в порівнянні з вартістю звичайних автомобілів;

– можливістю управління міні-автомобілем без водійських прав або з мотоциклетними правами, що привабливо для молоді, людей похилого віку і людей з фізичними обмеженнями. Авторами в роботі [24] представлений наступний типаж 4-х колісних ТЗ.

Транспортні засоби автомобільного типу, які мають:

- ДВЗ об'ємом до 50 см³;
- ДВЗ об'ємом до 500 см³;
- ДВЗ об'ємом понад 500 см³;
- ГСУ.

Транспортні засоби мотоциклетного типу, які мають:

- ДВЗ об'ємом до 50 см³;
- ДВЗ об'ємом до 500 см³;
- ДВЗ об'ємом понад 500 см³;
- ГСУ.

На рисунку 2.41 наведено можливі схеми розташування основних агрегатів квадріциклів, а на рисунку 2.42 – загальний вигляд деяких моделей, розроблених в ВАТ «Іжмаш».

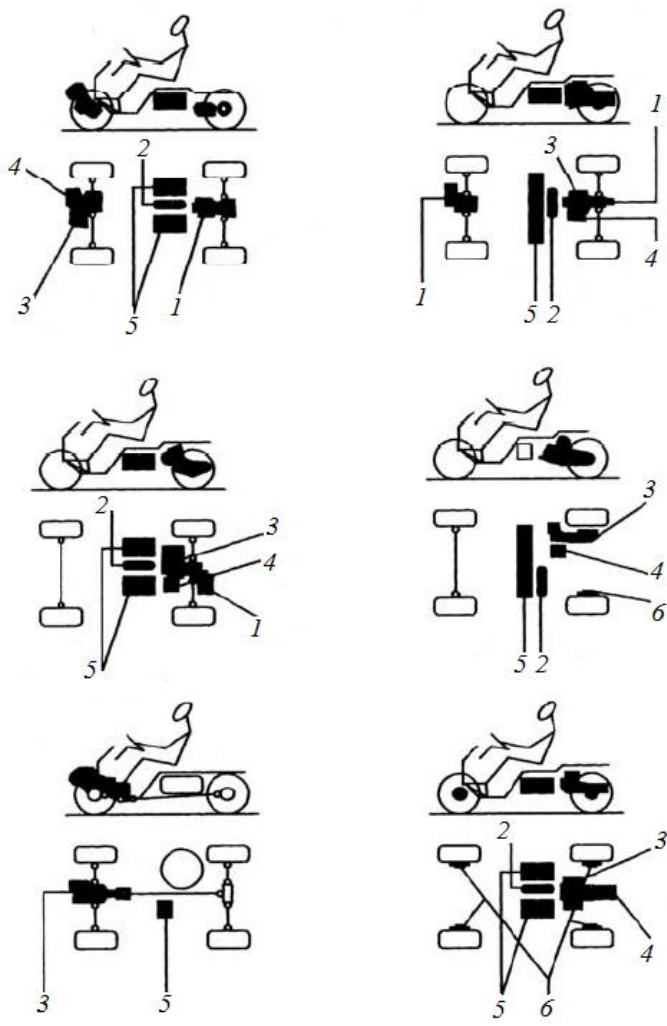


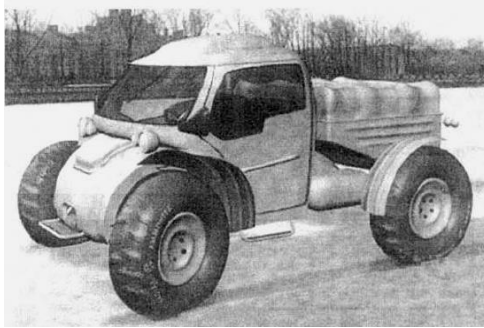
Рисунок 2.41 – Компонувальні схеми квадріциклів: 1 – електричний двигун; 2 – пристрій синхронізації; 3 – ДВЗ; 4 – генератор; 5 – акумуляторні батареї; 6 – мотор-колесо



a



б



в

Рисунок 2.42 – Загальний вид квадрициклів: *a* – чотирихмістний з мотоциклетною посадкою; *б* – двомістний; *в* – з гібридним двигуном на основі двотактного мотоциклетного ІЖ-Ю5. Знаряджена маса – 300 кг, корисне навантаження – 2 чоловіка і 15 кг вантажу

Автори в роботі [24] вважають, що в залежності від сформульованих вимог до паливної економічності, екологічності, тягово-швидкісних властивостей, компонованню тощо в конструкції квадрицикла можна застосувати різні агрегати і

конструктивні схеми гібридних енергосилових установок (ГЕСУ). Наприклад, в якості теплового двигуна (ТД) можна використовувати бензиновий ДВЗ, дизель, газотурбінний двигун та ін.; в якості електродвигуна (ЕД) – різні типи ЕД постійного і змінного струму; в якості накопичувача енергії (НЕ) – свинцево-кислотні акумуляторні батареї, маховикові накопичувачі кінетичної енергії та ін.

ГЕСУ, що розробляються, можна розбити на два типи в залежності від принципу компоновальних рішень по розміщенню тепло- і електродвигунів. Перший тип – ГЕСУ послідовної компоновальної схеми (рис. 2.43), при якій ведучі колеса квадріцикла приводяться в рух від електродвигуна.

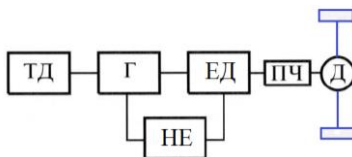


Рисунок 2.43 – Структурна схема гібридного квадріцикла з послідовною компоновальною схемою ГЕСУ: ТД – тепловий двигун; ЕД – електричний двигун; НЕ – накопичувачі енергії; Г – генератор; Д – міжколісний диференціал; ПЧ – перетворююча частина

Другий тип – ГЕСУ паралельної компоновальної схеми (рис. 2.44), при якій привід ведучих коліс може здійснюватися одночасно від теплового двигуна і (або) електродвигуна.

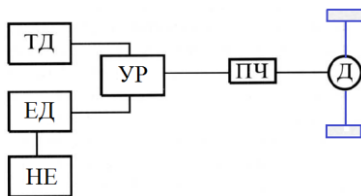


Рисунок 2.44 – Структурна схема гібридного квадріцикла з паралельною компоновальною схемою ГЕСУ: ТД – тепловий двигун; ЕД – електричний двигун; НЕ – накопичувач енергії; Г – генератор; Д – міжколісний диференціал; ПЧ – перетворююча частина; УР – узгоджувачий редуктор

2.10.2 Послідовна компоувальна схема гібридної енергетичної силової установки

Вихідним валом ГЕСУ першого типу є вихідний вал електродвигуна, з якого потік потужності надходить на ведучі колеса квадріцикла. За тепловим двигуном розташований генератор (Г) електричної енергії, а за вихідним валом ЕД зазвичай знаходиться муфта зчеплення. Для збільшення і зміни переданого крутного моменту між вихідним валом і ведучими колесами можна встановити коробку передач і редуктор, а далі – міжколісний диференціал (Д) (рис. 2.45).

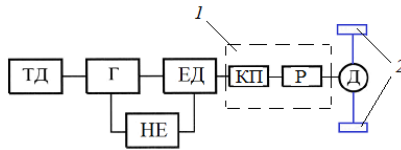


Рисунок 2.45 – Структурна схема гібридного квадріцикла з послідовною компоувальною схемою ГЕСУ: ТД – тепловий двигун; ЕД – електричний двигун; НЕ – накопичувач енергії; Г – генератор; Д – міжколісний диференціал; КП – коробка передач; Р – редуктор (головна передача); 1 – перетворююча частина; 2 – ведучі колеса

Ділянка від вихідного вала ГЕСУ до диференціала авторами умовно названа перетворюючою частиною (ПЧ) ГЕСУ. При цьому можлива й інша конструкція ПЧ, наприклад, у повноприводному квадріциклі можуть бути розміщені роздавальна коробка, міжосьовий диференціал й т.п. (рис. 2.46). Будь-яка з перерахованих складових ПЧ може, як бути присутньою, так і бути відсутньою в конструкції.

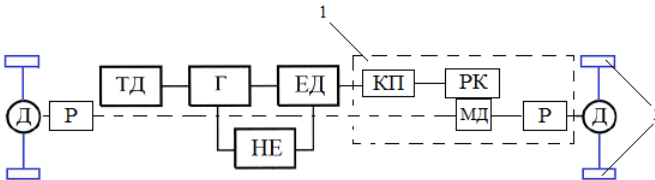


Рисунок 2.46 – Структурна схема гібридного квадріцикла з послідовною компоувальною схемою ГЕСУ: ТД – тепловий двигун; ЕД – електричний двигун; НЕ – накопичувач енергії; Г – генератор; Д – міжколісний диференціал; МД – міжосьовий диференціал; КП – коробка передач; Р – редуктор (головна передача); 1 – перетворююча частина; 2 – ведучі колеса

При русі квадріцикла з усталеними швидкостями або при розгоні з невеликими прискореннями передача потужності від ТД до ведучих коліс буде проходити через такі агрегати квадріцикла:

$$\text{ТД} \rightarrow \text{Г} \rightarrow \text{ЕД} \rightarrow \text{ПЧ} \rightarrow \text{Д.}$$

Якщо при цьому НЕ знаходиться в розрядженому стані, то енергія в нього надходить додатково по ланцюгу:

$$\text{ТД} \rightarrow \text{Г} \rightarrow \text{НЕ.}$$

При необхідності додаткової сили тяги на ведучі колеса (наприклад, у важких дорожніх умовах, при динамічному розгоні, збільшенні опору руху при високих швидкостях квадріцикла) енергія від накопичувача надходить до ведучих коліс по колу:

$$\text{НЕ} \rightarrow \text{ЕД} \rightarrow \text{ПЧ} \rightarrow \text{Д,}$$

одночасно з передачею потужності від теплового двигуна по ланцюгу:

$$\text{ТД} \rightarrow \text{Г} \rightarrow \text{ЕД} \rightarrow \text{ПЧ} \rightarrow \text{Д.}$$

Рух квадріцикла можливий при відключеному ТД за рахунок енергії, що надходить тільки від НЕ, наприклад, при необхідності зменшення викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами ТД (рух в закритих заводських та інших приміщеннях, на території лікувальних установ, в містах з високими густиною населення і транспортними потоками та ін.). При гальмуванні та при русі накатом за рахунок переходу електродвигуна в режим генератора енергія уповільнення і гальмування рекуперується в енергію НЕ по ланцюгу:

$$\text{Д} \rightarrow \text{ПЧ} \rightarrow \text{ЕД} \rightarrow \text{НЕ.}$$

Послідовна конструктивна схема дозволяє використовувати ТД в малому діапазоні частоти обертання колінчастого вала на режимах найкращої паливної економічності (малих питомих

витрат палива). Однак отримати високі показники паливної економічності в даному випадку проблематично через багаторазове перетворення енергії. При передачі всієї енергії від ТД на ведучі колеса квадріцикла буде відбуватися триразове й більш її перетворення. Одна частина теплової енергії ТД перетворюється в механічну енергію, механічна в генераторі – в електричну, а потім в механічну в електродвигуні. Інша частина енергії в НЕ перетворюється додатково з електричної енергії в хімічну, а потім знову в механічну в електродвигуні. Кожне перетворення енергії супроводжується її втратами. Крім того, надійність цієї конструктивної схеми залежить від надійності роботи електродвигуна і генератора, тобто при виході хоча б одного з них з ладу продовжувати рух на квадріциклі неможливо. Але, коли основними вимогами до квадріциклу є такі, як зменшення токсичних викидів в атмосферу або раціональність компоновального рішення, застосування послідовної компоновальної схеми виправдано. Відомо, що токсичність відпрацьованих газів ТД збільшується багаторазово при його роботі на несталіх режимах, більшу частину яких можна виключити за рахунок застосування на квадріциклі ГЕСУ послідовної схеми. Правда, повністю реалізувати роботу ТД на сталих режимах неможливо через часту необхідність збільшення крутних моментів на ведучих колесах в процесі розгону або при збільшенні дорожнього опору.

2.10.3 Паралельна компоновальна схема гібридної енергетичної силової установки

Послідовна компоновальна схема ГЕСУ через великі втрати енергії програє енергетичним установкам, у яких тепло- і електродвигуни працюють паралельно і дозволяють, тим самим, підвищити паливну економічність квадріцикла. Паралельна компоновальна схема приведена на рисунку 2.44.

Для синхронізації частот обертання валів тепло- і електродвигунів в паралельній компоновальній схемі ГЕСУ передбачений узгоджувальний редуктор (УР). Квадріцикл рухається з постійними і близькими до них швидкостями за рахунок потужності, переданої до ведучих коліс по колу:

ТД→УР→ПЧ→Д.

При цьому в разі необхідності відбувається зарядка накопичувача енергії по ланцюгу:

ТД→УР→ЕД→НЖ,

тобто електродвигун переходить в режим роботи генератора.

Під час динамічного розгону до ведучих коліс квадрантика надходить додаткова енергія по ланцюгу:

НЕ→ЕД→УР→ПЧ→Д.

Рух накатом і гальмування супроводжується рекуперацією енергії в енергію накопичувача енергії по ланцюгу:

Д→ПЧ→УР→ЕД→НЕ.

Як узгоджуючий редуктор можуть використовуватися різні типи редукторів – ланцюгового, шестеренчастого, пасового типів. Результати дослідження, а також багаторічний досвід робіт по створенню ГЕСУ для транспортних машин, дозволили авторам роботи [32] виявити наступні недоліки розглянутої паралельної компоувальної схеми.

По-перше, це підвищені втрати потужності в трансмісії ГЕСУ через введення узгоджуючого редуктора. Відповідно до загальної теорії силового потоку узгоджуючий редуктор одночасно перетворює силові і швидкісні фактори потоку потужності від тепло- і електродвигуна. Втрати потужності в трансмісії, які пов'язані з циркуляцією потужності, відсутні, так як в даній конструкції паралельної схеми немає замкнутих потоків потужності. Причина підвищених втрат потужності в трансмісії полягає в складних динамічних процесах, що відбуваються в УР, тобто є великі дисипативні теплові втрати, усунути які конструктивно складно.

По-друге, складність узгодження роботи тепло- і електродвигунів через невстановлені режими роботи теплового

двигуна в різноманітних дорожніх умовах і природно-кліматичних умовах експлуатації, що, в кінцевому рахунку, також впливає на втрати енергії та призводить до підвищення динамічних навантажень в УР. Вирішення цієї проблеми можливе за допомогою пускорегулювальної апаратури і електронного блоку управління, основним показником досконалості яких є їх здатність узгоджувати роботу обох двигунів ГЕСУ при передачі крутних моментів за заданою програмою, що моделює реальні умови руху.

Можлива й інша конструкція ГЕСУ паралельної компоновальної схеми (рис. 2.47), яку також можна застосовувати при створенні квадріцикла. Ця схема більш сприятлива з точки зору узгодження роботи тепло- і електродвигунів і дозволяє зменшити динамічні навантаження в УР і знизити дисипативні втрати енергії в трансмісії.

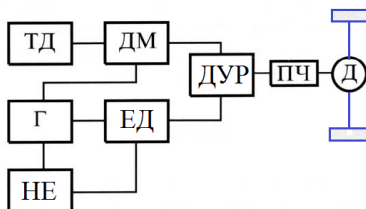


Рисунок 2.47 – Структурна схема гібридних квадріциклів при замиканні потоків потужності від ТД і ЕД через диференціал: ТД – тепловий двигун; ЕД – електричний двигун; НЕ – накопичувач енергії; Г – генератор; Д – міжколісний диференціал; ПЧ – перетворююча частина; ДУР – диференційний узгоджувачий редуктор

В цьому випадку ГЕСУ являє собою замкнуту диференціальну передачу, що дозволяє передавати потужність від теплового двигуна до ведучих коліс після ділянки потужності (ДП) двома потоками. Замикання потужних потоків від тепло- і електродвигунів здійснюється за рахунок введення в конструкцію диференційного узгоджувачого редуктора (ДУР), що створює додаткові можливості для створення автоматичної трансмісії квадріцикла. Велика частина потужності від теплового двигуна на ДУР йде по ланцюгу:

ТД→ДМ→ДУР

з постійним передавальним відношенням. Інша частина потужності надходить на ДУР через електродвигун, який працює під управлінням електронного блоку як варіатор. Таким чином, виходить автоматична трансмісія гібридного квадріцикла.

Для гібридного квадріцикла з такою структурною схемою здійснюються такі потоки потужності (рис. 2.47). При русі квадріцикла зі сталими та близькими до них швидкостями потужність до ведучих коліс передається по двох ланцюгах:

1-а: ТД→ДМ→ДУР→ПЧ→Д;

2-а: ТД→ДМ→Г→ЕД→ДУР→ПЧ→Д.

Якщо розряджений накопичувач енергії, то в цьому режимі руху енергія надходить додатково в накопичувач енергії по ланцюгу:

ТД→ДМ→Г→НЕ.

При необхідності реалізації великих крутних моментів на ведучих колесах в ГЕСУ виникає додатковий (третій) потік енергії від накопичувача енергії по ланцюгу:

НЕ→ЕД→ДУР→ПЧ→Д.

При гальмуванні та русі накатом відбувається рекуперація енергії по ланцюгу:

Д→ПЧ→ДУР→ЕД→НЕ

і електродвигун працює в режимі генератора. При необхідності руху тільки на електродвигуні (тепловий двигун відключений) потік енергії до ведучих коліс надходить по ланцюгу:

НЕ→ЕД→ДУР→ПЧ→Д.

Контрольні запитання для самоперевірки

1. Що представляє собою ГСУ?
2. Які розрізняють схеми компонування ГСУ?

3. За якими ознаками класифікуються гібридні автомобілі?
4. Які розрізняють схеми ГСУ послідовної архітектури?
5. Що є перевагами послідовної схеми ГСУ?
6. У чому полягає відмінність схем (а від б) принципів схем паралельних ГСУ, які наведені на рисунку 2.12?
7. Які розрізняють типи паралельних гібридних трансмісій ГСУ?
8. Які характерні режими можна виділити при роботі ТЗ з ГСУ паралельної схеми?
9. У чому полягає сутність послідовно-паралельної архітектури ГСУ?
10. У чому полягають особливості конструкції ТЗ з мотор-генератором?
11. Які компоновальні схеми ГЕСУ запропоновані для гібридного квадріцикла?
12. Наведіть послідовність передачі механічної енергії від двигуна на колеса у схемі, яка наведена на рисунку 2.46.
13. Наведіть послідовність передачі електричної енергії у схемі, яка наведена на рисунку 2.45.
14. Наведіть можливі варіанти паралельної компоувальної схеми ГЕСУ квадріцикла.
15. Які характерні режими роботи властиві ГСУ ТЗ з паралельною схемою?
16. Чим відрізняється компоновання силового агрегату, наведеного на рисунках 2.18 і 2.19?
17. Наведіть основні риси, які характерні для конструкції ГСУ, яка наведена на рисунку 2.16.
18. В яких місцях трансмісії ТЗ може встановлюватись мотор-генератор?
20. Які типи електроприводів можуть бути використані у діапазоні потужностей мотор-генераторів від 20 до 70 кВт?
21. Якими особливостями характеризується високовольтна акумуляторна батарея?
22. Яку функцію виконують інвертори, які застосовуються в конструкції гібридного ТЗ?
23. Які основні компоненти входять до складу інвертора?

3 КОНСТРУКТИВНІ СХЕМИ ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ

На сьогоднішній день навіть сучасні двигуни внутрішнього згорання мають ККД близько 42%.

Більша ж частина енергії «вилітає в трубу» разом з вихлопними газами. Тому багато виробників автомобілів зацікавлені в тому, щоб використовувати хоча б частину енергії, що йде разом з ВГ (відпрацьованими газами) двигунів (а це близько 40% від енергії згорілого в двигуні палива). Суть пропонуваного методу полягає в спробі використовувати теплову енергію ВГ, що марно розсіюється в навколишнє середовище, для отримання пара, енергія якого використовується для руху автомобіля.

3.1 Гібридна силова установка компанії Honda

Японські автомобільні виробники представили прототип, в якому було реалізовано рішення, що дозволяє перетворити теплову енергію ВГ в механічну, що обертає колеса автомобіля. На прототипі встановлений ДВЗ, випускний колектор якого об'єднаний з парогенератором. Пара з парогенератора прямує в турбіну, з'єднану з електрогенератором. Енергія генератора використовується для підзарядки електричної батареї, яка (як і в автомобілі Toyota Prius) живить електромотори, що обертають колеса. Таким чином, ДВЗ не витрачає потужність на привід електрогенератора (рис. 3.1) [13].

Але з іншого боку, через те що енергія проходить багаторазові стадії перетворення, які супроводжуються неминучими втратами, загальний ККД установки невисокий, приблизно 15–20% (рис. 3.2).

На даний час ведуться роботи, спрямовані на підвищення ефективності силової установки.

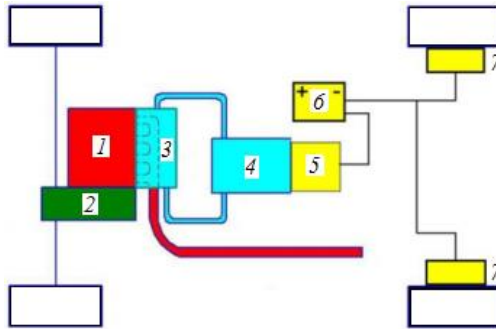


Рисунок 3.1 – Схема ГСУ Honda: 1 – ДВЗ; 2 – коробка передач; 3 – парогенератор; 4 – парова турбіна; 5 – електрогенератор; 6 – електрична батарея; 7 – ведучі колеса



Рисунок 3.2 – Схема перетворення енергії відпрацьованих газів у прототипі Honda

3.2 Гібридна силова установка фірми BMW

Інший підхід до реалізації ідеї використання енергії ВГ продемонструвала фірма BMW, випустивши прототип під назвою «Turbosteamer». Його силова установка також використовує пар в якості робочого тіла, але на відміну від японського виробника інженери BMW використовують парову машину не для підзарядки електричної батареї, а як джерело додаткового крутного моменту. Парова машина аксіально-поршневого типу встановлена безпосередньо на ДВЗ та з'єднана з колінчастим валом за допомогою пасової передачі (рис. 3.3) [13].

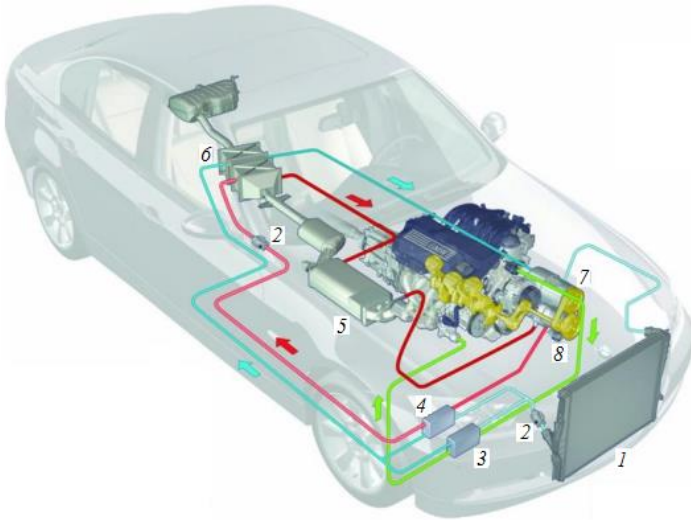


Рисунок 3.3 – Прототип BMW Turbosteamer: 1 – низькотемпературний конденсатор; 2 – насос; 3 – парогенератор; 4 – парогенератор (високотемпературний конденсатор); 5 – нагрівач пара; 6 – низькотемпературний нагрівач пара; 7 – низькотемпературний розширювач; 8 – високотемпературний розширювач; **■** – високотемпературне коло циркуляції пара; **■** – низькотемпературне коло циркуляції пара; **■** – коло циркуляції охолоджуючої води (теплоносія системи охолодження двигуна)

В якості нагрівача використовуються каталітичні нейтралізатори, які розігріваються під час роботи до 800°C . Крім створення пара, парогенератор служить ще одній меті – він охолоджує ВГ, тим самим знижуючи згубний вплив одного з найнебезпечніших компонентів ВГ – оксиду азоту.

У цієї схеми є ряд недоліків.

По-перше, використання аксіально-поршневої машини в якості парового двигуна. В силу своїх конструктивних особливостей він погано пристосований для роботи з паром. Деталі схильні до корозії, а при роботі з газоподібними речовинами ККД такої машини набагато менше, ніж при роботі з рідинами (ККД аксіально-поршневої машини, що використовує в якості робочого тіла рідину становить близько 70–80%).

По-друге, парова машина пов'язана безпосередньо з колінчастим валом двигуна, тобто незалежна робота однієї з двох силових установок не допускається.

3.3 Гібридна силова установка конструкції ІрДТУ

В ІрДТУ, на кафедрі автомобільного транспорту, велася робота над ГСУ, що працює за схожим принципом. При розробці концепції силової установки вирішувалися завдання реалізації перетворення енергії з теплової в механічну з найменшими втратами, як наслідок – отримання високого ККД силової установки, а також забезпечення можливості незалежної роботи двох силових агрегатів – ДВЗ і парової машини [13].

Як парова машина була обрана парова турбіна, в першу чергу, через свого високого ККД (90–95%). На відміну від вищезгаданих розробок, парова машина призначена не для приводу електрогенератора або «докручування» ДВЗ, а для безпосереднього приводу ведучих коліс автомобіля. Щоб уникнути ускладнення трансмісії, за основу був прийнятий повнопривідний автомобіль. При цьому ДВЗ служить приводом для передніх коліс, а парова турбіна – для задніх. Між турбіною і головною передачею встановлено варіатор для плавної зміни передавального числа відповідно до постійно мінливих дорожніх умов.

Процес пароутворення ідентичний попереднім прототипам. На випускному тракті встановлений парогенератор, сполучений з накопичувачем пара (ресивером), який потрібен для підтримки необхідного тиску пара. У міру наростання тиску в трубопроводі, що з'єднує ресивер з турбіною, відкривається клапан подачі пари. Після здійснення роботи в турбіні відпрацьований пар надходить в охолоджувач, де конденсується, і потім подається в парогенератор. Цикл повторюється (рис. 3.4).

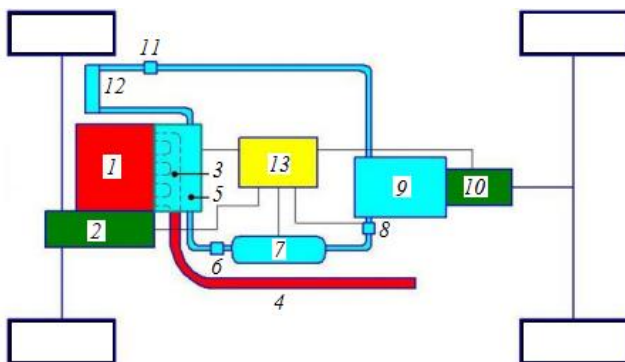


Рисунок 3.4 – ГСУ конструкції ІрДТУ: 1 – ДВЗ; 2 – коробка передач; 3 – випускний колектор; 4 – вихлопна труба; 5 – парогенератор; 6 – зворотній клапан; 7 – ресивер; 8 – клапан подачі пара; 9 – турбіна; 10 – варіатор; 11 – насос; 12 – охолоджувач; 13 – електронний блок керування

Завдяки тому, що в установці використана парова турбіна з високим ККД, а також тому, що вдалося мінімізувати втрати енергії, прибравши зайві перетворення, планується досягти досить високого ККД всієї системи – близько 70%. На підставі цього автори здійснюють прогноз ефективності силової установки (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Порівняні характеристики ГСУ

Розробник	ККД парової машини, %	ККД силової установки в цілому, %	Потужність допоміжної силової установки, кВт
Honda	–	13	30
BMW	≈50	≈20–30	10
ІрДТУ	95	≈70	≈50

Як видно з представлених даних, концепція ГСУ, розробленої співробітниками ІрДТУ, вигідно відрізняється від основних конкурентів.

Контрольні запитання для самоперевірки

1. За рахунок яких рішень можна перетворити теплову енергію ОГ в механічну, що обертає колеса автомобіля?
2. Яку функцію виконує парова турбіна в конструкції ГСУ, яка наведена на рисунку 3.4?
3. Через які елементи конструкції ГСУ, що наведена на рисунку 3.4, замикається високотемпературне коло циркуляції пара?
4. Через які елементи конструкції ГСУ, що наведена на рисунку 3.4, замикається низькотемпературне коло циркуляції пара?

4 СХЕМИ ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК З ДВИГУНАМИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ В ДЕКЛАРАЦІЙНИХ ДОКУМЕНТАХ НА КОРИСНІ МОДЕЛІ ТА ВИНАХОДИ

4.1 Гібридний автомобіль з двома двигунами внутрішнього згорання

Запропоновано гібридний автомобіль, в якому зменшення витрати палива, зменшення шкідливих викидів і збільшення ресурсу акумуляторної батареї здійснюється шляхом оптимізації режиму заряду [17].

Попереднім аналогам (прототипам) були властиві наступні недоліки.

По-перше, за рахунок використання ДВЗ малої потужності, рух був можливий лише на малій швидкості, у результаті автомобіль вибивається із транспортного потоку й стає неповноцінним.

По-друге, підвищена витрата палива й збільшені викиди в режимі заряду АКБ від ДВЗ при малій швидкості руху. Така ситуація виникає, наприклад, у заторах, у яких автомобілі повільно рухаються. Обумовлене це тим, що ємність акумуляторної батареї порівняно мала та її в такому режимі потрібно періодично підзаряджувати, особливо якщо працює кондиціонер. При кожній підзарядці ДВЗ запускається на короткий час, тому що для підвищення ККД потужність, що знімається із ДВЗ, намагаються збільшити. Це можливо тільки при зарядці АКБ великим струмом. Однак через обмежений граничний зарядний струм АКБ від ДВЗ відбирається потужність суттєво менша, чим та, при якій ДВЗ має мінімальну питому витрату палива. Відбувається це через те, що потужність ДВЗ значно перевищує потужність, необхідну для зарядки АКБ.

Додатково економічність погіршується через втрати енергії на запуск ДВЗ і через те, що за час між зарядками температура ДВЗ знижується, і, виходить, його робота відбувається в неоптимальному температурному режимі зі зниженим ККД. Показники роботи в неоптимальному температурному режимі погіршуються в холодну пору року, тому що від ДВЗ відбирається тепло для обігріву салону. Режим заряду

акумулятора великим струмом веде до зниження ККД батареї, оскільки не вся електрична енергія зарядного струму запасється в акумуляторі, частина її втрачається (іде на нагрівання акумулятора), при тому, чим більша частина, тим вище зарядний струм. Крім того, заряд великим струмом зменшує ресурс і надійність АКБ.

