

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни

"Транспортні енергетичні установки"

для студентів спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"
("Колісні та гусеничні транспортні засоби"),
усіх форм навчання

Частина 4 - змістовий модуль 2.

ДВЗ з нетрадиційними робочим циклами.
Напрямки розвитку транспортних енергетичних установок

2019

ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни "Транспортні енергетичні установки" для студентів спеціальності 133 "Галузеве машинобудування" ("Колісні та гусеничні транспортні засоби") усіх форм навчання. Частина 4 - змістовий модуль 2. ДВЗ з нетрадиційними робочим циклами. Напрямки розвитку транспортних енергетичних установок / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 82 с.

Укладачі: О.М. Артюх, доцент, канд.техн.наук;
О.В. Дударенко, доцент, канд.техн.наук;
А.Ю. Сосик, доцент, канд.техн.наук;
А.В. Щербина, доцент, канд.техн.наук

Рецензенти: О.С. Слюсаров, доцент, канд.техн.наук;
С.М. Турпак, професор, д-р.техн.наук

Відповідальний за випуск: А.Ю. Сосик, доцент, канд.техн.наук

Затверджено
на засіданні кафедри "Автомобілі"
Протокол № 10
від « 10 » травня 2019.

Рекомендовано для видання
НМК Транспортного факультету
Протокол № 76
від « 17 » травня 2019.

ЗМІСТ

Частина 4

Вступ	190
Тематичний план лекційних занять	191
Лекція № 11. Гібридні й електричні енергетичні установки транспортних засобів	194
Лекція № 12. Двигуни внутрішнього згоряння з нетрадиційними робочими циклами.....	210
Лекція № 13. Водневі енергетичні установки.....	235
Лекція № 14. Напрямки розвитку транспортних енергетичних установок.....	258
Рекомендована література	266
Основна	266
Додаткова.....	266
Інформаційні ресурси	268

ВСТУП

Метою курсу "Транспортні енергетичні установки" є вивчення робочих процесів енергетичних установок і особливостей їх конструкції.

Двигун внутрішнього згоряння - це основна енергетична установка сучасного транспорту (перед усім автомобільного), головною функцією якої є перетворення хімічної енергії палива в механічну роботу. Теорія енергетичної установки транспортної техніки вивчає робочі процеси, що відбуваються в енергетичній установці при перетворенні енергії палива в роботу за допомогою спеціальних пристроїв і механізмів, які складають конструкцію енергетичної установки. До енергетичної установки пред'являються вимоги по габаритах, масі та по надійності й довговічності.

Сучасна автомобільна транспортна техніка є складною машиною, створеною працею великої кількості інженерів з різних галузей науки й техніки багатьох країн.

Перші автомобілі з паровою силовою енергетичною установкою, що з'явилися в XVIII ст., були важкими й громіздкими. В 1860 р. французький інженер Етьєн Лєнуар винайшов перший двигун внутрішнього згоряння, що працював на світільному газі.

В 1870 р. Є. Ланген і Н. Отто (Німеччина) побудували чотири-тактні газові двигуни із примусовим запаленням суміші, а в 1897 г. німецький інженер Р. Дизель створив перший стаціонарний двигун із запаленням робочої суміші від стиску - дизель.

В 1883 г. з'явився автомобіль із двигуном внутрішнього згоряння, побудований К. Бенцем, в 1888 г. - перший мотоцикл Г. Даймлера.

Двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) поступово став основним джерелом енергії на транспорті будь якого типу та призначення.

Матеріал, викладений у даному конспекті лекцій, надає студентам необхідну інформацію з кожного з розділів навчальної програми курсу "Транспортні енергетичні установки", і допоможе студентам досягти необхідного рівня знань, практичних навичок та умінь.

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ

Загальний об'єм курсу становить 28 годин і складається з двох змістових модулів. Даний конспект лекцій дисципліни "Транспортні енергетичні установки" складається з двох частин, і розроблений відповідно до:

Робоча програма з дисципліни "Транспортні енергетичні установки" для студентів за напрямом підготовки 6.050503 – "Машинобудування", спеціальністю 133 - Галузеве машинобудування (Колісні та гусеничні транспортні засоби), усіх форм навчання. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 18 с.

Нижче наведено назву першого змістового модуля дисципліни "Транспортні енергетичні установки", найменування тем лекційних занять в модулі і вказано кількість годин аудиторних занять, для студентів денної форми навчання, окремо для кожної лекції.

Для кожної теми лекції вказано перелік питань які треба розглянути під час даної лекції. Слід враховувати те, що в даному конспекті лекцій приведено лише стислий огляд питань кожної лекції. Крім того навчальним планом дисципліни передбачено активну самостійну роботу студентів за вказаними темами курсу.

Вкінці кожної лекції наведено перелік питань для самоперевірки. Для самостійної роботи студенту слід користуватися рекомендованою літературою для вивчення дисципліни, перелік якої наведено в кінці даного конспекту лекцій, а також використовувати розроблені методичні вказівки:

Методичні вказівки з вивчення дисципліни "Транспортні енергетичні установки" та виконання контрольних завдань, для студентів спеціальності 133 "Галузеве машинобудування" ("Колісні та гусеничні транспортні засоби"), усіх форм навчання. / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 62 с.

Змістовий модуль 2. ДВЗ з нетрадиційними робочим циклами.
Напрямки розвитку транспортних енергетичних установок

Тема 8. Газові енергетичні установки на транспортних засобах (2 год.)

Паливо для газобалонних автомобілів. Автомобільні газобалонні установки й газові дизелі. Особливості конструкції газобалонних автомобілів і автобусів. Автомобільні газові балони. Газові редуктори й випарники. Газозмішувальні пристрої. Автомобільні газонаповнювальні станції. Автомобільні газогенераторні установки.

Тема 9. Роторно-поршневі ДВЗ (2 год.)

Конструктивні схеми роторно-поршневих двигунів. Робочий цикл двигуна Ванкеля. Кінематична схема двигуна Ванкеля. Динаміка роторного двигуна. Автомобільні варіанти двигуна Ванкеля.

Тема 10. Газотурбінні ДВЗ (2 год.)

Історія створення й принцип дії. Основні характеристики. Термодинамічні цикли. Конструктивні схеми двигунів застосовуваних на автомобілях. Матеріали для виготовлення й шляхи поліпшення характеристик газотурбінних двигунів.

Тема 11. Гібридні й електричні енергетичні установки транспортних засобів (2 год.)

Схеми гібридних силових установок автомобілів: послідовна, паралельна й послідовно-паралельна. Переваги й недоліки автомобілів з гібридними силовими установками. Електромобілі. Механічні накопичувачі енергії. Електропневматичні силові установки.

Тема 12. Двигуни внутрішнього згоряння з нетрадиційними робочими циклами (2 год.)

Напрямки й методи модифікування робочого циклу ДВЗ. Двигуни з розділеними тактами. Двигуни з доданими тактами. Двигуни зі

змінюваною комбінацією тактів. Двигуни з регульованими ступенем стиску й робочим об'ємом. Гібридні робочі процеси із самоzapалюванням гомогенного заряду.

Тема 13. Водневі енергетичні установки (2 год.)

Моторні властивості водню й передумови його використання як палива для ДВЗ. Енергоекологічні показники водневого ДВЗ. Робочий процес автомобільних двигунів на водні й суміші бензину з воднем. Акумуляування водню на борту автомобіля.

Тема 14. Напрямки розвитку транспортних енергетичних установок (2 год.)

Екологічна безпека ДВЗ. Норми токсичності Євро. Альтернативні види палива ДВЗ. Біопаливо як засіб вирішення кліматичної проблеми. Напрямки і перспективи подальшого конструктивного вдосконалення ДВЗ.

ЛЕКЦІЯ № 11. ГІБРИДНІ Й ЕЛЕКТРИЧНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

План лекції. Схеми гібридних силових установок автомобілів: послідовна, паралельна й послідовно-паралельна. Переваги й недоліки автомобілів з гібридними силовими установками. Електромобілі. Механічні накопичувачі енергії. Електропневматичні силові установки.

Література: [1], с.209-222.

Гібридним автомобілем називається транспортний засіб, що приводиться в рух за допомогою гібридної силової установки. Відмінною рисою гібридної силової установки є використання двох і більше джерел енергії й відповідних їм двигунів, що перетворюють енергію в механічну роботу. У деяких джерелах інформації використовується термін "гібридний двигун", який з технічної точки зору невірний.

Незважаючи на різноманіття джерел енергії (теплова енергія бензину або дизельного палива, електроенергія, енергія стисненого повітря, енергія стислого зрідженого газу, сонячна енергія, енергія вітру та ін.) у промисловому масштабі на гібридних автомобілях використовується комбінація двигуна внутрішнього згоряння й електродвигуна.

Головна перевага гібридного автомобіля полягає в істотному скороченні витрати палива й викидів шкідливих речовин в атмосферу, яке досягається:

- у погодженій роботі ДВЗ і електродвигуна;
- застосуванням акумуляторів великої ємності;
- використанням енергії гальмування, так зване рекуперативне гальмування, що перетворює кінетичну енергію руху в електроенергію.

Разом з тим, у гібридних автомобілях використовується безліч інших інноваційних розробок, що дозволяють заощаджувати паливо й берегти атмосферу, у тому числі: система зміни фаз газорозподілу; система стоп-старт; система рециркуляції відпрацьованих газів; система підігріву охолодної рідини відпрацьованими газами; поліпшена аеродинаміка; електропривод допоміжних пристроїв (водяного насоса, кліматичної установки, підсилювача керма та ін.); шини зі зниженим

опором коченню. Необхідно відзначити, що великий ефект від гібридних автомобілів спостерігається при русі в міському циклі, який характеризується частими зупинками, роботою в режимі холостого ходу. При русі з постійною високою швидкістю (заміський цикл) гібриди не так ефективні. Залежно від характеру взаємодії двигуна внутрішнього згоряння й електродвигуна розрізняють наступні схеми гібридних силових установок: послідовна, паралельна, послідовно-паралельна.

Послідовна схема гібридного автомобіля.

Це сама проста конфігурація. При послідовній схемі автомобіль приводиться в рух від електродвигуна. Двигун внутрішнього згоряння з'єднаний тільки з генератором, який у свою чергу живить електродвигун і заряджає акумуляторну батарею.

Свою назву послідовна схема гібридного автомобіля одержала тому, що потік потужності надходить на ведучі колеса, проходячи ряд послідовних перетворень. Від механічної енергії, вироблюваної ДВЗ, в електричну вироблювану генератором, і знову в механічну. При цьому частина енергії неминуче губиться.

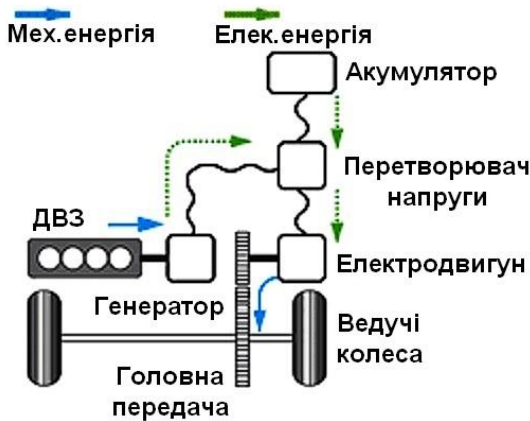


Рисунок 11.1 - Послідовна схема гібридного автомобіля

У гібридному автомобілі з послідовною схемою силової установки, як правило, передбачається можливість підключення до електричної мережі по закінченню поїздки. Такі автомобілі називають Plug-in Hybrid (дослівно - гібрид, що підключається). Реалізація даної функції припускає використання акумуляторів збільшеної ємності (літій-іонні

аккумулятори), приводить до скорочення використання ДВЗ і відповідно зниженню шкідливих викидів.

Представниками Plug-in Hybrid є автомобілі Chevrolet Volt, Opel Ampera. Їх ще називають електромобілями зі збільшеним радіусом дії (Extended Range Electric Vehicle, EREV). Ці автомобілі мають можливість руху до 60 км на енергії аккумуляторів і до 500 км на енергії генератора, що приводиться в дію ДВЗ.



Рисунок 11.2 – Конструкція Chevrolet Volt



Рисунок 11.3 - Opel Ampera

Оскільки ДВЗ використовується тільки для привода генератора, то відпадає необхідність у коробці передач і зчепленні. Для підзарядки акумулятора також використовується рекуперативне гальмування.

Послідовний гібрид дозволяє використовувати ДВЗ малої потужності, причому він постійно працює в діапазоні максимального ККД, або ж його можна зовсім відключити. При відключенні ДВЗ електродвигун і батарея в змозі забезпечити необхідну потужність для руху. Тому вони, на відміну від ДВЗ, повинні бути більш потужні, а отже вони мають і більшу вартість.

Найбільш ефективна послідовна схема при русі в режимі частих зупинок, гальмувань і прискорень, русі на низькій швидкості, тобто в місті. Тому використовують її в міських автобусах і інших видах міського транспорту. По такому принципу працюють також великі кар'єрні самоскиди, де необхідно передати великий крутний момент на колеса і не потрібні високі швидкості руху.

Паралельна схема гібридного автомобіля.

У паралельній схемі електродвигун і двигун внутрішнього згоряння встановлюються таким чином, що можуть працювати як самостійно, так і спільно. Це досягається шляхом з'єднання ДВЗ, електродвигуна й коробки передач за допомогою автоматично керованих муфт.

Гібридні автомобілі, що використовують паралельну схему, зветься Mild Hybrid (дослівно - помірний або м'який гібрид). У них використовується електродвигун малої потужності (порядку 20 кВт), який забезпечує, як правило, додаткову потужність при прискоренні автомобіля. У більшості конструкцій електродвигун, розташований

між ДВЗ і коробкою передач, виконує також функцію стартера й генератора.

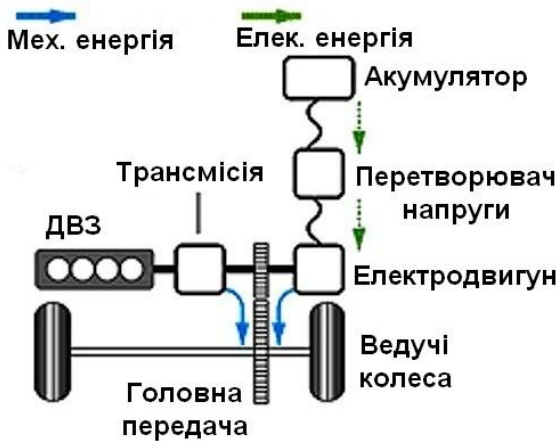


Рисунок 11.4 - Паралельна схема гібридного автомобіля

Відомими гібридними автомобілями з паралельною схемою є Honda Insight, Honda Civic Hybrid, BMW Active Hybrid 7, Volkswagen Touareg Hybrid, Hyundai Elantra Hybrid. Піонером у даній області є Honda та її система Integrated Motor Assist, ІМА (дослівно – інтегрований помічник двигуна).

При роботі системи ІМА можна виділити наступні характерні режими:

- робота від електродвигуна;
- спільна робота ДВЗ і електродвигуна;
- робота від ДВЗ із одночасною зарядкою акумулятора від електродвигуна в режимі генератора;
- зарядка акумуляторної батареї в режимі рекуперативного гальмування.

Отже ведучі колеса при паралельній схемі гібридного автомобіля приводяться в рух і ДВЗ, і електродвигуном (який повинен бути оборотним, тобто може працювати в якості генератора). Для їхньої погодженої паралельної роботи використовується комп'ютерне управління. При цьому зберігається необхідність у звичайній трансмісії, а тому двигуну доводиться працювати в неефективних перехідних режимах. Крутний момент, що надходить від двох джерел, розподіляється

ся залежно від умов руху: у перехідних режимах (старт, прискорення) у допомогу ДВЗ підключається електродвигун, а в устояних режимах і при гальмуванні він працює як генератор, заряджаючи акумулятор.

Таким чином, у паралельних гібридах більшу частину часу працює ДВЗ, а електродвигун використовується для допомоги йому. Тому паралельні гібриди можуть використовувати меншу акумуляторну батарею, у порівнянні з послідовними. А раз ДВЗ безпосередньо пов'язаний з колесами, то й втрати потужності значно менші, чим у послідовному гібриді. Подібна конструкція досить проста, але її недоліком є те, що оборотна машина паралельного гібрида не може одночасно приводити в рух колеса й заряджати батарею. Паралельні гібриди ефективні на шосе, але малоефективні в місті. Незважаючи на простоту реалізації цієї схеми, вона не дозволяє значно поліпшити як екологічні параметри, так і ефективність використання ДВЗ.

Прихильником такої схеми гібридів є компанія "Хонда". Їхня гібридна система одержала назву Integrated Motor Assist (Інтегрований помічник двигуна). Вона передбачає, насамперед, створення бензинового двигуна зі збільшеним ККД. І тільки тоді, коли двигуну стає важко, на допомогу йому повинен приходити електричний мотор.



Рисунок 11.5 – Розміщення батареї за спинкою сидіння у Honda Civic Hybrid



Рисунок 11.6 - Двигун Honda Civic Hybrid із системою Integrated Motor Assist, IMA (інтегрований помічник двигуна)

У цьому випадку система не вимагає складного й дорогого силового блоку керування, і, отже, собівартість такого автомобіля виявляється нижчою. Система IMA складається з бензинового двигуна (який надає основний ресурс потужності), електромотора, який надає додаткову потужність і додаткової батареї для електромотора.

Коли автомобіль зі звичайним бензиновим двигуном уповільнюється, його кінетична енергія гаситься опором мотора (гальмування двигуном) або розсіюється у вигляді тепла при нагріванні гальмових дисків і барабанів. Автомобіль із системою IMA починає гальмувати електромотором. Таким чином, електромотор працює як генератор, виробляючи електрику. Збережена при гальмуванні енергія запасасться в батареї. І коли автомобіль знову почне прискорюватися, батарея віддасть усю накопичену енергію на розкручування електромотора, який знову перейде на свої тягові функції. А витрата бензину зменшується рівно настільки, скільки енергії було запасено при попередніх

гальмуваннях. Загалом, у компанії Honda вважають, що гібридна система повинна бути максимально простою, тому електричний мотор виконує лише одну функцію - допомагає двигуну внутрішнього згоряння заощадити якнайбільше пального. Honda випускає дві гібридні моделі: Insight і Civic.