Пропонований гібридний автомобіль містить:

- основний ДВЗ із системами охолодження, живлення й випуску, який механічно пов'язаний з колесами й генератором;
- електродвигун, який механічно пов'язаний з колесами;
- акумуляторну батарею;
- блок керування, пов'язаний із основним ДВЗ, електродвигуном, генератором і акумуляторною батареєю;
- додатковий ДВЗ, що має системи охолодження, живлення й випуску, які пов'язані з відповідними системами основного ДВЗ;
- додатковий (другий) генератор, який механічно пов'язаний із другим ДВЗ.

Компонування ГСУ виконано таким, що другий ДВЗ і другий генератор пов'язані із блоком керування й мають меншу, ніж в основного ДВЗ і основного генератора потужність. При цьому потужність другого ДВЗ і другого генератора відповідає потужності заряду акумуляторної батареї.

Блок-схема запропонованого гібридного автомобіля зображена на рисунку 4.1.

Пропонований гібридний автомобіль працює наступним чином [17].

Наприклад, припускається що акумуляторна батарея перед поїздкою, заряджена. Початок руху й набір швидкості здійснюється за допомогою електродвигуна 5, що обертає через диференціал 8 колеса 12. Живиться електродвигун через блок керування 3 від акумулятора 4. Одночасно по командах від блоку керування запускається другий ДВЗ 2. Генератор 11 включається в режим електродвигуна запускає ДВЗ 2. Після пуску генератор 11 переводиться блоком керування в режим генератора й підзаряджає АКБ 4.

Зарядка акумулятора 4 від ДВЗ 2 під час руху забезпечує більш повільну витрату енергії запасеної в АКБ. При цьому ДВЗ

2 працює з навантаженням близької до оптимальної, отже, має максимальний ККД. Якби цю енергію виробляв основний ДВЗ, навантажений генератором на незначну частину своєї потужності, витрата палива була б більше. ДВЗ 2, маючи малий робочий об'єм, швидко прогривається й, отже, швидко виходить на режим з високим ККД. Ця властивість особливо важлива в холодну пору року, тому що швидко можна увімкнути обігрів салону (і обігрів акумуляторів). Згодом тепла енергія, що виробляється ДВЗ 2 спрямовується на прогрів основного ДВЗ, щоб при його пуску (коли знадобиться) не витратити зайву енергію на роботу холодного основного двигуна. Крім того, цей прогрів зменшує й шкідливі викиди основного ДВЗ, тому що непрогрітий працюючий двигун має підвищений рівень шкідливих викидів. Тільки після того, як буде прогрітий і основний ДВЗ зайва тепла енергія буде спрямована у радіатор автомобіля.

Якщо при збільшенні швидкості руху, енергія, що відбирається від батареї й від ДВЗ 2, перевищить задане значення, блок керування запустить основний ДВЗ 1, енергія якого буде передаватися на колеса б за допомогою трансмісії 7. Крім того, частина енергії основного двигуна буде передаватися на генератор 10 для підзарядки через блок керування 3 акумулятора 4. При цьому блок керування 3 зупиняє другий ДВЗ 2.

При необхідності отримати максимальне прискорення або швидкість (режим – акселератор до підлоги) блок керування 3 плавно включає електродвигун 5 на максимальний обертовий момент, який за рахунок енергії АКБ (і, якщо це передбачено в програмі блоку керування, то й енергії другого ДВЗ 2) додатково збільшує швидкість автомобіля. Одночасно блок керування 3 стежить за ступенем розряду АКБ і відключає її від навантаження при досягненні стану гранично припустимого розряду.

Поки педаль акселератора натиснута до упору, блок керування 3 не відбирає енергію від основного ДВЗ 1 для зарядки АКБ.

При повільному русі автомобіля в заторі, коли енергії потрібно відносно небагато, використовується енергія АКБ для живлення електромотора 5, керованого блоком керування 3. При досягненні певного частково розрядженого стану АКБ

(наприклад, 50%), блок керування 3 автоматично запускає другий ДВЗ 2, який заряджає АКБ, економно витрачаючи паливо. Таким чином, повільний рух може тривати в пробці досить довго з мінімальною витратою палива.

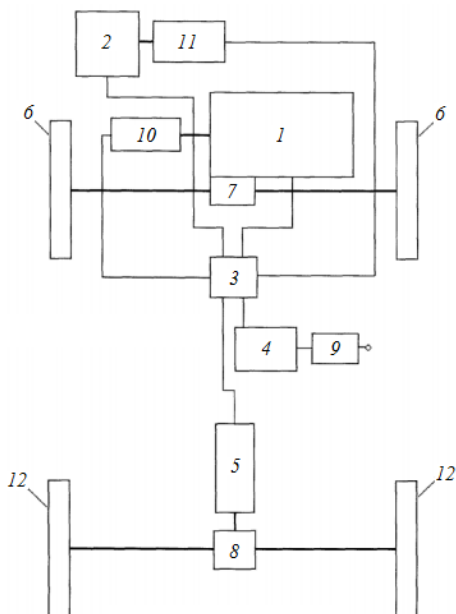


Рисунок 4.1 – Блок-схема гібридного автомобіля з двома ДВЗ:
 1 – основний ДВЗ; 2 – другий ДВЗ; 3 – блок керування; 4 – акумуляторна батарея; 5 – електродвигун; 6 і 12 – колеса; 7 – трансмісія; 8 – диференціал;
 9 – обладнання для підзарядки від зовнішньої мережі; 10 – генератор;
 11 – другий генератор, механічно пов'язаний із другим двигуном

Відмітні ознаки пропонованого винаходу забезпечують досягнення зазначеної мети, тому що значну частину дороги, особливо при русі в місті, гібридний автомобіль проходить тільки на електродвигуні, і, отже, тільки на енергії запасеної в акумуляторі. Тому суттєвими стають витрата палива й викид відпрацьованих газів при виробленні кожної кіловат-години енергії, що запасється в акумуляторі.

Якщо умови руху не дозволяють довго рухатися з досить високою швидкістю, неминуче доводиться у відомому гібридному автомобілі заряджати акумулятор від малонавантаженого ДВЗ, що працює з низьким ККД. Оптимізований за потужністю, згідно з винаходом, другий ДВЗ дозволяє на вироблення кіловат-години в таких умовах витратити менше палива й менше забруднювати навколишнє середовище.

Додатково досягненню поставленої мети сприяє поліпшення теплового режиму обох ДВЗ. Зазначене в меті винаходу збільшення терміну служби й надійності акумулятора обумовлене зниженням зарядного струму. При меншому зарядному струмі зменшуються нагрівання й електроліз усередині акумулятора, відповідно зменшуються та їх руйнівні впливи. Найбільший позитивний ефект пропонується винахід забезпечує на гібридному автомобілі з можливістю зарядки акумуляторної батареї від зовнішньої мережі. Такі автомобілі можуть на заряді АКБ (отриманому, наприклад, за час нічної стоянки) проїхати деяку відстань на дешевій електроенергії, після чого запускається ДВЗ, що рухає далі автомобіль і підзаряджає АКБ. Але в холодну пору року ДВЗ доводиться запускати відразу, жертвуючи економічністю, щоб працював опалювач салону. У гібридному автомобілі згідно пропонуваному винаходу в такому випадку відразу запускається другий ДВЗ невеликої потужності, який з одного боку збільшує пробіг на попередньому заряді АКБ, з іншого боку, як уже було сказано, забезпечує опалення салону й прогрів основного двигуна, витрачаючи мало палива.

Додаткова мета, що досягається пропонуваним винаходом, полягає в тому, що стає можливим ефективно використання в гібридних автомобілях суттєво більш дешевих свинцевих АКБ, замість Ni-MH. Одне з основних якостей Ni-MH АКБ, що обумовило їх застосування у гібридних автомобілях – здатність заряджатися відносно великими струмами.

Згідно із пропонуваним винаходом малопотужний другий ДВЗ може з високим ККД заряджати свинцеві АКБ відносно малим струмом більш тривалий час. При цьому суттєво зростає й ККД акумулятора, тому що заряд великим струмом завжди сполучений з більшими втратами. ККД свинцевого акумулятора,

що повільно заряджається – близько 90%, ККД Ni-MH, що заряджається більшими струмами – 60–70%. Такий вигравш у ККД компенсує зниження частини енергії, що йде на зберігання у свинцевий акумулятор при рекуперативному гальмуванні, у порівнянні з Ni-MH акумулятором.

4.2 Гібридний автомобіль з мехатронним накопичувачем енергії

Запропонована схема силової установки, в якій зведено до мінімуму втрати кінетичної енергії гальмування гібридного автомобіля за рахунок використання мехатронного накопичувача енергії, який включає в себе обернену електричну машину та маховик [18].

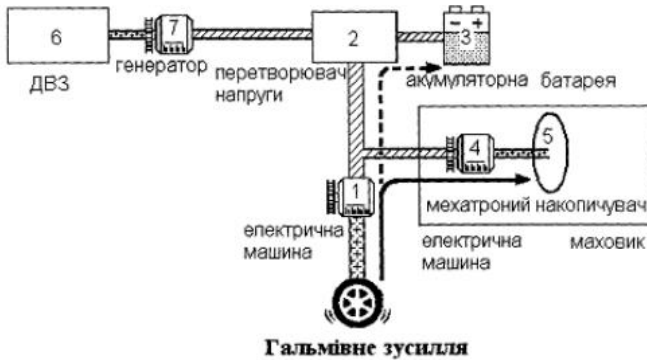
Попереднім аналогам (прототипам) були властиві наступні недоліки:

- неможливість використання мотор-колес в електромобілі та невеликий запас ходу, який обмежений джерелом енергії;

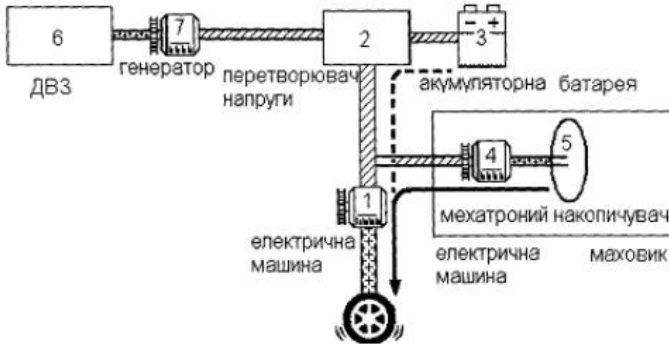
- неможливість рекуперації всієї кінетичної енергії, яка виділяється при гальмуванні автомобіля, тому що акумуляторна батарея за короткий термін гальмування автомобіля не має фізичної можливості повністю зарядитися. Більша частина кінетичної енергії, яка виділяється при гальмуванні автомобіля, розсіюється у звичайній системі гальмування з гідравлічним приводом.

Гібридний автомобіль з мехатронним накопичувачем енергії (рис. 4.2) містить:

- тяговий електричний двигун 1;
- перетворювач напруги 2;
- акумуляторну батарею 3;
- електричну машину 4;
- маховик 5;
- ДВЗ 6;
- генератор 7.



а



б

Рисунок 4.2 – Схеми роботи ГСУ гібридного автомобіля:
 а – у режимі рекуперативного гальмування; б – у режимі початку руху
 або розгону

Запропонований гібридний автомобіль з мехатронним накопичувачем енергії працює наступним чином [18]:

– у режимі гальмування гібридного автомобіля з мехатронним накопичувачем енергії (рис. 4.2 а) тяговий електричний двигун переходить у генераторний режим, тим самим перетворює механічну енергію ведучих коліс у електричну енергію. Незначна частина цієї електричної енергії через перетворювач напруги 2 йде на заряд акумуляторної батареї 3,

решта електричної енергії поступає на електричну машину 4, що працює у режимі двигуна та віддає механічну енергію на маховик 5;

– у режимі початку руху або розгону гібридного автомобіля з мехатронним накопичувачем енергії (рис. 4.2 б) енергія, що була накопичена на маховику 5, через електричну розв'язку: електричний генератор 4 – електричний двигун 1, подається на ведучі колеса автомобіля (рис. 4.2 б). При цьому, за необхідністю, з акумуляторної батареї 3 теж подається струм на тяговий електричний двигун 1, але цей струм значно менший того, який би він був без використання маховика 5;

– у режимі зупинки гібридного автомобіля з мехатронним накопичувачем енергії енергія, що була накопичена на маховику, через електричний генератор та перетворювач напруги, використовується для заряду акумуляторної батареї.

Таким чином відбувається підвищення економічних та екологічних показників гібридного автомобіля, зниження витрати палива та є можливість використання мотор-коліс. Найбільший ефект від запропонованої корисної моделі досягається у міському циклі руху, в якому чергуються режими розгону та гальмування.

Крім того використання на гібридному автомобілі запропонованої корисної моделі збільшує строк служби та підвищує надійність роботи акумуляторної батареї за рахунок того, що більша частина пускового струму тягового електричного двигуна береться від мехатронного накопичувача замість акумуляторної батареї.

Використання на гібридному автомобілі мехатронного накопичувача дозволяє також збільшити ресурс акумуляторної батареї шляхом оптимізації системи рекуперативного гальмування, пуску тягового електричного двигуна та заряду акумуляторної батареї.

4.3 Пристрій для перетворення силового агрегату автомобіля з розташованим поперечно двигуном внутрішнього згорання в гібридний силовий агрегат

Запропоновано пристрій для перетворення силового агрегату автомобіля, з розташованим поперечно ДВЗ, у гібридний силовий агрегат, що містить електродвигун і механізм передачі крутного моменту з вала електродвигуна. Він відрізняється тим, що механізм виконаний у вигляді пасової передачі, адаптованої для

передачі крутного моменту на первинний вал коробки передач силового агрегату (рис. 4.3) [19].

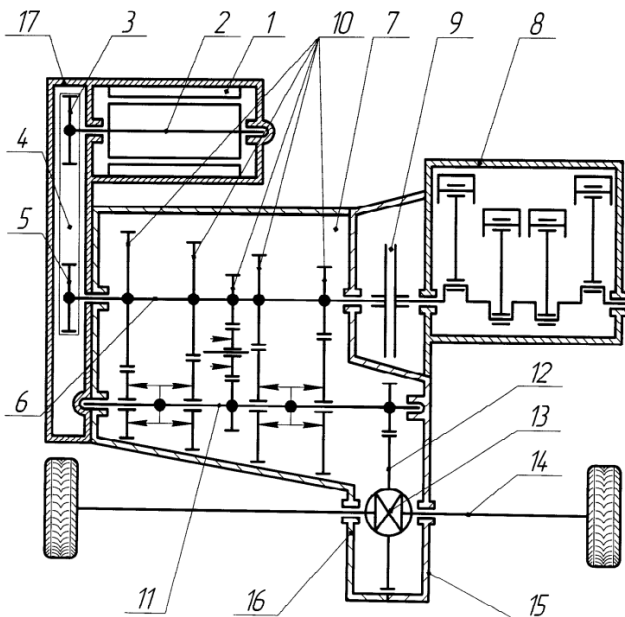


Рисунок 4.3 – Схема ГСУ з пасовою передачею: 1 – електродвигун; 2 – вал електродвигуна; 3, 5 – шків; 4 – пас; 6 – вал коробки передач; 7 – коробка передач; 8 – ДВЗ; 9 – муфта зчеплення; 10 – зубчаста передача; 11 – вторинний вал коробки передач; 12 – головна передача; 13 – диференціал; 14 – ведуча ось; 15, 16 – половини корпусу; 17 – єдиний модуль

Попереднім аналогам (прототипам) були властиві наступні недоліки:

- збільшені габарити картера зчеплення і силового агрегату;
- значні розміри електродвигуна, об'єднаного з редуктором, що є наслідком передачі великого крутного моменту безпосередньо на вторинний вал коробки передач і виключення функції існуючих зубчастих передач первинного і вторинного валів коробки передач при роботі електродвигуна.

Пристрій для перетворення силового агрегату автомобіля з розташованим поперечно ДВЗ у гібридний силовий агрегат містить (рис. 4.3):

- електродвигун 1;
- вал 2;
- шків 3, 5;
- ведучий пас 4.

Силовий агрегат автомобіля об'єднує в єдине ціле трансмісію і ДВЗ 8.

Корпус трансмісії складається з двох частин:

- перша частина: половина корпусу 15, що об'єднує картер зчеплення 9 і головної передачі 12 з диференціалом 13;
- друга частина: половина корпусу 16, що вміщує первинний вал 6 і вторинний вал 11 із зубчастими передачами 10.

Як електродвигун 1 може бути використаний вентиляційний електродвигун з дисковим ротором.

Пасова передача 3, 4, 5 може бути розміщена в кожусі (на рис. 4.3 не показано).

Електродвигун 1 і пасова передача 3, 4, 5 являють собою єдиний модуль 17.

Запропонована конструкція дозволяє здійснювати гібридному силовому агрегату як мінімум п'ять режимів роботи:

- робота в режимі приводу коліс тільки від електродвигуна;
- спільна робота ДВЗ та електродвигуна для приводу коліс;
- робота електродвигуна для приводу ДВЗ (режим стартера);
- робота ДВЗ для приводу електродвигуна (режим генератора електричного струму);
- робота пристрою в режимі рекуперативного гальмування – передача обертання від коліс на електродвигун, який працює в режимі генерації електричного струму.

Гібридний силовий агрегат працює також як і силовий агрегат у режимі приводу коліс тільки від ДВЗ 8. При цьому він передає обертання на первинний вал 6 через муфту зчеплення 9, далі через одну з зубчастих передач 10 на вторинний вал 11, з нього через головну передачу 12 і диференціал 13 на ведучу вісь автомобіля 14. В процесі роботи обертання з первинного вала 6 також передається на вал 2 електродвигуна 1 через пасову

передачу 3, 4, 5, але його обмотки в цьому режимі відключені і він не впливає на передачу обертання з ДВЗ на колеса (рис. 4.3).

За участю пристрою для перетворення силового агрегату гібридний силовий агрегат працює наступним чином.

1. В режимі приводу коліс від електродвигуна 1 зчеплення 9 розмикається, обертання валу 2 електродвигуни 1 передається за допомогою пасової передачі 3, 4, 5 на первинний вал 6, далі через одну із зубчастих передач 10 на вторинний вал 11, з нього через головну передачу 12 і диференціал 13 на ведучу вісь автомобіля 14.

2. В режимі спільного приводу коліс від електродвигуна 1 і ДВЗ 8 обертання від обох двигунів передається на первинний вал 6 аналогічно їх роботі окремо, далі через одну з зубчастих передач 10 на вторинний вал 11, з нього через головну передачу 12 і диференціал 13 на ведучу вісь автомобіля 14.

3. У режимі роботи електродвигуна 1 для запуску ДВЗ 8 зубчасті передачі 10 з первинного вала 6 на вторинний вал 11 не задіяні. Обертання валу 2 електродвигунів 1 передається за допомогою пасової передачі 3, 4, 5 на первинний вал 6, далі через муфту зчеплення 9 на ДВЗ 8.

4. В режимі роботи пристрою для перетворення силового агрегату для генерації електричного струму зубчасті передачі 10 з первинного вала 6 на вторинний вал 11 не задіяні. ДВЗ 8 передає обертання на первинний вал 6 через муфту зчеплення 9, далі обертання передається на вал 2 електродвигуна 1 за допомогою пасової передачі 3, 4, 5. Електродвигун 1 в цьому випадку працює в режимі генератора електричного струму.

5. В режимі роботи пристрою для перетворення силового агрегату для рекуперативного гальмування електродвигуном 1 обертання від ведучої вісі автомобіля 14 передається через диференціал 13 і головну передачу 12 на вторинний вал 11, з нього через одну з зубчастих передач 10 на первинний вал 6, далі обертання передається на вал 2 електродвигуна 1 за допомогою пасової передачі 3, 4, 5. Електродвигун 1 в цьому випадку працює в режимі генератора електричного струму. В цьому режимі муфта зчеплення 9 може бути включена або відключена.

Корисна модель зменшує габарити пристрою і усуває інші недоліки найбільш близького аналога.

4.4 Схема гібридного приводу автомобіля

Запропоновано рішення гібридної схеми приводу автомобіля $m_a=1300$ кг. Схема містить ДВЗ $N_e=45$ кВт, вал якого механічно пов'язаний з ротором першої ЕМ № 1, статор якої закріплений на валу з ротором ЕМ № 2 і пов'язаний з первинним валом двоступеневої коробки передач (рис. 4.4). При цьому друга електрична машина з'єднана з пристроєм накопичення енергії – батарея конденсаторів: $m=80$ кг; $U_{max}=288$ В, $U_p=70-270$ В (рис. 4.4) [20, 22].



Рисунок 4.4 – Схема гібридного приводу

Вибір конденсаторів замість акумуляторної батареї був обумовлений, в першу чергу, їх високим ККД заряду і розряду. Звичайно, низька енергоємність конденсаторів змушує збільшувати їх масу до гранично допустимого значення і стежити, щоб вони не були розряджені при інтенсивному енергоспоживанні. Це, в свою чергу, змушує на деяких режимах переводити ДВЗ на більш високу потужність і в менш економічну зону. Незважаючи на цей недолік, на погляд автора, конденсатори більш перспективні в порівнянні з дорогими акумуляторами, в тому числі із-за практично необмеженого терміну служби.

Принцип роботи запропонованої схеми автор розглядає, розділивши графік руху автомобіля умовно на чотири режими [22].

Режим № 1. При зупинці автомобіля

При зупинці автомобіля передбачено примусове обертання колінчастого вала ДВЗ ЕМ № 1. Такий режим змодельований для запобігання масляного голодування ДВЗ. Одночасно це дозволяє уникнути неефективного споживання палива на холостому ходу, а значить, з точки зору екології, є очевидна перевага. Для більшої ефективності в схемі доречно застосовувати ДВЗ з функцією декомпресії циліндрів, де момент опору на прокручування вала буде істотно нижче.

Режим № 2. Розгін автомобіля

Розгін автомобіля до швидкості 30 км/год здійснюється ЕМ № 2. Швидкість отримана експериментально для забезпечення так званого «нульового» балансу енергії в міському циклі. «Нульовий» баланс означає, що кількість енергії, запасеної батареєю на одних режимах руху, дорівнюється до такої ж кількості енергії, що віддається на інших режимах.

Для дотримання подібного балансу і необхідно в певних режимах розряджати батарею, щоб на інших залишилася можливість її зарядити.

Розігнавши автомобіль до швидкості 30 км/год, система управління переводить ДВЗ у робочий режим і задає його оберти на рівні 2500 хв^{-1} . Вибір робочих обертів визначено для конкретного ДВЗ з умовою отримання мінімальної питомої витрати палива.

В режимі інтенсивного розгону момент ДВЗ задається максимальним і відповідає області мінімальної витрати палива. Передача моменту ДВЗ на ведучі колеса здійснюється за рахунок порушення ЕМ № 1. Виходячи з потужності обраного ДВЗ, а саме 45 кВт, очевидно, що його момент недостатній для розгону автомобіля, тому ЕМ № 2 компенсує недостатній момент.

За рахунок того, що індуктор ЕМ № 1 обертається з частотою обертання ДВЗ, а саме 500 хв^{-1} , а оберти якоря рівні оборотам карданного валу і вони нижче 2500 хв^{-1} , реалізується вироблення електроенергії.

Режим № 3. Набір автомобілем певної швидкості руху

При наборі автомобілем певної швидкості оберти карданного валу досягнуть 2500 хв^{-1} , тобто зрівняються з обертами ДВЗ. У цей момент вироблення електроенергії припиниться і почнеться інтенсивний розряд батареї конденсаторів. Для запобігання розряду батареї і передбачена коробка передач. Після включення другої (понижувальної) передачі частота обертання карданного валу, а значить і якоря, зменшуються. Так як оберти якоря і індуктора розрізняються, ЕМ № 1 знову почне виробляти електроенергію. При подальшому розгоні на другій передачі оберти якоря та індуктора знову порівнюються і система управління блокує їх взаємне обертання за допомогою електромагнітного моменту, як би включаючи пряму передачу між ДВЗ і ведучим мостом. Збільшення вироблення електроенергії можливо і за рахунок переведення ДВЗ на оберти більше, ніж 2500 хв^{-1} . Так, при швидкості руху понад 90 км/год схема збільшувала обороти ДВЗ до 4000 хв^{-1} . Це дозволяло утримати напругу батареї конденсаторів в необхідному діапазоні, хоча ДВЗ працював з більш високою питомою витратою палива. На жаль, тут позначився головний недолік конденсаторів – низька енергоємність.

Режим № 4. Досягнення автомобілем рівномірної швидкості руху

При досягненні автомобілем рівномірної швидкості руху, момент, який вимагається від енергосистеми, значно знижується. Щоб не дати робочій точці переміститися в область неекономічної роботи ДВЗ, ЕМ № 2 переводиться в режим генератора – додатково завантажуючи ДВЗ і заряджаючи конденсатори. Тривалість такого режиму обмежена ємністю конденсаторів і при їх заряді система все ж змушена знижувати потужність ДВЗ. Рух автомобіля після цього забезпечується тільки ДВЗ. Якщо при цьому залишається взаємне обертання якоря і індуктора (а це залежить від швидкості руху), ЕМ № 1 продовжує забезпечувати споживачі електроенергією. Гальмування автомобіля здійснюється, в тому числі за рахунок переведення ЕМ № 2 у режим генератора і віддачею енергії гальмування в батарею.

Досліджуваний алгоритм режиму роботи схеми містить ряд незаперечних переваг:

- конструктивно схема досить проста і компактна;
- умова роботи ДВЗ в зоні мінімальної витрати палива виконується як на режимах розгону, так і частково в режимі рівномірного руху.
- компоненти системи розраховані таким чином, що батарея грає роль буфера енергії.

Недолік схеми:

- низький ККД перетворення енергії;
- не вдається домогтися кардинального зниження витрати палива в порівнянні з витратою палива звичайного автомобіля, він трохи нижче, ніж у автомобілів аналогічної маси.

Моделювання руху автомобіля з включеними споживачами визначило витрату палива у міському циклі 6,5 л/100 км, а в заміському – 6,2 л/100 км.

Зміна швидкості руху автомобіля в стандартному міському циклі показано на рисунку 4.5.

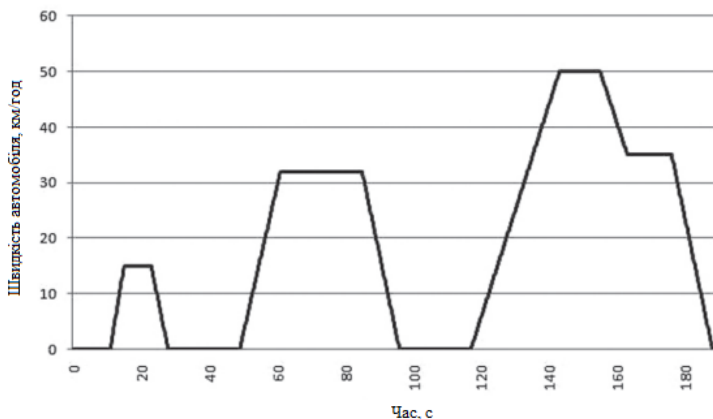


Рисунок 4.5 – Зміна швидкості руху автомобіля в міському циклі

З даних, наведених на рисунку 4.6, випливає, що енергоємність батареї сучасних конденсаторів цілком достатня

для забезпечення «нульового» балансу енергії і безперервного руху автомобіля.

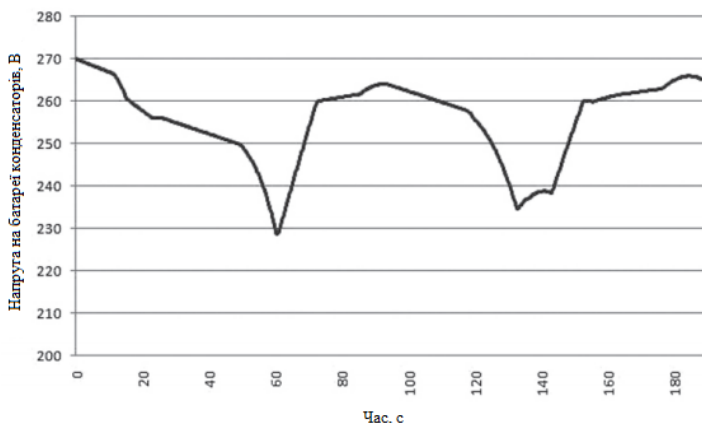


Рисунок 4.6 – Зміна напруги батареї конденсаторів в міському циклі руху

4.5 Комбінована енергетична установка гібридного автомобіля

При розробці сучасних гібридних ТЗ, зокрема легкових автомобілів, технічні рішення, в основному, спрямовані на створення таких універсальних КЕУ, які:

– забезпечували б у рамках одного автомобіля різноманітність схем підключення використовуваних джерел енергії до ведучих коліс автомобіля (послідовна, паралельна або є сукупністю перших двох схем послідовно-паралельна схема) з можливістю швидкого переходу з однієї схеми на іншу;

– дозволяли урізноманітнити подачу силового потоку на ту чи іншу ведучу вісь автомобіля, забезпечуючи можливість використання різних типів приводу (передній, задній привід, повний привід).

З аналізу аналогових конструкцій авторами встановлено наступне [20]:

– наявність в силовій установці тільки однієї електромашини викликає потребу в розгалуженні кінематичних зв'язків між

джерелами енергії для ведучих коліс та підвищеному числі проміжних вузлів трансмісії;

– наявність зниженої функціональності і енергоефективності КЕУ через неможливість механічно відключити тепловий двигун від ведучих коліс ТЗ в окремих режимах руху.

Визначене, по-перше, призводить до підвищених втрат на тертя між деталями теплового двигуна. По-друге, призводить до обмежень функціонального діапазону першої електромашини, пов'язаної з колесами передньої осі, яка не має можливості функціонувати в якості двигуна, який виробляє енергію для приводу ТЗ. І, по-третє, ускладнюється управління тепловим двигуном на режимі його холостого ходу, викликане необхідністю зниження втрат в тепловому двигуні при його функціонуванні в цьому режимі (через неможливість механічно відключити зв'язок його вала і ведучих коліс).

Авторами в роботі [20] для поліпшення функціональних властивостей гібридних автомобілів запропоновано розширити число варіантів використання приводних компонентів силової установки.

КЕУ містить (рис. 4.7):

- тепловий двигун, наприклад, ДВЗ 1;
- дві ЕМ 2, 8;
- механізм зчеплення 3;
- муфту зчеплення 4;
- вали приводу 5, 9.

Вузол 3 забезпечує додаткові варіанти індивідуального, також вибіркового підключення (від'єднання) до осі 6 кожної зі складових силового блоку машини 1 або 2 незалежно від іншої. Вузол 3 і муфта 4 пов'язані з блоком управління 7 і виконані будь-яким відомим чином, наприклад, по типу нормально замкнутого або нормально розімкнутого зчеплення, при чому в будь-якій доцільній комбінації (рис. 4.7).

Друга ЕМ 8 з'єднана постійно з валом 9 приводу коліс іншої ведучої вісі 10 (відповідно, передній або задній).

Обидві ЕМ 2 і 8 є оборотними, в залежності від режиму роботи КЕУ можуть функціонувати в якості як тягових двигунів, так і генераторів, і підключені до накопичувача 11 електричної енергії та перетворювача 12.

Як тепловий двигун поряд з бензиновим ДВЗ може бути використаний дизельний, газотурбінний, паровий або двигун будь-якого іншого типу.

Тип накопичувача 11 електричної енергії також може бути будь-яким – електрохімічний накопичувач (акумуляторна батарея), конденсатор.

При роботі КЕУ крутний момент на вал 5 приводу коліс першої ведучої осі 6 передається від ДВЗ 1 через вузол зчеплення 3, а також від розташованої з ним на одній осі щодо поздовжньої вісі автомобіля ЕМ № 1 2 через муфту зчеплення 4. Крутний момент на вал 9 приводу коліс другою ведучою віссю 10 передається безпосередньо від пов'язаною з ним ЕМ № 2 8. При цьому можливі варіанти конкретних виконань КЕУ, коли передача потоку потужності від силового блоку на вісь 6 ведучих коліс забезпечується шляхом зміни передавального числа крутного моменту, наприклад, за допомогою ступінчастої або безступінчастої трансмісії, розміщеною між блоком і муфтою 4 (на представленому кресленні умовно не показана), або без зміни передавального числа при прямому з'єднанні силового блоку з муфтою 4, і забезпечується, наприклад, за рахунок керування роботою електродвигунами.

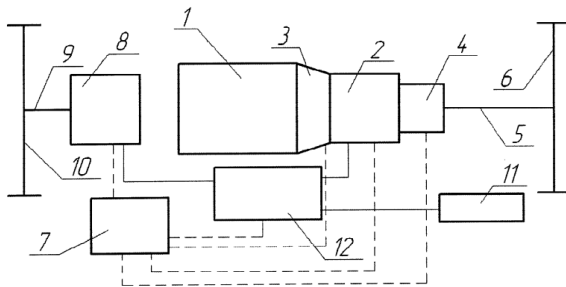


Рисунок 4.7 – Схема КЕУ: 1 – ДВЗ; 2, 8 – ЕМ № 1, № 2; 3 – вузол зчеплення; 4 – муфта зчеплення; 5, 9 – вал приводу коліс; 6, 10 – перша (друга) ведуча вісь; 7 – блок управління; 8 – електрична машина № 2; 11 – накопичувач енергії; 12 – перетворювач енергії

Режими роботи КЕУ

1. Послідовний режим

В даному режимі муфта 4 розімкнута, а вузол зчеплення 3 замкнутий. ЕМ № 1 2 працює як генератор, перетворюючи механічну енергію ДВЗ 1 в електричну, яка потім надходить у ЕМ № 2 8, пов'язану з колесами другою провідною віссю 9, які призводять ТЗ в рух. В даному режимі двигун 1 не пов'язаний з колесами будь-якої з ведучих осей автомобіля і режим його роботи не залежить від режиму руху.

2. Паралельний режим

В цьому режимі вузол 3 і муфта 4 замкнуті. Автомобіль приводиться в рух як двигуном 1, підключеним до коліс першої ведучої осі 6, так і ЕМ № 1 2, з'єднаної з двигуном 1 в єдиний силовий блок, і ЕМ № 2 8, від якої крутний момент передається другою ведучою віссю 9. При цьому можливий рух за допомогою тяги тільки коліс першої ведучої вісі 6, а також в режимі повного приводу, коли ведучими є колеса обох ведучих осей 6 і 9. В режимі приводу ТЗ від коліс першої ведучої осі 6 енергія для приведення в обертання коліс цієї осі виробляється спільно тепловим двигуном 1 і ЕМ № 1 2. ЕМ № 2 8 при цьому не функціонує. У режимі повного приводу колеса першої ведучої осі 6 приводяться в обертання ДВЗ 1, а колеса другої ведучої осі 9 – ЕМ № 2 8, яка отримує енергію від ЕМ № 1 2, що працює в режимі генератора. При цьому частина енергії, що виробляється, може направлятися в накопичувач електричної енергії 11. У разі потреби у великій величині тяги в цьому режимі можливе використання для приводу автомобілів в рух тяги від обох ЕМ 2 і 8. У цьому випадку електрична енергія береться з накопичувача електричної енергії 11.

3. Режим «через дорогу»

В цьому режимі вузол 3 і муфта 4 замкнуті. ЕМ № 2 8 працює як генератор, навантажуючи двигун 1, пов'язаний з колесами першої провідної 6 і виробляє енергію для приведення їх в обертання. Енергія, що виробляється ЕМ № 2 8, може направлятися:

– у накопичувач електричної енергії 11;

– у разі необхідності у великій величині тяги дана енергія може використовуватися для живлення ЕМ № 1 2, в цьому випадку працює в режимі тягового двигуна і спільно з двигуном 1 виробляє енергію для приведення в обертання коліс першої ведучої осі б.

4. Режим електромобіля

В такому режимі вузол 3 розімкнута, а муфта 4 може перебувати як в розімкненому, так і в замкненому стані. Обидві ЕМ 2 і 8 працюють в режимі тягових двигунів і отримують енергію з накопичувача електричної енергії 11. При цьому для приводу автомобіля в рух може використовуватися:

– тільки ЕМ № 1 2 (використовується привід коліс першої ведучої осі б);

– тільки ЕМ № 2 8 (використовується привід коліс другої ведучої осі 9);

– обидві ЕМ 2 і 8 – одночасно (використовується привід автомобіля від коліс обох ведучих осей б і 9).

Таким чином, з описаного вище видно, що введенням в силовий блок «тепловий двигун – ЕМ № 1/генератор» керованого вузла зчеплення, який призначений для вибіркового підключення до осі коліс тієї чи іншої машини даного блоку незалежно від іншої машини блоку, в сукупності з можливістю механічного відключення за допомогою муфти 4 потоку енергії від цього блоку на ведучу вісь автомобіля у пропонованій КЕУ забезпечується її функціонування за послідовно-паралельною схемою.

Крім того, можливість розмикання механічного зв'язку між тепловим двигуном і ЕМ № 1 2 за допомогою встановленого між ними вузла зчеплення дозволяє підвищити ККД енергетичної установки за рахунок того, що на режимах руху автомобіля, в яких тепловий двигун не виробляє енергію для його приводу (наприклад, гальмування або холостого ходу), обертальний рух коліс першої ведучої вісі не передається на вал двигуна, внаслідок чого відсутнє тертя між його деталями. До того ж винахід дозволяє спростити систему керування тепловим двигуном, тому що на відміну від аналогів, в пропонованій КЕУ знімається необхідність в додаткових засобах, призначених для

зменшення втрат енергії шляхом регулювання подачі палива в двигуні на режимі його холостого ходу.

Контрольні запитання для самоперевірки

1. Через які елементи конструкції передаються потоки потужності від ДВЗ до ведучих коліс на блок-схемі, яка наведена на рисунку 4.1?

2. За якою схемною архітектурою виконано ГСУ автомобіля за рисунку 4.2?

3. Яку функцію виконує елемент за позицією 4 на рисунку 4.3?

4. Яку функцію виконую вузол за позицією 3 на рисунку 4.7?

5. У чому полягає особливість розміщення електричних машин на схемі КЕУ, яка наведена на рисунку 4.7?

5 ВИКОРИСТАННЯ ПОРШНЕВОГО ПНЕВМАТИЧНОГО ДВИГУНА У СКЛАДІ АВТОМОБІЛЬНОЇ ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ

5.1 Загальні положення

Найбільшого поширення в ГСУ автомобілів, як вже було зазначено вище, мають на сьогоднішній день схеми, що включають ДВЗ, один чи кілька тягових електродвигунів (або оборотних електромашин) і акумуляторну батарею. Разом з тим багатьма фірмами вже багато років досить успішно ведуться роботи по використанню пневмодвигунів як у складі автомобільних гібридних установок, так і в ролі самостійного силового агрегату [29].

Перевагами поршневого пневмодвигуна в порівнянні з іншими типами пневматичних двигунів є [29]:

- поршневий – це єдиний двигун, який можна виготовити зі змінним ступенем наповнення, а значить, і регульованим ступенем розширення, що відкриває можливості оптимізації робочого процесу фазами розподілу повітря в залежності від умов здійснення робочого циклу;

- поршневий пневмодвигун має найбільший пусковий момент, що в 1,8 рази перевищує номінальний момент;

- поршневий пневмодвигун має найбільш сприятливу тягову характеристику $M_e(n)$;

- робоча камера поршневого пневмодвигуна має високу ступінь ущільнення за рахунок поршневих кілець, тому витоки стисненого повітря в ньому порівняно невеликі.

Фірма Energinе (Південна Корея) розробила легковий автомобіль PHEV (Pneumatichybridelectricvehicle) з гібридним електропневматичним приводом. У цій машині два двигуна: пневматичний поршневий і електричний. Ці двигуни живляться відповідно від бортових балонів зі стисненим повітрям і від акумуляторів. Автомобіль стартує, набирає швидкість і долає підйоми на пневматичній тязі. Рух з постійною швидкістю понад 25 км/год здійснюється за допомогою електродвигуна. При такій роботі використовуються переваги обох типів двигунів і згладжуються їх недоліки. Так, високий стартовий обертовий момент і велика потужність на валу пневмодвигуна

доповнюються відносно низьким споживанням енергії електродвигуном на «крейсерських» режимах руху [29].

Технічні дані легкового автомобіля PHEV:

- максимальна швидкість 120 км/год;
- маса 1260 кг;
- обидва мотори важать по 30 кг кожен
- 100-літровий повітряний балон важить 40 кг;
- Ni-MH батареї мають робочу напругу 280 В.

Європейська фірма MDI (MoteurDevelopmentInternational) в Люксембурзі під керівництвом Guy Negre створила ряд автомобілів з приводом тільки від поршневого пневмодвигуна. Електродвигун є і тут, але йому відведена допоміжна роль: дозаправляти повітряні балони і спрощувати парковку машини. В пневмодвигуні застосований поршневий механізм, що забезпечує затримку поршня в районі верхньої мертвої точки на час, що становить п'яту частину тривалості робочого циклу (72° повороту колінчастого валу). Завдяки цьому в циліндр подається достатня кількість повітря і, як наслідок, отримана задовільна характеристика крутного моменту. Щоб ліквідувати динамічну незбалансованість в пневмодвигуні застосували опозитне розташування циліндропоршневих груп. У всіх елементах двигуна застосовані шарикопідшипники, що спростили систему мащення.

Фірмою MDI представлено цілий ряд моделей автомобілів. У нього входить:

- багатоцільовий автомобіль Family;
- розвізний міні-фургон;
- таксі;
- пікап;
- міський міні-автомобіль MiniCat's.

Всі автомобілі, окрім останнього зі згаданих, розраховані на 6 місць і мають такі характеристики:

- довжина становить 3,84 м;
- висота 1,75 м;
- ширина 1,72 м;
- маса 750 кг;
- максимальна розрахункова швидкість 110 км/год;
- час розгону з місця до 100 км/год – 11,5 с;

- пробіг без дозаправки 200–300 км;
- максимальний вантаж, що перевозиться –500 кг;

Для можливої заправки балонів від бортового компресора потрібно 4 години. Заправка ж на компресорній станції високого тиску займає 3 хвилини. Щоб конденсат не замерзав в магістралях, встановлюють вологовідділювач.

Тримісний автомобіль MiniCat's має такі характеристики:

- розміри становлять приблизно 60–75% від зазначених вище;
- потужність двоциліндрового пневмодвигуна з робочим об'ємом 1200 см³ становить 18,3 кВт при 3500 хв⁻¹;
- максимальний обертовий момент 61,7 Н·м при 1500–2500 хв⁻¹.

Останні моделі MDI мають задній привід, двигун поміщається ззаду під підлогою автомобіля, що дозволило зменшити втрати в трансмісії.

Застосована на автомобілі рекуперативна пневматична система гальмування дозволяє повертати приблизно 13% енергії гальмування. Машини забезпечені балонами з композиційних матеріалів (вуглеволокно в термопластику) з робочим тиском 300 бар. Ці резервуари загальної масою всього 35 кг вміщують 100 л стисненого повітря.

Значний інтерес представляє розробка дослідників зі швейцарського Федерального технологічного інституту Цюріха ETH Zürich. Гібридна установка являє собою ДВЗ, обладнаний додатковим впускним клапаном для стисненого повітря. Установка забезпечена балоном зі стисненим повітрям і системою рекуперації енергії гальмування. Тестування прототипу показало зниження витрати палива на 33% в порівнянні з бензиновим ДВЗ. В міському режимі зниження витрати – до 50% за рахунок роботи системи рекуперації [29].

У Каліфорнійському університеті за участю фахівців компанії Ford створена оригінальна автомобільна силова установка на базі ДВЗ, яка може працювати на декількох режимах. Пуск двигуна здійснюється на стислому повітрі. Після розгону автомобіля двигун перемикається в режим зі спалюванням палива. При гальмуванні ДВЗ працює в режимі компресора [29].

Французька автомобілебудівна корпорація PSA Peugeot-Citroen також займається розробкою ГСУ з пневматичним приводом HybridAir. Ідея HybridAir полягає в використанні енергії повітря, що закачується при гальмуванні в спеціальний резервуар гідравлічним насосом. Замість електромотора використовується повітряна помпа, поєднана з трансмісією з планетарною (диференціальною) передачею. Технологія дозволяє знизити витрату палива і рівень шкідливих викидів в атмосферу (рис. 5.1) [30].



Рисунок 5.1– Вид днища автомобіля: 1 – металевий резервуар; 2 – глушник

Розробники визначають, що обладнаний повітряно-гібридною технологією HybridAir хетчбек Peugeot 208 зможе на 100 км шляху витратити мінімум 2,9 л бензину. Викиди CO₂ при цьому складуть 69 грамів на кілометр. Для порівняння, самий екологічний Peugeot 208 з 1,4-літровим турбодизелем і системою e-NDi має показник викиду CO₂ в атмосферу на рівні 87 г/км.

У концерні Peugeot-Citroen стверджують, що силова установка HybridAir дозволяє їздити тільки на стислому повітрі від 60% до 80% часу в міському режимі.

За аналогією з електро-бензиновими силовими установками HybridAir працює в парі з трансмісією, що має електронне управління. Система автоматично вибирає джерело живлення, яке приводить в рух автомобіль, в залежності від умов керування транспортним засобом (місто, шосе або змішаний цикл).

5.2 Пневмодвигун для автомобільної гібридної силової установки

У ХНАДУ створено експериментальний автомобіль, який обладнується ГСУ як за схемою «ДВЗ – електродвигун», так і за схемою «ДВЗ – пневмодвигун». Для початкового етапу випробувань такого автомобіля створений експериментальний зразок поршневого пневмодвигуна [31].

Пневмодвигун розглядався як «технологічний» зразок для вивчення вузького кола питань взаємодії двох незалежних бортових джерел енергії – ДВЗ і двигуна, що працює на стисненому повітрі при експлуатації автомобіля в реальних умовах міського автомобільного руху [31]. Двигун був створений і випробуваний в другій половині 2007 р.

Характеристика пневмодвигуна:

- поршневий чотирициліндровий;
- V-подібний з кутом розвалу циліндрів 90° , нереверсивний з золотниковим повітрярозподіленням;
- з комбінованою системою змащення (підшипники ковзання колінчастого вала змащуються під тиском, а деталі циліндропоршневої групи змащуються розбризкуванням);
- діаметр циліндра $D = 76$ мм, хід поршня $S = 66$ мм;
- Робочий цикл двигуна чотирипроцесний:
 - впуск;
 - розширення;
 - випуск-виштовхування;
 - зворотне стиснення.

Процес розширення не повний, а частковий, що обмежується мінімально допустимою температурою робочого тіла в кінці процесу за умовою недопущення обмерзання випускного тракту.

Базові деталі двигуна: блок-картер, оребрені циліндри, деталі циліндропоршневої групи, шатуни, вкладиші корінних і шатунних підшипників і ряд інших деталей, взяті від ДВЗ МеМЗ-968.

Використання алюмінієвого сплаву у виготовленні тунельного картера дає можливість отримати помірну масу всієї конструкції.

Наявність чотирьох циліндрів дозволяє отримати досить рівномірний сумарний обертовий момент і можливість запуску двигуна при будь-якому положенні колінчастого вала.

Наявність оребрення на циліндрах інтенсифікує підведення теплоти з навколишнього середовища до робочого тіла, що розширюється, з пониженням температури, що позитивно впливає на ККД робочого циклу і перешкоджає обмерзанню випускних каналів.

Замість серійного колінчастого вала з хрестоподібним розташуванням кривошипів виготовлений новий колінчастий вал, відповідний двотактному робочому циклу пневмодвигуна. Вал триопорний з двома кривошипами, розташованими під кутом 180° («плоский вал»). До кожного кривошипа під'єднується два шатуна від лівого та правого циліндрів.

Аналіз врівноваженості двигуна показав, що при заданому розташуванні циліндрів і нової конструкції колінчастого вала невірноваженими виявляються моменти від сил інерції обертових мас і момент від сил інерції першого порядку. Ці моменти врівноважуються розміщенням противаг на продовженні щік.

Золотникове повітрярозподілення дволінійне, тобто має два канали: один напірний і один випускний, пов'язаний з атмосферою.

Повітрярозподілювач складається з таких елементів:

- нерухомої циліндричної золотникової коробки;
- золотника, який розташований усередині коробки і обертається синхронно колінчастому валу.

Золотникова коробка розташована в розвалі блоку циліндрів на можливо близькій відстані від головок циліндрів, з якими вона з'єднана каналами (трубками). Прохідний перетин сполучних каналів оптимізовано: зі збільшенням цього перетину гідравлічні втрати знижуються (позитивний фактор), а мертвий обсяг збільшується (негативний фактор).

Фази повітрярозподілення, як і перерізу сполучних каналів, оптимізовані шляхом розрахункового дослідження, в якому критерієм оптимізації була обрана мінімальна питома витрата стисненого повітря.

Прохідні перетини каналів випуску в золотнику та за його межами прийняті в два рази більшими в порівнянні з каналами впускання. Це викликано головним чином тим, що обсяг робочого тіла на випуск після розширення стає багаторазово більше його обсягу на впуску.

Через канал у золотнику впуск відбувається тільки в один циліндр (фази впуску циліндрів не перекриваються). Тоді як випуск через один і той же канал в золотнику відбувається на значному протязі одночасно з двох циліндрів (фази випуску чергуються в роботі циліндрів в певній мірі перекриваються).

Привід золотника здійснюється ланцюговою передачею від колінчастого вала.

Як пневмодвигун агрегат ГСУ був змонтований на експериментальному автомобілі «Таврія» (рис. 5.2) [31].



Рисунок 5.2 – Автомобіль «Таврія», обладнаний створеною в ХНАДУ експериментальною гібридною силовою установкою схеми «ДВЗ на стиснутому природному газі – поршневий пневмодвигун»

Лабораторними випробуваннями автомобіля на бігових барабанах з приводом від пневмодвигуна було встановлено, що останній на необхідних частотах обертання і при робочих тисках стисненого повітря на вході розвиває обертовий момент близький до розрахункового. Наприклад, на швидкості руху автомобіля 38

км/год і тяговому зусиллі на ведучих колесах 800 Н обертовий момент на валу пневмодвигуна склав 146 Н·м при частоті його обертання 600 хв^{-1} і розвивається на валу потужності 9,2 кВт [31].

5.3 Гібридна силова установка з поршневим пневматичним двигуном

Поршневі двигуни, що використовують енергію попередньо стиснутих, зріджених газів, інертних по відношенню до навколишнього середовища та біосистеми, на даний час у нас і за кордоном знаходять застосування під час розробки та створення екологічно чистих двигунів у складі комбінованих силових установок. Пневмодвигуни, використовувані в подібних силових установках, як правило, виконують на базі поршневих двигунів з примусовим газорозподілом. Система примусового газорозподілу має низку істотних недоліків: складність конструктивного виконання, підвищене механічне тертя, невисоку надійність та ін. Ці недоліки можуть бути виключені шляхом створення і розробки принципово нових конструкцій поршневих двигунів, що відрізняються простотою конструкції, невеликою металомісткістю, ефективністю роботи, підвищеною надійністю.

Пропонується силова установка з приводним двигуном і поршневим пневмодвигуном з автоматичною системою газорозподілу [25].

Гібридна силова установка (рис. 5.3) включає в себе наступні елементи:

- приводний двигун 1;
- муфту 2, 6;
- трансмісію 3;
- ведучі колеса 4;
- поршневий пневмодвигун 5;
- зубчасту або іншу передачу 7;
- балон низького тиску 8;
- балон високого тиску 9;
- газовий редуктор 10.

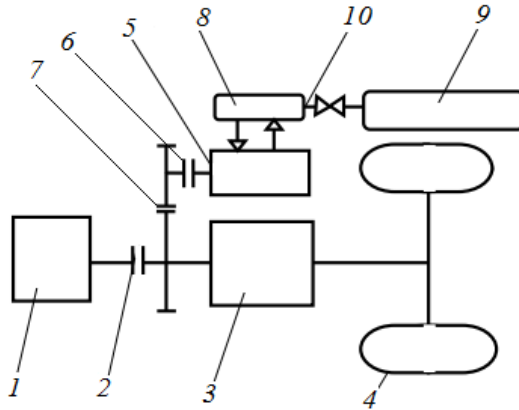


Рисунок 5.3 – Гібридна силова установка на один вал ведучих коліс:
 1 – ДВЗ; 2, 6 – муфта; 3 – трансмісія; 4 – ведучі колеса; 5 – поршковий пневмодвигун; 7 – передача; 8 – балон низького тиску; 9 – балон високого тиску; 10 – газовий редуктор

Поршковий пневмодвигун (рис. 5.5) містить циліндр 11, поршень 12, пов'язаний з кривошипно-шатунним механізмом (на кресленні не показаний). У стінках циліндра 11 виконані вихлопні вікна 13. У кришці 14 циліндра 11 розташовуються нормально відкритий впускний 15 і закритий випускний 16 клапани, впускний штуцер 17.

Впускний нормально відкритий клапан включає в себе:

- обмежувач 18 з можливістю переміщення, наприклад, по різьбі, відносно кришки 14 і впускного штуцера 17;
- запірний елемент 19;
- пружину 20.

Випускний нормально закритий клапан містить запірний елемент 21 з пружиною 22.

Порядок роботи ГСУ ТЗ

При роботі приводного двигуна 1 (ДВЗ або електродвигун) ТЗ (рис. 5.4) потужність на ведучі колеса 4 передається через підключену муфту 2 і трансмісію 3 через передачу 7. При підключеній муфті 6 частина потужності приводного двигуна 1

передається поршневому пневмодвигуну 5, що працює в режимі компресора.

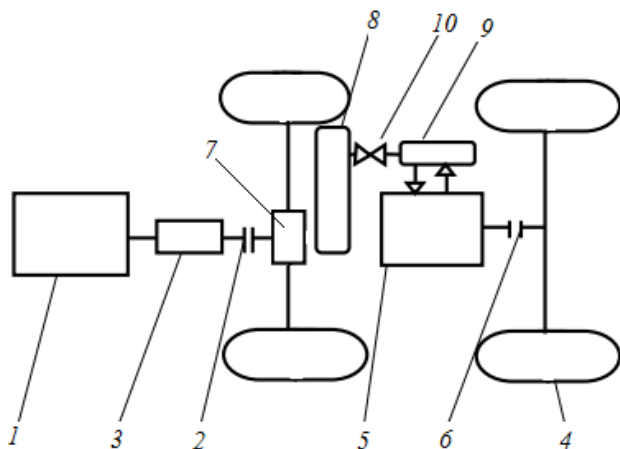


Рисунок 5.4 – Гібридна силова установка на два вала ведучих колеса:
 1 – ДВЗ; 2, 6 – муфта; 3 – трансмісія; 4 – ведучі колеса; 5 – поршневий пневмодвигун; 7 – передача; 8 – балон низького тиску; 9 – балон високого тиску; 10 – газовий редуктор

Атмосферне повітря в цьому випадку надходить через вихлопні вікна 11 (рис. 5.5) циліндра 13 при знаходженні поршня 12 в районі нижньої мертвої точки. При переміщенні поршня 12 в напрямку до верхньої мертвої точки після перекриття поршнем вихлопних вікон 11 він стискає атмосферне повітря, що надійшло, в циліндр 13. При перевищенні тиску повітря в циліндрі 13 тиску в кришці 14 циліндра відкриваються закриті впускний 15 і випускний 16 клапани. Стиснене повітря в циліндрі 11 із кришки 14 через штуцер 17 надходить в балон низького тиску 8.

Поршневий пневмодвигун також працює в режимі компресора в разі гальмування силової установки ТЗ поршневим пневмодвигуном 5.

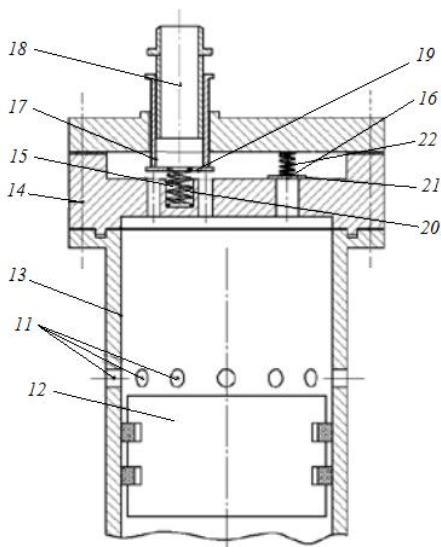


Рисунок 5.5 – Поршневий пневмодвигун з автоматичними клапанами гібридної силової установки: 11 – вихлопні вікна; 12 – поршень; 13 – циліндр; 14 – кришка циліндра; 15 – впускний клапан; 16 – випускний клапан; 17 – впускний штуцер; 18 – обмежувач підйому; 19, 21 – запірний елемент; 20, 22 – пружина

Порядок роботи ГСУ в режимі пневмодвигуна

Стиснене повітря з балона тиску 9 через газовий редуктор 10 надходить в балон низького (робочого) тиску 8 і через впускний штуцер 17 в кришку 14 циліндра 13 (впускний клапан 15 при цьому відкритий, а випускний клапан 16 закритий), відбувається впуск газу в циліндр 11 через нормально відкритий впускний клапан 15.

Поршень 12 при цьому починає рух від верхньої мертвої точки (ВМТ) до нижньої мертвої точки (НМТ). При наростанні перепаду тисків на запірний елемент 19 пружина 20 стискається і клапан закривається.

Надійшовши в циліндр повітря продовжує чинити тиск на поршень 12 і при його переміщенні розширюється з вчиненням зовнішньої роботи.

При відкритті торцевою поверхнею поршня 12 вихлопних вікон 11 відбувається вихлоп і виштовхування відпрацьованого повітря в атмосферу. Відкриті поршнем 12 вихлопні вікна 11 в

продовження його руху до НМТ сприяють звільненню циліндра від відпрацьованого повітря. При зворотному русі поршня до ВМТ тиск в циліндрі 13 після закриття поршнем вихлопних вікон 13 зростає за рахунок стиснення повітря, що залишилося, в циліндрі.

При перевищенні тиску повітря в циліндрі 13 над тиском в кришці 14 циліндра запірні елементи впускного 19 і випускного 21 клапанів відкриваються. При подальшому наблизенні поршня до верхньої мертвої точки відбувається виштовхування стиснутого при зворотному ході поршня повітря з циліндра 11 в кришку 14 через штуцер 17 в балон низького тиску 8. Потім цикл повторюється.

Для забезпечення ефективної роботи пневмодвигуна при постійному тиску на вході і зовнішнього навантаження, що змінюється, положення запірних елементів впускного 19 клапана відносно кришки 14 циліндра змінюється переміщенням обмежувача підйому 18.

З екологічних позицій впливу на навколишнє середовище в якості робочого тіла силової установки з поршнеvim газovým двигуном може бути використаний запас стисненого повітря, рідкого азоту, переведеного в газований стан в спеціальному теплообміннику, продукти згорання водню в спеціальній камері.

При роботі на стислому повітрі силову установку комплектують двома балонами, з'єднаними газovým редуктором. Один балон призначений для створення запасу стисненого повітря з тиском 30 МПа, другий з тиском до 1,0 МПа для функціонування пневмодвигуна.

На підставі результатів експериментальних і теоретичних досліджень встановлено наступне [25]:

- регулювання режиму функціонування пневмодвигуна при постійному тиску на вході найдоцільніше здійснювати зміною висоти підйому запірного елемента;
- форсований режим роботи пневмодвигуна досягається збільшенням висоти підйому запірного елемента, що забезпечує закриття нормально відкритих впускних клапанів в момент проходження поршнем вихлопних вікон;

– для функціонування пневмодвигуна при різних режимах зміни зовнішнього навантаження найбільш доцільна наявність двох опозитно розташованих циліндрів;

– при роботі пневмодвигун на стислому повітрі може не поступатися за питомими показниками сучасним зарубіжним і вітчизняним зразкам поршневих пневмодвигунів, при цьому питома витрата повітря, перерахована на нормальні умови, може становити не більше 0,8–1,2 (м³/хв)/кВт.

5.4 Силова установка гібридної мобільної машини з додатковою функцією пневматичного двигуна

Запропоновано технічне рішення для розширення функціональних можливостей штатної силової установки гібридної мобільної машини виконанням додатково функцій компресора або пневмодвигуна при відповідному підвищенні паливної економічності і зниженні загальної маси установки [26].

Авторами встановлено, що раніше існуючі аналоги і прототипи мають наступні недоліки:

- дорожнеча;
- складність конструкцій та підвищена маса;
- недовикористання можливостей силової установки, що працює тільки в режимі ДВЗ, що знижує загальний ККД, підвищену витрату палива.

Пропонована конструкція силової установки приведена на рисунку 5.6.

Силова установка гібридної мобільної машини заснована на:

- ДВЗ, що виконує функції компресора або пневмодвигуна зміною фаз газорозподілу та регулюванням подачі палива для кожного циліндра окремо;
- системі випуску відпрацьованих газів;
- пристроях електромагнітного управління клапанами системи газообміну та відключення подачі палива;
- системі запалювання;
- пневматичному ресивері.

У циліндрі 1 ДВЗ силової установки гібридної мобільної машини розташований поршень 2, з'єднаний кривошипно-шатунним механізмом 3 з колінчастим валом 4 (рис. 5.6).