Послідовно-паралельна схема гібридного автомобіля.

При послідовно-паралельній схемі двигун внутрішнього згоряння й електродвигун з'єднані через планетарний редуктор. При цьому потужність кожного із двигунів може передаватися на ведучі колеса одночасно у співвідношенні від 0 до 100 % від номінальної потужності. На відміну від паралельної схеми в послідовно-паралельну схему доданий генератор, що забезпечує енергією роботу електродвигуна.

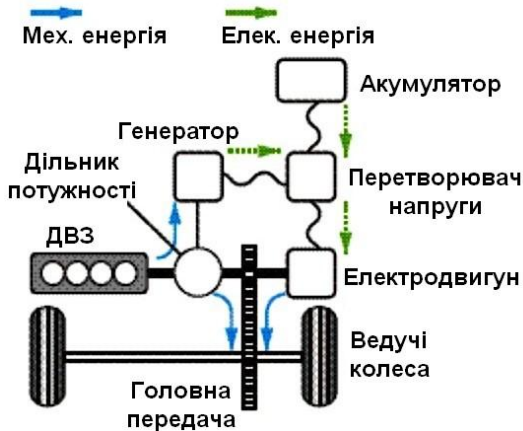
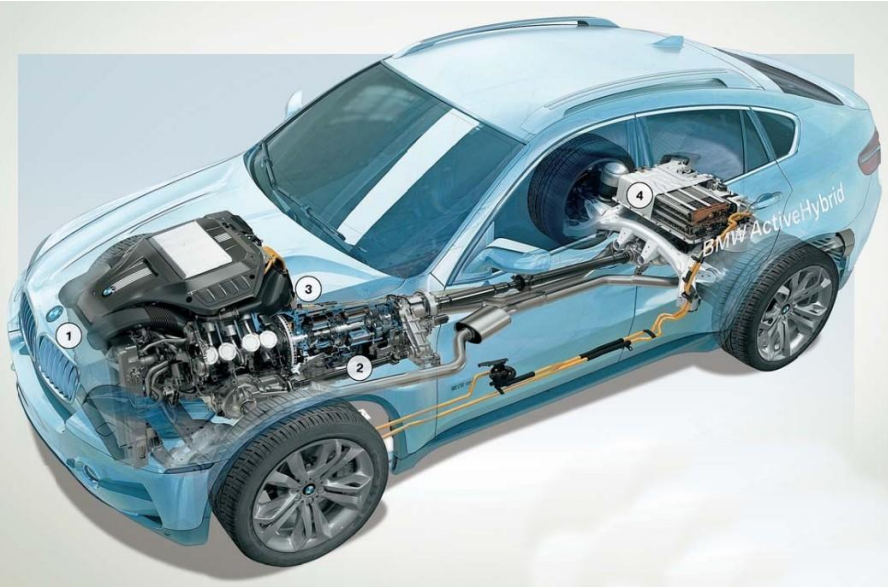


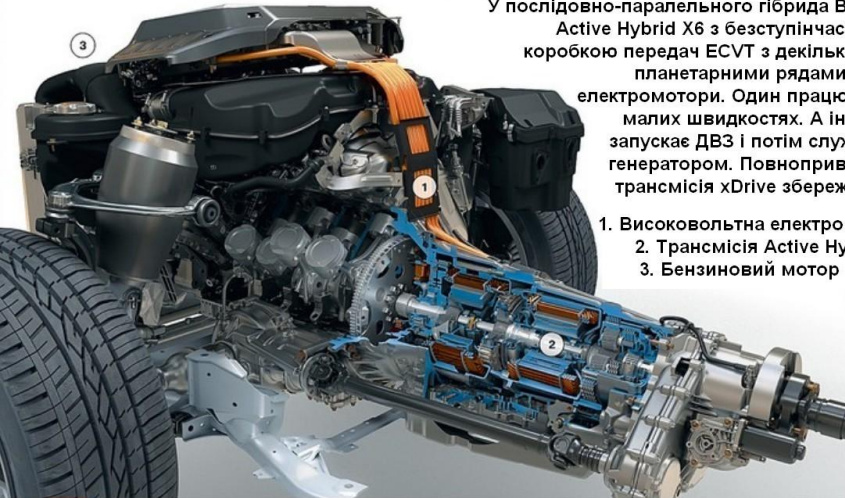
Рисунок 11.7 - Послідовно-паралельна схема гібридного автомобіля

Гібридні автомобілі, що використовують послідовно-паралельну схему, називають Full Hybrid (дослівно - повний гібрид). Відомими повними гібридами є автомобілі Toyota Prius, Lexus RX 450h, Ford Escape Hybrid. У цьому сегменті ринку гібридних автомобілів панує компанія Toyota та її система Hybrid Synergy Drive, HSD.

Силова установка системи HSD являє собою двигун внутрішнього згоряння (з'єднаний з водило планетарного редуктора), електродвигун (з'єднаний з коронною шестірнею планетарного редуктора), генератор (з'єднаний із сонячною шестірнею планетарного редуктора).



У послідовно-паралельного гібрида BMW Active Hybrid X6 з безступінчастою коробкою передач ECVT з декількома планетарними рядами два електромотори. Один працює на малих швидкостях. А інший запускає ДВЗ і потім служить генератором. Повнопривідна трансмісія xDrive збережена.



1. Високовольтна електроніка
2. Трансмісія Active Hybrid
3. Бензиновий мотор

Рисунок 11.8 - Послідовно-паралельна схема гібрида BMW Active Hybrid X6

Двигун внутрішнього згоряння працює по циклу Аткінсона, при якому реалізуються посередні показники потужності на низьких обер-

тах, відповідно досягається більша паливна економічність і менші шкідливі викиди.

У роботі системи Hybrid Synergy Drive можна виділити наступні режими:

- режим електромобіля, при якому ДВЗ виключений, а акумуляторна батарея живить електродвигун;
- режим руху з постійною (крейсерською) швидкістю, при якому потужність від ДВЗ розподіляється між ведучими колесами й генератором. Генератор у свою чергу живить електродвигун, потужність якого поєднується з потужністю ДВЗ. При необхідності проводиться зарядка акумуляторної батареї;
- форсований режим, при якому до ДВЗ приєднується електродвигун, що живиться від акумуляторної батареї, забезпечуючи імпульс потужності;
- економічний режим, при якому акумуляторна батарея живить генератор. Генератор перетворює електричну енергію в механічну, сповільнюючи обертання ДВЗ. При цьому крутний момент двигуна не зменшується, а досягається паливна економічність;
- режим гальмування, при якому електродвигун працює як генератор, а електроенергія використовується для обертання сонячної шестірні в протилежну сторону, сповільнюючи швидкість руху автомобіля;
- режим зарядки акумулятора, що здійснюється за допомогою ДВЗ і генератора.

Розглянемо більш детально конструктивні особливості послідовно-паралельної схеми. Так розроблена компанією Тойота система Hybrid Synergy Drive (HSD) поєднує в собі особливості двох попередніх типів. У схему паралельного гібрида додається окремий генератор і дільник потужності (планетарний механізм). У результаті гібрид здобуває риси послідовного гібрида: автомобіль рушає й рухається на малих швидкостях тільки на електротязі. На високих швидкостях і при русі з постійною швидкістю підключається ДВЗ.

При високих навантаженнях (прискорення, рух у гору й т.п.) електродвигун додатково підживлюється від акумулятора - тобто гібрид працює як паралельний. Завдяки наявності окремого генератора,

що заряджає батарею, електродвигун використовується тільки для приводу коліс і при рекуперативному гальмуванні.

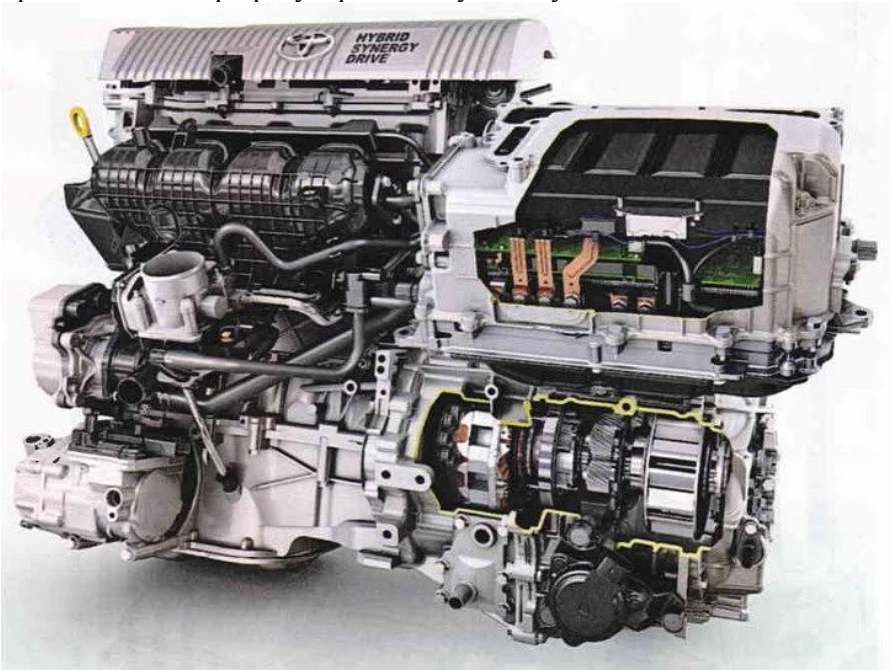


Рисунок 11.9 - Силовий агрегат Toyota Prius

Планетарний механізм передає частину потужності ДВЗ на колеса, а іншу частину на генератор, який або живить електродвигун, або заряджає батарею. Комп'ютерна система постійно регулює подачу потужності від обох джерел енергії для оптимальної експлуатації при будь-яких умовах руху.

У цьому типі гібрида більшу частину часу працює електродвигун, а ДВЗ використовується тільки в найбільш ефективних режимах. Тому його потужність може бути нижче, чим у паралельному гібриді.

Важливою особливістю ДВЗ також є те, що він працює по циклу Аткинсона, а не по циклу Отто, як звичайні двигуни. Тобто якщо робота двигуна організована по циклу Отто, то на такті впуску поршень, рухаючись униз, створює в циліндрі розрідження, завдяки якому відбувається усмоктування в нього повітря й палива.

При цьому в режимі малих обертів, коли дросельна заслінка

майже закрита, з'являються так звані "насосні втрати". Щоб краще зрозуміти, що це таке, спробуйте, наприклад, втягти повітря через затиснуті ніздрі.

Крім того, при цьому погіршується наповнення циліндрів свіжим зарядом і відповідно підвищується витрата палива й викиди шкідливих речовин в атмосферу. Коли поршень досягає нижньої мертвої точки (НМТ), впускний клапан закривається. У ході такту випуску, коли відкривається впускний клапан, відпрацьовані гази ще перебувають під тиском, а їхня енергія безповоротно губиться - це так звані "втрати випуску".

У двигуні Аткінсона на такті впуску впускний клапан закривається не поблизу НМТ, а значно пізніше. Це дає цілий ряд переваг. По-перше, знижуються насосні втрати, тому що частина суміші, коли поршень пройшов НМТ і початків рух нагору, виштовхується назад у впускний колектор (і використовується потім в іншому циліндрі), що знижує в ньому розрідження. Горюча суміш, що виштовхується із циліндра, також несе із собою частину тепла з його стінок.

Тому що тривалість такту стиску стосовно такту робочого ходу зменшується, то двигун працює по циклу зі збільшеним ступенем розширення, при якому енергія відпрацьованих газів використовується більш тривалий час, тобто зі зменшенням втрат випуску. Таким чином, одержуємо кращі екологічні показники, економічність і більший ККД, але меншу потужність. Але в тому-то й суть, що мотор гібрида Тойоти функціонує в режимах малих навантажень, при яких цей недолік циклу Аткінсона не відіграє великої ролі.

До недоліків послідовно-паралельного гібрида слід віднести більш високу вартість, у вигляді того, що він потребує окремого генератора, більшого блоку батарей, і більш продуктивну і складну комп'ютерну систему управління.

Система HSD установлюється на хетчбеку Toyota Prius, седані бізнес-класу Camry, позашляховику Lexus RX400h, Toyota Highlander Hybrid, Harrier Hybrid, спортивному седані Lexus GS 450h і автомобілі люкс-класу - Lexus LS 600h.

Ноу-хау компанії Тойота вже куплене компаніями Форд і Ніссан і використане при створенні Ford Escape Hybrid і Nissan Altima Hybrid. Toyota Prius лідирує по продажах серед усіх гібридів. Витрата бензину в місті становить 4 л на 100 км пробігу. Це перший автомобіль, у якого витрата палива при русі в місті менше, чим на шосе.

Переваги автомобілів з гібридною силовою установкою.

Ощадлива експлуатація - головна перевага гібридів. Щоб досягти її, необхідно було шукати баланс, тобто зрівноважити всі технічні показники машини, але при цьому зберегти всі корисні параметри звичайного автомобіля: його потужність, швидкість, здатність до швидкого розгону, і безліч інших, досить важливих характеристик, закладених у сучасних автомобілях.

Мало того, здатність накопичувати енергію, у тому числі й не втрачати понапрасну кінетичну енергію руху під час гальмування, а заряджати акумуляторні батареї, крім основних явних переваг, привнесло деякі побічні "дрібні радості", наприклад, менше зношування гальмових колодок.

Як була досягнута економія:

- зниженням обсягу й потужності двигуна;
- за рахунок роботи двигуна в оптимальному й рівномірному режимі, у набагато меншій залежності від умов їзди;
- повною зупинкою роботи двигуна, коли це необхідно;
- можливістю руху тільки на електродвигунах;
- рекуперативним гальмуванням із зарядкою акумулятора.

Уся ця система настільки складна, що стала можлива повною мірою тільки в сучасних умовах, із застосуванням досить непростих алгоритмів роботи бортового комп'ютера. Навіть правильне й ефектвне (з погляду безпеки) гальмування управляється бортовим комп'ютером.

Екологічна чистота. Зниження витрати вуглецевого палива, негайно позначилося на екологічній чистоті. Повна зупинка роботи двигунів у місцях скупчення автомобілів на дорогах міст, і насамперед у пробках, має саму першорядну роль. Застосування ж акумуляторних батарей, набагато меншої ємності, чим в електромобілях, знизило проблему утилізації використаних акумуляторів. Розвиток гібридної технології в суспільному транспорті, і для вантажних автомобілів, ще більше поліпшить екологічну обстановку міст.

Гарні ходові характеристики. Тепер немає необхідності встановлювати двигун з розрахунку пікових навантажень експлуатації. У момент, коли необхідно різке посилення тягового навантаження, у роботу включаються одночасно як електро-, так і звичайний двигун (а в деяких моделях і додатковий електродвигун).

Це дозволяє заощадити на установці менш потужного двигуна

внутрішнього згоряння, що працює основний час у найбільш сприятливому для себе режимі. Такий рівномірний перерозподіл і накопичення потужності, з наступним швидким використанням, дозволяє використовувати гібридні установки в автомобілях спортивного класу й позашляховиках.

Незважаючи на те, що електродвигуни мають досить сильний крутний момент у перерахуванні на масу й габарити двигуна, у порівнянні з іншими двигунами, розроблювачі все-таки в ряді моделей установлюють не занадто потужні електродвигуни, зменшуючи їх габарити. При цьому, з метою підсумовування потужностей, застосовуються комбіновані схеми передачі крутного моменту, із прямою передачею механічного крутного моменту, безпосередньо від двигуна. Така схема називається "гібридно-спільний привод".

Збільшення дальності пробігу автомобіля. Час - це самий коштовний ресурс для людини. Виключення половини заїздів на заправні станції, і навіть більшої кількості таких заїздів, при їзді по місту, вивільняє у автовласника деяку кількість часу для інших більш важливих справ.

Збереження й повторне використання енергії. Усунутий головний недолік двигуна на вуглецевому паливі - неможливість повернення енергії назад у вуглецеве паливо. Інженери давно намагалися зберегти енергію руху при гальмуванні, щоб її повторно використовувати. Наприклад, застосовувалися спеціальні конструкції з більшим маховиком. Але тільки електричну енергію вдається зберегти із самими мінімальними втратами й максимально дешево. У якості накопичувача застосовуються як акумулятори, так і спеціальні конденсатори.

Звичайне заправлення паливом. В електромобілів поки є один великий недолік - необхідність зарядки акумулятора. Процес довгий, і вимагає деякого спеціально обладнаного пункту зарядки. У такий спосіб він стає непридатним для тривалих і далеких поїздок. Але вже розроблені технології, що дозволяють заряджати літій-іонні акумулятори з електродами з наноматеріалів до 80 % ємності за 5-15 хвилин.

У гібридного автомобіля цей недолік усунутий. Заправлення здійснюється за звичною схемою, звичайним вуглецевим паливом, тоді, коли це необхідно, і подальший рух можна негайно продовжити. У міському циклі експлуатації гібридний автомобіль 80 % часу працює в режимі електромобіля.

Загальні недоліки гібридів.

Гібридні автомобілі складніші й дорожчі традиційних автомобілів із двигунами внутрішнього згорання. Акумуляторні батареї мають невеликий діапазон робочих температур, не люблять морозів, піддані саморозряду, термін їхньої служби обмежений декількома роками. А "ощадливість" гібрида прямо пов'язана зі станом акумуляторної батареї.

Гібриди дорожчі в ремонті. Досвід автоіндустрії США говорить про те, що автомеханіки беруться за ремонт гібридних автомобілів з великим небажанням, та й за сам ремонт візьметься далеко не кожний. Тому у США намагаються розв'язати проблему дорожнечі володіння гібридним авто податковими пільгами.

Далеко не всі великі автовиробники змогли створити власну гібридну систему. Компанія Porsche взагалі відмовилася від спроб самостійного виробництва гібридного автомобіля. Компанія Mitsubishi споконвічно не намагалася створити гібридний автомобіль, а сконцентрувала всі свої зусилля на розробці електромобілів. Найбільш вдала на сьогодні серійна розробка - Hybrid Synergy Drive компанії Toyota.

Гібридні автомобілі, як і електромобілі, хоч і меншою мірою, піддані проблемі утилізації відпрацьованих акумуляторів. Вплив викинутих акумуляторів на навколишнє середовище, очевидно, ніхто не досліджував. Але ж він може бути небезпечним.