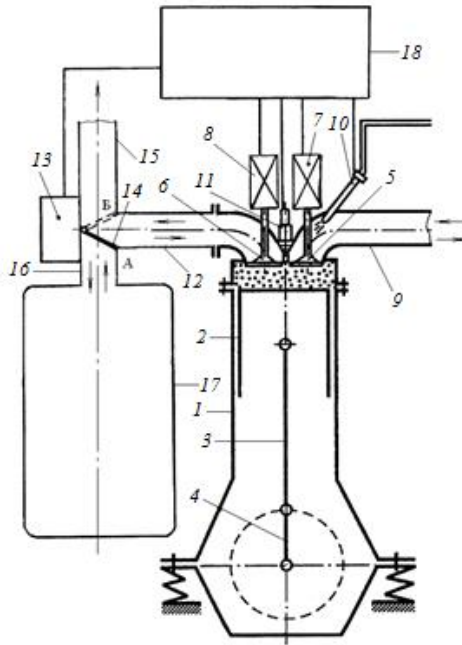


Рисунок 5.6 – Схема силової установки: 1 – циліндр; 2 – поршень; 3 – кривошипно-шатунний механізм; 4 – колінчастий вал; 5 – клапан впускний; 6 – клапан випускний; 7, 8 – пристрої електромагнітного управління; 9 – впускний трубопровід; 10 – форсунка; 11 – свічка; 12 – випускний трубопровід; 13 – привід заслінки; 14 – поворотна заслінка; 15, 16 – трубопровід; 17 – ресивер; 18 – блок управління

Впускний 5 і випускний 6 клапани циліндра 1 забезпечені пристроями електромагнітного управління 7 і 8 відповідно. Впускний трубопровід 9 загальноприйнятої конструкції забезпечений форсункою 10 подачі палива.

Свічка 11 призначена для займання робочої суміші.

Випускний трубопровід 12 за допомогою приводу 13 керованої поворотної заслінки 14 в положенні А має можливість з'єднання трубопроводом 15 з системою випуску відпрацьованих газів (на кресленні не показана) або в положенні Б – трубопроводом 16 з пневматичним ресивером 17. Таким чином, для кожного циліндра керована заслінка 14 встановлена між випускним трубопроводом 12, трубопроводом 15 системи

випуску відпрацьованих газів і трубопроводом 16 пневматичного ресивера 17.

Управління роботою силової установки проводиться за допомогою блоку управління 18, пов'язаного з пристроями електромагнітного управління 7 і 8 клапанами 5 і 6, форсункою 10 подачі палива, свічкою 11, приводом 13 поворотної заслінки 14.

При цьому положення А заслінки 14 відповідає з'єднанню випускного трубопроводу 12 з системою випуску відпрацьованих газів трубопроводом 15, а положення Б заслінки 14 відповідає з'єднанню з пневматичним ресивером 17 через трубопровід 16.

Порядок роботи силової установки

Робота силової установки гібридної мобільної машини відбувається наступним чином.

При русі мобільної машини на режимі, що вимагає повної потужності від циліндра, робота відбувається за загальноприйнятим чотиритактним циклом. На такті впуску повітря з трубопроводу 9 в суміші з паливом, що надійшли з форсунки 10, через відкритий впускний клапан 5 надходить в циліндр 1. Після стиснення і робочого ходу поршня 2 відпрацьовані гази через впускний клапан 6 надходять в впускний трубопровід 12. Заслінка 14 за допомогою приводу 13 знаходиться в положенні А. З трубопроводу 12 гази відводяться через трубопровід 15 в систему випуску відпрацьованих газів.

Для рекуперації енергії гальмування мобільної машини циліндр 1 переводиться в режим роботи компресора. Заслінка 14 за допомогою приводу 13 переводиться в положення Б. При цьому повітря на такті впуску через впускний клапан 5 поступає в циліндр 1, подача палива через форсунку 10 відключається. На такті стиснення впускний клапан 5 закривається. Повітря в циліндрі 1 стискається і через відкритий впускний клапан 6 надходить в пневматичний ресивер 17. Потім впускний клапан 6 закривається, а впускний клапан 5 відкривається і цикл повторюється. Цей режим може бути отриманий також і при обертанні колінчастого вала ДВЗ за рахунок роботи інших циліндрів.

Іншим варіантом накопичення енергії в пневматичному ресивері є напрямок відпрацьованих газів при роботі циліндра 1 в

режимі двигуна по чотиритактному циклу. При цьому заслінка 14 за допомогою приводу 13 встановлюється в положення Б.

При роботі циліндра 1 в режимі пневмодвигуна заслінка 14 за допомогою приводу 13 переводиться в положення Б. Повітря з пневматичного ресивера 17 через трубопроводи 16 і 12 надходить до випускного клапану 6, який відкривається при переміщенні поршня 2 з ВМТ в НМТ. Подача палива через форсунку 10 відключається. Впускний клапан 5 при цьому закритий. Поблизу НМТ впускний клапан 5 відкривається, а випускний клапан 6 закривається. При русі поршня 2 до верхньої мертвої точки повітря з циліндра 1 через впускний клапан 5 витісняється у впускний трубопровід 9. У ВМТ випускний клапан 5 закривається. Потім цикл повторюється.

Для відключення від роботи циліндра 1 подача палива форсункою 10 припиняється. При цьому впускний 5 і випускний 6 клапани постійно закриті. У циліндрі 1 при переміщенні поршня 2 відбувається почергове стиснення-розширення однієї і тієї ж кількості повітря, забезпечуючи мінімальні механічні втрати.

Таким чином, використання запропонованого винаходу дозволяє отримати відповідне підвищення паливної економічності, зниження загальної маси силової установки гібридної мобільної машини.

5.5 Конвертація штатного ДВЗ в поршневий пневмодвигун

В роботі [27] запропонована конвертація штатного ДВЗ на автомобілях сімейства ВАЗ, експлуатованих виключно в умовах міст в поршневий пневмодвигун.

Загальна схема автомобіля ВАЗ-2104 представлена на рисунку 5.7.

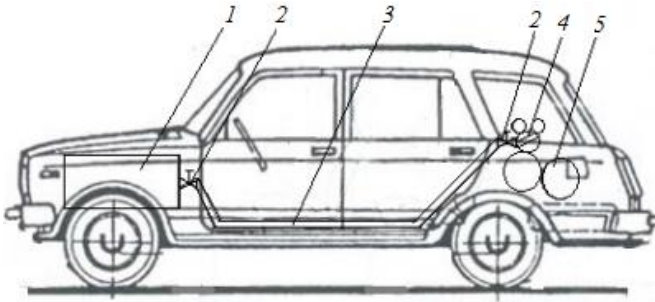


Рисунок 5.7 – Загальна схема пневматичної системи автомобіля:
 1 – пневмодвигун; 2 – орган керування подачею повітря, пов'язаний з педаллю «газу»; 3 – трубопровід стисненого повітря робочого тиску; 4 – редуктори; 5 – балони зі стисненим повітрям; 6 – вентиль

В якості базової моделі, прийнятої для конвертації в пневмодвигун, був обраний серійний автомобільний двигун внутрішнього згорання ВАЗ-2103. Це чотиритактний чотирициліндровий рядний двигун, номінальною потужністю $N_e=56,6$ кВт при частоті обертання $n=5600$ хв⁻¹, ступінь стиснення $\varepsilon=8,5$, маса двигуна $m_{дв}=140$ кг.

Конвертація цього ДВЗ в пневмодвигун виконана з мінімальними змінами в конструкції та мінімальною кількістю нових деталей.

Блок циліндрів, головка блоку циліндрів, кривошипно-шатунний механізм, клапани в комплекті з усіма допоміжними деталями і привід розподільного вала залишилися без будь-яких змін.

Розподільний вал доопрацьований:

- з тильного боку кожного кулачка (впускного і випускного) наплавлений з відповідною механічною обробкою додатковий кулачок;

- колишній кулачок доопрацьований у відповідності з обраними фазами впуску та випуску робочого тіла з циліндра.

Таким чином, розподільний вал, обертаючись як і раніше у два рази повільніше колінчастого вала, забезпечує відкриття і закриття клапанів при кожному оберті вала, тобто забезпечується двотактний робочий цикл пневмодвигуна. При цьому циліндри

працюють попарно (1-й і 4-й та 2-й і 3-й) в однакових фазах робочого процесу.

З базового двигуна і автомобіля були зняті всі елементи системи запалювання і паливної системи. Замість карбюратора встановлена плита з вбудованим органом регулювання тиску стисненого повітря перед впускними клапанами. Цей орган механічно пов'язаний з ногою педаллю «газу».

Балон зі стисненим повітрям високого тиску (20 МПа) в зборі з редуктором (рамповий кисневий РКЗ-500-2,26) встановлено в багажнику автомобіля.

В цілому конвертація базового ДВЗ у пневмодвигун здійснена в повній відповідності зі схемою, представленою в патенті [28], яка зображена на рисунку 5.8.

Пневматичний двигун містить: циліндр, в якому з можливістю зворотно-поступального руху розміщений поршень 2, з'єднаний з шатуном 3 і колінчастим валом 4. У верхній частині циліндра знаходяться незалежні порожнини – впускна 13 і випускна 14, в яких змонтовані клапани – впускний 5 і випускний 6. Пружини 21 тримають клапани в закритому стані. Над клапанами 5 і 6 з можливістю обертатися знаходиться розподільний вал 9, кінематично з'єднаний ланцюговою або ремінною передачею 10 з колінчастим валом 4. На розподільному валу 9 знаходяться шліфовані кулачки 11 и 12. Їх приблизна форма в розрізі показана на рисунку 5.8 *г* і *д*. Впускна порожнина 13 через патрубок 7 герметично сполучена з вентилям 15 і зворотним клапаном 18. Ємність для стислого газу через редуктор 16 сполучена з вентилям 15. Випускна порожнина 14 патрубком 8 сполучена з атмосферою через вентилям 19. Рух ТЗ здійснюється за допомогою коліс 20. Робота пристрою здійснюється за одне обертання колінчастого валу 4 із здійсненням двох циклів – впуск стисненого газу (робочий хід) і вихлоп.

До початку роботи двигуна вентилям 15 закритий, а вентилям 19 відкритий. Редуктором 16 виставляється робочий тиск газу. Поршень знаходиться в середньому положенні відносно «мертвих точок» (рис. 5.8). Клапан 5 повністю відкритий кулачком 11.

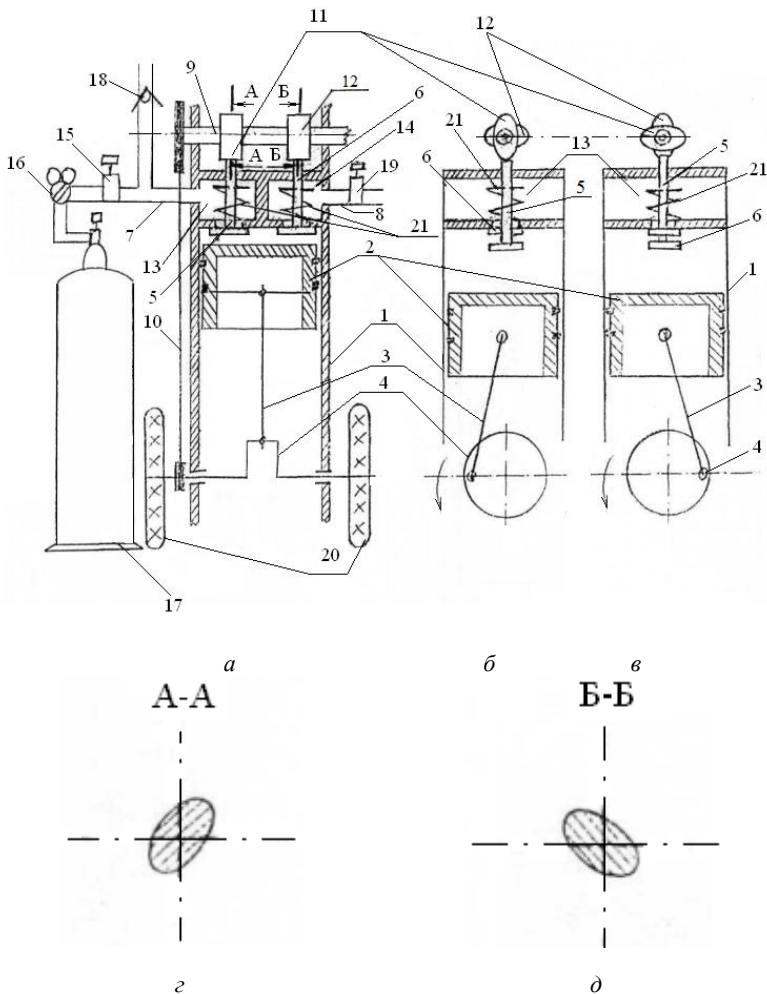


Рисунок 5.8 – Принципова схема пневматичного двигуна:
а – загальний вид; *б* – положення поршня у фазі вприскування;
в – положення поршня у фазі випуску; 1 – корпус циліндра;
 2 – поршень; 3 – шатун; 4 – колінчастий вал; 5, 6 – клапани;
 7, 8 – патрубок; 9 – розподільний вал; 10 – пасова передача;
 11, 12 – кулачки; 13 – впускна порожнина; 14 – випускна порожнина;
 15, 19 – вентиль; 16 – редуктор; 17 – балон; 18 – зворотний клапан;
 20 – колеса; 21 – пружина; *г*, *д* – види А, Б

Відкривши вентиль 15 подається газ в порожнину впорскування 13. Через клапан 5 стислий газ проходить в циліндр. За рахунок різниці тиску поршень 2 приходить у рух і йде до НМТ, приводячи в рух шатун 3 і колінчастий вал 4 (проти часової стрілки). Колінчастий вал в свою чергу через ланцюгову або пасову передачу 10 приводить в дію розподільний вал 9. Якщо робочий хід поршня 100 мм, то не доходячи до НМТ 10 мм (цифру можна змінити в залежності від робочого об'єму циліндра) закривається клапан 5, обидва клапани закриті.

Продовжується рух поршня за рахунок інерції пройшовши НМТ, а за нею 10 мм вище відкривається клапан 6 розподільним валом 9, починається викид газу через порожнину 14 і вентиль 19 в атмосферу. Поршень йде до ВМТ (рис. 5.8), не доходячи 10 мм до ВМТ закривається клапан 6. Через 10 мм після ВМТ відкривається клапан 5, подаючи стислий газ в циліндр з порожнини 13, приводячи в рух поршень 1. Поршень виконує робочий хід. Цикл повторюється.

При зачиненні вентиля 15 і руху ТЗ по інерції за рахунок передачі від коліс 20 через колінчастий вал 4, шатун 3 відбувається примусовий зворотно-поступальний рух поршня. При цьому в порожнині 13 створюється вакуумне середовище, яке через зворотній клапан 18 може бути використане в системі гальмування автомобіля.

Зачиняючи вентиль 19, здійснюється аварійне гальмування двигуна.

Контрольні запитання для самоперевірки

1. Якими перевагами характеризується поршневий пневмодвигун у порівнянні з іншими типами пневматичних двигунів?

2. Яким чином включено пневматичне обладнання у ГСУ за схемою на рисунку 5.3?

3. Чим відрізняються ГСУ, які наведені на рисунках 5.3 і 5.4?

4. Яким чином здійснюється накопичення повітря у схемі силової установки, яка наведена на рисунку 5.6?

5. Що собою представляє розподільний вал пневматичного двигуна, який наведений на рисунку 5.8?

6 ГІБРИДНІ СИЛОВІ УСТАНОВКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНЕРЦІЙНИХ МАХОВИКОВИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

6.1 Загальні відомості про інерційні маховикові накопичувачі енергії

Інерційні маховикові накопичувачі енергії призначені для виконання наступних функцій:

- накопичення механічної енергії в маховику (системі маховиків);
- консервація енергії при обертанні маховика;
- видачі енергії споживачу при необхідних режимних параметрах.

Маховик, що виконує функції акумулятора енергії і джерела потужності, має наступні потенційно позитивні якості [39]:

- високу питому потужність зарядно-розрядних режимів;
- автоматичний перехід з режиму акумуляції (заряду) на режим генерування (розряду) енергії, що забезпечує можливість ефективної рекуперації енергії;
- високий ККД (~95%, [35]) і стабільність характеристик в широкому діапазоні зміни умов експлуатації (тиск, температура та ін.);
- відсутність при роботі побічних виділень, що забруднюють навколишнє середовище.

Маховик – єдиний накопичувач, який акумулює одночасно з енергією і кінетичний момент, що створює ряд додаткових можливостей при застосуванні маховикових накопичувачів енергії в різних технічних пристроях.

При обертанні вала, наприклад, ДВЗ, у моменти перевищення рушійної сили над необхідною силою для обертання валу приводу (машини, що приводиться до руху) маховик накопичує кінетичну енергію, стримуючи ДВЗ від розгону. У періоди перевищення моменту опору споживача над обертовим моментом, наприклад ДВЗ, маховик віддає енергію, одночасно перешкоджаючи значному зменшенню швидкості обертання.

Конструктивно силові схеми маховиків можна розділити на три великі групи [39]:

- 1-а: монолітні маховики з ізотропних матеріалів;

- 2-а: маховики з високоміцних анізотропних матеріалів;
- 3-тя: маховики з високоеластичних матеріалів.

Для цілей акумулювання енергії перспективні два типи маховиків першої групи: маховики-диски і маховики-стрижні (обертаються навколо поперечної осі). Маховики-диски значно перевершують маховики-стрижні по об'ємній ефективності. При цьому їх енергоємнісні можливості визначаються характеристиками міцності матеріалів [39].

6.2 Застосування інерційних накопичувачів енергії в конструкції автомобілів (історична довідка)

Інерційні (маховикові) накопичувачі енергії розглядаються як можливий складовий елемент конструкції гібридних транспортних машин. Застосування таких накопичувачів енергії в складі ГСУ, наприклад, легкових автомобілів буде актуально для вирішення проблеми рекуперації енергії їх гальмування [34]. Крім того, при обмеженій потужності енергоустановок, яка визначається зазвичай сталими режимами експлуатації, для форсування нестационарних режимів, що характеризуються підвищеною витратою енергії, і реалізації плавності їх роботи існує потреба в постійному її запасі. Роль акумулятора такого запасу успішно може виконувати маховик.

Інтерес до маховика пояснюється їх новими конструкціями, використовуваними матеріалами, високою здатністю накопичувати енергію, більшим ККД (~95%). Маховики створюють умови для протікання процесів, що характеризуються економією палива, відрізняються екологічною частотою і технічно безпечні. Можливості застосування і досконалість маховикового акумулятора визначаються його питомою енергоємністю, безпекою, внутрішніми втратами в кожусі, питомою характеристикою накопичення і виділення енергії [35].

В Росії використання маховиків на транспорті було вперше запропоновано інженером-поручиком З.І. Шуберським у 1862 році (рис. 6.1 а). У 1791 році з метою рекуперації кінетичної енергії і досягнення плавності руху російський механік-самоучка І.П. Кулібін на своєму «самокатному» візку встановив масивний маховик (рис. 6.1 б) [35].

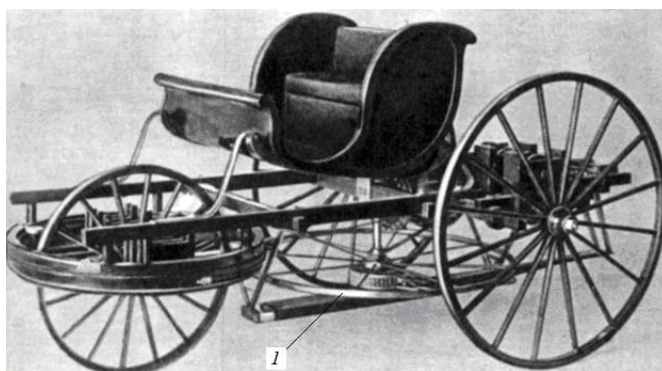
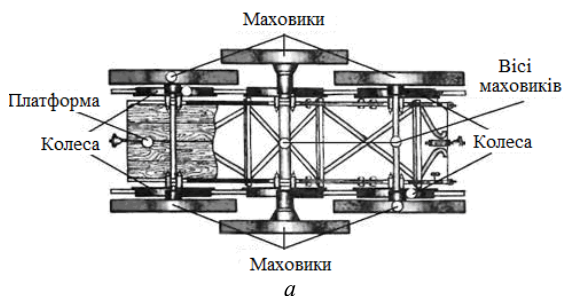


Рисунок 6.1 – Застосування маховиків у складі ТЗ:
a – маховоз Шуберскім З.І; *б* – коляска Кулібіна І.П. 1 – маховик

Маховиковий накопичувач у 1960-і рр. обкатувався на різних класах автотехніки. У 1980-і до його випробувань повернулися в складі легковий Volvo (серії 200), а пізніше маховиковий накопичувач був застосований в гоночних автомобілях. На цей час у зарубіжній пресі досить повно відображається зазначений вище напрямок. При цьому присутні також відомості відносно сидельного тягача Glider, в якому система накопичення енергії проходить під позначенням KERS (Kinetic Energy Recovery System). Використання маховикового накопичувача в колишньому СРСР, його створення і опрацювання пов'язані з ім'ям професора МДІУ Н.В. Гуліа. З легкої руки вченого такий маховик став відомий з приставкою «супер» [38].

За конструкцією, формою і використовуваних матеріалах виділяють наступні типи маховиків [35]:

- ободкові, зі сталеві стрічки, запатентовані в колишньому СРСР професором Н.В. Гуліа;

- стрижневі, рівномісні при обертанні (розроблені в США фірмою «Локхід»;

- клинові, що нагадують дволопатий гвинт з кутом підйому $7-8^\circ$, створені Д.В. Рабенхорстом у США (рис. 6.2).

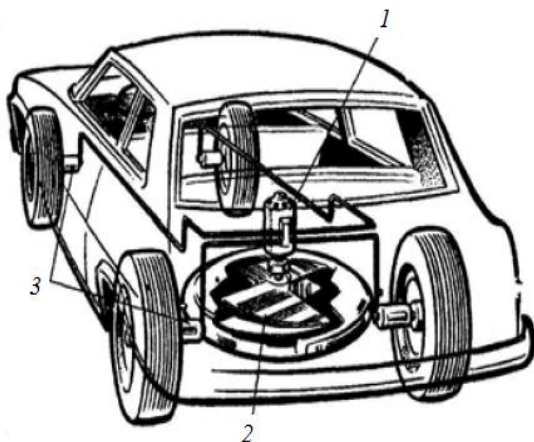


Рисунок 6.2 – Автомобіль Рабенхорста Д.В:

1 – електродвигун-генератор; 2 – супермаховик; 3 – мотор-колесо

На рисунках 6.3 і 6.4 приведені деякі схеми індивідуальних і гібридних маховикових силових установок. Для зменшення несприятливих гіроскопічних ефектів при поворотах можуть розміщуватися два маховика, що обертаються в протилежних напрямках (рис. 6.4 б) [35].

Маховики можуть мати жорсткі, пружні, пружно-в'язкі або карданні підвіски, а в залежності від умов експлуатації – по різному орієнтовані відносно несучої системи. Зазвичай площина їх обертання горизонтальна (рис. 6.1, 6.2).

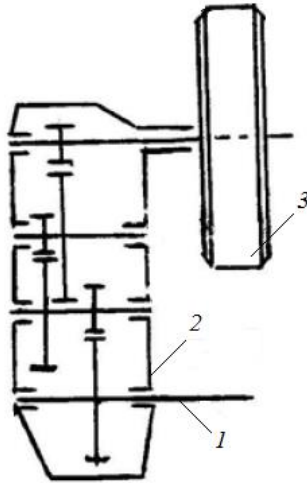
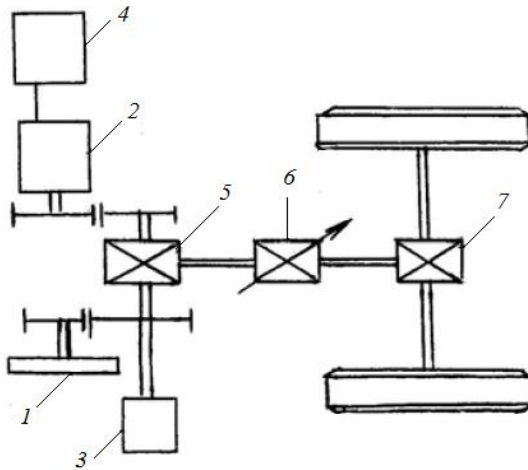


Рисунок 6.3 – Індивідуальний двигун: 1 – вал трансмісії; 2 – редуктор; 3 – маховик



a

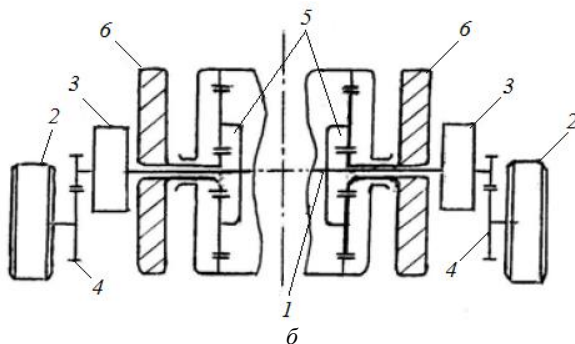


Рисунок 6.4 – Схеми включення механічного акумулятора енергії:
a – з одним маховиком: 1 – маховик; 2 – електродвигун; 3 – ДВЗ; 4 – блок батарей; 5, 7 – диференціал; 6 – коробка передач; *б* – з двома маховиками:
 1 – вал трансмісії машини; 2 – ведучі колеса; 3 – механізм повороту; 4 – бортові передачі; 5 – редуктори; 6 – маховики

Швидко обертаючий маховик дуже впливає на плавність ходу, керованість і стійкість автомобіля. Під плавністю ходу тут розуміється здатність несучої системи долати різні за профілем і станом дороги нерівності з найменшими коливаннями, вібраціями і струсами, які діють на вантажі, що перевозяться і пасажирів. Ця дія проявляється на збільшенні навантажень на опори маховика і несучу систему машини, формуванні перекидного (гіроскопічного) моменту, і у використанні стабілізуючих і демпфуючих властивостей маховика. Вплив маховика на характер динаміки несучої системи зводиться до двох основних факторів руху машини: коливань і відведенню коліс. Через гіроскопічний момент на поворотах виникають проблеми можливого перекидання, перерозподілу реакцій на колеса, більш раннього прослизання одного з коліс і зміни кута їх нахилу, зміни кута відведення і стійкості (курсової, на поворотах, при заметах) [35].

На даний час створені супермаховики, ободи яких конструктивно виконані навитою стрічкою (рис. 6.5) або тросом [37].

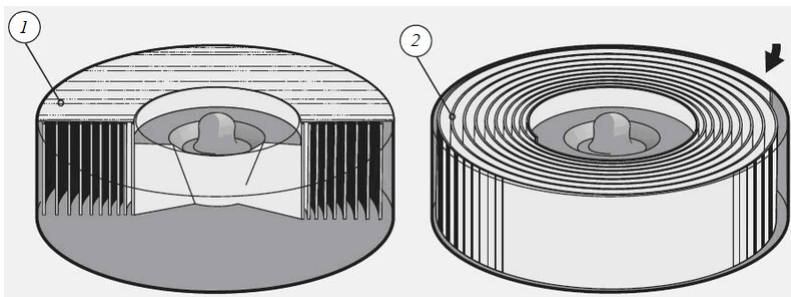


Рисунок 6.5 – Загальний вигляд супермаховика:
1 – робочий стан; 2 – вид після розриву стрічки

Застосовуваними матеріалами є: сталь, титан, кевлар, дюралюміній, кварц, скловолокно, графітове волокно та ін. [34]. Супермаховик з кевлара при випробуваннях при тій же масі накопичує в чотири рази більше енергії, ніж сталевий. Супермаховик, навитий з вуглеволокна, може в 20–30 разів перевершити сталевий по щільності енергії. Якщо використовувати для виготовлення, наприклад, діамантове волокно, то накопичувач набуває фантастичну енергоємність – 15 МДж/кг. За допомогою нанотехнологій на основі вуглецю створюються волокна дуже високої міцності, що дає можливість досягти щільність енергії 2500–3500 МДж/кг. Наприклад, 150-ти кілограмовий супермаховик з такого матеріалу здатний забезпечити легковому автомобілю пробіг у два з гаком мільйона кілометрів з однієї прокрутки [37].

Накопичувачі останнього покоління, наприклад, Torqstor, (рис. 6.6) відрізняють композитні сплави на основі вуглецевих волокон і розміщення в безповітряному середовищі для зменшення втрат потужності [38].



Рисунок 6.6 – Виставковий зразок маховика Torqstor з частково прозорим картером

Сучасні маховикові накопичувачі, що виконуються з вуглепластика, та які відрізняються навівкою з вуглеволокна, є високоміцними (як і захисний корпус); сталь в якості матеріалу їх виготовлення пішла в минуле. У ряді випадків композитний сплав маховикових накопичувачів наповнюють магнітною пудрою, водночас зводячи нанівець виникнення вихрових струмів. Крім того, намагнічений таким чином маховик здатний працювати в умовах підвищених температур не на шкоду терміну служби. У новітніх зразках розглянутих пристроїв механічне поєднання валу, приводу маховикового накопичувача і головної передачі в ряді випадків поступилося місцем магнітному поєднанню, яке виключає прослизання обертових валів, узгоджує частоту обертання маховика і в кінцевому рахунку крутний момент коліс. Плавно змінює передавальне відношення між вхідним і вихідним валами безступінчастий привід, сьогодні відомий як Compact Variator Transmission (CVT-варіатор, той же Torotrak, раніше – планетарний дисковий варіатор). Його наявність і належний рівень виготовлення – одне з головних умов використання маховикового накопичувача [38].

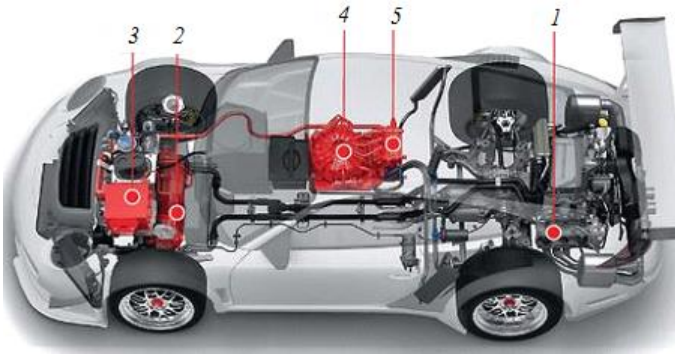
Накопичення значної кінетичної енергії передбачає використання високо-спритних маховиків. Частота обертання їх сучасних зразків досягає $60\,000\text{ хв}^{-1}$, маса становить від 6 до 100 і вище кг, а, наприклад, при потужності 100 кВт вони запасують

200 кДж енергії. Сучасні маховикові накопичувачі для автотехніки різних класів пропонують Ricardo, Williams Hybrid Power (рис. 6.7), Flybrid Automotive (з 2014 р. – Torotrak Group) [38].