Природна складність і "нетрадиційність" створення деяких моделей спричиняє збільшення ціни на автомобілі, тобто відразу виникає такий істотний недолік як висока вартість деяких гібридних моделей автомобілів.

І на останок, високу екологічність і економічність гібридів багато фахівців ставлять під сумнів. Так, ряд тестів, проведених авторитетними автомобільними виданнями, показав, що гібриди дають помітну економію палива тільки в місті, при русі ж у змішаному циклі незначно, а за містом суттєво програтують сучасним дизелям.

Із усього сказаного вище, можна зробити висновок, що напевно, нема рації вважати гібридні автомобілі вирішенням усіх проблем. Це скоріше проміжний етап на шляху до майбутньої машини з нульовим викидом шкідливих речовин. Гібридні технології дають можливість відробити її ключові технічні компоненти - емні компактні акумулятори, оптимізовані системи "повторного використання" енергії, технологію швидкої зарядки від зовнішніх джерел, нові електродвигуни,

полегшені кузова. Тільки масове виробництво цих вузлів зможе наблизити той час, коли замість поїздки на заправлення досить буде підключити автомобіль на 5-10 хвилин до звичайної домашньої електромережі, або до електрозаправної станції десь у місті - а потім їздити цілий день без підзарядки.

Питання для самоперевірки

1. Який транспортний засіб (автомобіль) називається "гібридом"?
2. В чому полягає головна перевага гібридного автомобіля?
3. Які з інноваційних розробок використовуються у гібридних автомобілях?
4. Поясніть послідовну схему гібридного автомобіля.
5. Які переваги й недоліки послідовної схеми гібридного автомобіля?
6. Поясніть паралельну схему гібридного автомобіля.
7. Які переваги й недоліки паралельної схеми гібридів?
8. Поясніть послідовно-паралельну схему гібридного автомобіля.
9. В чому полягають переваги й недоліки послідовно-паралельних схем гібридних автомобілів?
10. Які режими роботи можна виділити у роботі системи Hybrid Synergy Drive?
11. Розкажіть про конструктивні особливості послідовно-паралельної схеми гібридів на прикладі Toyota Prius.
12. Назвіть загальні переваги автомобілів з гібридною силовою установкою.
13. Які загальні недоліки притаманні всім гібридним силовим установкам транспортних засобів?
14. Розкажіть про використання механічних накопичувачів енергії на сучасному автомобільному транспорті.
15. Розкажіть принцип дії пневматичного двигуна автомобіля.
16. Які переваги і недоліки властиві електропневматичним силовим установкам транспортних засобів?

ЛЕКЦІЯ № 12. ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ З НЕТРАДИЦІЙНИМИ РОБОЧИМИ ЦИКЛАМИ

План лекції. Напрямки й методи модифікування робочого циклу ДВЗ. Двигуни з розділеними тактами. Двигуни з доданими тактами. Двигуни зі змінюваною комбінацією тактів. Двигуни з регульованими ступенем стиску й робочим об'ємом. Гібридні робочі процеси із самозапалюванням гомогенного заряду.

Література: [1], с. 99-140; [5], с. 227-253; [15]; [19]; [24]; [25], с. 125-161; [37]; [38]; [39]; [40]; [41].

Аналіз перспектив розвитку двигунобудування свідчить про те, що в недалекому майбутньому поршневі двигуни внутрішнього згоряння збережуть своє домінуюче положення в традиційних галузях їх застосування (автомобільний і залізничний транспорт, сільськогосподарське машинобудування, суднобудування) при одночасному розширенні їх використання в транспортних засобах спеціального призначення. Поршневі двигуни постійно удосконалюються в першу чергу по екологічних і економічних показниках, обумовленою досконалістю робочого процесу. Однак в останні роки намітилася тенденція до зниження темпів поліпшення цих показників.

Поліпшення показників робочого процесу ДВЗ здійснюється за рахунок розвитку гнучко керованих систем паливоподачі й повітропостачання. При цьому схема реалізації робочого процесу базується на традиційних дво- або чотиритактних циклах, що практично не перетерпіли змін, за більш ніж столітню історію розвитку ДВЗ. Удосконалювання традиційних циклів уже виявляється недостатньо ефективним і можуть бути затребувані нетрадиційні модифіковані робочі цикли ДВЗ.

Напрямки й методи модифікування робочого циклу ДВЗ. При описі циклів використовуються наступні терміни й визначення.

Робочим циклом ДВЗ називають періодично повторюваний ряд послідовних процесів, що протікають у циліндрі двигуна, що й обумовлюють перетворення теплової (хімічної) енергії в механічну роботу.

Такт (хід поршня) - частина робочого циклу (сукупність процесів), що відбувається в циліндрі, здійснювана в інтервалі переміщення поршня між двома суміжними мертвими точками (ВМТ і НМТ).

Свіжий заряд – суміш палива й окиснювача, що надійшла в циліндр.

Робоче тіло - гази, за допомогою яких у циліндрі здійснюється перетворення теплової енергії в механічну роботу.

Випускні гази - гази, що віддаляються із циліндра ДВЗ після завершення робочого циклу.

У традиційному циклі присутні наступні такти: впуск; стиск; робочий хід, що складається із процесів згорання й розширення робочого тіла; випуск - видалення випускних газів із циліндра в атмосферу, або в турбіну турбокомпресора.

З метою вдосконалювання робочих процесів і одержання нових якостей пропонувалися й пропонуються відмінні від класичних модифіковані цикли ДВЗ.

Модифіковані робочі цикли можуть складатися з комбінації декількох елементарних циклів, які відрізняються тактами, або використуваним робочим тілом. Елементарний цикл починається з такту впуску й завершується тактом випуску. Комбінований цикл, наприклад, що складається з чотиритактного і двотактного циклів позначається як 4+2.

У двигунах з модифікованим робочим циклом такти можуть спільно здійснюватися не в одному, а у двох, або більше циліндрах. Тому тактом будемо називати частину робочого циклу при зміні об'єму модуля від мінімального до максимального значення. Такти можуть бути рівної й нерівної довжини.

У двигунах з модифікованим циклом, робочим тілом, крім продуктів згорання, також можуть бути пара, суміш пари із продуктами згорання, стиснене повітря.

У модифікованому циклі можуть бути присутні процеси й такти, відмінні від традиційних, або такі, що є їхнім різновидом.

Витиснення - видалення випускних газів або повітря з одного циліндра в інший циліндр двигуна з метою додаткового розширення.

Розширення - робочий хід, у якому є процес розширення, але відсутній процес згорання.

Згорання - так будемо називати традиційний робочий хід із

процесами згоряння й розширення, тобто щоб відрізнити його від такту *Розширення*.

Ізохорне згоряння - згоряння в камері постійного об'єму.

Нагнітання - стиск робочого тіла (як правило повітря) в одному циліндрі та його переміщення в повітряний ресивер, або використання для наддування іншого циліндра.

Розглянемо більш докладно приклади модифікації циклу ДВЗ при поділі тактів між його робочими об'ємами - двигуни з розділеним циклом і двигуни з доданими тактами.

Двигуни з розділеними тактами.

Двигунами з розділеними тактами будемо називати такі, у яких такти робочого циклу (впуск - стиск - розширення - випуск) здійснюються в різних циліндрах, як правило, у двох. При цьому двигун складається із двоциліндрових модулів. Повний робочий цикл відбувається, як правило, за один оберт колінчатого вала, хоча двигун є чотири-тактним.

У традиційному чотиритактному двигуні робочий цикл здійснюється в одному циліндрі за два оберти колінчатого вала, а у двигуні з розділеним у просторі циклом, робочий процес здійснюється у двох циліндрах за один оберт колінчатого вала. Тому за інших рівних умов, літрова потужність двигунів із традиційним і розділеним циклами однакова.

При реалізації робочого циклу за класичною схемою, процеси згоряння й розширення здійснюються протягом одного такту - робочий хід. Вони не розділені в просторі (відбуваються в одному циліндрі) і слабо розділені в часі.

Паливноповітряній суміші бракує часу для повноцінного згоряння. Для якісного сумішоутворення в дизелі часу так само недостатньо. При частоті обертання колінчатого валу 4800 хв^{-1} (80 с^{-1}), характерної для високооборотних дизелів легкових автомобілів, чотири такти (два оберти колінчатого вала) відбуваються за $2/80=0,025 \text{ с}$ (25 мс). Сумішоутворення здійснюється приблизно за 20° повороту колінчатого вала, або за $20/360 \times 80 = 0,0007 \text{ с} = 0,7 \text{ мс}$.

При частоті обертання колінчатого валу $350 \dots 550 \text{ хв}^{-1}$, характерної для середньоборотних суднових дизелів, на сумішоутворення приділяється на порядок більше часу 6...10 мс, що визначає суттєво більш високий рівень індикаторного ККД у дизелів цього класу.

Іншою обставиною, що негативно впливає на процес згоряння, є зменшення обсягу надпоршневого простору при русі поршня вниз після проходження ВМТ. При цьому в міру поширення фронту полум'я, тиск і температура робочого тіла зменшуються, а площі охолодних поверхонь і, відповідно, втрати теплоти збільшуються. Це приводить до зниження ефективності процесу згоряння й збільшенню утвору продуктів неповного згоряння CO і CH .

Для усунення зазначених недоліків запропонований ряд конструктивних рішень, у яких передбачено повний або частковий поділ робочого ходу на такти згоряння й розширення.

Крім того, поділ тактів по різних циліндрах додає традиційному циклу ДВЗ додаткові позитивні якості. Наприклад, збільшивши розміри одного із циліндрів, можна забезпечити продовжене розширення робочого тіла.

Концепція розділеного циклу не нова. Ще в 1891 г. американська компанія Backus Water Motor Company випускала такі двигуни малими серіями, але вони не одержали поширення.

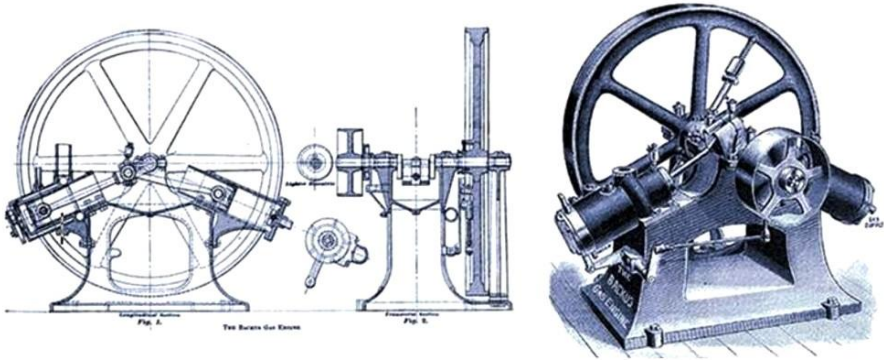


Рисунок 12.1 - Двигун Backus Water Motor Company

Двигун Кушуля.

В 60-х роках ХХ сторіччя, професор Ленінградського інституту авіаційного приладобудування В.М. Кушуль, запропонував двигун, у якому попарно розташовані циліндри, сполучені між собою через короткий тангенціальний канал, виконаний у головці блоку.

Рух поршнів відбувається з деяким зрушенням по фазі. Поршень другого циліндра відстає на $22-24^\circ$ по куту повороту колінчатого вала

від поршня першого, що досягається особливим розташуванням цапфи причіпного шатуну.

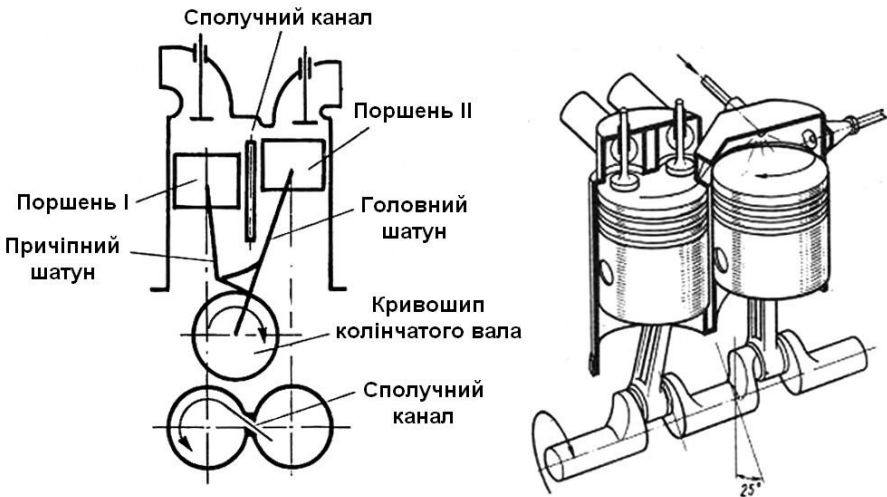


Рисунок 12.2 – Двигун В.М. Кушуля

Ступінь стиску в першому циліндрі дорівнює 7, як у двигунах з іскровим запаленням, а в другому - 21. При цьому загальна для блоку із двох циліндрів ступінь стиску дорівнює 10.

Двигун працює в таким чином. На такті впуску перший циліндр через відповідний канал із клапаном заповнюється збагаченою паливноповітряною сумішшю, а в другий через свій впускний клапан надходить чисте повітря. На такті стиску, значна частина повітряного заряду із другого циліндра перетікає в перший циліндр.

Запалення суміші в першому циліндрі здійснюється від електричної іскри за $10-12^\circ$ до ВМТ. Після запалення й початку першої фази згоряння заряду в першому циліндрі, поршень у другому циліндрі ще продовжує рух до ВМТ. Кут відставання в русі поршня другого циліндра обраний таким, що за першу фазу процесу згоряння - до приходу поршня першого циліндра у ВМТ - підвищення тиску від стиску в другому циліндрі, дорівнювало би збільшенню тиску від згоряння в першому циліндрі, або незначно перевершувало його.

Отже, у першій фазі процесу згоряння, незважаючи на те, що циліндри сполучені між собою, у кожному з них незалежно відбува-

ються різні процеси: у першому - згоряння, а в другому - стиск (з можливим незначним перетіканням стисненого повітря в перший циліндр). Коли ж поршень першого циліндра проходить ВМТ і згоряння за участю власного повітряного заряду в основному закінчується, тиск стиску в другому циліндрі починає перевищувати тиск згоряння й наступає друга фаза процесу згоряння, із надходженням стислого до високого тиску повітря, із другого, в перший циліндр.

До моменту закінчення перетікання стисненого повітря, коли другий поршень досягає ВМТ, процес згоряння повністю закінчується й починається одночасне розширення в першому й другому циліндрах. Наприкінці процесу розширення в обох циліндрах відкриваються випускні канали, й при наступному такті газу виштовхуються із циліндрів. Не дивлячись на досить успішні випробування дослідних зразків, двигун В.М. Кушуля не знайшов промислового застосування внаслідок значного ускладнення конструкції.

Двигун Скудері.

В останні роки найбільш активно розробляє концепцію розділеного циклу фірма Scuderi Group (США), винахідника К. Скудері, який запропонував термін Split-Cycle Combustion (SCC). В 2009 р. на Всесвітньому конгресі SAE у Детройті, був представлений діючий прототип двигуна Скудері.

У двигуні Скудері один циліндр призначений для впуску й стиску, а інший - для розширення (робочого ходу) і випуску відпрацьованих газів. Циліндри з'єднуються між собою пропускним каналом із клапанним механізмом, по якому стисла паливноповітряна суміш надходить у робочий циліндр.

Поршні в паралельних циліндрах рухаються з невеликим зсувом по фазі (орієнтовно, близько 30°), забезпечуючи послідовне, але майже одночасне протікання двох тактів. Коли в першому циліндрі (компресорному) здійснюється впуск або стиск, у другому циліндрі, відповідно, відбувається розширення або впуск. Двигун Скудері може складатися з декількох пар циліндрів.

Запалення суміші відбувається після ВМТ. При цьому поршень у першому циліндрі рухається нагору, а поршень у другому (робітнику) циліндрі - вниз. Процес згоряння здійснюється при слабко мінливому обсязі циліндрів, що повинне сприяти підвищенню індикаторного ККД.

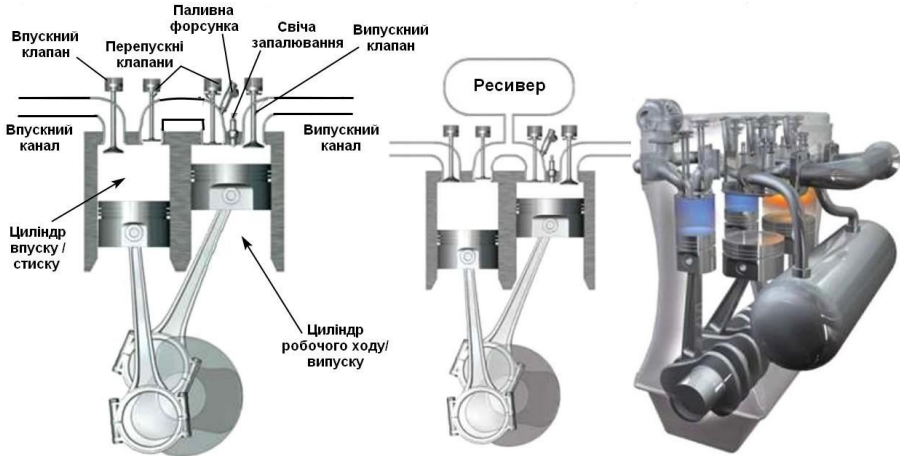


Рисунок 12.3 - Двигун Скудері

Двигун Скудері може бути доповнений повітряним ресивером. У цьому випадку можливі кілька режимів роботи двигуна.

Звичайний режим, при якому в компресорному циліндрі здійснюються такти впуску й стиску, а в робочому циліндрі - робочий хід і випуск. Повітряний ресивер відключений.

Режим компресора. Робочий циліндр відключений, а компресорний циліндр нагнітає повітря в ресивер, акумулюючи енергію гальмування автомобіля, яка використовується згодом для здійснення корисної роботи.

Економічний режим. Компресорний циліндр відключений. Стиснене повітря з ресивера надходить у робочий циліндр, у який також подається паливо. Підвищення ККД циклу відбувається через відсутність витрат енергії на стиск робочого тіла.

Еспандерний режим. Компресорний циліндр відключений. Подача палива в робочий циліндр відсутня. Стиснене повітря з ресивера надходить у робочий циліндр, розширюючись у якому, робить корисну роботу за рахунок рекуперації енергії гальмування.

Двигун Zajacmotors.

В інжиніринговій фірмі Zajac Motors (США) розроблений двигун з розділеним робочим циклом, принцип роботи якого також досить близький до організації робочого процесу у двигуні Скудері.

Стиск повітряного заряду проводиться в одному циліндрі, а розширення - в іншому (рис. 12.4).

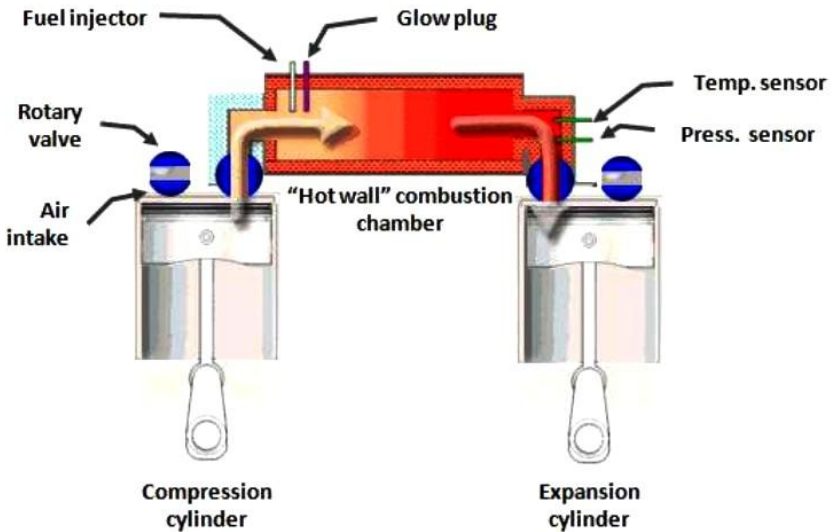


Рисунок 12.4 - Схема двигуна ZajacMotors

Двигун оснащений зовнішньою камерою згоряння, що працює за принципом, названому розроблювачами "гаряча стінка", у яку надходять паливо й повітря, стислі у першому циліндрі. Форма камери згоряння, принцип роботи, дизайн і матеріали для виготовлення захищені патентами. Конструкція двигуна передбачає використання елементів газорозподілу обертового типу.

Двигун TourEngine.

Схема двигуна, розробленого Х. Туром (Touengineinc., США), близька до схеми двигуна Скудері. Модуль двигуна Touengine складається з двох опозитно розташованих циліндрів зі зміщеними осями й двох колінчатих валів. Внутрішні порожнини компресорного циліндра, названого "холодним" і робочого циліндра, названого "гарячим", сполучені один з одним коротким сполучним каналом, що перекривається клапаном (рис. 12.5).

Робочий об'єм "холодного" циліндра 95 см^3 у два рази менше, чим в "гарячого" циліндра 190 см^3 . Відповідно ступінь стиску в "холо-

дному" циліндрі, дорівнює 8, у два рази менше ступеня розширення в "гарячому" циліндрі, дорівнюючої 16, що дозволяє забезпечити продовжене розширення робочого тіла.

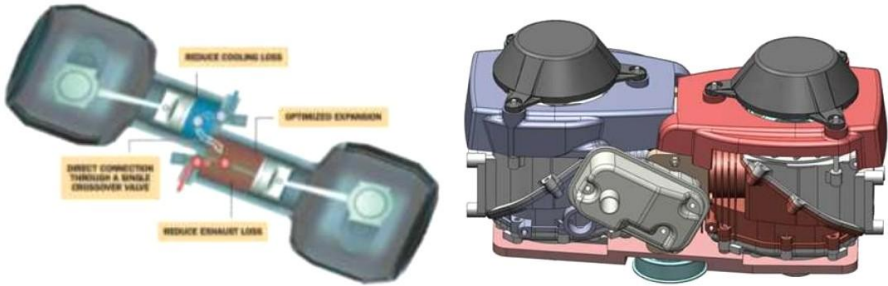


Рисунок 12.5 - Двигун TourEngine

У 2011 р. дослідний зразок двигуна TourEngine експонувався на різних автомобільних виставках і конференціях.

Розділений цикл із робочим процесом НСРС.

Група вчених з університетів Піза (Італія) і Медісон (США) на базі двигуна з розділеним циклом розробляють концепцію Homogenous Charge Progressive Combustion (НСРС), що є різновидом робочого процесу із samozапалюванням гомогенної суміші (рис. 12.6).

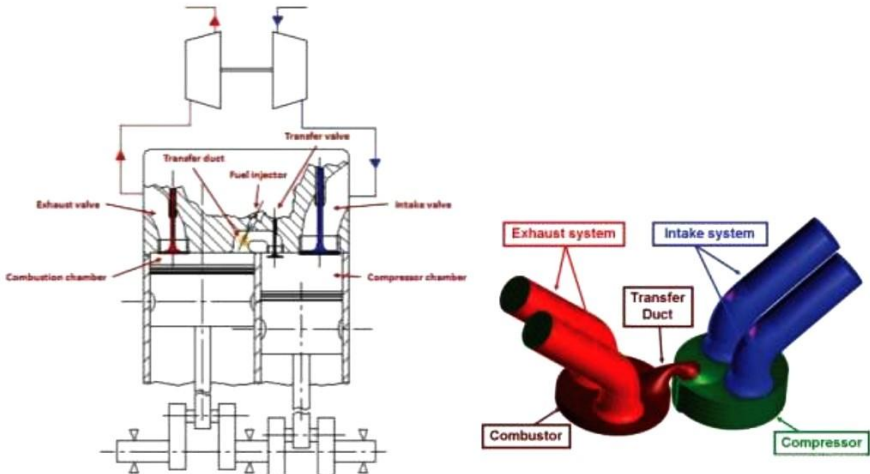


Рисунок 12.6 - Двигун із процесом НСРС

Як і в інших двигунах з розділеними тактами, у двигуні, що реалізує процес НСРС, є два циліндри, в одному з яких (компресорному) здійснюються впуск і стиск, а в іншому (робочому) - згоряння, розширення й впуск. Циліндри з'єднані пропускним каналом, у який проводиться упорскування палива трохи пізніше ВМТ поршня робочого циліндра. У цей час поршень компресорного циліндра рухається до своєї ВМТ, переміщаючи повітряний заряд через пропускний канал у робочий циліндр.

Двигуни з доданими тактами.

Додаткові такти додають до чотирьох тактів традиційного циклу з метою реалізувати продовжене розширення робочого тіла, або забезпечити додатковий відвід і рекуперацію теплоти від деталей циліндропоршневої групи.

Модифіковані робочі цикли можуть складатися з комбінації декількох елементарних циклів, що відрізняються тактами, або використанням робочим тілом. Елементарний цикл починається з такту впуску й завершується тактом впуску.

Комбінований цикл, наприклад, що складається із чотиритактного й двотактного циклів позначається як 4+2. У двигунах з модифікованим циклом, робочим тілом, крім продуктів згоряння, також можуть бути пара, суміш пари із продуктами згоряння або стиснене повітря.

П'ятитактний двигун ILMOR.

Англійська компанія Ilmor Engineering, відома своїми двигунами для гоночних автомобілів, представила на виставці EXPO 2009 у Штутгарті двигун, названий п'ятитактним. За основу конструкції двигуна прийняті технічні рішення патенту 2003 р. бельгійського винахідника Герхарда Шмітца (Gerhard Schmitz).

Двигун має доданий такт робочого циклу й забезпечує продовжене розширення. Головним завданням проекту було створення бензинового двигуна з високою питомою потужністю, що не уступає по паливній економічності дизелям, але позбавленого властивого останнім недоліку, у вигляді підвищеної емісії оксидів азоту й сажі.

Три циліндри п'ятитактного ДВЗ мають різний діаметр. Зовнішні циліндри високого тиску (ВТ) малого діаметра, працюють по звичайному чотиритактному циклу. У середньому циліндрі низького тиску (НТ) великого діаметра відбувається продовжене розширення газів,

яке розроблювачі й назвали п'ятим тактом.

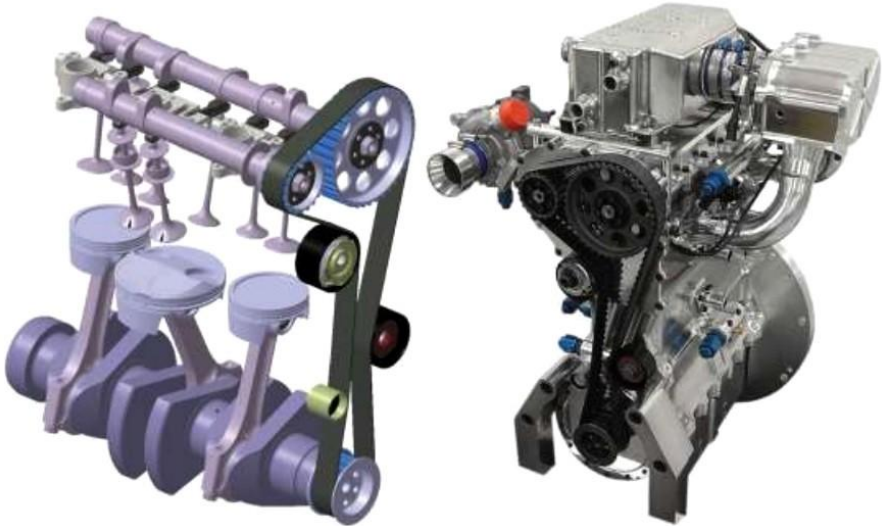


Рисунок 12.7 - Двигун ILMOREngineering

Робочий об'єм циліндра низького тиску становить 350 см^3 , а робочий об'єм циліндра високого тиску дорівнює 778 см^3 . Геометричний ступінь стиску, він же ступінь розширення, у циліндрах високого тиску є 8, а ступінь розширення в циліндрі низького тиску є 30. Загальний ступінь розширення у двигуні становить 30.

Дослідний зразок двигуна має максимальні потужність і крутний момент відповідно $96 \text{ кВт}/7000 \text{ хв}^{-1}$ і $166 \text{ Нм}/5000 \text{ хв}^{-1}$. При цьому мінімальна величина питомої ефективної витрати палива дорівнює 226 г/кВт год , що значно нижче, чим у кращих сучасних аналогів. Тиск наддування становить $0,5 \text{ МПа}$.

Двигун має два розподільні вали. Перший вал, що обслуговує циліндри високого тиску, робить один оберт за два оберти колінчатого вала так, як це здійснюється в традиційних чотиритактних ДВЗ. Другий розподільний вал, що обслуговує циліндр низького тиску, обертається із частотою, дорівнюючій частоті обертання колінчатого вала.

Робочий процес п'ятитактного двигуна складається із чотирьох фаз (рис. 12.8).

Фаза А. Поршні в циліндрах ВТ рухаються від ВМТ до НМТ. Поршень у циліндрі НТ рухається від НМТ до ВМТ. У першому цилі-

ндри ВТ здійснюється впуск свіжого заряду, а в другому циліндрі ВТ - робочий хід (згоряння й попереднє розширення). У циліндрі НТ здійснюється випуск газів.

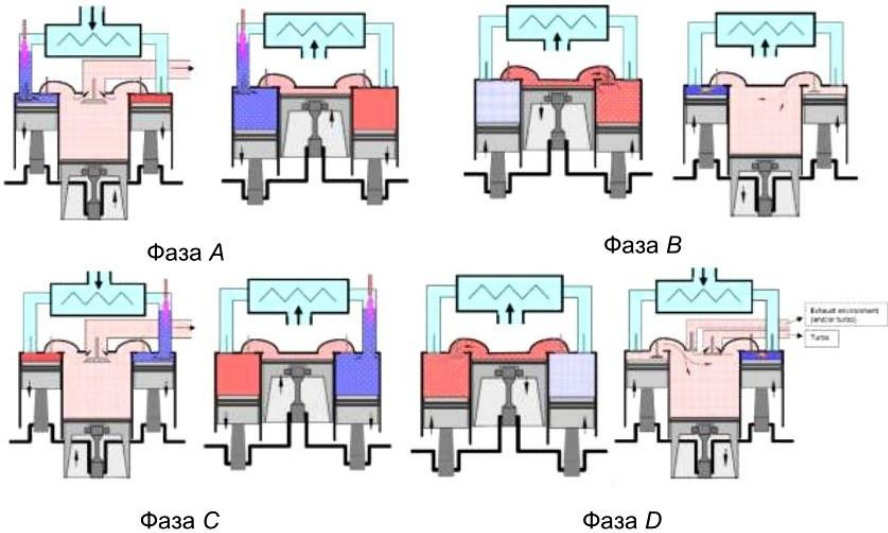


Рисунок 12.8 - Фази робочого процесу п'ятитактного двигуна

Фаза В. Поршні в циліндрах ВТ рухаються від НМТ до ВМТ. Поршень у циліндрі НТ рухається від ВМТ до НМТ. У першому циліндрі ВТ здійснюється стиск свіжого заряду, а в другому циліндрі ВТ - витиснення випускних газів у циліндр НТ. У циліндрі НТ здійснюється процес додаткового розширення випускних газів із другого циліндра ВТ.

Фаза С. Поршні в циліндрах ВТ рухаються від ВМТ до НМТ. Поршень у циліндрі НТ рухається від НМТ до ВМТ. У першому циліндрі ВТ здійснюється робочий хід (згоряння й попереднє розширення), а в другому циліндрі ВТ - впуск свіжого заряду. У циліндрі НТ здійснюється випуск газів.

Фаза D аналогічна Фазі В, у якій перший і другий циліндри ВТ міняються місцями.

Таким чином, робочий цикл п'ятитактного двигуна здійснюється за два оберти колінчатого вала й складається із двох процесів. Перша група включає процеси впуску, згоряння й попереднього розширення

в першому або другому циліндрах ВТ і випуск газів із циліндра НТ.

Друга група включає процеси стиску й витиснення випускних газів у першому або другому циліндрах ВТ і додаткове розширення випускних газів у циліндрі НТ.

Необхідно відзначити, що перші зразки трициліндрових двигунів із зовнішніми циліндрами малого діаметра, що працюють по чотиритактному циклу, і внутрішнім циліндром великого діаметра, що працюють по двотактному циклу, були виготовлені ще Н. Отто й Р. Дизелем

Реалізація п'ятитактного циклу у двигунах традиційної конструкції.

Істотним недоліком концепції ILMOR Engineering є необхідність створення двигунів нової конструкції без уніфікації із серійними моделями й неможливість побудови типорозмірних рядів двигунів.

Продовжене розширення робочого тіла може бути організоване й у серійних двигунах традиційної конструкції з форсуванням двигуна за допомогою наддування при скороченні числа працюючих циліндрів. При цьому середній ефективний тиск і, отже, механічний ККД на характерних режимах експлуатації автомобіля, можуть бути суттєво підвищені зі збереженням вихідної номінальної потужності двигуна.

У виключених циліндрах припиняється здійснення традиційного робочого процесу ДВЗ, і вони переводяться в режим продовженого розширення (еспандерний режим). У сучасних комбінованих двигунах внутрішнього згорання продовжене розширення продуктів згорання палива звичайно здійснюють у газовій турбіні, потужність якої використовують тільки для привода нагнітача. Додаткове розширення продуктів згорання в циліндрах буде сприяти підвищенню ефективності утилізації енергії випускних газів ДВЗ.

Розглянемо реалізацію робочого циклу з розділеними тактами й продовженим розширенням на прикладі двигуна ВА3-11194 з робочим об'ємом 1,4 л, хоча цей цикл може бути реалізований у будь-якому чотиритактному чотирициліндровому двигуні з порядком роботи 1-3-4-2. При цьому поставимо завдання звести до мінімуму конструктивні зміни деталей і вузлів базового двигуна.

Два зовнішні (робочі) циліндри чотирициліндрового двигуна працюють по звичайному чотиритактному циклу. У двох внутрішніх (еспандерних) циліндрах відбувається продовжене розширення газів,

яке може бути назване п'ятим тактом. Таким чином, в еспандерних циліндрах здійснюються тільки такти розширення й випуску відпрацьованих газів.

Двигун має два розподільні вали. Обидва вали обслуговують як зовнішні робочі циліндри, так і внутрішні еспандерні циліндри, роблячи один оберт за два оберти колінчатого вала так, як це відбувається в традиційних чотиритактних ДВЗ. Кулачки, що обслуговують еспандерні циліндри, мають двосторонній профіль (рис. 12.9). Завдяки цьому в еспандерних циліндрах здійснюється двотактний цикл розширення й випуску.

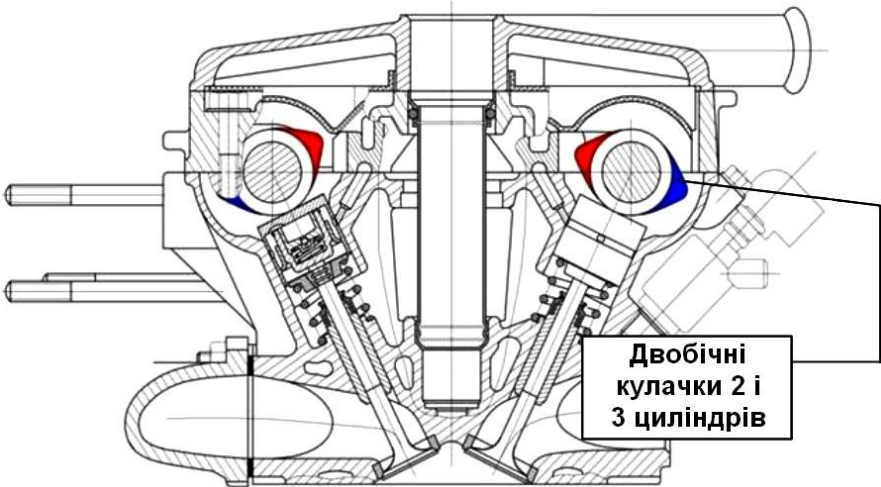


Рисунок 12.9 - Змінена головка циліндрів двигуна ВАЗ

Робочий цикл двигуна складається із чотирьох фаз (рис. 3.5).

Фаза А. Поршні в робочих циліндрах рухаються від ВМТ до НМТ. Поршні в еспандерних циліндрах рухаються від НМТ до ВМТ. У першому робочому циліндрі здійснюється впуск свіжого заряду, а в другому робочому циліндрі - згоряння (попереднє розширення). В еспандерних циліндрах здійснюється випуск газів.