Рисунок 6.7 – Маховик від Williams Hybrid Power
(такі агрегати випробовувалися на автобусах Лондона як допоміжний привід)

Наведений на рисунку 6.7 маховик знайшов застосування в конструкції гібридного автомобіля Porsche 911 GT3 R Hybrid, в якому він виконує функції накопичувача енергії замість високовольтних акумуляторних батарей (рис. 6.8) [40, 41]. Функції маховика виконує ротор, що входить до складу електричної машини.



a



б

Рисунок 6.8 – Автомобіль Porsche 911 GT3 R Hybrid:

a – вид зверху: 1 – бензиновий опозитний 4,0-літровий двигун потужністю 480 к.с., що приводить тільки задні колеса; 2 – блок двох електричних машин, рекуперує енергію гальмування в режимі генератора, а в режимі електромоторів постачають потужність на передні колеса; 3 – блок керування електромоторами передньої осі; 4 – маховикові накопичувачі енергії з максимальною частотою обертання 40000 хв⁻¹; 5 – блок керування маховиковим накопичувачем енергії, що забезпечує перемикання його режимів роботи; *б* – маховик-генератор системи KERS (розташований поруч з пілотом на пасажирському місці)

При уповільненні автомобіля електромотори передньої осі, працюючи в режимі генераторів, «виробляють» струм з енергії гальмування. Отримана електрика подається на обмотки статора електричної машини, за рахунок чого ротор-маховик починає

обертатися, тобто електрична машина працює як електродвигун. Тільки на відміну від традиційного електродвигуна, що приводить редуктор або будь-який інший механізм, ротор-маховик нічого не призводить: його завдання – обертатись, запастися якомога більше кінетичної енергії. Енергія ця тим вище, чим вище кутова швидкість маховика (число обертів у хвилину може досягати 40000) і чим більше його момент інерції щодо осі обертання. Якщо маховик розкручений по максимуму, то всю накопичену енергію протягом декількох секунд можна буде передати на електромотори, що приводять до руху передні колеса. Це станеться після того, як електрична машина примусово (за бажанням водія) «переклучиться» у режим генератора і вся накопичена маховиком механічна енергія перетвориться в електричну [40].

Маховики більш ранніх років випуску, виконані зі сталі, в межі могли накопичити тільки 30–50 кДж/кг на 1 кг маси. Якщо їх розкручували швидше, вони розривалися. Для порівняння, свинцево-кислотні акумулятори мали енергоємність 64 кДж/кг на 1 кг, лужні акумулятори 110 кДж/кг на 1 кг, найдорожчі срібно-цинкові акумулятори мали питому ємність 540 кДж/кг на 1 кг і відповідали ємним на сьогодні літій-іонним акумуляторам [37].

Для супермаховиків досягнута робоча частота обертання $n=30000 \text{ хв}^{-1}$, окружна швидкість периферії обода більш 500 м/с. Маховик утримується і центрується магнітним підвісом, підшипники запозичені від газових турбін (графітові ковзання і подвійні кочення), для ущільнення вакуумної камери використана магнітна рідина. В цілому це високотехнологічний і дорогий агрегат. Маховик у вільному обертанні, як правило, може знаходитися в перебігу 40 діб, досвідчені екземпляри вільно обертуються до десяти років. Особлива відзнака маховикового приводу від інших – кінетична енергія маховика перетворюється в кінетичну енергію транспортної машини з високим ККД цього перетворення [34]. У цьому випадку відсутнє перетворення енергії, наприклад, ДВЗ, що має місце при використанні електричних накопичувачів у складі ГСУ. Двигун виділяє енергію у вигляді обертання, а ведучі колеса автомобіля споживають цю енергію теж у вигляді обертання. Отже, не треба перетворювати енергію двигуна в електричну і назад, досить

передавати її від двигуна до коліс через механічний привід. Але навіть якщо маховик вбудований як елемент електро- або гідроприводу, то при такому подвійному перетворенні енергії ККД може досягати значень $\eta=0,75$. Маховиковий привід здатний до роботи як в підзарядці від ДВЗ на ходу, так і до рекуперації енергії гальмування транспортної машини. Маховиковий привід слід віднести до машинних систем з двигуном великої потужності, оскільки маховиковий тип приводу здатний в найкоротший час подати в систему силову характеристику $M_g^{np} = M_c^{np}$ (приведені до валу супермаховика моменти рушійних сил і сил опору), тим самим забезпечити режим сталого стаціонарного руху при будь-якому значенні. M_c^{np} у перехідному режимі руху, коли виникає різниця значень M_g^{np} і M_c^{np} , величина прискорення d_ω/d_t ланки приведення визначається, у тому числі інерційністю системи. Але, в силу великої енергоозброєності приводу, перехідний процес за часом буде динамічним і мати малу тривалість, що корисно при русі в міських умовах [34].

6.3 Гібридний силовий агрегат з маховиком і варіатором

Якщо об'єднати в одну схему супермаховик і суперваріатор, то вийде силовий кінематичний ланцюг маховикової машини (рис. 6.9).



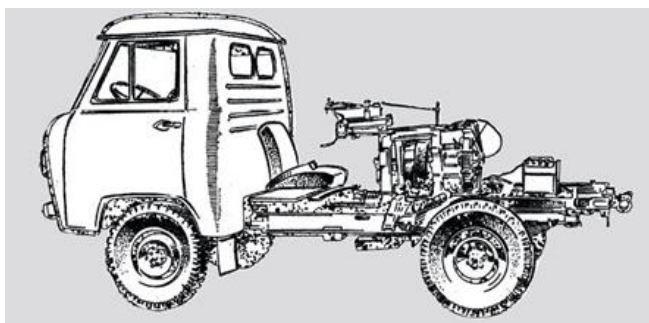
a



б

Рисунок 6.9 – Елементи конструкції маховикових машин:
а – машини на паливних елементах; *б* – машини з ДВЗ

Гібридний силовий агрегат з маховиком і варіатором – механічний гібрид Гулія Н.В. у складі автомобіля УАЗ-450, зображений на рисунку 6.10. Передні колеса автомобіля приводилися від ДВЗ, задні колеса – від варіатора і маховика. Такий зразок виявився вдвічі економічніше ніж УАЗ-450Д [37, 38].



а



б

Рисунок 6.10 – Механічний гібрид Гулія Н.В: *а* – вид збоку; *б* – вид ззаду
(управління гібридом автором Н.В. Гулія (1966 р.)

6.4 Використання маховикових накопичувачів енергії для підвищення прийомистості дизельного двигуна в складі автомобіля

Встановлено, що найбільш прийнятними способами підвищення прийомистості дизельного двигуна подаються такі [39]:

- підкрутка ротора турбокомпресора з підведенням додаткової енергії;
- подача додаткового повітря перед впускними органами або безпосередньо в циліндри двигуна.

Автори в роботі [39] вважають, що сучасні методи, які забезпечують підведення додаткової енергії до ротора турбокомпресора, а також подачу додаткового повітря малоєфективні і використовуються вкрай рідко в зв'язку з витратами додаткової енергії на живлення електродвигуна в першому випадку і привід компресорів високого тиску в другому.

Так, авторами пропонуються механічний, пневмомеханічний і електромеханічний способи підвищення прийомистості дизельного двигуна в складі автомобіля з використанням інерційного накопичувача енергії (рис. 6.11–6.13).

Механічний спосіб підвищення прийомистості дизельного двигуна, наведений на рисунку 6.11, забезпечує підкручення ротора турбокомпресора на режимах розгону, використовуючи енергію маховика 4, що запасається на режимах гальмування автомобіля.

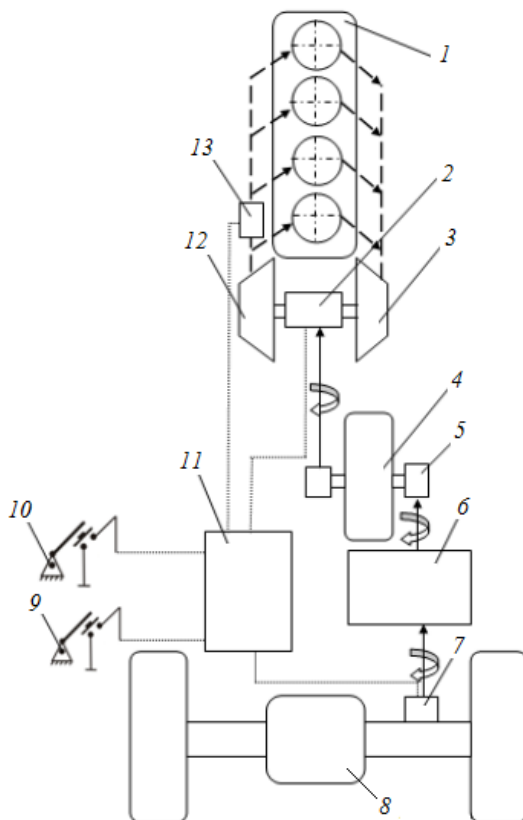


Рисунок 6.11 – Схема, що ілюструє механічний спосіб підвищення прийомистості дизеля з системою рекуперативного гальмування:
 1 – дизель; 2, 7 – електрична муфта; 3 – турбіна; 4 – маховик (інерційний акумулятор); 5 – муфта обгону; 6 – підвищуючий редуктор; 8 – трансмісія автомобіля; 9 – педаль гальма; 10 – педаль подачі палива; 11 – електронний блок керування; 12 – компресор; 13 – датчик тиску наддувочного повітря

Пневмомеханічний спосіб підвищення прийомистості дизеля (рис. 6.12) забезпечує подачу додаткового повітря з ресиверів (пневматичних акумуляторів), що заряджаються компресором. Компресор, в свою чергу, приводиться в дію від маховикового накопичувача енергії, що заряджається на режимах гальмування автомобіля. Даний спосіб може бути застосований як на безнаддувних двигунах, так і на двигунах, обладнаних різними системами наддуву.

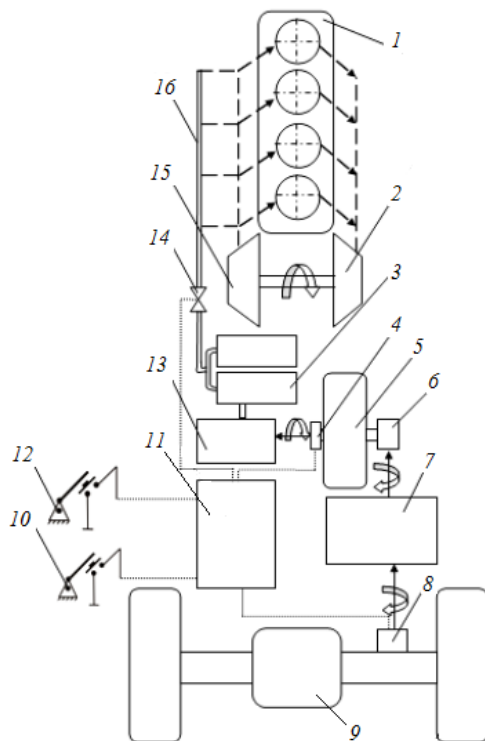


Рисунок 6.12 – Схема, що ілюструє пневмомеханічний спосіб підвищення прийомистості дизеля з системою рекуперативного гальмування:

- 1 – дизель; 2 – турбіна; 3 – ресивери; 4 – електрична муфта; 5 – маховик (інерційний акумулятор); 6, 8 – електрична муфта; 7 – підвищуючий редуктор; 9 – трансмісія автомобіля; 10 – педаль гальма; 11 – електронний блок керування; 12 – педаль подачі палива; 13 – компресор високого тиску; 14 – регулюючий орган; 15 – компресор; 16 – повітроводи високого тиску

Електромеханічний спосіб підвищення прийомистості дизеля (рис. 6.13) забезпечує зарядку акумуляторних батарей для живлення електродвигуна, підкручує ротор турбокомпресора на режимах розгону. Для приводу генератора використовується енергія маховика, що запасасться на режимах гальмування автомобіля.

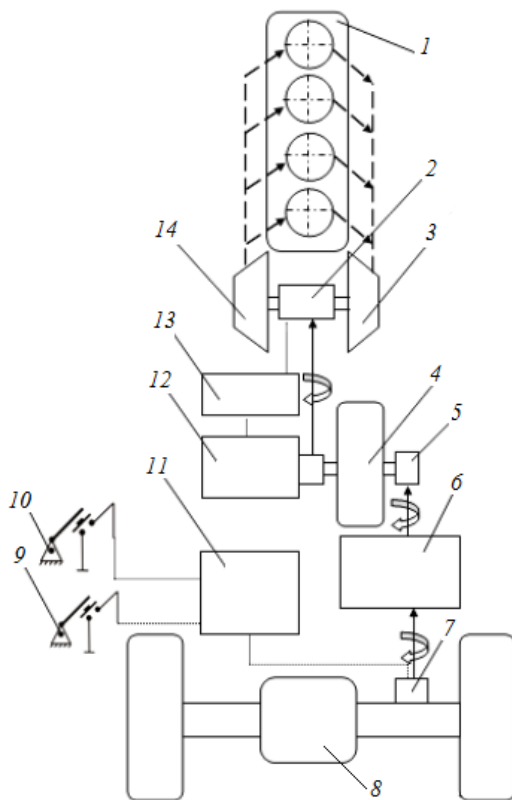


Рисунок 6.13 – Схема, що ілюструє електромеханічний спосіб підвищення прийомистості дизеля з системою рекуперативного гальмування:
 1 – дизель; 2 – електродвигун; 3 – турбіна; 4 – маховик (інерційний акумулятор);
 5 – муфта обгону; 6 – підвищуючий редуктор; 7 – електрична муфта;
 8 – трансмісія автомобіля; 9 – педаль гальма; 10 – педаль подачі палива;
 11 – електронний блок керування; 12 – генератор; 13 – акумуляторна батарея;
 14 – компресор

6.5 Керування маховиковим акумулятором

Автори в роботі [36] обумовлюють, що практично єдиним способом керування маховиковим акумулятором є зміна передавального відношення його приводу, однак теорія способу управління зміною передавального відношення для рекуперації енергії гальмування транспортних машин розроблена недостатньо повно.

Рекуперація енергії гальмування та її накопичення в маховику здійснюється шляхом зміни передавального відношення варіатора, зображеного на рисунку 6.14, що зв'язує маховик з трансмісією машини.

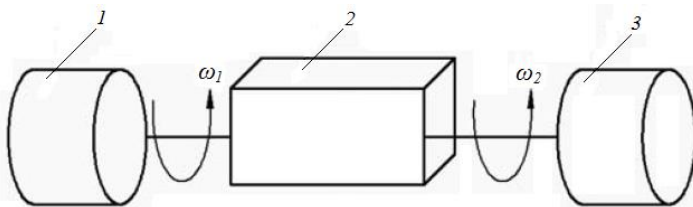


Рисунок 6.14 – Схема машини з маховиковим акумулятором енергії:

1 – момент інерції маховика акумулятора; 2 – приведений момент інерції машини; 3 – варіатор

Представлена модель описує тільки одну ступінь свободи приводу від трансмісії машини маховика за допомогою керованого варіатора швидкостей. При описі динамічної поведінки трансмісії під дією зовнішнього і внутрішнього збурень у вигляді моменту рекуперації при зміні передавального відношення, необхідно використовувати систему рівняння двомасової системи.

Якщо в якості критерію оптимізації вибрати кінетичні втрати енергії при гальмуванні, то закон зміни передавального відношення варіатора буде оптимальним, забезпечуючи постійне значення кінетичної енергії машини:

$$T_{\Sigma} = T_{max} + T_{tp} = const, \quad (6.1)$$

де $T_{max} = \frac{J_{max} \cdot \omega_{max}^2}{2}$ – кінетична енергія маховика;

$T_{mp} = \frac{J_{mp} \cdot \omega_{mp}^2}{2}$ – кінетична енергія трансмісії машини;

$\omega_{mp}, \omega_{max}$ – кутові швидкості вихідного вала трансмісії і маховика;

J_{max}, J_{mp} – моменти інерції маховика і машини.

Перше завдання, яке вирішується за допомогою динамічної моделі, наведеної на рисунку 6.5 – розрахунок необхідного моменту інерції маховика. З умови, що початковий запас кінетичної енергії машини перед гальмуванням і запас її в маховику після гальмування повинні бути рівні, момент інерції маховика визначається наступним чином:

$$T_{max} = \frac{J_{mp} \cdot \omega_{mp_{max}}^2}{\omega_{max_{max}}^2} = \frac{J_{mp}}{U_{var_{max}}^2}. \quad (6.2)$$

Друге завдання, яке необхідно вирішити – визначити закон зміни передавального відношення при повній рекуперації енергії гальмування. Авторами в роботі [36] отримана безрозмірна залежність оптимального закону зміни передавального відношення варіатора:

$$U_{var}(\omega_{mp}) = \sqrt{\left(\frac{U_{var_{max}} \cdot \omega_{mp_{max}}}{\omega_{mp}}\right)^2 - 1}. \quad (6.3)$$

На рисунку 6.15 авторами представлена оптимальна залежність зміни передавальної функції варіатора при гальмуванні, починаючи з максимального значення швидкості обертання головного вала машини $\omega_{2_{max}}$.

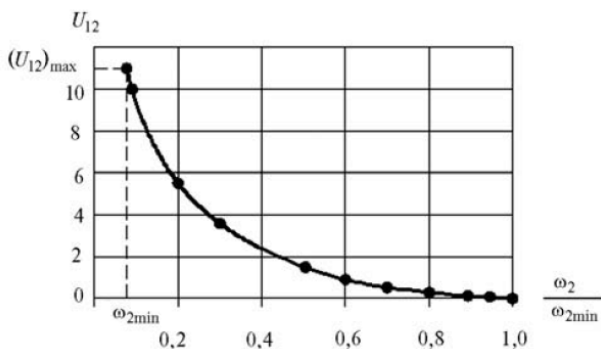


Рисунок 6.15 – Залежність передавальної функції варіатора для забезпечення постійного значення кінетичної енергії системи

Практично всі відомі варіатори швидкостей мають обмежені по максимальному і мінімальному передавальним відношенням, і це буде позначатися на економічних характеристиках процесу рекуперації енергії маховиковим акумулятором. При обмеженні максимального значення передавального відношення варіатора $U_{12_{max}}$ перекачування кінетичної енергії в маховик при гальмуванні машини припиняється при досягненні кутової швидкості обертання валу трансмісії машини ω_{2min} , як показано на рисунку 6.15.

Управління рекуперацією енергії здійснюється системою керування, при цьому повна зупинка машини повинна забезпечуватися звичайною гальмівною системою з деякими втратами кінетичної енергії. При обмеженому мінімальному передавальному відношенні при досягненні максимального значення швидкості обертання маховика рекуперація енергії гальмування припиняється. Таким чином, частина енергії гальмування втрачається і деяку частину кінетичної енергії гальмування не можна використовувати, що викликає появу втрат енергії з коефіцієнтом втрат. Отже, це викликає і зниження ККД процесу рекуперації енергії на деяку величину в залежності від обмежень передавального відношення варіатора.

З розглянутого авторами в роботі [36] випливає, що оптимальний закон зміни передавального відношення $U_{12_{min}}$.

U_{opt} не залежить від діючих сил і моментів цих сил, а визначається тільки зміною швидкості руху машини. Тому варіатор може бути підключений до системи автоматичного регулювання швидкості руху машини без використання даних по навантаженню (рис. 6.16).

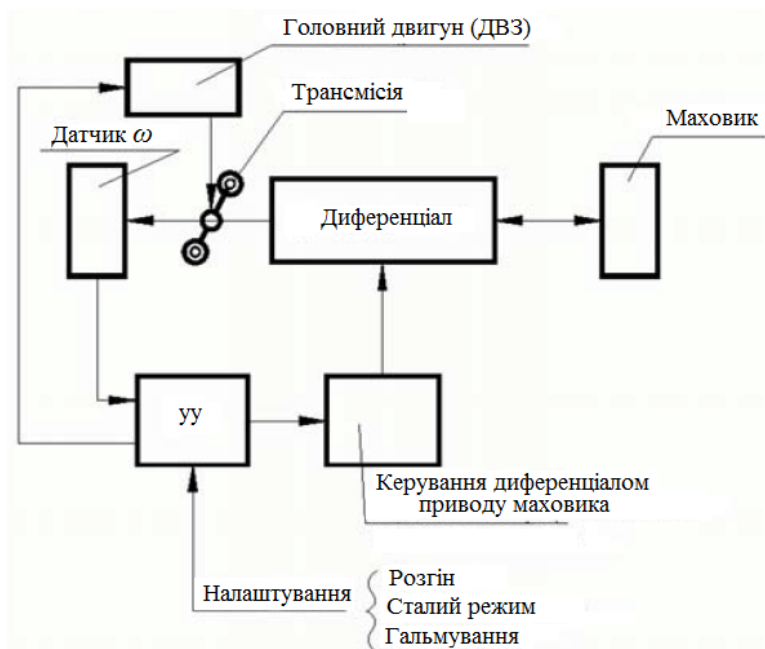


Рисунок 6.16 – Система регулювання швидкості руху транспортної машини

З огляду на простоту включення маховикового акумулятора в систему автоматичного регулювання швидкості руху машини і через його надійність, його застосування представляється переважним відносно електричного акумулятора енергії. Оптимальне передавальне відношення варіатора може забезпечити тільки стійкість запасу кінетичної енергії машини. Відхилення від оптимального закону зміни передавального відношення варіатора викликає зниження коефіцієнта рекуперації і підвищення витрати енергії.

6.6 Механічні накопичувачі енергії в деклараційних документах на винаходи

6.6.1 Рекуператор механічної енергії зі здвоєними планетарними рядами і фрикційними муфтами

Пропонується технічне рішення для вирішення завдання зниження втрат при перетворенні енергії в процесі рекуперації (розгону) автомобіля, а також максимального використання потенціалу його двигуна в режимі рекуперації для компенсації загальних втрат в механізмі, який узгоджує трансмісію уповільнюючого автомобіля і маховика, що прискорюється (і навпаки). Також при цьому створюється додатковий запас енергії для режиму розгону. Для вирішення завдання використовується узгоджувальний елемент (механізм) у вигляді здвоєних планетарних рядів з муфтами управління, який має досить широкий діапазон робочих частот обертання вихідного валу, що працює в парі з механічною ступінчастою коробкою перемикання передач. Таке рішення забезпечує не тільки зниження втрат в узгоджувальних елементах (механізмі), але і надходження в систему додаткової потужності [42].

Рекуператор механічної енергії містить (рис. 6.17):

- маховик 1;
- планетарну передачу з центральними колесами 2 і 7, сателітами 3 і водилом 4;
- реверсують вузол (води́ло 11, сонячне колесо 12, сателіт 13, коронне колесо);
- гальмо управління 10;
- муфту управління 15, 16;
- коробку передач 5.

Коробка передач 5 кінематично пов'язана своїм первинним валом з водилом 4, а вторинним – з вихідним валом 6. Вихідний вал 6 зв'язаний з виконавчим органом. Вхідний вал 9 пов'язаний з двигуном, наприклад, ДВЗ. Початковий елемент 8 пов'язує центральне колесо 7 з керованою муфтою 15 і реверсуючим вузлом.

Реверсуючий вузол складається, наприклад, із планетарної передачі з керованим гальмом 10, водилом 11, сонячним колесом 12, сателітами 13, коронним колесом 14. Додатковим елементом є

коробка передач 17, яка первинним валом пов'язана з центральним колесом 2, а вторинним – з маховиком 1.

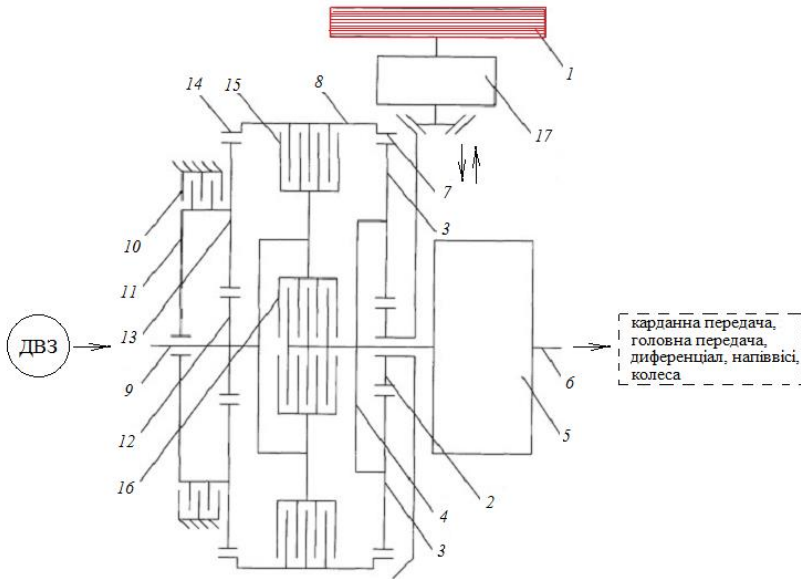


Рисунок 6.17 – Схема рекуператора механічної енергії:

- 1 – маховик; 2, 7 – центральне колесо; 3, 13 – сателіт; 4, 11 – водило; 5 – коробка передач; 6 – вихідний вал; 8 – з'єднувальний елемент; 9 – вхідний вал; 10 – гальмо; 12 – сонячне колесо; 14 – коронне колесо; 15, 16 – муфта; 17 – додаткова коробка передач

Рекуператор механічної енергії працює наступним чином.

Режим рекуперативного гальмування

У режимі рекуперативного уповільнення маховик 1, кінематично пов'язаний з центральним колесом 2 планетарної передачі, прискорюється. При цьому він отримує механічну потужність з двох сторін:

– з одного боку, через сателіти 3, водило 4 і коробку передач 5 від уповільнюючого вихідного вала 6, пов'язаного з виконавчим органом, наприклад, з головною передачею автомобіля;

– з іншого боку, через сателіти 3, центральне колесо 7, з'єднувальний елемент 8 і реверсуючий вузол від прискореного вхідного вала 9, пов'язаного з двигуном.

Конструктивно, яке з центральних коліс, сонячне або коронне, пов'язане з маховиком, а яке з двигуном, або використовується симетричний диференціал, вибирається в залежності від конкретного призначення і виконання механізму.

Реверсуючий вузол складається, наприклад, з планетарної передачі з керованим гальмом 10. Гальмо 10 призначене для зупинки водила 11. При цьому механічна потужність від вхідного вала 9 через сонячне колесо 12, сателіт 13 передається на коронне колесо 14. Така взаємодія забезпечує зміну напрямку обертання на протилежне і збільшення моменту згідно з передавальним числом планетарної передачі.

Режим розгону

У режимі розгону вихідний вал 6 прискорюється. При цьому він отримує механічну потужність з двох сторін:

– з одного боку, через коробку передач 5, водило 4 і сателіти 3 планетарної передачі через центральне колесо 2 від уповільнюючого маховика 1;

– з іншого боку, через центральне колесо 7, з'єднувальний елемент 8, керовану муфту 15 від прискореного вхідного вала 9, пов'язаного з двигуном.

У режимі рівномірного руху

У режимі рівномірного руху механічна потужність від вхідного вала 9, пов'язаного з двигуном, передається через керовану муфту 16 на коробку передач 5 і вихідний вал 6. Керована муфта 15 і гальмо 10 відключені, центральне колесо 7 обертається вільно.

Перед включенням режиму рекуперації (розгону) проводиться вибір початкової передачі коробки передач, що забезпечує потрапляння в номінальний діапазон частоти обертання двигуна. Це здійснюється за рахунок того, що з двигуном пов'язано центральне колесо 7 незмінним для кожного режиму передавальним відношенням. Тахометр (на схемі не показаний), який визначає частоту вільного обертання колеса 7 у

момент безпосередньо перед рекуперацією (розгоном), незалежно від співвідношення частот обертання маховика і вихідного валу дозволяє однозначно вибрати початкове передавальне число коробки передач. Надалі, у міру уповільнення (прискорення) вихідного вала відбувається послідовне збільшення (зменшення) передавальних чисел коробки передач 5 виходячи з умови роботи двигуна в номінальному діапазоні частот.

Якщо рекуператор обладнати додатковою коробкою передач 17, пов'язаною з маховиком, того ж ефекту можна досягти, зменшуючи (збільшуючи) передавальні числа даної коробки. При цьому незмінне передавальне число коробки 5 забезпечить відносно постійний (в залежності від швидкісної характеристики двигуна) момент уповільнення (прискорення) на вихідному валу. Коробка передач 17 дозволяє підтримувати частоту обертання центрального колеса 2 в оптимальному діапазоні. Використання коробки 17 є також альтернативою збільшення кількості ступенів стандартної коробки 5. Інтенсивність уповільнення (прискорення) визначається регулюючим органом двигуна, наприклад, дросельною заслінкою.

Рекуператор механічної енергії може встановлюватися як додатковий механізм в існуючій машині, наприклад, між двигуном і штатною коробкою передач автомобіля (за умови, якщо штатна коробка передач відповідає умовам достатності діапазону регулювання, необхідної близькості передавальних чисел, можливості зміни алгоритму управління), а також як складова частина знову проєктованих машин.

Рекуператор механічної енергії дозволяє з високим коефіцієнтом корисної дії утилізувати кінетичну (при зниженні швидкості руху) і потенційну (при русі під ухил) енергії. Накопичена енергія використовується для розгону, що веде до економії палива і покращує динамічні характеристики. Застосування рекуператора може також зменшити капітальні витрати, якщо використовується двигун меншої потужності. Економія енергії, крім економічного ефекту, несе також і екологічний ефект.

6.6.2 Пристрій рекуперації енергії гальмування машини із змінним передавальним відношенням

Пропонується пристрій, з використанням якого обмін кінетичної енергії між маховиком і трансмісією машини проводиться за допомогою зміни передавального відношення кінематичного ланцюга планетарного диференціала за рахунок зміни його ступеня рухливості шляхом загальмування або розгальмування його ланки за допомогою гальма. При гальмуванні однієї ланки, наприклад, водила, число ступенів рухливості механізму, наприклад, планетарного диференціала, знижується на одиницю і стає рівною одиниці. При гальмуванні однієї ланки число ступенів рухливості механізму збільшується на одиницю і стає рівним двом (рис. 6.18) [43].

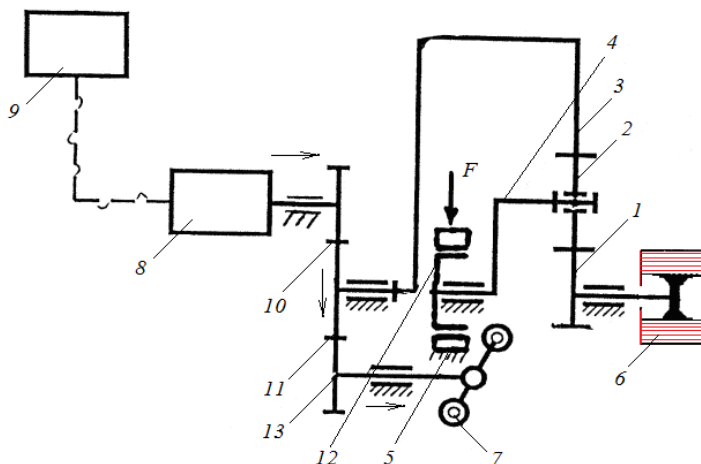


Рисунок 6.18 – Схема пристрою рекуперації енергії гальмування машини:
1 – сонячна шестерня планетарного диференціала; 2 – сателіт; 3 – центральне зубчасте колесо; 4 – водило; 5 – колодки гальма; 6 – маховик; 7 – ведучі колеса; 8 – тяговий двигун; 9 – керуючий пристрій; 10, 11 – редуктори з нерухомими осями; 12 – барабан гальма; 13 – трансмісія машини

Сонячна шестерня 1 планетарного диференціала з'єднана з центральним зубчастим колесом 3 за допомогою сателіта 2, розташованого на водилі 4.

Центральне зубчасте колесо 3 пов'язане з редукторами 10, 11 з нерухомими осями. Водило 4 пов'язане з барабаном 12 гальма. Колодки гальма 5 при затягуванні силою F перешкоджають обертальному руху барабана 12, так як з'єднані з нерухомим корпусом пристрою.

Маховик 6 з'єднаний з сонячною шестернею 1 планетарного диференціала.

Ведучі колеса 7 машини з'єднані за допомогою трансмісії 13 і редукторів 10, 11 (з нерухомими осями) з тяговим двигуном 8, який з'єднаний електричними ланцюгами з керуючим пристроєм 9.

Кращий варіант пристрою полягає в тому, що додаткове зчеплення з'єднує вал тягового двигуна 8 за допомогою редукторів з нерухомими осями 10 і 11 з трансмісією 13 машини.

Робота пристрою

На рисунку 6.19 зображена кінематична схема планетарного диференціала, поруч з якою зображені плани швидкостей його ланок у вигляді променів, що виходять з початку координат:

- V – швидкість точки на радіусі r ;
- Π_1 и Π_2 – полюса зачеплення зубчастих коліс, в яких їх лінійні швидкості однакові між собою.

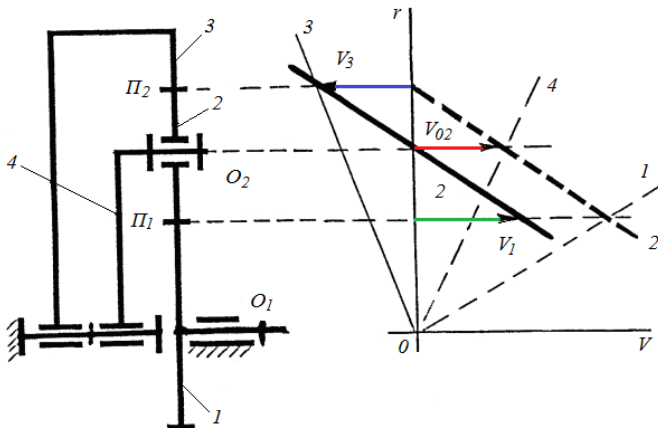


Рисунок 6.19 – Кінематична схема однорядного планетарного диференціала з планом швидкостей: 1 – сонячна шестерня планетарного диференціала; 2 – сателіт; 3 – центральне колесо; 4 – водило

Пунктиром показано стан швидкостей ланок планетарного диференціала на стоянці машини, в якій швидкість трансмісії 13 машини і центрального колеса 3 V_3 дорівнюють нулю.

План швидкостей відповідає планетарному диференціалу зі ступеня рухливості, що дорівнює двом. Колодки 12 гальма відпущені і воδιла 4 вільно обертається, а швидкість центру воδιла V_{02} максимальна. V_1 – швидкість в полюсі P_1 , що залежить від швидкості центру воδιла 4 V_{02} , також максимальна.

З початком руху машини затягуються колодки 12 гальма і швидкість воδιла 4 та його центру V_{02} приймає нульове значення. План швидкостей, показаний безперервними лініями, переміщається вліво і відповідає редуктору з нерухожими осями і ступенем рухливості, що дорівнює одиниці. Швидкість трансмісії V_3 збільшується в порівнянні зі значеннями на стоянці, маховик б віддає свою енергію і його швидкість знижується V_1 в порівнянні зі значеннями на стоянці.

Швидкість трансмісії 13 машини регулюється потужністю і швидкістю тягового двигуна 8.

При усталеному русі машини спостерігається баланс рушійних сил і сил опору. Тому потужність тягового двигуна 8 передається кінематичним ланцюгом через зчеплення (на рис. 6.18 не показано) і через трансмісію 13 ведучих коліс 7.

При розгоні дисбаланс рушійних сил і сил опору порушується і додаткова енергія передається від маховика б через центральне зубчасте колесо 3 і трансмісію 13 ведучих коліс 7.

Припинення руху машини викликається зниженням потужності тягового двигуна 8 і відпуском колодок 5 гальма та розгальмуванням воδιла 4.

При гальмуванні машини дисбаланс рушійних сил і сил опору порушується в зворотну сторону, що викликає зміну напрямку руху енергії від ведучих коліс 7 через планетарний диференціал у маховик б.

За кращий варіант пристрою передбачено додаткове зчеплення (на рис. 6.18 не показано), вимикання якого дозволяє зберегти кінетичну енергію маховика б при зупинці, тягового двигуна 8 і ведучих коліс 7 машини.

Пристрій рекуперації енергії гальмування машини дозволяє підвищити ефективність витрати енергії машин, знизити втрати

енергії та підвищити економічність машин на будь-яких невстановлених режимах роботи шляхом зміни передавальних відношень між трансмісією машини і маховиком, що дозволяє виробляти повну рекуперацію енергії гальмування. Кращими якостями володіє пристрій, що керується шляхом підтримки постійного значення запасу кінетичної енергії трансмісії транспортної машини і маховика [43].

6.6.3 Рекуперативна механічна саморегульована безступінчаста передача з маховиковим накопичувачем енергії

Пропонується технічне рішення для створення повнопотокової рекуперативної передачі з маховиковим накопичувачем енергії на основі механічної саморегульованої безступінчастої передачі. Така передача, крім забезпечення безступінчастого автоматичного (і/або керованої) зміни швидкості обертання вихідного вала в залежності від навантаження на ведучих колесах і подачі палива в двигун, дозволить зменшити витрату палива ТЗ при розгоні за рахунок використання енергії, накопиченої при гальмуванні (рис. 6.20) [44].

Основними складовими частинами рекуперативної механічної саморегульованої безступінчастої передачі (далі передача) з маховиковим накопичувачем енергії є:

- ведучий 1 вал;
- ведений 2 вал;
- порожнистий вал 18;
- порожнистий ексцентрик 3 вал;
- ексцентрик 4, встановлений на ексцентриковому валу 3 (робочий і врівноважуючий) з пазовим диском 5;
- механізми вільного ходу (МВХ) 23, 24 і 7 з ведучими 6 і веденими 8 елементами;
- торсіонні вали 9;
- планетарний ряд (сонячна шестерня 13, водило 13, епіциклічне колесо 15, сателіти – цифрою не позначені);
- фрикційні муфти Фм, Фп2, Фз1, Фз2;
- маховик.

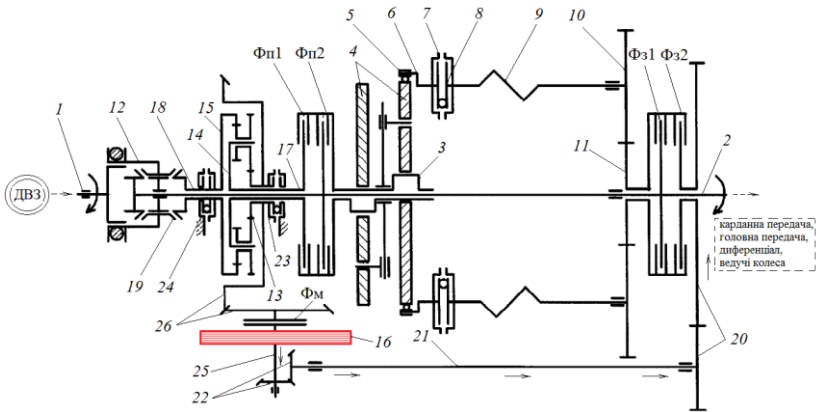


Рисунок 6.20 – Кінематична схема рекуперативної передачі з маховиковим накопичувачем енергії: 1 – ведучий вал; 2 – ведений вал; 3 – порожнистий ексцентриковий вал; 4 – ексцентрик; 5 – пазовий диск; 6 – ведучі елементи механізмів вільного ходу; 7 – муфта вільного ходу (МВХ); 8 – ведені елементи механізмів вільного ходу; 9 – торсіонні вали; 10 – зубчасте колесо; 11 – центральне зубчасте колесо; 12 – зубчаста муфта; 13 – сонячна шестерня; 14 – водило; 15 – епіциклічне колесо; 16 – маховик; 17, 18, 21, 25 – вали; 19 – синхронізуючий пристрій; 20, 22 – зубчасті колеса; 23, 24 – механізми вільного ходу; 26 – зубчаста пара

Ведені елементи 8 МВХ за допомогою торсіонних валів 9 з'єднані з зубчастими колесами 10, що знаходяться в зачепленні з центральним зубчастим колесом 11. Колесо 11 встановлено вільно на веденому валу 2, передній кінець якого через порожнистий ексцентриковий вал 3 і вали центральних коліс 13, 14 і 15 планетарної передачі виведений на вхід передачі.

Сонячна шестерня 13 планетарної передачі пов'язана зубчастою парою 26 через фрикційну муфту ФМ із маховиком 16. Водило 14 планетарної передачі пов'язано з допомогою вала 17 з передньою фрикційною муфтою Фп1, що здійснює його підключення до ексцентрикового вала 3. Епіциклічне колесо 15 з допомогою вала 18 пов'язано з зубчастою муфтою 12.

Зубчаста муфта 12 забезпечена синхронізуючим пристроєм 19 і встановлена між ведучим валом 1 і валами 2 і 18.

Ведений вал 2 з'єднується з ексцентриковим валом 3 і з центральним зубчастим колесом 11 з допомогою передньої Фп2 і задньої Фз1 фрикційними муфтами відповідно.

Підключення маховика 16 до виходу безступінчастої передачі (центральне зубчасте колесо 11) здійснюється за допомогою задньої фрикційної муфти Фз2 через прискорюючий привід (циліндрична 20, 50 конічна, пари зубчастих коліс 22, вал 21).

Ведучі обойми МВХ 24 і 23 пов'язані з епіциклічним колесом 15 і сонячною шестірнею 13. Ведені обойми МВХ з'єднані з корпусом передачі, запобігаючи їх зворотне обертання.

Передача може працювати як в режимі рекуперації енергії гальмування, так і без нього.

Робота передачі без рекуперації енергії

Робота передачі без рекуперації енергії здійснюється при наступних установках керуючих елементів:

– вхідний вал 1 за допомогою зубчастої муфти 12 з'єднаний з валом 18 епіциклічного колеса 15;

– фрикційні муфти Фп1 і Фз1 включені (працюють синхронно і управляються одним органом, наприклад, педаллю «муфти зчеплення»);

– фрикційні муфти Фп2 і Фз2 вимкнені (працюють синхронно і управляються одним органом, наприклад, педаллю гальма);

– сонячна шестерня 13, маховик 16 із фрикційним зчепленням Фм, зубчасті пари 22, 20 і вал 21.

Планетарний ряд працює в режимі понижувальної передачі. Реактивний момент на шестірні 13 сприймається корпусом передачі через МВХ 23. Обертання ведучого вала 1 через планетарну передачу, фрикційну муфту Фп1 передається на ексцентриковий вал 3.

Працює передача наступним чином.

При зупиненому веденому валу 2, коли передавальне відношення дорівнює нулю (стоповий режим), розвороту зовнішнього ексцентрика 4 і збільшення загального ексцентриситету пазового диска 5 перешкоджають сили, що діють на пазовий диск з боку ведучих елементів 6 МВХ 7. Величини цих сил залежать від кутів закрутки торсіонних валів 9. За один оборот ведучого вала кут закрутки кожного торсіонного вала із зсувом по фазі змінюється від нуля до максимального значення і знову до нуля. Динамічна рівновага моменту

відцентрової сили щодо осі внутрішнього ексцентрика 3 і моментів сил, що діють на пазовий диск 5 з боку ведучих елементів 6 МВХ 7, встановлюється при величині ексцентриситету пазового диска 5, що становить певну частку від максимального. Величина цієї частки залежить від вибору конструктивних параметрів при динамічному розрахунку передачі.

При збільшенні передавальної відносини в зв'язку зі зменшенням моменту опору на веденому валу зменшується максимальний кут закрутки торсіонних валів 9. При цьому зменшуються сили, що діють від ведучих елементів 6 МВХ 7 на пазовий диск 5, ексцентриситет його збільшується. Збільшується і розмах коливань ведучих елементів 6 МВХ 7. При цьому зменшується завантаження двигуна.

Зі збільшенням передавальної відносини більш 0,7...0,8 для забезпечення більш повного використання потужності двигуна необхідно за допомогою зубчастої муфти 12 включити «пряму» передачу – з'єднати вали 1 і 2. Вирівнювання швидкостей валів 1 і 2 забезпечується за допомогою зниження частоти обертання двигуна і синхронізуючого пристрою зубчастої муфти 12. При включенні «прямої» передачі усі МВХ (7, 23) працюють в режимі вільного ходу, при цьому їх ведучі елементи 6 (разом з елементами 3, 4, 5 і центральними колесами планетарної передачі 13, 14, 15) припиняють рух, і, тим самим, не створюють додаткову інерційну складову сил тертя в МВХ.

Розвантаження зубчастої муфти 12 для її вільного виключення з режиму «прямої» передачі і переходу на «нейтральну», здійснюється за допомогою зменшення подачі палива в двигуні. Для переходу на режим безступінчастої передачі за допомогою муфти 12 здійснюється з'єднання вала 1 з валом 18 епіциклічні колеса 15 при короткочасному відключенні фрикційних муфт Фп1 і Фз1. При цьому за рахунок синхронізуючого пристрою муфти 12 спочатку відбувається розкрутка деталей 15 і 14, а після включення фрикційних муфт Фп1 і Фз1 і деталей 3, 4, 5 з нерухомого стану до швидкості вхідного вала 1.

Робота передачі з акумулюванням енергії при гальмуванні і рекуперацією енергії при розгоні ТЗ

Передача з акумулюванням енергії при гальмуванні і рекуперацією енергії при розгоні ТЗ працює при підключенні вхідного вала 1 до валу 18 через епіциклічне колесо 15.

При необхідності гальмування маховиком, фрикційні муфти Фп1 і Фз1 синхронно вимикаються, а фрикційні муфти Фз2 і Фз2 синхронно включаються. При цьому вхідний вал 1 відключається, а ведений вал 2 разом з наведеною масою ТЗ підключається до входу передачі (ексцентрикових валів 3). При цьому маховик 16 через підвищувальний привід (деталі 25, 22, 21 і 20) підключається до вихідного валу передачі (центрального колеса 11). Фрикційна муфта маховика Фм, керована вручну, наприклад, важелем, розташованим на колонці рульового колеса, при цьому відключена. У разі спочатку не обертаючого маховика 16, робота передачі відповідає «стоповому» режиму, описаного вище. У міру розкручування маховика 16 (збільшення передавального відношення) зменшується максимальний кут закрутки торсіонних валів 9. При цьому зменшуються сили, що діють від ведучих елементів 6 МВХ на пазовий диск 5. При цьому ексцентриситет його збільшується. Збільшується і розмах коливань ведучих елементів 6 МВХ. Паралельно з ростом кутової швидкості маховика 16 відбувається зниження швидкості ТЗ і, відповідно, кутової швидкості ексцентрикового вала 3. У зв'язку з цим відбувається постійна зміна динамічної рівноваги моменту відцентрової сили щодо осі внутрішнього ексцентрика 3 і моментів сил, що діють на пазовий диск 5 з боку ведучих елементів 6 МВХ.

Таким чином, передавальне відношення безступінчастої передачі і, отже, інтенсивність гальмування ТЗ змінюються автоматично. Максимальна інтенсивність гальмування ТЗ і, отже, розкручування маховика буде на максимальних початкових швидкостях гальмування, забезпечуючи протягом короткого часу розкрутку маховика до максимальних обертів за один цикл гальмування. У міру зниження початкової швидкості гальмування, інтенсивність гальмування знижується через зменшення сумарного ексцентриситету пазового диска 5 і амплітуди коливань ведучих елементів 6 МВХ 7. У цих умовах, для забезпечення розкрутки маховика до максимальних обертів

необхідно виконати два і більше циклів гальмування, забезпечуючи послідовне «накачування» маховика.

Управління процесом гальмування з використанням маховика здійснюється по команді штатної гальмівної системи ТЗ.

Розгін ТЗ за рахунок кінетичної енергії маховика

При необхідності розгону ТЗ за рахунок кінетичної енергії маховика (режим рекуперації енергії) фрикційні муфти Фп1 і Фз1 синхронно включаються, а фрикційні муфти Фп2 і Фз2 синхронно вимикаються. Включенням фрикційної муфти Фм водило 14, сонячна шестерня 13 через зубчасту пару 26, підключаються разом з маховиком 16, деталями 25, 22, 21, 20 до входу передачі (ексцентрикового валу 3). При цьому вихідний вал 2 підключається муфтою Фз1 – до вихідного валу передачі (центрального колеса 11), забезпечуючи режим роботи передачі, описаний вище.

Розгін ТЗ на маховику з вимкненим двигуном відбувається автоматично без участі оператора на основі динамічної рівноваги моменту відцентрової сили щодо осі внутрішнього ексцентрика 3 і моментів сил, що діють на пазовий диск 5 з боку ведучих елементів 6 МВХ. Інтенсивність розгону змінюється автоматично в залежності від співвідношення кутових швидкостей ведучих мас, пов'язаних із маховиком 16 і наведеною до веденого валу 2 масою ТЗ. Для управління інтенсивністю розгону необхідно розганятися на маховику з включеним двигуном, змінюючи його обороти з урахуванням швидкості обертання маховика. Обороти і моменти двигуна і маховика, підсумовуючись в певному співвідношенні на водилі 14 (відповідно до параметрів планетарної передачі), забезпечують розгін з керованою інтенсивністю з урахуванням накопиченої енергії маховика.

Таким чином, у запропонованій конструкції передачі за допомогою трьохпозиційної зубчастої муфти з синхронізуючим пристроєм, планетарного ряду, маховика з керованою фрикційною муфтою, що знижується і прискорюється приводами, і синхронного попарного перемикавання фрикційних муфт Фп1, Фз1 і Фп2, Фз2 обумовлюється можливість:

– по-перше, здійснення повнопоточного саморегульованого обміну кінетичною енергією:

– між приведеною масою ТЗ та маховиком при гальмуванні;
– між маховиком і наведеною масою ТЗ при розгоні;
– по-друге, істотно зменшити витрату палива ТЗ при розгоні за рахунок рекупіювання енергії обертового маховика, розкрученого при гальмуванні ТЗ.

Інтенсивність гальмування ТЗ може додатково регулюватися штатної гальмівною системою, а інтенсивність розгону – оборотами двигуна.

Контрольні запитання для самоперевірки

1. Які функції виконують маховикові накопичувачі енергії?
2. Якими позитивними властивостями володіє маховик при виконанні функції накопичувача енергії?
3. З яких матеріалів виконують маховики, що виконують функції накопичення енергії?
4. На яких підвісах можуть встановлюватись маховики та як вони можуть бути орієнтовані відносно несучої системи?
5. Чим відрізняються схеми *a* і *b*, які наведені на рисунку 6.4?
6. На приводі яких елементів встановлено маховик, що зображений на рисунку 6.4 *b*?
7. На яких частотах обертаються маховики сучасних інерційних накопичувачів механічної енергії?
8. З якою метою встановлено маховик в схемі, яка наведена на рисунку 6.11, та з яким елементом конструкції він з'єднаний?
9. З якою метою встановлено маховик в схемі, яка наведена на рисунку 6.12, та з яким елементом конструкції він з'єднаний?
10. На який елемент конструкції передається енергія маховика на схемі, яка наведена на рисунку 6.17?
11. Поясніть режим рекуперативного гальмування, яке може здійснюватися за схемою, яка наведена на рисунку 6.17.
12. У чому полягає особливість включення маховика у кінематичну схему, яка наведена на рисунку 6.20?
13. З яких енергій складається кінетична енергія машини при використанні в конструкції силового привода маховика?

7 МЕТОДИ ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ

7.1 Використання статистичних коефіцієнтів оцінки енергетичних параметрів гібридної силової установки

Для легкових автомобілів максимальну потужність двигуна зазвичай вибирають виходячи з забезпечення максимальної швидкості на дорозі. Максимальна швидкість досягається на вищій передачі. Максимальна швидкість та потужність заявляються виробником у технічному описі на ТЗ і перевіряється при сертифікаційних випробуваннях. Двигун також повинен забезпечувати високі динамічні якості автомобілю при обгонах на дорозі. Динамічні якості автомобіля залежать від величини максимального крутного моменту двигуна і його розташування на зовнішній швидкісній характеристиці.

При проектуванні гібридного автомобіля і виборі потужності на першому етапі зручно використовувати статистичні дані автомобільних каталогів. Аналіз параметрів силових установок гібридних автомобілів (HEV) показує, що сумарна потужність енергоустановки, як правило, вибирається дещо меншою або рівною потужності ДВЗ, встановленого на автомобілі аналогу. Це дає певний результат зниження витрати палива на гібридному автомобілі. Під аналогом розуміється традиційний бензиновий автомобіль того ж виробника і класу [45, 46].

Енергетичні параметри силової установки можна в першому наближенні вибрати за статистичними коефіцієнтами. Для цього можна використовувати статистичну інформацію про потужнісні параметри різних моделей гібридних автомобілів, які є в технічній літературі.

Автори в роботі [45, 46] пропонують використовувати:

– коефіцієнт $K_1 = N_{eл} / N_{ДВЗ}$, який характеризує відношення потужностей електродвигуна і ДВЗ гібридних автомобілів, $K_1 = 0,073 - 0,95$;

– коефіцієнт $K_2 = M_{K_{eл}} / M_{K_0}$, який характеризує співвідношення величин крутних моментів електродвигуна і ДВЗ, $K_2 = 0,65 - 1,46$ для звичайних гібридів HEV, для гібридних автомобілів HVEV, що підзряджаються – $K_2 = 0,69 - 3,1$;

– коефіцієнт $K_3=N_{ДВЗ}/N_{\Sigma}$, який характеризує співвідношення потужності ДВЗ до сумарної потужності силової установки, $K_3=0,73-0,9$;

– коефіцієнт $N_I=N_{\Sigma}/m_{\Sigma}$, який характеризує співвідношення сумарної потужності силової установки до повної маси автомобіля, $N_I=0,044-0,096$, для гібридних автомобілів НУЕV, що підзаряджаються – $N_I=0,039-0,125$.

На рисунку 7.1 показані статистичні дані коефіцієнта K_I різних гібридних автомобілів.

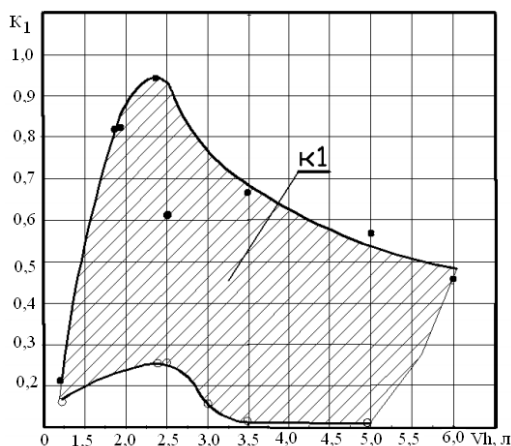


Рисунок 7.1 – Значення коефіцієнта K_I залежно від робочого об'єму V_h ДВЗ у різних гібридних автомобілів: ● – верхня межа значень коефіцієнта; ○ – нижня межа значень коефіцієнта

Значення коефіцієнта K_I для різних гібридних автомобілів змінюється в широких межах від 0,0045 (BMW 7) і 0,073 (Mercedes-Bens S400) до 0,95 (Toyota Camry). Найменше значення коефіцієнта K_I мають моделі автомобілів з 15 кВт електродвигунами і великим робочим об'ємом ДВЗ, а найбільше автомобіль Toyota Camry з 105 кВт електродвигуном і невеликим робочим об'ємом ДВЗ рівним 1,36 л. Слід зазначити, що велике значення коефіцієнта K_I ще не є гарантією досягнення низької витрати палива автомобілем. Так, у автомобіля Hyundai Sonata з 30 кВт електродвигуном ($K_I=0,24$) витрата палива нижче в випробувальних американських циклах ЕРА щодо бензинового

аналога, ніж у Ford Escape з 70 кВт електродвигуном ($K_1=0,61$). Це також характерно і для гібрида Toyota Camry, і для інших моделей. Якщо у автомобіля Hyundai Sonata зниження витрати палива складає 45% в міському циклі і 29% в змішаному циклі, то у другого автомобіля – 36% і 18% відповідно, а у третього – 36% і 24%.

У гібридних автомобілів Honda Insight і Honda Civic з 10 і 15 кВт електродвигунами коефіцієнт K_1 також має низькі значення 0,15 і 0,23. Однак на цих гібридних автомобілях отримано значне зниження витрати палива щодо аналогів. Даний результат, досягнутий в певній мірі завдяки тому, що у даних моделей автомобілів робочий об'єм ДВЗ був знижений щодо аналога Honda Civic з 2,0 л до 1,34 л, при цьому потужність основного двигуна була також знижена з 148 кВт до 65 і 70 кВт відповідно. Прийняте рішення дозволило значно зменшити витрату палива в випробувальних циклах. Порівняльна оцінка паливної економічності гібридних автомобілів щодо аналогів приведена в таблиці 7.1. Для порівняння ефективності роботи силових установок гібридних автомобілів зниження витрати палива по випробувальних американських федеральних циклах EPA і європейських EU показано у відсотках. Там же наведені значення коефіцієнта K_1 енергетичної установки і показники паливної економічності гібридних автомобілів.

Коефіцієнти, що характеризують енергетичні параметри силової установки, такі як співвідношення крутних моментів ДВЗ і електродвигуна, потужностей ДВЗ і електродвигуна, сумарної потужності силової установки по відношенню до повної маси автомобіля наведені в таблиці В.1 додатку В.

Максимальне значення $K_2=2,8$ має силова установка типу PHEV гібридного автомобіля Chevrolet Volt з 55 кВт електромотором. Даний автомобіль має також на порядок більш потужну, ніж у звичайних гібридів літій-іонну батарею з енергоємністю 16 кВт і має можливість підзарядки її від електромережі, що дозволяє йому проїхати відстань на одній зарядці 61 км. Цей же автомобіль має найменше значення $K_3=0,57$.

Найбільше значення N_f мають швидкісні гібридні автомобілі, такі як Porsche Cayenne. Автомобіль має максимальну швидкість 242 км/год і високі динамічні якості, розгін з місця до 100 км складає 6,5 с.

Таблиця 7.1 – Вплив коефіцієнта K_f на зниження витрати палива гібридних автомобілів щодо аналогів у випробувальних циклах

№	Автомобіль	$K_f = N_{ef} / N_{двз}$, кВт/кВт	Витрата палива в випробувальному циклі, л/100 км	Зниження витрати палива відносно аналога, %
1	Toyota Corolla (гібрид)	0,82	EU 3,8/3,8/3,8	56/31/43
2	Toyota Corolla (впорскув. бенз.)	–	EU 8,7/5,5/6,7	–
3	Toyota Camry (гібрид)	0,95	EPA 6,9/7,1/6,9	36/–/24
4	Toyota Camry (впорскув. бенз.)	–	EPA 10,7/7,3/9,1	–
5	Hyundai Sonata (гібрид)	0,24	EPA 6,4/6,0/6,2	45/–/29
6	Hyundai Sonata Fe (впорскув. бенз.)	–	EPA 11,7/6,9/8,7	–
7	Ford Escape (гібрид)	0,61	EPA 7,6/6,9	36/18
8	Ford Escape (впорскув. бенз.)	–	EPA 11,8/8,4	–
9	Lexus RX (гібрид)	0,67	EPA 7,3/8,4/7,8	49/–/26
10	Lexus RX 350 (впорскув. бенз.)	–	EPA 14,3/8,4/10,6	–
11	Mercedes-Bens S 400 (гібрид)	0,073	EU 10,8/6,4/4,8	0/–/41
12	Mercedes-Bens S 350 (впорскув. бенз.)	–	EU 10,8/6,5/8,1	–
13	Cadillac Escalade (гібрид)	0,24	EU 11,6/10,7/11,1 EPA 11,8/10,2	41/5/24 54/22
14	Cadillac Escalade (впорскув. бенз.)	–	EU 20,1/11,3/14,5 EPA 18,1/13,1	–
15	Porsche Cayenne (гібрид)	0,139	EU 8,7/7,9/8,2	45/6/27
16	Porsche Cayenne (впорскув. бенз.)	–	EU 15,9/8,4/11,2	–
17	BMW 7 (гібрид)	0,045	EU 12,6/7,6/9,4	26/15/21
18	BMW 7 (впорскув. бенз.)	–	EU 17,1/8,9/11,9	–

На рисунку 7.2 наведені статистичні дані коефіцієнта K_2 , K_3 і N_f по гібридних автомобілях.

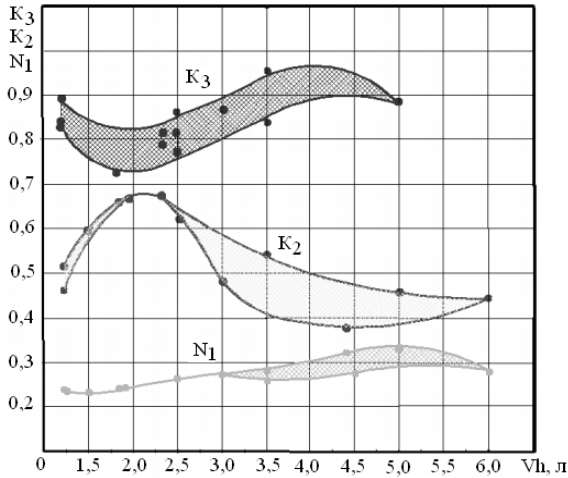


Рисунок 7.2 – Значення коефіцієнтів K_2 , K_3 і N_1 в залежності від робочого об'єму V_h ДВЗ у різних гібридних автомобілів

З розглянутого випливає, що визначальну роль у зниженні витрат палива автомобілем грає не сама по собі обрана потужність електродвигуна силової установки, а інші її характеристики. До таких характеристик слід віднести [45]:

- алгоритм роботи енергоустановки, що визначає режим включення електродвигуна на різних режимах руху автомобіля;
- конструктивні особливості силової установки, що дозволяють працювати ДВЗ в оптимальній зоні багатопараметричної характеристики ДВЗ.