Фаза В. Поршні в робочих циліндрах рухаються від НМТ до ВМТ. Поршні в еспандерних циліндрах рухаються від ВМТ до НМТ. У першому робочому циліндрі здійснюється стиск свіжого заряду, а в другому робочому циліндрі - витиснення випускних газів в еспандерні циліндри. В еспандерних циліндрах здійснюється процес продовжено-

го розширення випускних газів із другого робочого циліндра.

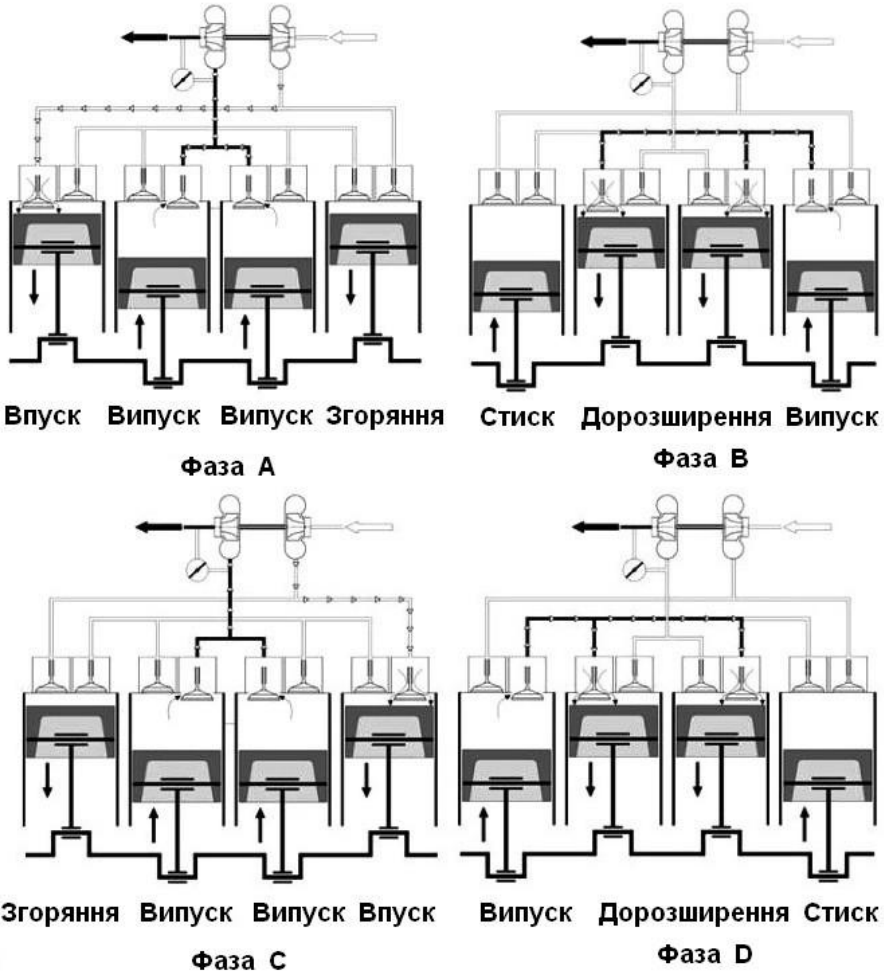


Рисунок 12.10 - Фази робочого циклу

Фаза С. Поршні в робочих циліндрах рухаються від ВМТ до НМТ. Поршні в еспандерних циліндрах рухаються від НМТ до ВМТ. У першому робочому циліндрі здійснюється згорання (попереднє розширення), а в другому робочому циліндрі - впуск свіжого заряду. В еспандерних циліндрах здійснюється випуск газів.

Фаза D аналогічна Фазі B, у якій перший і другий циліндри ВТ міняються місцями.

Таким чином, робочий цикл двигуна із продовженим розширенням здійснюється за два оберти колінчатого вала й складається із двох груп процесів. Перша група включає процеси впуску й попереднього розширення в першому або другому робочих циліндрах і випуск газів з еспандерних циліндрів. Друга група включає процеси стиску й витиснення випускних газів в першому або другому робочих циліндрах і додаткове розширення випускних газів в еспандерних циліндрах.

Шеститактні двигуни.

Шеститактним двигуном називають ДВЗ, у якого до чотирьох тактів традиційного циклу додано два додаткові такти. Шеститактні двигуни, як правило, є однооб'ємними зі здійсненням усіх тактів циклу в одному циліндрі. Під час додаткових тактів до робочого тіла підводиться теплота від нагрітих поверхонь камери згоряння, яка утилізується на такті розширення.

Одним з перших шеститактних двигунів був двигун Гріффіна (S. Griffin), виготовлений в Англії у 1883 р. У цьому двигуні після завершення такту випуску відпрацьованих газів, відбувався такт впуску повітря без подачі палива, а потім здійснювався такт випуску повітря.

Додаткові такти забезпечували зниження температури елементів камери згоряння й поліпшення очищення циліндрів від залишкових газів, сприяючи підвищенню наповнення.

Існує значна кількість конструкцій шеститактних двигунів. Розглянемо найбільш характерні з них.

Двигун Кроуера.

Американським інженером Б. Кроуером (Bruce Crower) розроблена конструкція й виготовлені зразки двигунів, у циліндри яких після завершення такту випуску подається вода під тиском 15 МПа. Відбираючи теплоту від нагрітих поверхонь камери згоряння, вода випаровується. При ході поршня від ВМТ до НМТ водяна пара, розширюючись, робить корисну роботу (п'ятий такт - паровий робочий хід).

При ході поршня від НМТ до ВМТ (шостий такт) здійснюється випуск відпрацьованої пари, далі ця пара надходить у конденсатор, де охолоджується й знову перетворюється у воду. Послідовність тактів двигуна Кроуера показана на рис. 12.11.

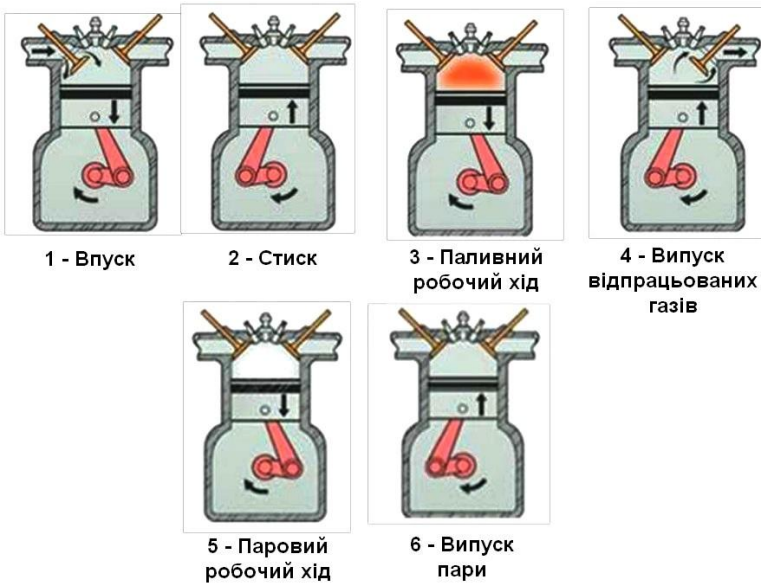


Рисунок 12.11 - Послідовність тактів двигуна Кроуера

Строго говорячи, цикл двигуна Кроуера складається із чотири-тактного й двотактного циклів (4+2). Цикл двигуна Кроуера відрізняється від традиційного циклу Отто не тільки кількістю тактів, але й відношенням кількості робочих тактів до їхнього загального числа. Так, у циклі Отто це відношення становить 1:4, а в циклі Кроуера - 1:3.

Перевагами двигуна Кроуера є висока паливна економічність за рахунок утилізації теплоти від стінок камери згоряння й можливість зменшити габарити елементів системи охолодження, або взагалі від неї відмовитися. Крім того, внутрішнє охолодження дозволяє суттєво підвищити ступінь стиску двигуна з іскровим запалюванням, що також позитивно позначиться на паливній економічності.

Серед недоліків двигуна Кроуера слід зазначити необхідність установки на автомобілі додаткового устаткування для зберігання й конденсації води. Серйозною проблемою є необхідність запобігання замерзання води в зимових умовах експлуатації. Для виготовлення клапанів, поршня й гільзи циліндра, швидше за все, будуть потрібні спеціальні нержавіючі матеріали.

Технологія подачі води широко застосовувалася під час Другої світової війни в авіаційних двигунах американських і німецьких літаків для їхнього форсування. Системою упорскування води оснащувалися авіамотори Daimler Benz серії 605 і BMW 801D для Messerschmitt Bf 109, Junkers Jumo 213 A1 для Fockewulf 190D, Pratt&Whitney J57 для американського B-29 Stratofortress і багато інших.

Вода додавалася у вже готову суміш, прохолоджуючи її, і попадала разом з нею в камеру згоряння. Від контакту з розпеченою поверхнею поршня й стінок циліндра вода миттєво перетворювалася в пару, яка розширюючись збільшувала потужність двигуна.

Попереднє охолодження паливоповітряної суміші дозволяло збільшити її обсяг на упорскуванні й підвищувало ефективність згоряння палива. Згодом воду замінили спеціальною сумішшю, що складалася з рівних частин води й метанолу, тим самим збільшивши потужність двигунів на 25-30 %.

Двигун Баюласа.

Двигун Баюласа розроблений у компанії Bajulaz S. A. (Швейцарія). У двигуні Баюласа реалізований робочий процес із запаленням від стиску. У головці циліндра розміщені камера згоряння і камера нагрівання, а також чотири клапани, два з яких управляють процесами впуску й випуску, а два інших розташовані в каналах, що з'єднують циліндр (надпоршневий простір) з камерами згоряння й нагрівання.

Утилізація теплоти відпрацьованих газів, сприяє підвищенню паливної економічності двигуна Баюласа. Однак, він також має недоліки, властиві дизелям з розділеними камерами згоряння, такі як втрати теплоти через збільшені поверхні камери згоряння й невисокі пускові якості. Крім того, наявність додаткових камер і клапанів з індивідуальними законами керування значно ускладнює конструкцію головки циліндрів двигуна.

Двигун Revelation Power.

У канадській компанії Revelation Power Technology розроблена конструкція й виготовлені зразки восьмитактного двигуна, у двоциліндровому модулі якого поршень другого (правого) циліндра рухається із запізнюванням на 90° щодо поршня першого (лівого) циліндра. Перший циліндр оснащений впускним клапаном для подачі паливно-повітряної суміші й пропускним клапаном, що з'єднують перший і

другий циліндри. Другий циліндр має впускний клапан для подачі повітря й випускний клапан, для видалення відпрацьованих газів. Робочий цикл двигуна здійснюється за два оберти колінчатого вала.

Двигуни з доданими тактами мають потенціал істотного поліпшення паливної економічності, як за рахунок продовженого розширення робочого тіла, так і утилізації теплоти, відведеної від нагрітих поверхонь камери згоряння. Однак, збільшення тактності сполучене з появою певних проблем, які необхідно вирішувати, або, принаймні, враховувати. Додавання додаткових тактів за інших рівних умов неминує приводить до зниження літрової потужності двигуна.

Зазначена обставина може бути частково компенсована за рахунок наддування. Додаткові такти вимагають внесення змін у систему газообміну, що ускладнюють конструкцію двигуна. Використання у двигуні нетрадиційних компонентів робочого тіла, таких як вода, вимагає зміни номенклатури матеріалів і, можливо, конструкції деталей, що обмежують камеру згоряння.

Тому, для прийняття рішень про створення двигунів з додатковими тактами необхідний зважений аналіз поліпшення паливної економічності, з одного боку, і можливими витратами, пов'язаними з ускладненням конструкції, що супроводжують це поліпшення. У кожному разі, плата за зниження витрат палива й поліпшення екологічних показників двигуна, що забезпечують економічну доцільність його виробництва, не повинна бути надмірно високою.

Двигуни з регульованими ступенем стиску й робочим об'ємом.

Реалізовані в сучасних двигунах нововведення відносяться до вдосконалювання їхніх систем і агрегатів, у першу чергу елементів паливної апаратури, з метою поліпшення протікання робочих процесів. При цьому закони руху поршнів залишаються жорстко заданими й залежними тільки від незмінних параметрів кривошипно-шатунного механізму. Зазначена обставина не дозволяє використовувати такі потужні резерви оптимізації показників робочих процесів двигуна у всьому діапазоні режимів його роботи, як регулювання ступеня стиску й робочого об'єму.

До останнього часу вважалося аксіомою, що ступінь стиску є незмінним конструктивним параметром двигуна, таким як, наприклад,

діаметр циліндра. Дійсно, у традиційних двигунах величина ступеня стиску однозначно визначається розмірами кривошипно-шатунного механізму, висотою поршня, а також розташуванням головки циліндра щодо осі колінчатого вала.

Як відомо, потужність і паливна економічність двигуна зростають при збільшенні ступеня стиску внаслідок підвищення індикаторного ККД. При досягненні величин ступеня стиску 13-14, поліпшення показників двигуна припиняється через неминучий ріст механічних втрат. Тому зазначені величини ступеня стиску є оптимальними.

У той же час закладена в конструкцію двигунів величина ступеня стиску відрізняється від оптимальної. У бензинових двигунах ступінь стиску менша оптимальної й обмежується детонацією. У дизелях ступінь стиску більша оптимальної й вибирається з урахуванням забезпечення надійного samozапалювання палива при пуску холодного двигуна.

Численні розрахунки й експериментальні дослідження показали, що й для бензинового двигуна, і для дизеля регулювання ступеня стиску здатне забезпечити приблизно однакове поліпшення паливної економічності на 20 %, хоча причини цього й алгоритм регулювання ступеня стиску для бензинового двигуна й для дизеля, різні.

У дизелі з регулюванням ступеня стиску можна значно збільшити тиск наддування, підвищивши за рахунок цього потужність. А можна, зберігши колишній рівень потужності, знизити робочий об'єм (кількість циліндрів), поліпшивши при цьому паливну економічність, зменшивши масу й вартість двигуна.

У бензиновому двигуні при зниженні ступеня стиску можна збільшити тиск наддування без детонації, підвищивши при цьому літрову потужність із усіма супутніми позитивними ефектами, у тому числі поліпшенням паливної економічності на режимах великих навантажень. При підвищенні ступеня стиску паливна економічність буде поліпшуватися на режимах малих навантажень.

Можливість регулювання робочого обсягу ще більш витратна для показників двигуна, ніж регулювання ступеня стиску. Великий робочий об'єм існуючих двигунів потрібний тільки для руху автомобіля зі швидкостями, близькими до максимальної швидкості. Ці режими не перевищують 10 % загального часу руху автомобіля.

Найбільшу частину часу, наприклад, при русі в місті - потрібен економічний двигун з малим робочим об'ємом. Спільне регулювання

ступеня стиску й робочого об'єму відкриває широкі перспективи створення двигуна нового типу з керованим рухом поршнів. Це - "еластичний" двигун, який гнучко пристосовує свої об'єм і ступінь стиску до умов руху автомобіля. Наприклад, коли потрібна більша потужність, цей двигун еквівалентний 6-циліндровому двигуну. Якщо більша потужність не потрібна (міський режим руху), він буде відповідати 4-циліндровому й навіть 3-циліндровому двигуну звичайного типу. При цьому може бути забезпечене значне зниження витрати палива.

На теперішній час відома досить велика кількість способів регулювання ступеня стиску ϵ і робочого об'єму. Кількість запропонованих конструкцій, що дозволяють регулювати ступінь стиску й робочий об'єм двигуна дуже велика. Однак, переважна більшість із них, дозволяючи вирішувати поставлені завдання по управлінню ϵ й V_h , виявилися не придатними для практичної реалізації, через неможливість забезпечити прийнятну працездатність двигуна, або по технологічних причинах. Тому тільки обмежене число двигунів було реалізовано в металі й лише одиничні конструкції вироблялися серійно.

На початку 90-х років ХХ ст. у ГНЦ ФГУП "НАМИ" був запропонований перетворюючий механізм, названий траверсним, що дозволяє управляти рухом поршнів, змінюючи ступінь стиску й робочий об'єм двигуна. Технічні рішення по траверсному механізму НАМИ захищені патентами різних країн.

З початку ХХІ ст. роботи із двигунів із траверсними перетворюючими механізмами активно проводять фірми Peugeot, Nissan і HONDA. У ГНЦ "НАМИ" було виготовлено більш десятка зразків траверсних двигунів з керованим рухом поршнів на базі серійних моторів ВАЗ, ЯМЗ і DaimlerChrysler. Траверсні двигуни Т-01 і VE111 пройшли випробування на безвідмовність в обсязі 1500 годин.

Траверсний механізм НАМИ працює таким чином (рис. 12.14). Вісь колінчатого вала 1 зміщена щодо осі циліндрів. Шатунна шийка 2 колінчатого вала пов'язана із траверсою 3, що має ще два циліндричні шарніри: один з'єднаний із шатуном 4, а другий - з коромислом 5.

Верхній кінець коромисла з'єднаний з розміщеним у корпусі дизеля ексцентриковим валом 6, а верхній кінець шатуна 4 - з поршнем 7. При обертанні колінчатого вала поршень робить зворотно-поступальний рух. Відстань від площини головки циліндра до днища поршня, при знаходженні останнього у ВМТ, що визначає ступінь стиску, залежить від координати осі хитання коромисла.