При цьому для реалізації оптимального, з точки зору економічності, алгоритму, необхідна певна потужність електродвигуна, яка забезпечує роботу на електротязі в широкому діапазоні навантажень міського та магістрального циклу. Потрібно також враховувати, що для успішного функціонування разрядно-зарядної системи силової установки при русі автомобіля по циклу необхідно безперервно підтримувати заряд батарей на певному рівні. Це можна зробити тільки забезпеченням позитивного разрядно-зарядного балансу, який визначається:

- алгоритмом роботи силової установки;

- розрядною потужністю генератора;
- тяговою потужністю електродвигуна.

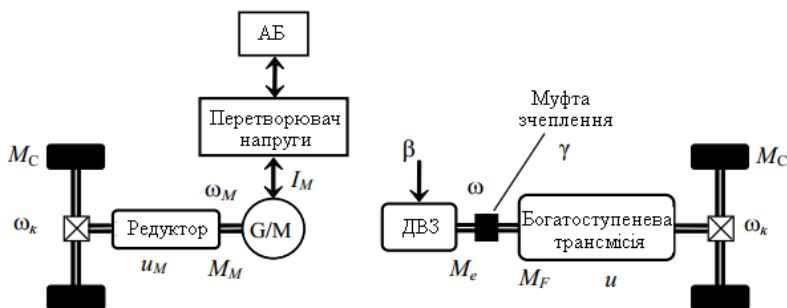
Одні схеми роботи гібрида використовують електродвигун тільки на низьких і середніх навантаженнях міського та магістрального циклів, інші – починають рух за допомогою ДВЗ, а електромотор підключається в тому випадку, якщо потрібна додаткова потужність.

Наведені статистичні дані можна використовувати не тільки для порівняльної оцінки економічності автомобілів з ГСУ, але при проектуванні нового гібридного автомобіля. Так, на першому етапі проектування гібридного автомобіля можна вибрати співвідношення потужностей його силових агрегатів. На другому необхідно оцінити вибрані потужності параметри агрегатів при русі автомобіля, наприклад, в випробувальному міському циклі методом математичного моделювання. Для цього треба знати значення навантажень на силову установку автомобіля [45].

7.2 Математичне моделювання динаміки системи «гібридна силова установка – автомобіль – дорога» з урахуванням керуючих і збурюючих впливів

Оптимальне керування перерозподілом потоків потужності між силовими агрегатами силової установки робить вирішальний вплив на екологічні, енергетичні та їздові характеристики автомобіля. В роботі [47] розглянуті особливості паралельної схеми ГСУ і трансмісії гібридного автомобіля як об'єкта управління по швидкості руху. При цьому пружно-деформуючі властивості трансмісії та пробуксовка ведучих коліс при русі ТЗ не враховувалися. Як збурюючий вплив в системі «ГСУ-автомобіль-дорога» розглядається зміна сили опору руху, викликане варіацією поздовжнього ухилу дороги і характеристик дорожнього покриття. Компоненти вектора управляючих впливів визначаються особливостями ГСУ.

Одним з можливих варіантів паралельної схеми побудови ГСУ є схема, при якій оборотна електрична машина (G/M) в якості допоміжного двигуна встановлюється в приводі ведучого моста ТЗ, відмінного від ведучого моста трансмісії первинного ДВЗ (рис. 7.3).



Рисунки 7.3 – Паралельна схема ГСУ

При гальмуванні автомобіля оборотна електрична машина, працюючи в генераторному режимі, може створювати необхідний гальмівний момент на колесах і забезпечувати рекуперацію кінетичної енергії ТЗ.

Управління ГСУ в даному випадку здійснюється при наступних керуючих впливах:

- положення органу управління потужністю ДВЗ (ступінь відкриття дросельної заслінки β);
- струм зворотної електричної машини I_m ;
- передавальне відношення трансмісії від ДВЗ до ведучих коліс u ;
- коефіцієнт включення муфти зчеплення γ (ступінь натискання на педаль зчеплення).

Параметр β чисельно дорівнює відношенню дійсної ефективної потужності, що розвивається двигуном, до максимальної ефективної потужності при даній швидкості обертання колінчастого вала.

Зміною струму I_m досягається необхідне значення моменту обертання або моменту опору на валу ротора оборотної електричної машини G/M .

З точки зору математичного опису динамічних властивостей гібридного автомобіля паралельна схема (рис. 7.3) практично не відрізняється від інших відомих варіантів. У схемі рисунку 7.3 існує жорсткий кінематичний зв'язок між ротором електричної машини і ведучими колесами, яка описується виразом:

$$\omega_k = \frac{\omega_m}{u_m}, \quad (7.1)$$

де ω_k – кутова швидкість обертання ведучих коліс, рад/с;

u_m – передавальне відношення трансмісії гібридного автомобіля від ротора електричної машини до ведучих коліс;

ω_m – кутова швидкість обертання ротора електричної машини, рад/с.

При відсутності пробуксовування швидкість автомобіля V визначається через кутову швидкість обертання ведучих коліс відповідно до виразу:

$$V = \omega_k \cdot r_k, \quad (7.2)$$

де r_k – радіус кочення ведучого колеса, м.

Математична модель руху гібридного автомобіля видається багатоструктурною, тобто режими руху з блокованою, розблокованою і з буксуючою муфтою зчеплення можуть бути описані окремими системами диференційних рівнянь.

При включеному зчепленні і обраному передавальному відношенні трансмісії в разі прямолінійного руху без пробуксовування коліс силова установка автомобіля і безпосередньо пов'язаний з нею споживач потужності (власне автомобіль) утворюють жорстку механічну обертальну систему з одним ступенем свободи. В якості узагальненої координати системи обирається кут повороту колінчастого вала ДВЗ φ . Зміна сили опору руху, моменту обертання допоміжного двигуна, передавальної відношень трансмісії або переміщення органу управління потужністю ДВЗ порушує баланс потужностей. Динаміка такої системи може бути описана за допомогою рівняння Лагранжа другого роду:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT_c}{d\dot{\varphi}} \right) - \frac{dT_c}{d\varphi} = Q_\varphi, \quad (7.3)$$

де $\dot{\varphi} = d\varphi/dt = \omega$ – кутова швидкість колінчастого вала, рад/с;

T_c – кінетична енергія системи, $T_c = 0,5J_\theta\omega^2$;

J_θ – сумарний момент інерції обертових мас, приведений до осі обертання колінчастого вала;

Q_φ – узагальнена сила, відповідна прикладеним до колінчастого валу моментів сил.

Узагальнена сила Q_φ визначається з виразу:

$$Q_\varphi = M_e + \frac{u_m}{u} M_m - \frac{M_c}{u} - M_F, \quad (7.4)$$

де $M_e = M_e(\omega, \beta)$ – ефективний крутний момент ДВЗ, Н·м;

$M_m = M_m(\omega_m, J_m)$ – момент на валу оборотної електричної машини, Н·м;

$M_c = M_c(V, \Theta)$ – момент опору, прикладений до ведучих коліс, Н·м;

Θ – кут поздовжнього ухилу дороги;

M_F – опір, обумовлений силами тертя в елементах трансмісії, приведений до осі обертання колінчастого вала.

Враховуючи, що значення $dJ_\theta/d\varphi$ мале, а співвідношення швидкостей обертання колінчастого вала ДВЗ і ротора електричної машини при відсутності пробуксовування коліс визначається передавальними відношеннями трансмісії, рівняння динамічної рівноваги системи «ГСУ-автомобіль» може бути записано у вигляді:

$$J_\theta \frac{d\omega}{dt} M_e + \frac{u_m}{u} M_m - \frac{M_c}{u} - M_F, \quad (7.5)$$

$$\omega_m = \frac{u_m}{u}.$$

Сумарний момент інерції J_θ , приведений до осі обертання колінчастого вала при блокуванні муфти зчеплення, можна виразити трьома складовими: наведеним моментом інерції

обертових мас ДВЗ J_{dv} , наведеним моментом інерції ротора електричної машини J_{emB} і наведеним моментом інерції мас автомобіля J_{IsB} .

$$J_e = J_{dv} + J_{emB} + J_{IsB}. \quad (7.6)$$

При русі з розблокованою муфтою зчеплення автомобіль з паралельною ГСУ являє собою систему з двома ступенями свободи. Якщо знехтувати силами тертя в елементах трансмісії, динамічні властивості такої системи описуються системою диференціальних рівнянь:

$$J_R \frac{d\omega_m}{dt} = M_m - \frac{M_c}{u} - \frac{u}{u_m} M_F, \quad (7.7)$$

$$J_{dv} \frac{d\omega}{dt} = M_e,$$

де $J_R = J_{em} + J_{IsR}$ – сумарний момент інерції обертових мас системи, приведений до осі обертання ротора електричної машини;

J_{IsR} – момент інерції мас автомобіля, приведений до осі обертання ротора електричної машини.

Для опису руху гібридного автомобіля з буксуючою муфтою зчеплення пропонується ввести додаткову змінну $r \in [0,1]$, що характеризує ступінь буксування фрикційної муфти зчеплення [47].

При цьому значення $r=0$ відповідає руху з розблокованою муфтою зчеплення або на нейтральній передачі, а $r=1$ – руху з заблокованою муфтою. В цьому випадку динамічні властивості системи «ГСУ – автомобіль – дорога» можуть бути описані в такий спосіб:

$$J_{er} \frac{d\omega}{dt} = M_c + \left(\frac{u_m M_m}{u} - \frac{M_c}{u} - M_F \right) r, \quad (7.8)$$

$$J_R \frac{d\omega_m}{dt}(1-r) + \omega_m r = \left(M_m - \frac{M_c}{u_m} - \frac{u}{u_m} M_F \right) (1-r) + \frac{u_m}{u} \omega_r,$$

де $J_{gr} = J_{dv} + (J_{emB} + J_{tsB})/r$ – сумарний момент інерції обертових мас системи при буксуючій муфті зчеплення, приведений до осі обертання колінчастого вала.

Отримана авторами модель може використовуватися при оптимізації функції перерозподілу потоків потужності між силовими агрегатами гібридного автомобіля на різних тягово-швидкісних режимах. Рішення такої оптимізаційної задачі дозволяє проводити порівняльний аналіз різних конструктивних (схемних) рішень ГСУ та обґрунтувати вибір їх базових параметрів і характеристик.

7.3 Математичне моделювання енергетичного балансу автомобіля при його русі у випробувальному міському циклі

Для оцінки потужних параметрів агрегатів обраної схеми компонування ГСУ за допомогою методу математичного моделювання необхідно:

- по-перше, знати значення навантажень на силову установку;
- по-друге, визначитися з випробувальним циклом, наприклад, використовувати міський європейський цикл відповідно до Правил №83 ЄЕК ООН;
- по-третє, вибрати розрахункові аналітичні вирази;
- у четвертих, виконати відповідні розрахунки, на підставі яких визначити кількість енергії, витраченої силовою установкою на рух автомобіля по окремих етапах циклу і накопичення енергії на акумуляторній батареї від ДВЗ, а також енергії рекуперації при гальмуванні. При цьому підсумовування потужностей по етапах дозволить визначити загальну витрачену енергію і рекуперуєму енергію [46].

Часткова частина використаної потужності тягового електродвигуна на навантажувальних режимах циклу визначається:

– потужністю електродвигуна, використовуваного в силовій установці;

– ступенем зарядки акумуляторної батареї;

– максимальною потужністю акумуляторної батареї.

Навантаження на силову установку при використанні даної методики визначаються:

– ваговим параметром автомобіля G_a ;

– моментом інерції автомобіля J_a ;

– середньою швидкістю руху V_a ;

– прискоренням автомобіля δ_j , $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$;

– коефіцієнтом опору коченню f ;

– коефіцієнтом аеродинамічного опору c_x ;

– площею поперечного перерізу автомобіля F .

Так, європейський міський випробувальний цикл Правил №83-05 ЄЕК ООН включає наступні режими:

– розгін з прискоренням протягом заданого часу і до заданої швидкості;

– рівномірний рух із заданою швидкістю протягом заданого часу;

– уповільнення до заданої швидкості або до повної зупинки;

– стоянку з працюючим на холостих обертах двигуном.

Відповідно до Правил №83 ЄЕК ООН на ділянках D_t циклу параметри (7.9) потужностного балансу (балансу енергій) при русі автомобіля визначаються за виразами (7.10–7.12).

$$\bar{N}_{k\Sigma} = \bar{N}_f + \bar{N}_\omega + \bar{N}_j, \quad (7.9)$$

де $\bar{N}_{k\Sigma}$ – середня потужність, що витрачається на подолання сумарного опору руху на ділянці D_t , кВт;

\bar{N}_j – середня потужність, що витрачається на подолання сил інерції автомобіля на ділянці D_t , кВт;

\bar{N}_f – середня потужність, що витрачається на подолання опору коченню на ділянці D_t , кВт;

\bar{N}_ω – середня потужність, що витрачається на подолання опору повітря на ділянці D_t , кВт.

$$\bar{N}_j = \frac{G_a}{g} \cdot j_a \cdot \delta_j \cdot \frac{\bar{V}_a}{3,6}, \quad (7.10)$$

де G_a – вага автомобіля, Н;

\bar{V}_a – середнє значення швидкості руху автомобіля в обраному інтервалі часу циклу, км/год;

J_a – момент інерції автомобіля, кг·м²;

δ_j – прискорення автомобіля, м·с⁻².

$$\bar{N}_f = G_a \cdot f \cdot \left(1 + 4 \cdot 10^{-5} \bar{V}_a^{-2}\right) \cdot \frac{\bar{V}_a}{3,6}, \quad (7.11)$$

де f – коефіцієнт опору коченню колеса.

$$N_\omega = \frac{c_x}{2} \rho \cdot F \cdot \frac{\bar{V}_a^3}{3,6^3}, \quad (7.12)$$

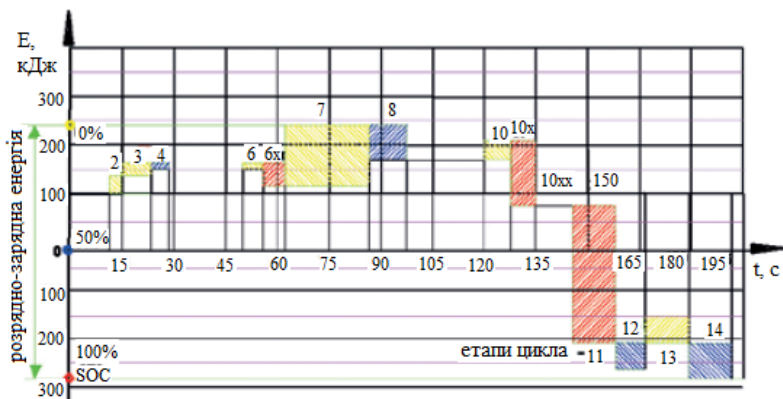
де ρ – щільність повітря, кг·м⁻³.

Виконані розрахунки авторами в роботі [46] показують, що на автомобілі УАЗ-3153 з різними варіантами включення ДВЗ і тягового електродвигуна буде мати місце наступне (табл. 7.1):

– якщо потрібно забезпечити рух автомобіля в постійних режимах і з прискоренням до 30 км/год, то максимальна потужність електродвигуна може не перевищувати 30 кВт;

– якщо використовувати в циклі тільки режим електротяги, то на автомобілі необхідний тяговий електродвигун не менше 60 кВт. Автомобіль при цьому працює як електромобіль, тобто без підзарядки. Але в цьому випадку йому буде потрібно акумуляторна батарея більшої потужності і, відповідно, ваги та вартості.

Результати розрахунків енергетичного балансу наведені на рисунку 7.4, результати моделювання наведені в таблиці Г.1 додатку Г. Як видно з рисунку 7.4 авторами моделювалися співвідношення потужностей ДВЗ і електродвигуна відповідно до їх верхніх і нижніх рівнів значень.



Рисунк 7.4 – Результати розрахунку енергетичного балансу силової установки автомобіля УАЗ-3153: 1 – холостий хід (не показано); 2, 7, 9, 14 – прискорення; 3, 10 – постійна швидкість; 4, 11, 12 – уповільнення; 5 – уповільнення за спрощеним варіантом включення ДВЗ і електродвигуна (не показано); 6, 13 – холостий хід; 8 – переключення передач; жовтий – розрядка на електродвигун; червоний – зарядка від ДВЗ; синій – зарядка від рекуперації

Виходячи з методики математичного моделювання авторами встановлено наступне.

Застосування електродвигуна 15 кВт максимально дозволяє отримати 33%-ну економію палива в європейському міському циклі. Використання електродвигуна 30 кВт дозволяє скорегувати алгоритм і поліпшити паливну економічність до 42% щодо стандартного варіанту автомобіля.

Найбільш раціональним з точки зору розрядно-зарядного балансу і роботи акумуляторної батареї в міському циклі є варіант № 3 роботи ГСУ з електродвигуном 30 кВт. Позитивний розрядно-зарядний баланс акумуляторної батареї при такому алгоритмі роботи ГСУ становить найбільш низьке значення – 225 кДж, що дозволяє застосовувати на автомобілі батарею меншої

потужності і, відповідно, ваги. Негативні значення розрядно-зарядного балансу акумуляторної батареї при інших варіантах (їх частина авторами не приведена) показують повну розрядку батареї і неможливість виконати рух автомобіля з обраним типом ГСУ по міському циклу з використанням електротяги.

7.4 Математичне моделювання діагностичного параметра оцінки технічного стану гібридної силової установки автомобіля

7.4.1 Основні несправності систем гібридної силової установки і закони їх розподілу

Автором в роботі [48] на підставі експериментальних даних встановлено закономірності зміни відмов у роботі систем ГСУ в залежності від інтервалів пробігу (рис. 7.5).

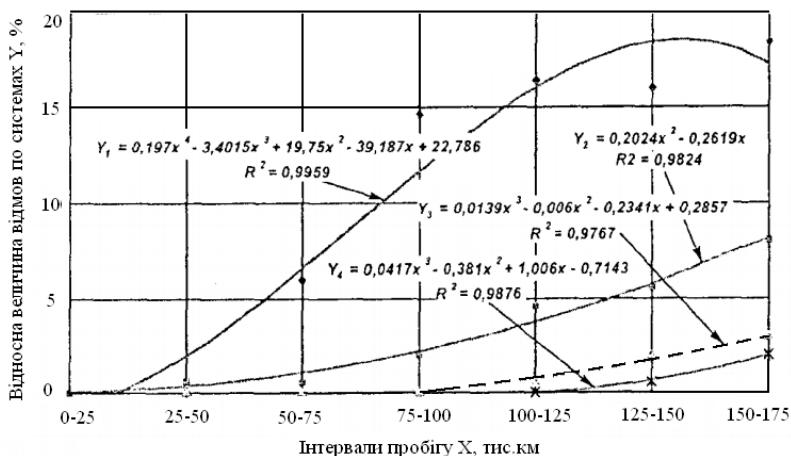


Рисунок 7.5 – Закономірності зміни відмов в роботі ГСУ в залежності від інтервалів пробігу: Y_1 – двигун і його системи; Y_2 – пристрій розподілення потужності; Y_3 – електроніка; Y_4 – високовольтна батарея

З отриманих закономірностей автором встановлено, що найбільша кількість відмов у роботі ГСУ викликано несправностями ДВЗ, що призводять до погіршення таких показників, як корисна потужність і витрата палива. При цьому недолік потужності ДВЗ супроводжується збільшенням

навантаження на друге джерело енергії – високовольтну батарею, що різко знижує її надійність [48].

7.4.2 Загальні відомості про параметри робочих процесів у системі енергопостачання

Для обґрунтування діагностичних параметрів для ГСУ з послідовно-паралельною схемою компонування автором виконаний аналіз робочих і супутніх процесів, що протікають в системах ГСУ. При цьому попередньо до параметра робочих процесів в системі енергопостачання автором віднесені [48]:

- електрична потужність МГ1 у режимі електродвигун (y_1);
- електрична потужність МГ1 у режимі генератора (y_2);
- електрична потужність МГ2 у режимі електродвигун (y_3);
- електрична потужність МГ2 у режимі генератора (y_4);
- електрична потужність високовольтної батареї (y_5) при

розряді;

- електрична потужність високовольтної батареї (y_6) при

заряді;

- саморозряд високовольтної батареї (y_7);
- ємність високовольтної батареї (y_8).

До параметрів супутніх процесів автором віднесено:

- шум;
- вібрації;
- тепловиділення двигуна;
- тепловиділення пристроїв розподілення потужності;
- тепловиділення високовольтної батареї.

На підставі складених та розглянутих матриць діагностичних параметрів автором визначено наступне. У чотирьох основних станах ГСУ (пуск двигуна; початок руху; прискорення; рух на підйом; рух накатом; гальмування) доцільно використовувати тільки один параметр у двох різних станах. Таким параметром є потужність в ланцюзі високовольтної батареї в режимі розряду (y_5) і в режимі заряду (y_6). Такий підхід покладено автором в основу рішення задачі постановки діагнозу технічного стану ГСУ.

У якості критерію оцінки запропонованого параметра приймається відносна величина відхилення Δ (7.13) характеристики зміни фактичного значення параметра y_ϕ від його

теоретичного еталонного значення y_m . А діагностичним параметром «у» є тимчасова залежність зміни значень потужності у ланцюзі високовольтної батареї.

$$\pm \Delta = \sum_{i=1}^n (y_m - y_{\phi}) \rightarrow \min. \quad (7.13)$$

При справному технічному стані ГСУ величина відхилення Δ повинна бути мінімальною. Відхилення діагностичного параметру в сторону верхньої межі свідчить про несправність ДВЗ (рис. 7.6), в сторону нижньої межі – про несправність високовольтної батареї.

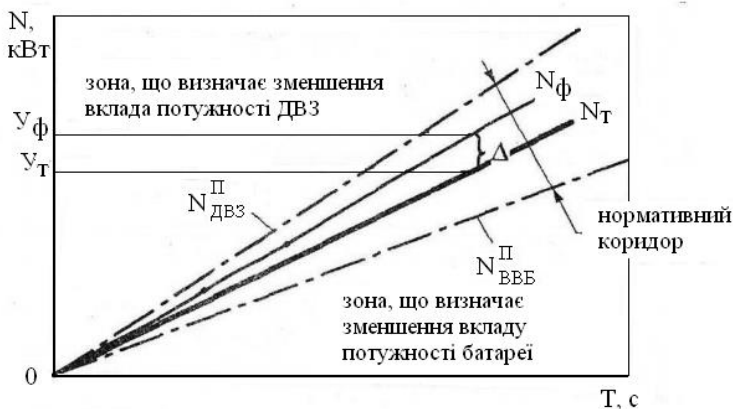


Рисунок 7.6 – Графік залежності зміни потужності в ланцюзі високовольтної батареї від часу: $N_{ДВЗ}^{II}$ – межа допустимого технічного стану ДВЗ; $N_{ВВЕ}^{II}$ – межа допустимого технічного стану високовольтної батареї; N_{ϕ} – фактичне значення діагностичного параметра; N_m – теоретичне значення діагностичного параметра

7.4.3 Алгоритм процесу діагностування гібридних автомобілів за параметрами робочих процесів

Схема алгоритму процесу діагностування гібридних автомобілів за параметрами робочих процесів наведена на рисунку 7.7.

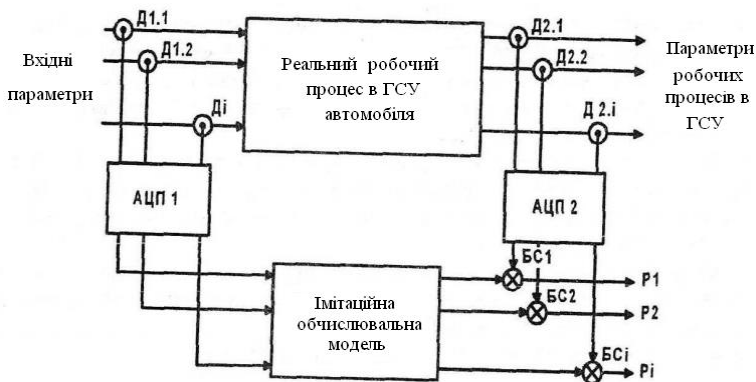


Рисунок 7.7 – Схема алгоритму оцінки технічного стану ГСУ:

$D_{1.1}$ - D_i – датчики, які характеризують рух автомобіля; $D_{2.1}$ - $D_{2.i}$ – датчики, які характеризують робочі процеси в ГСУ; БС1-БС i – блоки порівняння; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; P_1 - P_i – результат оцінки

Діагност або деякий стимулюючий пристрій діє на ГСУ через педаль керування подачею палива. Під даною дією автомобіль прискорюється. При цьому змінюються параметри робочого процесу руху автомобіля (миттєва швидкість, витрата палива), які вимірюються за допомогою датчиків $D_{1.1}$ - D_i , і параметри робочих процесів ГСУ (потужність, що генерується і що споживається), відслідковуються за допомогою датчиків $D_{2.1}$ - $D_{2.i}$, які встановлені на силових ланцюгах ГСУ. Весь потік діагностичної інформації поступає через аналого-цифровий перетворювач в імітаційну модель.

Між вхідними параметрами робочих процесів, які характеризують рух автомобіля, і параметрами робочих процесів в елементах ГСУ існує взаємозв'язок. Для його визначення існує алгоритм обчислювань, що входить до складу імітаційної моделі. Сигнали з датчиків $D_{1.1}$ - D_i надходять до імітаційної моделі, за допомогою якої відбувається обчислювання значень параметрів робочих процесів в ГСУ. Обчислені дані імітаційна модель перетворює в цифровий сигнал, який поступає на один із входів блоків порівнянь БС1-БС i . Значення цих сигналів для блоків порівнянь є опорними. На другий із входів блоків порівнянь надходять сигнали від датчиків $D_{2.1}$ - $D_{2.i}$ та параметрів робочих процесів ГСУ. Блоки порівнянь зіставляють значення датчиків з

опорними значеннями і формують вихідні сигнали за принципом «менше» – «норма» – «більше». Результат порівняння надходить на дисплей у вигляді діаграм.

За умовами справного стану ГСУ реальна характеристика зміни потужності у ланцюзі високовольтної батареї повинна співпадати з опорними сигналами імітаційної моделі.

7.4.4 Математична модель оцінки потужності у ланцюзі високовольтної батареї

Еталонне (теоретичне) значення потужності у ланцюзі високовольтної батареї ГСУ обчислюється на підставі даних тягово-швидкісного балансу автомобіля і енергетичного балансу ГСУ.

Вихідними даними для тягово-швидкісного балансу автомобіля є:

- часова залежність швидкості руху автомобіля $V(t)$ і поперечного профілю дороги $\alpha(t)$;
- маса ГЗ;
- коефіцієнт опору коченню f ;
- площа поперечного перерізу автомобіля F ;
- коефіцієнт обтічності k_g ;
- коефіцієнт врахування обертових мас елементів приводу k_m .

В результаті тягово-швидкісного балансу встановлюється тимчасова залежність зміни сумарної потужності сил опору на випробувальній ділянці $N_c(t)$, яка дорівнює потужності ГСУ, що розвивається при русі автомобіля (7.14).

$$N_c(t) = N_{ГСУ}(t). \quad (7.14)$$

Вихідними даними енергетичного балансу ГСУ є $N_{ГСУ}(t)$. Так, згідно технічного опису заводу-виробника, в послідовно-паралельній ГСУ автомобіля Toyota Prius, енергія, яка виробляється ДВЗ розділяється на два потоки:

- 28% механічної енергії перетворюється у МГІ в електричну. При цьому доля цієї енергії може бути витрачена на живлення одного з електромоторів-генераторів або запасена у накопичувачі енергії і витрачена пізніше;

– 72% механічної енергії передається на коронне зубчасте колесо через водило (рис. 2.23, 2.28) планетарної передачі, редуктор і на ведучі колеса.

Потужність ГСУ на випробувальній ділянці визначиться наступним чином:

$$N_{ГСУ} = N_1 + N_2 + N_3 - N_4, \quad (7.15)$$

де N_1 – потужність від ДВЗ в електроприводі, кВт;

N_2 – потужність у ланцюзі високовольтної батареї, кВт;

N_3 – потужність від ДВЗ в механічній передачі, кВт;

N_4 – потужність, що повертається від рекуперації при гальмуванні, кВт.

Виходячи з наведеного, діагностичний параметр – потужність у ланцюзі високовольтної батареї визначиться наступним чином:

$$N_2 = N_{ГСУ} - N_1 - N_3 + N_4. \quad (7.16)$$

У відповідності з балансом потужностей та їх розподіленням по потоках потужності виразу (7.15) визначаються наступним чином.

$$N_1 = 0,28(N_{ГСУ_i} - N_{HE_{ср.}}), \quad (7.17)$$

$$N_2 = N_{ГСУ_i} - N_{ГСУ_{ср.}}, \quad (7.18)$$

$$N_3 = 0,72(N_{ГСУ_i} - N_{HE_{ср.}}), \quad (7.19)$$

$$N_4 = N_{T_{ср.}}, \quad (7.20)$$

де $N_{ГСУ_i}$ – середня потужність ГСУ на ведучих колесах автомобіля в поточній точці i , кВт;

$N_{HE_{сep.}}$ – середня потужність у ланцюзі накопичувача енергії, кВт;

$N_{ГСУ_{сep.}}$ – середня потужність ГСУ на ведучих колесах автомобіля за випробування, кВт;

$N_{Г_{сep.}}$ – середня потужність гальмування за випробування, кВт.

Суміщення змін потужностей на колесах автомобіля в залежності від часу випробувань наведено на рисунку 7.8 [48].

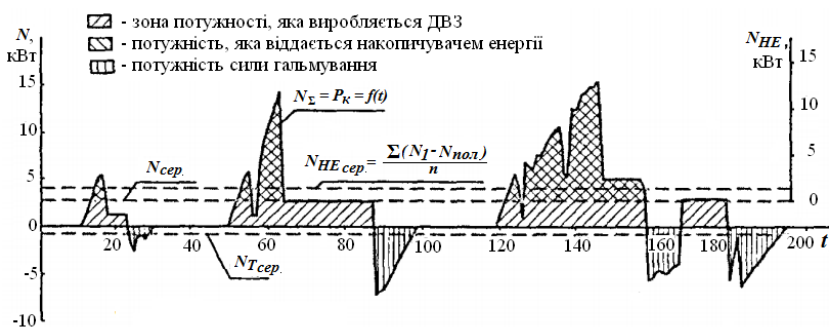


Рисунок 7.8 – Сумісний графік змін потужності N_{Σ} на колесах автомобіля в залежності від часу випробувань, середньої позитивної потужності $N_{поз.}$, середньої потужності гальмування $N_{Г_{сep.}}$ і середньої потужності накопичувача енергії $N_{HE_{сep.}}$.

Лінія $N_{сep.}$ (рис. 7.8) показує середню потужність ДВЗ, яка виробляється за час випробувань. Пік потужності N_{Σ} вище лінії $N_{сep.}$ компенсовані другим джерелом енергії – високовольтною батареєю. Середня потужність піків $N_{HE_{сep.}}$ (7.21) є середня потужність, що проходить через накопичувач за час руху на випробувальній ділянці i .

$$N_{HE_{сep.}} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_{ГСУ_i} - N_{ГСУ_{сep.}})}{n}, \text{ кВт} \quad (7.21)$$

(сума, якщо $N_i - N_{сеп.} > 0$).

При обчисленні N_2 враховуються параметри, що змінюються, а саме:

- фактичний рівень заряду високовольтної батареї;
- кількість енергії, яка надходить від ДВЗ;
- кількість енергії, яка потрібляється на рух і приймається від рекуперації гальмування.

Втрати в елементах ГСУ при передачі енергії від ДВЗ на ведучі колеса автомобіля знаходяться в результаті декомпозиції потоку потужності на окремі ланцюги:

- ланцюг N_1 – потужність від ДВЗ перетворюється в МГ1 в електричну, потім через інвертори Ін1,2 витрачається на рух за допомогою МГ2;

- ланцюг N_2 – потужність від ДВЗ перетворюється в МГ1 в електричну, потім витрачається на заряд високовольтної батареї, звідки за необхідністю подається на МГ2, де перетворюється в механічну і поступає на колеса автомобіля;

- ланцюг N_3 – потужність від ДВЗ передається на колеса автомобіля через водило планетарної передачі, коронне зубчасте колесо і редуктор;

- ланцюг N_4 виникає при гальмуванні автомобіля, коли енергія передається від ведучих коліс через редуктор на МГ2, інвертор Ін2 і накопичується у високовольтній батареї.

З урахуванням втрат у наведених ланцюгах потужності визначаються наступним чином (7.22–7.25).

$$N_1 = \frac{0,28(N_{ГСУ_i} - N_{HE_{сеп.}})}{\eta_{MG1} \cdot \eta_{MG2} \cdot \eta_{TP} \cdot \eta_{In}^2}, \text{ кВт} \dots \dots \dots (7.22)$$

$$N_2 = \frac{N_{HE_{сеп.}}}{\eta_{Г} \cdot \eta_{MG2} \cdot \eta_{BBB} \cdot \eta_{TP} \cdot \eta_{In}^2}, \text{ кВт} \quad (7.23)$$

$$N_3 = \frac{0,72(N_{ГСУ_i} - N_{HE_{сеп.}})}{\eta_{TP}}, \text{ кВт} \quad (7.24)$$

$$N_4 = N_{T_{сеп.}} \cdot \eta_{P} \cdot \eta_{Ko} \cdot \eta_{TP} \cdot \eta_{MG2} \cdot \eta_{In} \cdot \eta_{BBB}, \text{ кВт} \quad (7.25)$$

де $\eta_{МГ1}$ і $\eta_{МГ2}$ – ККД у першому та другому МГ;
 η_{In} – ККД інвертора;
 $\eta_{ТР}$ – ККД трансмісії;
 η_P – ККД рекуперації;
 $\eta_{ВВБ}$ – ККД накопичувача енергії.

Обчислені значення $N_{ВВБ} = N_2$ є еталонними та створюють нормативний коридор діагностичного параметра. Ширина коридору значень допустимого діагностичного параметру визначає границю несправностей:

$$N_{ВВБ} = \pm \Delta, \quad (7.26)$$

де Δ – допустиме розходження значень, кВт.

Відхилення фактичного значення сигналу датчиків у ланцюзі високовольтної батареї є підставою для оцінки потоків потужності від обох джерел енергії, тобто оцінки технічного стану ГСУ.

Алгоритм обчислення еталонних значень діагностичного параметру реалізується в комп'ютерних програмах. Так автором свого часу проведені обчислення [48] та отримано еталонну часову залежність потужності у ланцюзі високовольтної батареї в режимі заряду y_5 (від'ємні значення) і в режимі заряду y_6 (позитивні значення) (рис. 7.9).

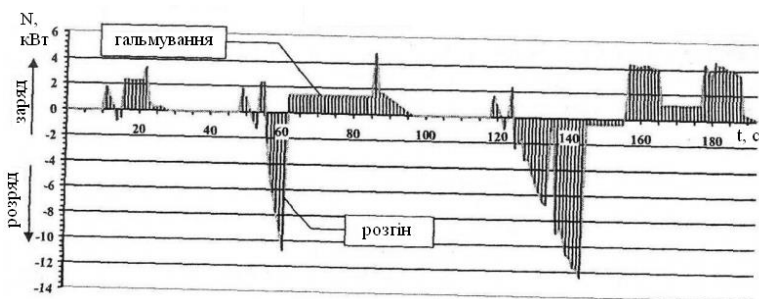


Рисунок 7.9 – Часова залежність змін потужності у ланцюзі високовольтної батареї за умов випробувань ¼ міського циклу за директивою 80/1268 ЕС 2004

Запропонована автором математична модель відповідала результатам експерименту. При цьому відносне відхилення експериментальних значень від теоретичних (еталонних) склало 4,35%, що обумовило можливість використання її при оцінці технічного стану ГСУ автомобілів.

Контрольні запитання для самоперевірки

1. У чому полягає сутність методики оцінки енергетичних параметрів ГСУ з використанням статистичних коефіцієнтів?
2. За рахунок яких параметрів здійснюється керування ГСУ при керуючих впливах?
3. За рахунок чого здійснюється збурюючий вплив в системі «ГСУ – автомобіль – дорога»?
4. Наведіть формулу, за якою встановлюється зв'язок між ротором електричної машини і ведучими колесами.
5. Що необхідно враховувати для оцінки потужних параметрів схеми компонування ГСУ при використанні методу математичного моделювання?
6. Якими параметрами визначається навантаження на ГСУ?
7. Який параметр може бути обраний для розгляду у якості діагностичного для оцінки технічного стану ГСУ з послідовно-паралельною схемою компонування?
8. У чому полягає сутність методики моделювання діагностичного параметра для оцінки стану ГСУ?
9. Що є вихідними даними енергетичного балансу ГСУ?
10. Яким чином визначаються втрати в елементах ГСУ при передачі енергії від ДВЗ на ведучі колеса автомобіля?

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ГОСТ Р ЕН 1986-2-2011. Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Часть 2. Гибридные транспортные средства. <http://docs.cntd.ru/document/1200085963>.
2. ГОСТ Р 58554-2019. Автомобильные транспортные средства. Показатели энергоэффективности и экологии. Способы информирования потребителей. https://allgosts.ru/43/020/gost_r_58554-2019.
3. Большая политехническая энциклопедия. Силовая установка https://polytechnic_dictionary.academic.ru/2334/%D0%A1%D0%98%D0%9B%D0%9E%D0%92%D0%90%D0%AF.
4. Большая политехническая энциклопедия. Силовая установка. <https://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/132279/%D0%A1%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F>.
5. Лежнев Л. Ю., Хрипач Н. А., Шустров Ф. А., Папкин Б. А., Петриченко Д. А., Иванов Д. А., Татарников А. П., Коротков В. С., Неверов В. А. Энергоустановки автомобильного транспорта с тяговым электроприводом : монография. / М-во образования и науки РФ, Московский Политех. Тамбов : ООО «Консалтинговая компания Юком», 2017. 204 с. <http://ucom.ru/doc/mon.2017.12.01.pdf>.
6. ГОСТ Р ИСО 23274-2013. Транспорт дорожный гибридно-электрический измерение выхлопных газов и потребления топлива транспортные средства, не использующие внешнюю подзарядку iso 23274:2007. <https://files.stroyinf.ru/data/560/56015.pdf>.
7. Бахмутов С. В., Карунин К. Л., Круташов А. В., Ломакин В. В., Селифонов В. В., Карпухин К. В., Баулина Е. Е., Урюков Е. В. Конструктивные схемы автомобилей с гибридными силовыми установками : учеб. пособие. М. : Изд. МГТУ «МАМИ», 2007. 72 с.
8. Белоусов Б. Н., Шухман С. Б. Прикладная механика наземных тягово-транспортных средств с мехатронными системами : монография. / под общ. ред. д.т.н., проф. Б. Н. Белоусова. М. : Агроконсалт, 2013. 612 с.
9. Гибридные автомобили. <https://www.autocentre.ua/opyt/tehnologii/tipy-gibridnyh-silovyh-ustanovok-305550.html>.
10. Гибридная трансмиссия. <https://wiki.zr.ru/>.

11. Гибридная трансмиссия. <https://www.hisour.com/ru/hybrid-vehicle-drivetrain-42630/>.

12. Принцип работы авто, гибридные автомобили. <https://www.youtube.com/watch?v=5RBZqrm-6ew>.

13. Федотов А. И., Бодров Е. А., Ковалев А. А. Гибридная силовая установка с использованием энергии температуры отработавших газов конструкции ИрГТУ. / Вестник ИрГТУ. 2012. № 11 (70). С. 136–139.

14. Шабанов А. В., Ломакин В. В., Шабанов А. А., Сальников В. И. Применение комбинированных силовых установок на автомобилях и экологическая безопасность окружающей среды. / Известия МГТУ «МАМИ». 2013. № 1 (15). Т. 1. С. 232–239.

15. Гибридная зима. Длительный тест VW Touareg Hybrid: разбираемся, зачем нужны экологически чистые внедорожники. <https://motor.ru/testdrives/hybridtouareg1.htm>.

16. Капустин, А. А. К 20 Гибридные автомобили: учеб. пособие. / А. А. Капустин, В. А. Раков ; М-во образ. и науки РФ, Вологод. гос. ун-т. Вологда : ВоГУ, 2016. 96 с.

17. Гібридний автомобіль: пат. 95263 Україна: МПК (2011.01) В60К6/00. Харківський автомобільно-дорожній університет. № а200807448; заявл. 30.05.2008; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.

18. Гібридний автомобіль з мехатронним накопичувачем енергії: пат. 49349 Україна: МПК (2009) В60К5/00. Харківський автомобільно-дорожній університет. № u200911647; заявл. 16.11.2009; опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8.

19. Устройство для преобразования силового агрегата автомобиля с расположенным поперечно двигателем внутреннего сгорания в гибридный силовой агрегат: пат. 126659 РФ: МПК В60К6/20 (2007.10), В60L11/02 (2006.01). № 2012139732/11; заявл. 17.09.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10.

20. Схема гибридного привода автомобиля: пат. 166471 РФ: МПК В60К6/00 (2007.10), В60L11/02 (2006.01), В60L11/12 (2006.01). № 2015118493/11; заявл. 18.05.2015; опубл. 27.11.2016, Бюл. № 33.

21. Комбинированная энергетическая установка гибридного автомобиля: пат. 2457959 РФ: МПК В60К6/44 (2007.10),

В60W20/00 (2006.01), В60L11/00 (2006.01). № 2010128225/11; заявл. 08.07.2010; опубл. 20.01.2012, Бюл. № 2.

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

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

24. Умняшкин В. А., Филькин Н. М., Скуба Д. В. Обоснование необходимости создания автомобиля особо малого класса (квадрицикла) с гибридной энергосиловой установкой. / Машиностроение и инженерное образование. 2005. № 2. С. 11–18.

25. Kalekin D. V., Kalekin V. S., Smolin A. A. Piston air motors for a hybrid power plant, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol. 2016. № 9 (1), pp. 71–85. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-1-71-85.

26. Силовая установка гибридной мобильной машины: пат. 2659111 РФ: МПК F04B41/04; F02D17/02; B60K6/12; F02D13/06; F01L9/04 (2006.01). Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ). № 2016137871; заявл. 22.09.2016; опубл. 23.03.2018. Бюл. № 9.

27. Воронков. А. И., Никитченко И. Н., Подоляка А. В., Богданов А. И., Збарский О. Б. Транспортное средство с пневматической силовой установкой на базе автомобиля ВАЗ-2104. Автомобильный транспорт, 2011. № 28. С. 75–80.

28. Пневматичний двигун: пат. 49714 Україна: МПК FV43/00. № u200911310; заявл. 06.11.2009; опубл. 11.05.2011, Бюл. № 9.

29. Абрамчук Ф. И., Воронков А. И., Никитченко И. Н. О достоинствах и целесообразности применения поршневого пневмодвигателя в составе автомобильной гибридной силовой установки. <https://cyberleninka.ru/article/n/pnevmodvigatel-dlya-avtomobilnoy-gibridnoy-silovoy-ustanovki>.

30. Citroen и Peugeot смогут работать на воздухе. https://www.cnews.ru/news/top/citroen_i_peugeot_smogut_rabotat_na_vozduhe.

31. Туренко А. Н., Богомолов В. А., Абрамчук Ф. И., Жилин С. С., Харченко А. И., Червяк В. С., Рубцов В. И.

Пневмодвигатель для автомобильной гибридной силовой установки. <https://cyberleninka.ru/article/n/pnevmodvigatel-dlya-avtomobilnoy-gibridnoy-silovoy-ustanovki>.

32. Лежнев Л. Ю., Хрипач Н. А., Шустров Ф. А., Папки Б. А., Петриненко Д. А., Иванов Д. А., Татарников А. П., Коротков В. С., Неверов В. А. Энергоустановки автомобильного транспорта с тяговым электроприводом : монография. / М-во образования и науки РФ, Московский политех. Тамбов : ООО «Консалтинговая компания Юком», 2017. 204 с.

33. ГОСТ Р 51815-2001. Квадрициклы. Общие технические требования. <http://docs.cntd.ru/document/1200026580>.

34. Балакин П. Д. Гибридные энергоустановки транспортных машин // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 1. С. 9–14.

35. Соколов В. С., Красных О. В., Косторной Г. В. Использование маховиков на транспорте. <file:///C:/Documents%20and%20Settings/ispolzovanie-mahovikov-na-transporte.pdf>.

36. Барбашов Н. Н., Леонов И. В. Улучшение механических характеристик механизмов привода маховичных аккумуляторов энергии. <file:///C:/Documents%20and%20Settings/Downloads/uluchshenie-mehnicheskikh-harakteristik-mehanizmov-privoda-mahovichn-h-akkumulyatorov-energii.pdf>.

37. Диски высокой энергии: маховичный накопитель. <https://www.popmech.ru/technologies/8424-diski-vysokoy-energii-makhovichnyu-nakopitel/>.

38. Маховичный накопитель кинетической энергии. <https://os1.ru/article/9082-mahovichniy-nakopitel-kineticheskoy-energii-zapasnoy-mahovik>.

39. Шабалин Д. В., Терещенко Е. С., Рослов С. В., Смирнов А. М. Метод повышения приемистости комбинированного дизеля с использованием инерционных накопителей энергии // Омский научный вестник. 2014. № 2 (130). С. 136–138. <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-povysheniya-priemistosti-kombinirovannogo-dizelya-s-ispolzovaniem-inertsionnyh-nakopiteley-energii/viewer>.

40. Все тонкости инженерии нового гибридного Porsche Cayenne. http://www.off-road-drive.ru/archive/50/Odnim_mahom_.

41. Гоночное купе Porsche 911 GT3 R Hybrid модернизировано до версии 2.0. <https://www.drive.ru/news/porsche/4efb32d500f11713001e26eb.html>.

42. Рекуператор механической энергии: пат. № 2350807 RU: МПК F16H 33/02. № 2006143288/11; заявл. 06.12.2006; опубл. 27.03.2009. Бюл. № 9. <https://findpatent.ru/patent/235/2350807.html>.

43. Рекуператор механической энергии: пат. № 2513192 RU: МПК B60K 6/10, B60K 6/365, F16H 33/02. № 2012155771/11; заявл. 24.12.2012; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11. <https://findpatent.ru/patent/235/2350807.html>.

44. Рекуперативная механическая саморегулируемая бесступенчатая передача с маховичным накопителем энергии: пат. 2261385 RU: МПК F16H 3/74. № 2004102757/11; заявл. 30.01.2004; Бюл. № 27. <https://patents.google.com/patent/RU2261385C1/ru>.

45. Ломакин В. В., Шабанов А. А. Критерии выбора основных параметров силовой установки гибридных автомобилей при проектировании : труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2016. № 2 (113). С. 151–157. <https://cyberleninka.ru/article/n/kriterii-vybora-osnovnyh-parametrov-silovoy-ustanovki-gibridnyh-avtomobiley-pri-proektirovanii>.

46. Ломакин В. В., Шабанов А. А., Шабанов А. В. К вопросу выбора мощности и алгоритма работы силовой установки гибридного автомобиля. Журнал автомобильных инженеров. 2013. № 6 (83). С. 40–45.

47. Сериков С. А., Бороденко Ю. Н. Гибридная силовая установка автомобиля как объект управления. <https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/bitstream/123456789/74/1/Serikov.pdf>.

48. Раков В. А. Методика оценки технического состояния гибридных силовых установок автомобилей : автореф. дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. ВоГТУ, 2012. 23 с.

Додаток А

Таблиця А.1 – Характеристики автомобілів з бензиновими ДВЗ і з комбінованими енергоустановками [14]

Автомобілі	Маса, кг	Літраж ДВЗ, л	Потужність ДВЗ, кВт	Потужність електродвигуна, кВт	Сумарна потужність силової установки, кВт	Витрата палива л/100 км. EU / EPA – європ./амер. випроб. цикл.	Викиди CO ₂ , г/км
Toyota Corolla (впорск бен.)	1250/1750	1,8	108	–	–	EU 8,7/5,5/6,7	155
Toyota Corolla (гібрид)	1380/1805	1,8	73	60	100	EU 3,8/3,8/3,8	89
Toyota Prius (гібрид)	1370/1805	1,8	73	60	100	EU 3,9/3,7/3,9	89/92
Honda Inspire (впорск бен.)	1610	3,47	206	–	–	9,0	
Honda Insight (гібрид)	1200/1650	1,34	65	10	72	EU 4,2/4,6/4,4	101
Mercedes-Bens S 350 (впорск бен.)	1835/2505	3,5	225	–	–	EU 10,8/6,5/8,1	
Mercedes-Bens S 400 (гібрид)	1880/2550	3,5	205	15	220	EU 10,8/6,4/4,8	188
Hyundai Sonata Fe (впорск бен.)	1725/2505	2,35	128	–	–	EPA 11,7/6,9/8,7	
Hyundai Sonata (гібрид)	1515	2,36	126	30	156	EPA 6,4/6,0/6,2	
Porsche Cayenne (впорск бен.)	1995/2765	3,6	220	–	–	EU 15,9/8,4/11,2	193
Porsche Cayenne (гібрид)	2240/2910	3,0	245	34	279	EU 8,7/7,9/8,2	193
Cadillac Escalade (впорск бен.)	2500/3310	6,2	301	–	–	EU 20,1/11,3/14,5	339
Cadillac Escalade (гібрид)	2780/3400	6,0	248	60	374	EU 11,6/10,7/11,1	264
Lexus LS 460 (впорск бен.)	1945/2495	4,6	280	–	–	EU 17,2/8,4/11,6	261
Lexus LS 600h (гібрид)	2270/2400	5,0	290	165	327	EU 11,2/8,0/9,3	218

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Характеристики енергетичних установок японських гібридних автомобілів [14]

Автомобілі	Маса, кг	Літраж ДВЗ, л	Потужність ДВЗ, кВт (при n , xv^{-1})	Потужність електродвигуна, кВт	Сумарна потужність силової установки, кВт	Тип акумуляторів силової установки	Характеристики силової установки	Характеристики акумуляторів силової установки
Honda Civic (гібрид парал.)	1249 Σ1720	1,34	70(6000)	15	84	Нікель-металогідрид (Ni-MH)	Електромотор 158 В	5,5 Ah
Honda Insight (гібрид послідов.)	1200 Σ1650	1,34	65(5800)	10	72	Нікель-металогідрид. $U=100,8$ В	Електромотор 0–1500 xv^{-1}	5,75 Ah
Honda Elantra (гібрид)	1300 Σ1740	1,59	84(6000)	15		Li-Polimer $U=180$ В	Електромотор	5,3 Ah
Lexus RX (гібрид) з 2004 р.	2045 Σ2560	3,5	183(6000)	123	219	Нікель-металогідрид (Ni-MH), $U=288$ В 45 кВт	Електр. синх. АС, 650 В	6,5 Ah
Lexus LS 600h (гібрид змішан.)	2270 Σ2400	5,0	290(6400)	165	327	Нікель-металогідрид (Ni-MH), $U=288$ В 45 кВт	Електр. синх. 650 В	–
Lexus HS (гібрид) з 2008 р.	1670	2,4	110(6000)	105	139	Нікель-металогідрид (Ni-MH), $U=244,8$ В 29,8 кВт	Електр. синх. АС, 650 В	5,3 Ah 168 шт. по 1,2 В
Toyota Crown (гібрид)	1840 Σ2115	3,45	218(6400)	147	254	Нікель-металогідрид (Ni-MH), $U=288$ В	Електр. синх. АС, 650 В	–
Toyota Prius (гібрид зміш.)	1370 Σ1805	1,8	73(5200)	60	100	Нікель-металогідрид (Ni-MH)	Електромот. синх. АС, генератор 650 В	168 шт. по 1,2 В 28 модулів
Toyota Camry (гібрид)	1670	2,36	110(6000)	105	140	Нікель-металогідрид (Ni-MH), $U=244,8$ В 29,8 кВт	Електромотор 120 В	6,5 Ah
BMW 7 (гібрид)	2045 Σ2635	4,4	330(5500)	15	345	Li-Ion, $U=120$ В	Електромотор 120 В	–
Nissan Altima (гібрид)	1575 Σ2055	2,5	116(5200)	30	146	Нікель-металогідрид (Ni-MH), $U=245$ В	Електр. синх. АС, 650 В	–

Додаток В

Таблиця В.1 – Характеристики автомобілів з бензиновими ДВЗ і з комбінованими енергоустановками

Автомобіль	Маса, кг	Літраж ДВЗ, л	Потужність ДВЗ, кВт (номінальна), $N_f = N_{ДВЗ} / \eta_{\Sigma}$	Крутний момент ДВЗ, Н·м (при $M_{k_{max}}$)	Потужність електродвигуна, кВт (при $M_{k_{max}}$), $K_1 = N_{el} / N_{ДВЗ}$	Крутний момент електродвигуна, Н·м, $K_2 = M_{k_{ДВЗ}} / M_{k_{el}}$	Сумарна потужність СУ кВт/Н·м, $K_3 = N_{ДВЗ} / N_2$	Витрата палива, л/100 км	Викиди CO ₂ , г/км	V, км/год
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Toyota Corolla (впорск. бен.)	1250 1270	1,8	108(6400)	–	–	–	EU 8,7/5,5/6,7	155		
Toyota Corolla (гібрид)	1380 Σ1805	1,8	73(5200)/0,04	142(4000)	60/0,82	207/0,69	100/0,73	EU 3,8/3,8/3,8	89	
Toyota Camry (впорск. бен.)	1500	2,5	125(6000)	233(4000)	–	–	–	EPA 7,6/11,2 10,7/7,3/9,1		180
Toyota Camry (гібрид)	1670	2,36	110(6000)	187(4400)	105/0,95	270/0,69	139/0,79	EPA 6,9/7/6,9 7,6/6,7/7,1	92	180
Toyota Prius (гібрид)	1370 Σ1805	1,8	72(5200)/0,04	142(4000)	60/0,82	207/0,69	100/0,73	EU 3,9/3,7/3,9 EPA 6,2/5,6/5,9	89 92	180
Nissan Altima (впорск. бен.)	1350 1485	2,5	128(5600)	245(3900)	–	–	–	EPA 7,6/10,2/8,8		
Nissan Altima (гібрид)	1575 Σ2055	2,5	116(5200)/0,056	30/0,26	270/0,81	148/0,78	–	EPA 7,1/6,7		
Honda Crossrad (впорск. бен.)	1410 1480	1,8	103(6300)	175(4300)	–	–	–	8,6		
Honda Insight (впорск. бен.)	1610	3,47	206(6200)	340(5000)	–	–	–	9,0		
Honda Insight (гібрид)	1200- Σ1650	1,34	65(5800)/0,039	121(4500)	10,0,15	79/0,65	72/0,9	EU 4,2/4,6/4,4	101	182
Honda Civic (впорск. бен.)	1265 1700	2,0	148(7800)	195(5600)	–	–	–	EU 12,7/7,9/9,1	215	235
Honda CR-Z (гібрид)	1200 Σ1520	1,5	84(600)/0,055	145(4800)	–	174/0,83	91/0,92	EU 6,1/4,4/4,5	117	200
Honda Civic (впорск. бен.)	1195 1220	1,8	103(6300)	175(4300)	–	–	–	EPA 8,1		
Honda Civic (гібрид)	1249 Σ1720	1,34	70(6000)/0,041	123(4600)	15,0,23	103/1,19	8,4/0,83	EU 5,2/4,3/4,6	109	185
Mersedes-Bens S350 (впорск. бен.)	1835 2505	3,5	225(6500)/370(3500)	–	–	–	EU 10,8/6,5/8,1	189		

Продовження таблиці В.1 додатку В

Mercedes-Bens S400 (гібрид)	1880 Σ2550	3,5	205(6000)/0,080	350 (3500-5500)	15/0,073	-	220/0,93	EU 10,8/6,4/4,8	188	
Hyundai Sonata (впорек. бен.)	1725 2505	2,35	128(6000)	126(3750)	-	-	-	EPA 11,7/6,9/8,7		190
Hyundai Sonata (гібрид)	1515	2,36	126(6000)	212(4250)	30/0,24	-	156/0,81	EPA 6,4/6,0/6,2		
BMW7 (впорек. бен.)	1945 2575	4,4	300(5500)	600(1700-4500)	-	-	-	EU 17,1/8,9/11,9	278	
BMW7 (гібрид)	2045 Σ2635	4,4	330(5500)/0,125	650(2000-4500)	15/0,045	210/3,1	-	EU 12,6/7,6/9,4	219	
Ford Escape (впорек. бен.)	1495	2,5	127(6000)	232(4500)	-	-	-	EPA 11,8/8,4/12,4/9,4		180
Ford Escape (гібрид)	1665 Σ1735	2,5	115(6000)/0,066	184(4500)	70/0,61	-	132/0,87	EPA 8,7/7,8/8,1 7,6/6,9		170
Lexus LS 460 (впорек. бен.)	1945 2495	4,6	280(6400)	493(4100)	-	-	-	EU 17,2/8,4/11,6	261	
Lexus LS 600h (гібрид зміш.)	2270 Σ2400	5,0	290(6400)/0,12	520(4000)	165/0,57	300/1,73	327/0,89	EU 11,2/8,0/9,3	218	
Lexus RX 350 (впорек. бен.)	1895 2545	3,5	204(6200)	346(4700)	-	-	-	EPA 14,3/8,4/10,6	250	
Lexus RX (гібрид)	2045 Σ2560	3,5	183(6000)/0,071	317(4800)	123/0,67	333/0,95	219/0,83	EPA 7,3/8,4/7,8 EU 6,6/6,0/6,3	148	
Porsche Cayenne (впорек. бен.)	1995 2765	3,6	220(6300)	400(3000)	-	-	-	EU 15,9/8,4/11,2	263	
Porsche Cayenne (гібрид)	2240 Σ2910	3,0	245(6500)/0,084	440(3000-5250)	34/0,139	300/1,47	279/0,87	EU 8,7/7,9/8,2	193	
Ford Fusion (впорек. бен.)	1490 1515	2,5	130(6000)	233(4500)	-	-	-	EPA 10,2/7,1/8,7		180
Ford Fusion (гібрид)	1665	2,5	116(6000)	185(2250)	30/0,26	-	143/0,81	EPA 6,5/5,7/6,3		180

Додаток Г

Таблиця Г.1 – Результати розрахункового моделювання роботи ГСУ автомобіля УАЗ-3153 в міському циклі [46]

№	Міський цикл	Навантаження Середня / Пікова потужн., кВт	Варіант №1		Варіант №2		Варіант №3		Варіант №4	
	Операція		Ел. дв. 15 кВт	Ел. дв. 30 кВт	Ел. дв. 15 кВт	Ел. дв. 15 кВт	Ел. дв. 30 кВт	Ел. дв. 30 кВт	Ел. дв. 15 кВт	Ел. дв. 30 кВт
1	Холостий хід	0								
2	Прискорення	7,5/15	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	ДВЗ	ДВЗ
3	Постійна швидкість	3/6	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.
4	Уповільнення	2,5/5	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
5	Уповільнення	0	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
6	Холостий хід	0	ДВЗ	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	ДВЗ	–
7	Прискорення	2,5/5	ДВЗ	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	ДВЗ	Ел. дв.
8	Перемикання передачі	–	ДВЗ	–	ДВЗ	ДВЗ	–	–	ДВЗ	–
9	Прискорення	15/30	Ел. дв.	Ел. дв.	ДВЗ	ДВЗ	Ел. дв.	Ел. дв.	ДВЗ	Ел. дв.
10	Постійна швидкість	5/5	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.
11	Уповільнення	6,5/13	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
12	Уповільнення	–	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
13	Холостий хід	0	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	Ел. дв.			ДВЗ	ДВЗ
14	Прискорення	7,5/15	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	ДВЗ	ДВЗ
15	Перемикання передачі	-	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	–	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ
16	Прискорення	15/30	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	Ел. дв.	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ
17	Перемикання передачі	–	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ

Продовження таблиці Г.1 додатку Г

18	Прискорення	27,5/55	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ
19	Постійна швидкість	10/10	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ	ДВЗ
20	Уповільнення	7,5/15	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
21	Постійна швидкість	7/7	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	Ел. дв.	ДВЗ	ДВЗ
22	Перемикання передач	–	–	–	–	–	–	–	ДВЗ	ДВЗ
23	Уповільнення	7,5/15	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
24	Уповільнення	–	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.	Рекуп.
25	Холостий хід	0								
	Сума за цикл	Зарядження від ДВЗ, кДж	521	436	496	441	288	396	826	741
	Сума за цикл	Зарядження від ДВЗ+рекуперация	740	655	715	660	507	615	1045	960
	Сума за цикл	Електродвигун, кДж	265	352,5	190	315	525	390	144	231,5
	Сума за цикл	Рекуперация, кДж	219	219	219	219	219	219	219	219
	Сума за цикл	Енергія ДВЗ, кДж	600	512,5	587,5	550	340	475	721	633,5
	Сума за цикл	Δ енергій (баланс), кДж	475	302,5	525	345	-18	225	901	728,5
		Досягнута економія енергії за цикл	27%	37,5%	28%	33%	–	42%	12%	23%

Навчальне видання

КУБІЧ Вадим Іванович

ГІБРИДНІ СИЛОВІ УСТАНОВКИ ЛЕГКОВИХ АВТОМОБІЛІВ

Навчальний посібник

Дизайн обкладинки: *Кубіч В. І.*

Технічні редактори: *Білостоцька А. О., Решетняк О. В.,
Даниленко О. М.*

Комп'ютерний набір: *Білостоцька А. О.*

Комп'ютерна верстка: *Решетняк О. В.*

Підписано до друку 10.03.2021. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 11,22.
Тираж 100 прим. Зам. № 150.

Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.