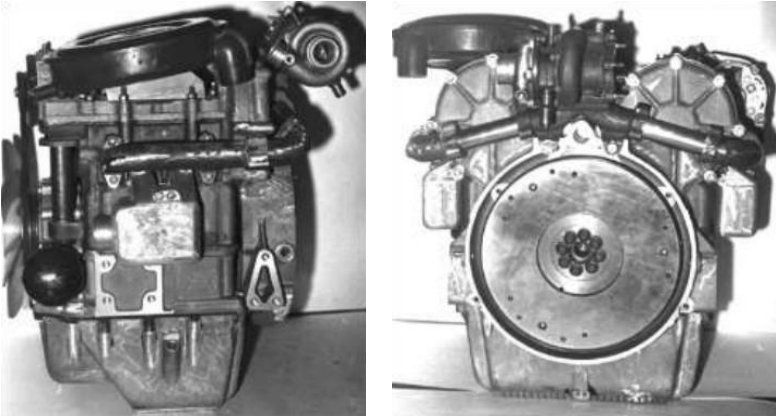


Рисунок 12.12 - Траверсний дизель ТБ-48 ($iV_h = 1,9$ л) на базі двигуна Elko 3.82.92Т фірми Elsbett-Konstruktion (Австрія)

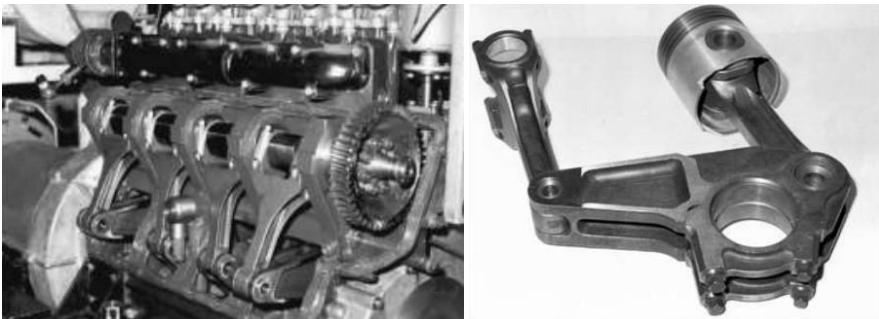


Рисунок 12.13 - Траверсний дизель Т-01 ($iV_h = 9,1$ л) і його деталі руху на базі двигуна ЯМЗ-8424

Ця координата, а отже, й ступінь стиску двигуна, регулюються за допомогою повороту ексцентрикового вала. При пуску й роботі на режимах холостого ходу й малих навантажень, ступінь стиску у двигуні максимальна. У міру росту навантаження й, отже, збільшення тиску наддування, ступінь стиску плавно знижується при повороті ексцентрикового вала.

При цьому максимальний тиск згоряння обмежується постійним рівнем, гранично припустимим за умовами забезпечення роботоздатності підшипників силового механізму в дизелі, або відсутності детонації в бензиновому двигуні. Одним з головних завдань, поставлених

при створенні траверсних двигунів, було забезпечення максимальної конструктивної, технологічної наступності й уніфікації з базовим двигуном.

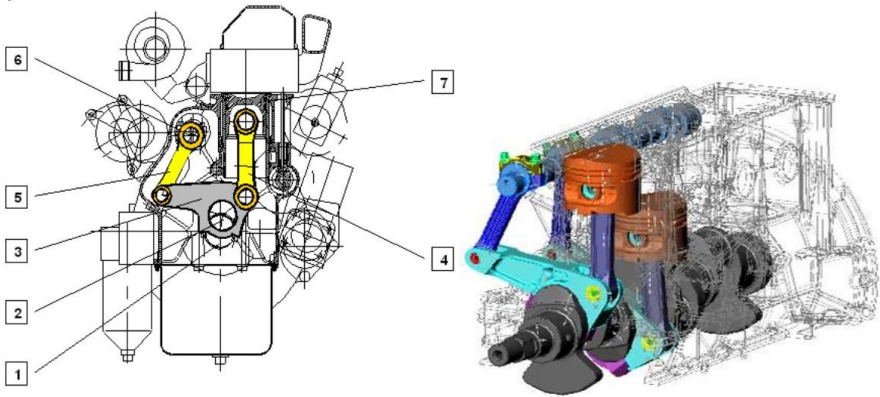
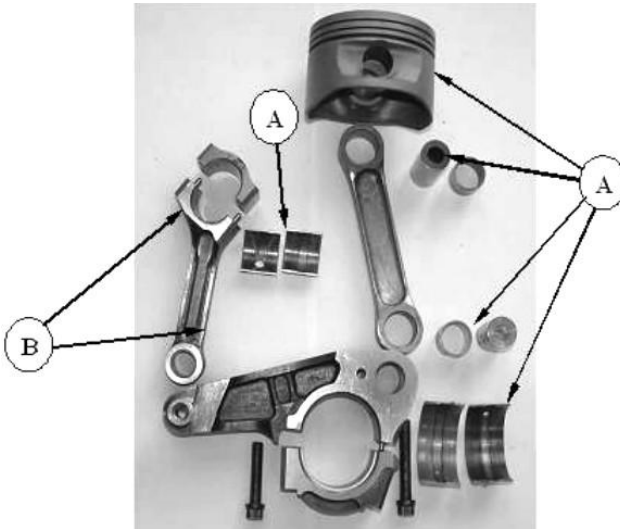


Рисунок 12.14 - Траверсний механізм двигунів НАМИ (Росія)



А - стандартні, В - додаткові (виготовлені по стандартних технологіях та із традиційних матеріалів)

Рисунок 12.15 - Деталі перетворюючого механізму траверсного двигуна

Деталі, вузли й агрегати двигуна з керованим рухом поршнів

можна підрозділити на три групи: стандартні, змінювані й додаткові (рис. 12.15). До групи стандартних відносяться наступні вироби базового серійного двигуна: головка циліндрів, впускний і випускний колектори, маховик, картер маховика, масляний піддон, кришки й вкладиші корінних опор колінчатого вала, масляний і водяний насоси, опори двигуна, системи живлення й запалювання, стартер, генератор.

Основною змінюваною деталлю є блок циліндрів, що має конструктивну й технологічну наступність із блоком циліндрів базового двигуна (рис. 12.16). У зв'язку з тим, що міжциліндрова відстань не міняється, обробка блоку циліндрів може проводитися на технологічному устаткуванні серійного виробництва.

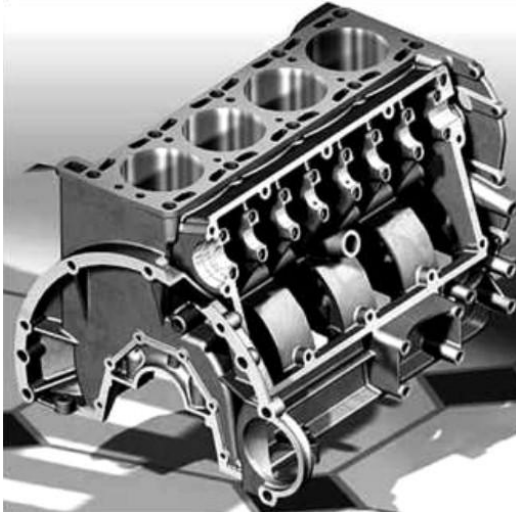


Рисунок 12.16 - Блок циліндрів траверсного двигуна

Колінчатий вал по конструкції й технології виготовлення уніфікований з колінчатим валом базового двигуна й відрізняється від останнього тільки зменшеним радіусом кривошипа. Його обробка проводиться так само на стандартному устаткуванні. Збережені довжина вала, розміри корінних шийок, діаметр шатунних шийок, їх координати в поздовжньому перетині. Збережена також конструкція передньої частини вала й вузла кріплення маховика. Матеріал колінчатого вала такий же, як і в базового двигуна.

Додатковими деталями траверсного двигуна є елементи перет-

воруючого механізму - траверси, коромисла й ексцентриковий вал (рис. 12.5). Конструкція траверси близька конструкції шатунів авіаційних двигунів. Підшипник шатунної шийки колінчатого вала виконаний за аналогією з базовим двигуном.

По конструктивному виконанню й застосовуваним матеріалам, коромисло достатньо близьке до шатунів традиційних двигунів. Верхня й нижня головки виготовлених шатунів ідентичні верхній головці шатуна базового двигуна. Шатуни двигуна з керованим рухом поршнів не мають рознімання в нижніх головках і, тому, простіше серійних. Технологія виготовлення ексцентрикового вала аналогічна технології виготовлення розподільного вала звичайного двигуна.

Конструкція траверсних двигунів дозволяє їх виготовляти паралельно із серійними двигунами в умовах діючого виробництва при частковій зміні стандартного устаткування.

Питання для самоперевірки

1. Чи мають взагалі перспективи поршневі двигуни внутрішнього згоряння у найближчому майбутньому?
2. Які напрямки й методи модифікування робочого циклу ДВЗ ви можете назвати?
3. Що таке робочий цикл ДВЗ?
4. Що таке такт (хід поршня)?
5. Поясніть що таке свіжий заряд.
6. Що таке робоче тіло?
7. Поясніть в чому полягає модифікація робочих циклів ДВЗ.
8. Що розуміють під згорянням?
9. Що таке нагнітання?
10. Які двигуни називаються двигунами з розділеними тактами?
11. Коли вперше з'явилася концепція розділеного циклу?
12. Назвіть переваги й недоліки двигунів з розділеними тактами.
13. Розкажіть принцип роботи двигуна Кушуля.
14. Які конструктивні особливості двигуна Скудері?
15. Які конструктивні особливості у двигунів із доданими тактами?
16. Назвіть переваги й недоліки двигунів з доданими тактами.
17. Як здійснюють п'ятитактний цикл у двигунах традиційної конструкції?
18. Як здійснюють динамічне регулювання ступеня стиску й робочого об'єму у сучасних ДВЗ?

ЛЕКЦІЯ № 13. ВОДНЕВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ

План лекції. Моторні властивості водню й передумови його використання як палива для ДВЗ. Енергоекологічні показники водневого ДВЗ. Робочий процес автомобільних двигунів на водні й суміші бензину з воднем. Акумуляування водню на борту автомобіля.

Література: [1], с. 145-152; [17]; [34], с. 162-165.

Традиційний двигун внутрішнього згорання (ДВЗ) має ряд істотних недоліків, що змушує вчених шукати йому гідну заміну. Самим популярним варіантом подібної альтернативи є електродвигун, однак він не єдиний, хто може скласти конкуренцію ДВЗ. Водневий мотор вважається одним з варіантів майбутнього автомобілебудування й може розв'язати проблему зі шкідливими викидами й дорожнечою палива.

Використання водню як енергоносія дозволить як суттєво скоротити споживання копалин вуглеводневих палив, так і значно просунутися у вирішенні екологічної проблеми зниження забруднення атмосфери міст шкідливими для здоров'я людини складовими вихлопних газів автомобілів і тепловозів.

В 2018 році приблизно 25 % викидів вуглекислого газу в атмосферу Землі відбувалося в результаті роботи різного роду транспорту. За різними оцінками до 2050 року це число подвоїться й продовжить рости в міру того, як у країнах що розвиваються буде збільшуватися кількість особистих автомобілів. Крім вуглекислого газу в атмосферу викидаються оксиди азоту, відповідальні за збільшення захворюваності астмою, оксиди сірки, відповідальні за кислотні дощі тощо.

У морському транспорті найчастіше використовуються низькоякісні дешеві сорти палива. Морський транспорт викидає оксидів сірки в 700 раз більше, ніж автомобільний транспорт. По даним International Maritime Organization викиди морським торговельним флотом досягли 1,12 млрд. тонн у рік.

Іншою причиною підвищення інтересу до водневого транспорту є ріст цін на енергоносії (у цей час гнітюча їхня більшість - вугілля, нафта і їх похідні), дефіцит палива, прагнення різних країн знайти

енергетичну незалежність.

Так у Німеччині з вересня 2018 року запущені в експлуатацію перші водневі поїзди - Coradia iLint компанії Alstom, по маршруту в Нижній Саксонії. Двовагонний состав Coradia iLint на паливних елементах випущений французькою компанією Alstom, має запас ходу 1 тис. км і здатний перевозити 200 пасажирів зі швидкістю до 140 км/год. Пробний запуск відбувся ще осінню 2017-го, тепер вже розпочата комерційна експлуатація. Це самий свіжий приклад використання водню в транспорті, але як і раніше один з деяких. Передбачається, що в підсумку водневі поїзди замінять 4 тис. дизельних регіональних поїздів, що діють у Німеччині на неелектрофікованих ділянках залізниць. Інтерес до таких поїздів також виразили Нідерланди, Данія й Норвегія.



Рисунок 13.1 - Водневий поїзд Coradia iLint

Незважаючи на те, що схоронність навколишнього середовища тільки зараз стала масовою проблемою, про зміну стандартного двигуна внутрішнього згоряння вчені замислювалися й раніше. Так, мотор, що працює на водні, побачив світ ще в 1806 році, чому посприяд французький винахідник Франсуа Ісак де Ріваз (він робив водень за допомогою електролізу води).

Пройшло кілька десятиків років, і в Англії видали перший патент на водневий двигун (1841 рік), а в 1852 році німецькі вчені сконструювали ДВЗ, який міг працювати на повітряно-водневій суміші.

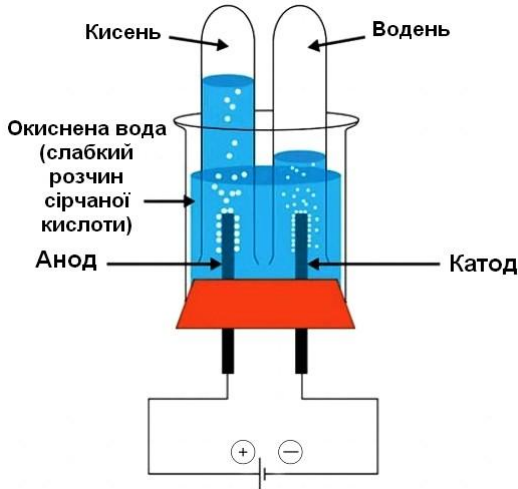


Рисунок 13.2 - Одержання водню шляхом електролізу води

Водневий двигун трохи пізніше, у часи блокади Ленінграду, коли бензин був дефіцитним продуктом, а водень був у досить великій кількості, технік Борис Шелищ запропонував використовувати для роботи загороджувальних аеростатів повітряно-водневу суміш. Після цього на водневе живлення перевели всі ДВЗ лебідок аеростатів, а загальне число працюючих на водні машин досягало 600 одиниць.

У першій половині ХХ століття інтерес громадськості до водневих двигунів був невеликий, але із приходом паливно-енергетичної кризи 70-х років ситуація різко змінилася. Зокрема, в 1979 році компанія BMW випустила перший автомобіль, який цілком успішно їздив на водні (без вибухів і водяної пари, що виривається з вихлопної труби). Слідом за BMW, у цьому напрямку почали працювати інші великі автовиробники, і до кінця минулого сторіччя кожна провідна автокомпанія світу вже мала концепцію розробки машини на водневому паливі.

Проте, із закінченням нафтової кризи зник і інтерес громадськості до альтернативних джерел палива, хоча в наш час він знову починає пробуджуватися, оскільки підігрівається захисниками екології, які борються за зниження токсичності вихлопних газів автомобілів.

Більше того, ціни на енергоносії й бажання знайти паливну незалежність тільки сприяють проведенню теоретичних і практичних

досліджень ученими багатьох країн світу. Самими активними є компанії BMW, General Motors, Honda Motor, Ford Motor.

Принцип роботи й типи водневого двигуна.

Основною відмінністю водневої установки від традиційних двигунів є спосіб подачі паливної рідини й наступне запалення робочої суміші. При цьому принцип трансформації зворотно-поступальних рухів кривошипно-шатунного механізму в корисну роботу залишається незмінним. Враховуючи, що горіння нафтового палива відбувається досить повільно, паливно-повітряна суміш наповнює камеру згоряння раніше, чим поршень займе своє крайнє верхнє положення (так звану верхню мертву точку).

Стрімка реакція водню дає можливість зрушити час упорскування ближче до того моменту, коли поршень починає вертатися до нижньої мертвої точки. Потрібно відзначити, що тиск у паливній системі не обов'язково буде високим.

Якщо водневому двигуну створити ідеальні робочі умови, то він може мати паливну систему живлення закритого типу, коли процес сумішоутворення буде проходити без участі атмосферних повітряних потоків. У такому випадку після такту стиску в камері згоряння залишається водяна пара, яка, проходячи через радіатор, конденсується й знову перетворюється у звичайну воду.

Однак застосування такого виду пристрою можливо тільки тоді, коли на транспортному засобі є електролізер, що відокремлює водень від води для його повторної реакції з киснем. На даний момент добитися таких результатів украй складно. Для стабільної роботи двигунів застосовується моторне масло, а його випари є частиною вихлопних газів. Тому безпроблемний запуск силової установки і її усталена робота на гримучому газі без використання атмосферного повітря – поки що нездійсненне завдання.

Розрізняють два варіанти автомобільних водневих установок: агрегати, що функціонують на основі водневих паливних елементів, і водневі двигуни внутрішнього згоряння.

Силкові установки на основі водневих паливних елементів.

В основі принципу роботи паливних елементів лежать фізико-хімічні реакції. По суті, це ті ж свинцеві акумуляторні батареї (АКБ), от тільки коефіцієнт корисної дії паливного елемента трохи вищий,

ніж АКБ, і становить близько 45% (іноді більше).

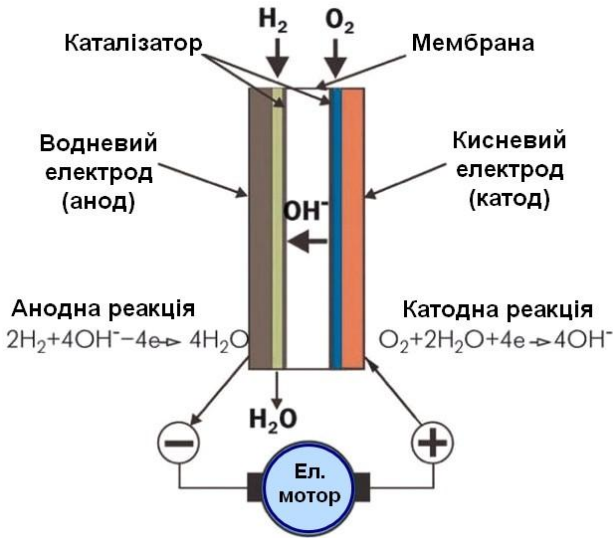


Рисунок 13.3 – Схема водневого паливного елемента

У корпус воднево-кисневого паливного елемента поміщена мембрана (проводить тільки протони), що розділяє камеру з анодом і камеру з катодом. У камеру з анодом надходить водень, а в камеру катода – кисень. Кожний електрод заздалегідь покривають шаром каталізатора, у ролі якого нерідко виступає платина. При його впливі молекулярний водень починає втрачати електрони.

У цей же час протони проходять через мембрану до катода й під впливом того ж каталізатора з'єднуються з електронами, що надходять зовні. У результаті реакції утворюється вода, а електрони з камери анода переміщуються в електричний ланцюг, приєднаний до мотора. Простіше говорячи, ми одержуємо електричний струм, який і живить двигун.

Водневі двигуни внутрішнього згорання.

У більшості дослідних і предсерійних автомобілів водень використовували як паливо у звичайному ДВЗ: у цьому випадку потужність у порівнянні з бензиновим еквівалентом знижувалася до рівня 65-82 %. Теоретично потужність можна й наростити (були випадки її

збільшення до 117%), якщо внести зміни в систему запалювання.

Але виникає цілий ряд проблем. По-перше, висока температура стиску "змусить" водень вступити в реакцію з металевими елементами двигуна або навіть моторним маслом. По-друге, навіть невеликий витік водню при контакті з розпеченим випускним колектором точно приведе до загоряння (вибуху). По-третє, через зрослу температуру запалення суміші, сильно збільшуються викиди окислів азоту й підвищується зношування деталей двигуна, сильно знижуючи його ресурс.

Із цієї причини для створення двопаливних бензо-водневих конструкцій ідеально підходять силові агрегати роторного типу, тому що їхня конструкція дозволяє зменшити ризик загоряння за рахунок відстані між випускним і впускним колектором. Отже горюча суміш надходить у відносно холодну камеру мотора, де неконтрольоване самозапалювання практично виключене.

Із серійними роторними моторами в останні роки мала справу тільки в Mazda, де також експериментували з водневим паливом. Але особливим успіхом цей досвід так і не увінчався: проблема утвору окислів азоту у цьому випадку не вирішується, а підвищених витрат масла, яке, по суті, викидається в атмосферу, уникнути не виходить.

Саме тому більш перспективним способом перетворення водороду в електроенергію стали паливні елементи. І якщо у випадку автомобілів із ДВЗ водень використовується як заміну звичному паливу, то транспортні засоби з паливними елементами - це зовсім інший клас. Останні можна почасти вважати гібридними електромобілями з водневою міні-електростанцією.

Конструктивні схеми водневих силових установок на транспортних засобах.

Провідні компанії світу які сьогодні роблять автомобілі на водневому паливі це Toyota, Honda і Hyundai. Розробкою автомобілів на водневому паливі займаються також Mazda, Daimler, Audi, BMW, Ford, Nissan.

Спалювання водню у звичайному двигуні внутрішнього згоряння видається найпростішим і логічним способом застосування газу, адже водень легко запалюється й згоряє без залишку. Однак через різницю у властивостях бензину й водню, практично перевести ДВЗ на новий вид палива виявилось не так вже й просто. Складності виникли

саме із довгостроковою експлуатацією двигунів: водень викликав перегрів клапанів, поршневої групи й масла, через утрое більшу, ніж у бензину, теплоту згоряння (141 Мдж/кг проти 44 Мдж/кг). Водень непогано показував себе на низьких оборотах двигуна, але при рості навантаження виникала детонація. Можливим вирішенням проблеми була заміна водню на бензиново-водневу суміш, концентрація газу в якій динамічно зменшувалася в міру росту оборотів двигуна.

Одним з серійних автомобілів, де водень спалювався у ДВЗ подібно іншому паливу, був BMW Hydrogen 7, вироблений усього в 100 екземплярах в 2006-2008 роках. Модифікований шестилітровий ДВЗ V12 працював на бензині або водні, перемикання між видами палива відбувалося автоматично. У систему впуску вмонтували додаткову газову магістраль, доробили програму керування клапанами й фазами газорозподілу "Дабл Ванос" і "Велвтронік".

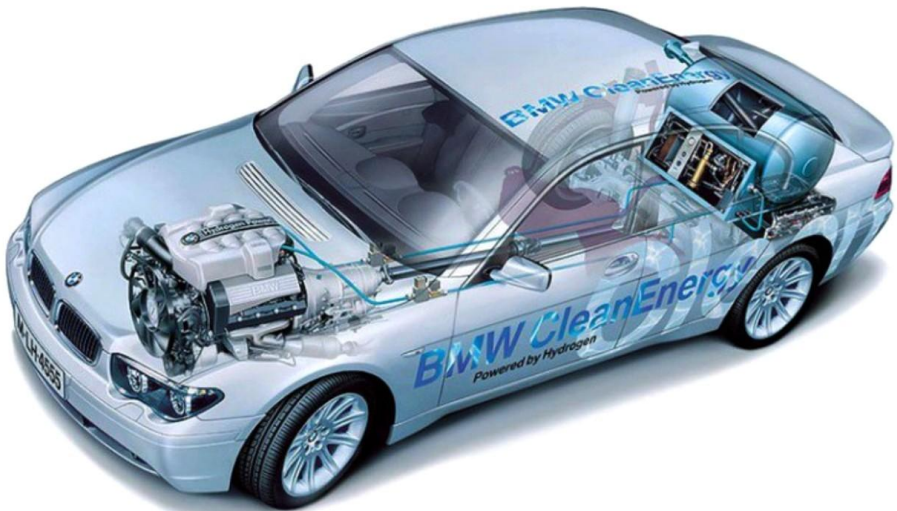


Рисунок 13.4 - BMW Hydrogen 7 у кузові E65

Щоб добитися на одному заправленні 700-кілометрового запасу ходу, 74-літровий бензобак доповнили резервуаром з подвійними стінками, що вміщали 8 кг рідкого водню (теплоізоляція балона дозволяла зберігати його при температурі -250°C).

Незважаючи на успішне вирішення проблеми перегріву клапанів, на цьому проекті все-таки поставили хрест. По-перше, при спалю-

ванні водню потужність двигуна падала приблизно на 20 % - з 260 к.с. на бензині до 228 к.с. По-друге, 8 кг водню вистачало всього на 200 км пробігу, що було в рази менше, ніж у традиційного двигуна. По-третє, Hydrogen 7 з'явився занадто рано - коли "зелені" автомобілі ще не були так актуальні. По-четверте, ходили завзяті слухи, що Агентство по охороні навколишнього середовища США не дозволило називати Hydrogen 7 автомобілем без шкідливого вихлопу саме через особливості роботи ДВЗ: частки моторного масла попадали в камеру згоряння й там запаливалися разом з воднем.

Воднева Mazda RX-8 Hydrogen RE не тільки зовні, але й під капотом мало відрізняється від стандартної. Там встановлено відомий роторно-поршневий двигун "Ренезіс", здатний працювати як на бензині, так і на водні. Для поліпшення наповнення камери згоряння, водень впорскують у камеру згоряння через окрему форсунку.

Японські конструктори стверджували, що саме роторний двигун краще, ніж поршневий, придатний для водневого живлення. Оскільки впуск і згоряння в цьому двигуні, відбуваються в різних камерах - паливо попадає в менш нагріту камеру, що в цілому поліпшує подальше згоряння.

З бензину на водень можна переходити прямо на ходу, нажавши кнопку секунди на дві. Потужність двопаливного двигуна помітно знизилася - до 107 к.с, при тому що сама слабка версія звичайного "Ренезіса" розвиває 206 к.с. Зате з вихлопної труби йде нешкідлива водяна пара.

Mazda Primacy Hydrogen RE Hybrid (у Європі це "Мазда-5") ще цікавіша за своєю конструкцією. Під капотом в неї стоїть той самий двопаливний роторний двигун, але механічного зв'язку між мотором і колесами немає. Колеса крутить електродвигун, що одержує енергію від роторного агрегату, а на малих швидкостях - тільки від акумуляторної батареї. Як і в інших гібридомобілях, ДВЗ включається не відразу, а лише при наборі швидкості. При необхідності включається під час інтенсивного розгону або обгону, електромотор живлять ротор і акумулятори разом. А при відпущеній педалі акселератора акумуляторні батареї підзаряджаються.

Не дивлячись на наявні успіхи, раціонально мислячі японці відверто заявляють, що ці автомобілі всього лише концепти, і призначені лише для дослідження і вдосконалення водневих технологій.



а

б

в

а – процес заправлення воднем через окрему горловину (тиск у балоні 35 МПа); б - багажника в Mazda RX-8 фактично немає, оскільки в ньому встановлений балон з воднем; в – на панелі, ліворуч від тахометра традиційний датчик рівня бензину, праворуч – показчик рівня водню

Рисунок 13.5 - Воднева Mazda RX-8 Hydrogen RE

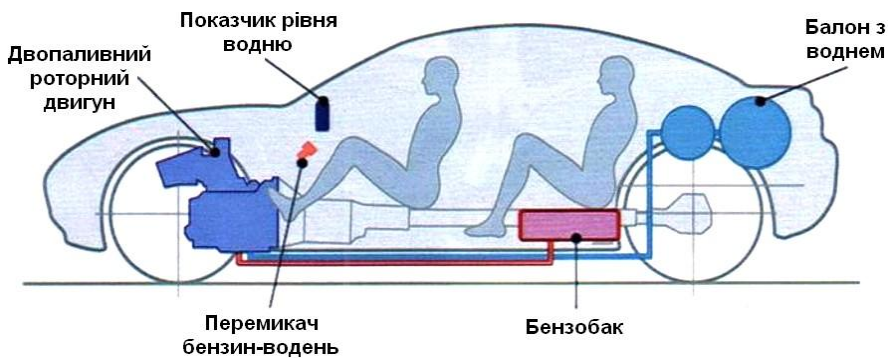


Рисунок 13.6 - Принципова схема Mazda RX-8 Hydrogen RE

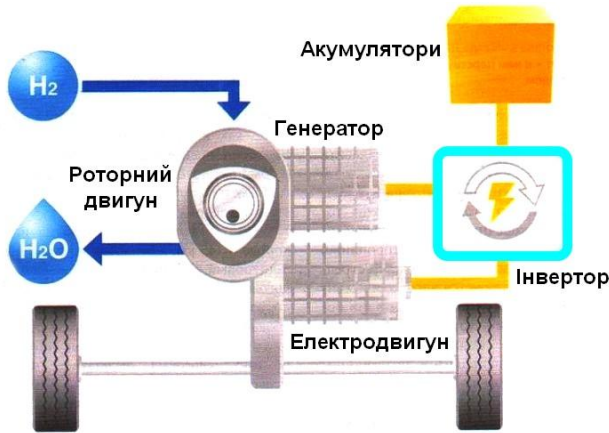


Рисунок 13.7 - Принципова схема Mazda Primacy Hydrogen RE Hybrid

Отже Mazda RX-8 Hydrogen RE – це той випадок, коли водень загубив усю динаміку роторного двигуна. При переході на водень від потужності легендарного роторного RX-8 не залишалося й сліду - потужність двигуна падала вдвічі: з 206 до 107 к.с., а максимальна швидкість автомобіля - до 170 км/год.

Тому головний конструктор Акіхіро Кашивагі стверджує: "- В ідеалі потрібно проектувати новий, суто водневий автомобіль. Тобто який буде первісно розрахований на це паливо. І навіть через 10 років частка водневих автомобілів на дорогах буде невелика, хоча й виросте. До речі, без податкових і інших пільг, думаю, не обійтись. А ще треба вдосконалювати устаткування, створювати інфраструктуру, у першу чергу заправлення."

BMW Hydrogen 7 і Mazda RX-8 Hydrogen RE були лебединою піснюю водневих ДВЗ: до моменту появи цих автомобілів стало остаточно ясно, що куди ефективніше використовувати водень у давно відомих паливних елементах, ніж просто палити у двигуні.

Першим успішним експериментом по створенню транспортного засобу на водневому паливному елементі можна вважати трактор Гаррі Карла, побудований в 1959 році. Правда, заміна дизеля на паливний елемент знизилася потужність трактора до 20 к.с.

В останні піввікку водневий транспорт випускався в штучних екземплярах. Наприклад, в 2001 році в США з'явився автобус Generation

II, водень для якого вироблявся з метанолу. Паливні елементи створювали потужність до 100 кВт, тобто близько 136 к.с.

У 2001 році російський ВАЗ представив "Ниву" на водневих елементах, відому під іменем "Антэл-1". Електродвигун видавав потужність до 25 кВт (34 к.с.), розганяв авто максимум до 85 км/год і на одному заправленні працював 200 км. Єдиний зроблений автомобіль так і залишився "лабораторією на колесах". Потім була "Лада 111" з агрегатом "Антел-2", розроблена уральськими інженерами, в якій одного заряду вистачало вже на 350 км.



Рисунок 13.8 - Російський автомобіль на водневих паливних елементах

В 2013 році Toyota представила модель Mirai на водневих паливних елементах. Унікальність ситуації була в тому, що автомобіль Toyota Mirai був не концепт-каром, а автомобілем готовим до серійного виробництва, продаж якого почався вже через рік.

На відміну від електромобілів на акумуляторах, Mirai сама виробляла електрику для себе. Електродвигун передньоприводної Mirai має максимальну потужність 154 к.с., що небагато для сучасного електромобіля, але досить непогано в порівнянні з водневими авто минулого.

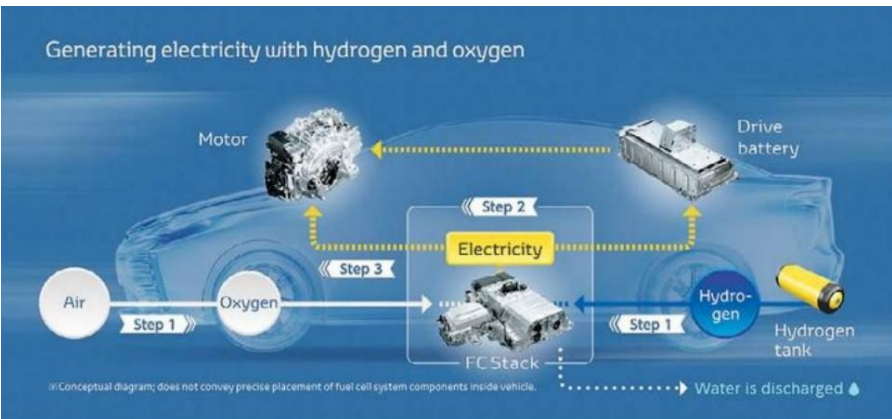


Рисунок 13.9 – Загальний вигляд та принцип роботи Toyota Mirai

Оскільки у водня низька об'ємна щільність, він зберігається на борті автомобіля у вигляді стисненого газу в балонах високого тиску. Два водневі балони у сумі вміщують 5 кг водню. Робочий тиск усередині балона 700 атм. Водень, що зберігається у двох баках високого тиску ємністю 60 л (передній балон) і 62,4 літра (задній балон), напра-

вляється в блок паливних елементів FC stack. Там він вступає в реакцію з киснем з повітря, що надходить через величезні повітрязабірники в передній частині автомобіля.



Рисунок 13.10 – Силова установка Toyota Mirai: попереду розташований електродвигун, водневі баки жовтого кольору на 60 і 62,4 л, додаткова батарея поза спинкою сидіння, блок паливних водневих елементів розміщений у середині автомобіля

У блоці паливних елементів FC stack, у результаті хімічної реакції взаємодії водню й кисню, виробляється звичайна вода й електроенергія. Далі постійний електричний струм, вироблений у паливних елементах, проходить через підвищуючий перетворювач FC Boost

Converter, у якому він перетворюється в змінний струм, а напруга збільшується до 650 В. Потім змінний струм подається в електродвигун, який і передає високий крутний момент, що становить значні 335 Нм на передні ведучі колеса.

Особливість схеми Toyota Mirai, характерна для електромобілів - тяговий електродвигун працює так само як генератор, регенеруючи енергію при гальмуванні у вторинний акумулятор - нікель-метал-гідридний, з максимальною вихідною потужністю 21 кВт.

Акумулятор є більше допоміжним - його енергія буде задіяна при різкому прискоренні. Величезний плюс водневої схеми подібного типу - у край високий ККД, який становить 83 % (для порівняння, 1,3-літровий тойотовський двигун VVT-iE, який з'явився в 2014 році, на сьогодні має найвищий серед бензинових моторів максимальний ККД 38 %).

Теоретичний запас ходу на 5 кг водню становить 500 км, фактичний - близько 350 км. Для порівняння: Tesla Model S по паспорту може пройти 540 км. От тільки на заправлення повного бака водню йде 3 хвилини, а батарея Tesla заряджається до 100 % за 75 хвилин на станціях Tesla Supercharger і до 30 годин від звичайної розетки на 220 В.



Рисунок 13.11 – Моторний відсік Toyota Mirai:
Fuel cell – це блок управління паливними елементами,
а також зарядкою акумуляторної батареї

Постійний струм 370 В з водневих паливних елементів Mirai пе-

ретворюється у змінний, а напруга збільшується до 650 В. Максимальна швидкість машини досягає 175 км/год - небагато в порівнянні з вуглеводним паливом, але цілком достатньо для повсякденної їзди.

Для запасу енергії використовується нікель-метал-гідридний акумулятор на 21 квт·год, у який передається надлишок від паливних елементів і енергія рекуперативного гальмування.

Враховуючи японські реалії, при яких населені пункти можуть у будь-який момент постраждати від землетрусу, у багажнику Mirai 2016-го модельного року було встановлене спеціальний роз'єм, через який можна організувати електропостачання невеликої частки будинку, що робить автомобіль генератором на колесах із граничною ємністю 150 квт·год.

До речі, усього за кілька років Toyota вдалося значно зменшити масу генератора: якщо на початку століття в прототипах він важив 108 кг і видавав 122 к.с., то в Mirai паливний елемент удвічі компактніше (об'єм 37 літрів) і важить 56 кг. Справедливо буде додати до цього 87 кг паливних баків.

Для порівняння, популярний сучасний турбомотор Volkswagen 1.4 TSI, зі схожою з Mirai потужністю 140-160 к.с. славиться своєю "легкістю" завдяки алюмінієвій конструкції - він важить 106 кг плюс 38-45 кг бензину в баку. До речі, батарея Tesla Model S важить 540 кг.

За 4 км пробігу Mirai виробляє тільки 240 мл дистильованої, безпечної щодо питва води - ентузіасти, які спробували "вихлоп" Mirai, повідомляли тільки про легкий присмак пластику.

Toyota розробляє й робить водневі баки самостійно от уже 18 років. Бак Mirai зроблений з декількох шарів пластику з вуглеволоконом і склотканиною. Використання таких матеріалів, по-перше, підвищило стійкість сховищ до деформації й пробиттю, а, по-друге, розв'язало проблему наводнення металу, через який сталеві баки втрачали свої властивості, гнучкість і покривалися мікротріщинами.

Аналогічна Toyota Mirai, схема водневої силової установки застосована на автомобілі Honda Clarity - заявлений запас ходу в неї досягає 700 км. Зараз Honda Clarity випускається досить обмеженою партією, і офіційно придбати автомобіль можна лише в Японії, Західній Європі й Америці.

Серед інших моделей легкових автомобілів, помітними представниками водневих транспортних засобів на сьогодні також є автомобілі Hyundai (Tucson FCEV), Mercedes-Benz GLC F-Cell, в яких є мож-

ливість підзарядки від звичайної побутової мережі, а сумарний запас ходу становить близько 500 км).



Рисунок 13.12 – Воднева Honda Clarity

Одержання водню.

Зараз відомо близько десятка методів одержання водню з різних вихідних матеріалів. Найвідоміший - електроліз води, її розкладання при пропусканні електричного струму, але він вимагає великих витрат енергії. Головним напрямком зниження енерговитрат при електролізі води є пошук нових матеріалів для електродів і електролітів.

Розробляються методи одержання водню з води з використанням неорганічних відновлювачів - електронегативних металів та їхніх сплавів з додаванням металів-активаторів. Такі сплави названі енергоакумулюючими речовинами. Вони дозволяють одержувати з води будь-яку кількість водню. Ще одним способом виділення водню з води може стати її фотоелектрохімічне розкладання під дією сонячного світла. До розповсюджених методів відносяться парофазна переробка метану (природного газу) і термічний метод розкладання вугілля й іншого біоматеріалу.

Перспективні термохімічні цикли виробництва водню, парофазні методи конверсії водню з кам'яного й бурого вугілля, торфу, а також метод підземної газифікації вугілля з одержанням водню.

Окрема тема - розробка каталізаторів для одержання водню з органічної сировини - продукту переробки біомаси. Але при цьому поряд з воднем утворюється значна кількість окису вуглецю (C), який необхідно утилізувати.

Ще один перспективний метод - процес каталітичної парової

переробки етанолу. Також усе більшу увагу залучає сірководень. Це обумовлено низькими витратами енергії на електролітичне виділення водню із сірководню й великими запасами цього з'єднання в природі - у воді морів і океанів, у природному газі. Сірководень також виходить у якості побічного продукту нафтопереробної, хімічної, металургійної промисловості.

Водень можна одержувати з використанням плазмових технологій. З їхньою допомогою можна газифікувати навіть саму низькоякісну вуглецеву сировину, наприклад тверді побутові відходи. У якості джерела термічної плазми використовуються плазмотрони - пристрої, що генерують плазмовий струмінь.

Зберігання водню.

Для зберігання водню безпосередньо в автомобілі існують наступні способи: газобалонний, криогенний, металогідридний.

У першому випадку водень зберігається в стислому виді при тиску близько 700 атм. При цьому маса водню становить усього близько 3 % від маси балона й для зберігання скільки-небудь помітної кількості газу потрібні досить важкі й об'ємні балони. Це не говорячи вже про те, що виготовлення, зарядка й експлуатація таких балонів вимагають особливих запобіжних заходів через небезпеку вибуху.

Криогенний спосіб має на увазі скраплення водню й зберігання його в теплоізольованих посудинах при температурі -235°C . Це досить енерговитратний процес - скраплення обходиться у 30-40 % тієї енергії, яка вийде при використанні отриманого водню. Але, якою б не була досконала теплоізоляція, водень у баку нагрівається, тиск збільшується й газ стравлюється в атмосферу через запобіжний клапан. Усього кілька днів - і баки порожні!

Самими перспективними є тверді накопичувачі, так звані металогідриди. Ці з'єднання вміють убирати в себе водень наче губка, при одних умовах, і віддавати при інших, наприклад при нагріванні. Щоб це було економічно вигідно, такий металогідрид повинен "усмоктувати" не менш 6 % водню. Увесь світ зараз шукає подібні матеріали. Як тільки матеріал буде знайдений - його підхоплять технологи, і процес "воднезації" транспорту піде значно швидше.

Тенденція створення заправних водневих станцій.

Північна Америка, Канада. П'ять станцій побудовані в Британ-

ській Колумбії (західна провінція Канади) у 2005 року. Більше станцій будувати в Канаді не будуть, проект завершився в березні 2011 року.

Сполучені Штати. Арізона: прототип водневої заправної станції побудований за всіма правилами безпеки для навколишнього середовища у Фініксі, щоб довести можливість будівництва таких заправних станцій у міських районах.

Каліфорнія: В 2013 році губернатор Браун підписав законопроект про фінансування \$20 мільйонів у рік протягом 10 років на 100 станцій. Комісія з енергетики Каліфорнії виділила \$46,6 млн. на 28 станцій, які були завершені в 2016 році. За станом на серпень 2018 року в Каліфорнії відкрито 35 станцій і ще 29 очікується до 2020 року.

Гавайї відкрили першу водневу станцію в Хикамі в 2009 році. В 2012 році компанія Aloha Motor Company відкрила водневу станцію в Гонолулу.

Массачусетс: французька компанія Air Liquide завершила будівництво нової водневої заправної станції в Менсфілді в жовтні 2018 року. Єдина воднева заправна станція в штаті Массачусетс розташована м. Білеріка (40 243 жителів), у штаб-квартирі компанії Nuvera Fuel Cells, що виготовляє водневі паливні елементи.

Мічиган: В 2000 році Ford і Air Products відкрили першу водневу станцію в Північній Америці в Дірборні, штат Мічиган.

Огайо: В 2007 році в кампусі Державного університету штату Огайо, в Центрі автомобільних досліджень, відкрилася воднева заправна станція. Єдина на весь штат Огайо.

Вермонт: воднева станція побудована в 2004 році в місті Берлінгтон. Проект частково профінансований через Програму водневого водопостачання Міністерства енергетики Сполучених Штатів.

Азія

Японія: У період з 2002 по 2010 рік, у Японії по проекту JHFC було введено кілька заправних станцій з воднем для тестування технологій виробництва водню. Наприкінці 2012 року було встановлено 17 водневих станцій, в 2015 році встановлено 19. Уряд розраховує створити до 100 водневих станцій. У бюджеті для цього виділено \$460 млн., що покриває тільки 50% витрат інвесторів. JX Energy встановило 40 станцій до 2015 року й ще 60 у період 2016-2018 років. Toho Gas і Iwatani Corp установили 20 станцій в 2015 році. Тойота й Air Liquide створили спільне підприємство для будівництва 2 водневих станцій, які побудували в 2015 році. Осака-Газ побудували 2 станції за 2014-

2015 роки.

Південна Корея: В 2014 році введена в експлуатацію лише одна воднева станція, ще 10 станцій заплановані на 2020 рік.

Європа.

За станом на 2019 рік у Європі вже працюють більше 30 станцій, здатних заповнювати 4-5 автомобілів у день.

Данія: В 2015 році в мережі водневих мереж було 6 суспільних станцій. H2 Logic, що входить в NEL ASA, будує завод у Хернінзі для випуску 300 станцій у рік, кожна з яких може видавати 200 кг водню в день і 100 кг за 3 години.

Фінляндія: В 2016 році працюють суспільні станції, одна з них рухлива. Станція заправляє автомобіль 5 кг водню за три хвилини. Завод по створенню водню працює в місті Коккола.

Німеччина: За станом на вересень 2018 року працює 15 загальнодоступних водневих станцій. Більшість, але не всі із цих станцій експлуатуються партнерами Clean Energy Partnership (CEP). З ініціативи H2 Mobility число станцій у Німеччині повинне зрости до 400 станцій в 2023 році. Ціна проекту 350 мільйонів євро.



Рисунок 13.13 – Сучасна воднева заправна станція в Німеччині: коштує \$2-3 млн. і здатна заправити лише 30 автомобілів за добу

Ісландія: Перша комерційна воднева станція відкрита в 2003 році в рамках ініціативи країни по рухові убік "водневої економіки".

Італія: У 2015 році в Больцано відкрита перша комерційна вод-

нева станція.

Нідерланди: Першу суспільну автозаправну станцію відкрили 3 вересня 2014 року в Роуні біля Роттердама. Станція використовує водень із трубопроводу з Роттердама в Бельгію.

Норвегія: У лютому 2007 року відкрита перша в Норвегії воднева заправна станція Нупог. Uno-X у партнерстві з NEL ASA планує побудувати до 20 станцій до 2020 року, включаючи станцію з виробництвом водню на місці з надлишкової сонячної енергії.

Об'єднане Королівство.

В 2011 році відкрилася перша суспільна станція в Суїндоні. В 2014 році Nytec відкрив станцію London Hatton Cross. 11 березня 2015 року проект по розширенню мережі водневих мереж у Лондоні відкрив перший супермаркет, розташований на заправній станції для водню в Sensbury's Hendon (північно-західний пригород Лондона).

Каліфорнія попереду планети всієї в області фінансування й будівництва водневих заправних станцій. За станом на середину 2018 року в Каліфорнії було відкрито 35 роздрібних водневих станцій, а ще 22 - на різних етапах будівництва або планування.

Каліфорнія продовжує фінансувати будівництво інфраструктури, а Енергетична комісія має право виділяти до \$20 млн. на рік до 2024 року, поки не запрацює 100 станцій. Для північно-східних штатів планують побудувати 12 роздрібних станцій. Перші відкриються до кінця 2019 року. Некомерційні станції в Каліфорнії й станції побудовані в інших штатах США обслуговують водневі легкові авто, автобуси, а також використовують для дослідницьких і демонстраційних цілей.

Витрати на утримання водневих станцій.

Водневим заправленням не так просто замінити велику мережу бензозаправних станцій (в 2004 році у Європі й США було 168 000 точок). Заміна бензинових станцій на водневі коштує \$1,5 трильйона. При цьому ціна облаштуваності водневої паливної мережі в Європі може бути в 5 разів нижчою ніж ціна заправної мережі для електромобілів. Ціна одної водневої станції \$2-3 мільйони.

При цьому, воднева мережа буде однаково дешевше мережі станцій для електромобілів по окупності. Причина у швидкому заправленні водневих автомобілів (від 3 до 5 хвилин). На мільйон автомобілів на паливних водневих елементах потрібно менше водневих стан-

цій, ніж зарядних станцій на мільйон акумуляторних електромобілів.

У майбутньому питання заправлення воднем буде вирішуватися для людини залежно від його місця проживання. АЗС будуть заправляти автомобілі воднем, доставленим на танкерах з великих паливних підприємств. Поставки з таких підприємств нічим не будуть уступати поставкам бензину з нафтоперегінних заводів. У перспективі, місцеві водневі заводи навчатися мати користь із місцевих ресурсів і з поновлюваних джерел енергії.

Підсумовуючи "водневу тему", можна виділити наступні **фактори, що стримують широке впровадження водневих технологій:**

- відсутність водневої інфраструктури (частково цю проблему можна вирішити зокрема побудовою домашніх заправок при приватних житлових будинках);
- недосконалі технології зберігання водню;
- відсутність стандартів безпеки, зберігання, транспортування, застосування і т.п.;
- розповсюджені сучасні способи безпечного зберігання водню вимагають більшого обсягу паливних баків, ніж для бензину. Тому в розроблених на сьогоднішній день автомобілях заміна палива на водень приводить до значного зменшення обсягу багажника. Можливо в майбутньому ця проблема буде переборена, але швидше за все, за рахунок деякого збільшення габаритів легкових авто. (Для інших класів автомобілів (автобусів, вантажних автомобілів, різноманітних спеціальних автомашин) проблема збільшення габаритів транспортного засобу не настільки гостра. Зокрема, на автобусах паливні елементи можуть розміщатися на даху кузова, подібно тому, як це робиться, наприклад, із тролейбусним електроустаткуванням.

Небезпека водневого палива.

Небезпека використання водню як палива пов'язана із двома факторами: високою летючістю водню, через яку він проникає через дуже невеликі зазори, і легкість запалення. З іншого боку, при пробіі паливного бака бензин розливається калюжею по поверхні, тоді як водень випаровується у вигляді спрямованого струменя. Однак є небезпека заповнення замкненого простору салону автомобіля воднем.

Ключові фактори які обмежують використання водню на транспорті:

- суміш водню з повітрям вибухонебезпечна. Водень більш небезпечний, ніж бензин, тому що горить у суміші з повітрям у більш широкому діапазоні концентрацій. Бензин не горить при лямбда менш 0,5 і більш 2, водень при таких співвідношеннях горить чудово. Але водень, що зберігається в баках при високому тиску, у випадку пробою бака дуже швидко випаровується. Для транспорту розробляються спеціальні безпечні системи зберігання водню - баки з багат шаровими стінками, зі спеціальних матеріалів і т.п. (приклад - бак з нанотрубок, заповнених воднем.) Але однаково це в цілому здорожує весь цикл експлуатації транспортного засобу, лягаючи витратами на плечі споживача;
- воднева силова установка на базі традиційного ДВЗ значно складніша й дорожча в обслуговуванні, чим звичайний ДВЗ (особливо дизельний). По даним Массачусетського технологічного інституту, експлуатація водневого автомобіля на даному етапі розвитку водневих технологій обходиться в сто разів дорожче, чим бензинового;
- поки немає достатнього досвіду тривалої експлуатації водневого транспорту;
- немає можливості швидкого дозаправлення в шляху з каністри або від іншого автомобіля;
- для заправлення воднем потрібно побудувати розгалужену мережу заправних станцій. Для заправних станцій, що заправляють автомобілі рідким воднем, вартість устаткування вища, чим для заправних станцій, що заправляють автомобілі рідким паливом (бензином, етанолом і дизельним паливом). (Згідно GM, у США, будівництво 12 тисяч водневих заправних станцій в 2005 році оцінювалося в \$12 млрд., тобто \$1 млн. на одну заправну станцію, у той час як комплект устаткування для бензинових заправних станцій коштує від \$40 тис., у середньому \$100-200 тис.);
- ціна водню приблизно 8 євро за літр;
- летючість водню найвища серед газів. Водень важко зберегти в рідкому виді, це утрудняє зберігання водню, транспортування й використання в баку, тому що паливо повністю випа-

- рується з бака за короткий час. За дев'ять днів випаровується півбака палива BMW Hydrogen;
- у даний час водень виробляється шляхом витрат значної кількості електроенергії.

Питання для самоперевірки

1. Розкажіть про використання водню, як джерела енергії для транспортних засобів.
2. Поясніть можливість застосування паливних елементів, як способу отримування електричної енергії на борту автомобіля.
3. Які фактори стримують впровадження водневих технологій?
4. Які можливі конструктивні схеми використання водню у існуючих ДВЗ?
5. Чому недоцільно використовувати водень у якості палива для традиційних ДВЗ?
6. Розкажіть про принцип роботи водневого паливного елемента.
7. З яких основних конструктивних елементів складається воднева силова установка Toyota Mirai?
8. Розкажіть принцип роботи силової установки Toyota Mirai.
9. З яких основних конструктивних елементів складається воднева силова установка Honda Clarity?
10. Назвіть методи одержання водню.
11. Поясніть схему одержання водню шляхом електролізу води.
12. Які існують способи зберігання водню?
13. Що стримує розвиток мережі водневих заправних станцій?
14. Які ключові фактори що обмежують використання водню на транспорті?
15. В чому полягає основна небезпека використання водню?

ЛЕКЦІЯ № 14. НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

План лекції. Екологічна безпека ДВЗ. Норми токсичності Євро. Альтернативні види палива ДВЗ. Біопаливо як засіб вирішення кліматичної проблеми. Напрямки і перспективи подальшого конструктивного вдосконалення ДВЗ.

Література: [1], с. 6-9; [16], с. 39-41; [40].

Ера двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) ще далека від занепаду - такої думки дотримується досить велика кількість фахівців провідних автоконцернів світу, і навіть простих автолюбителів. І для такого твердження в них є всі підстави. По великому рахункові, існує тільки дві серйозні претензії до ДВЗ – значні витрати палива і шкідливий вихлоп. Звісно, запаси нафти не безмежні, але ж автомобілі є одними з основних її споживачів. Вихлопні гази отруюють природу й людей і, накопичуючись в атмосфері, створюють парниковий ефект. Парниковий ефект приводить до зміни клімату й далі до інших екологічних лих.

Зі вказаними обома недоліками конструктори й інженери за останні десятиліття навчилися досить ефективно боротися, переконливо довівши усім скептикам, що у ДВЗ є ще невикористані резерви для подальшого розвитку й удосконалювання.

Так істотне зниження витрати палива було досягнуто завдяки впровадженню в конструкцію двигуна ряду технічних нововведень. Першим кроком став перехід від карбюраторних двигунів до систем впорску палива. Сучасні системи упорскування забезпечують подачу палива в циліндри під високим тиском, у результаті чого відбувається його тонке розпилення й гарне змішування з повітрям.

У ході такту стиску паливо впорскується в камеру згоряння точно дозованими порціями до 5-7 раз. Використання наддування, збільшення числа клапанів, підвищення ступеня стиску також дозволили більш повно спалювати робочу суміш. Оптимізація форми камери згоряння, днища поршнів, застосування систем з регульованими фазами газорозподілу сприяли поліпшенню процесів сумішоутворення. У

результаті двигун може працювати на більш бідних сумішах, заощаджуючи паливо й знижуючи викид шкідливих речовин. Отже подальші дослідницькі роботи в цьому напрямку будуть вестись і надалі.



Рисунок 14.1 – Шведський сміттєвоз Volvo на гібридній тязі

На сьогодні у сучасних автомобілях все більш широко застосовується система старт-стоп, що дає помітну економію палива в міському режимі руху. Ця система автоматично виключає двигун при зупинці автомобіля. Запуск проводиться при натисканні на педаль зчеплення (в автомобілях з механічною коробкою передач) або при відпусканні педалі гальма (в автомобілях з автоматичною коробкою). Це технічне рішення у найближчий час має законодавчо стати обов'язковим до використання на всій нових автомобілях.

Система рекуперації енергії гальмування, що вперше з'явився на гібридних автомобілях, поступово перекочувала й на звичайні. Кінетична енергія автомобіля, що вповільнюється, яка раніше розтрачувалася на нагрівання деталей гальмової системи, тепер перетворюється в

електричну й використовується для підзарядки акумулятора. Витрата палива при цьому знижується до 3 %.



Рисунок 14.2 - Американська компанія кур'єрської служби UPS, крім натурального газу сьогодні вже широко використовує інші альтернативні палива для своїх автопарків: пропан, етанол, поновлюване дизельне паливо (RLNG) й електроенергію

Дуже важливою обставиною є те, що поліпшення технічних характеристик двигунів відбувається при неухильному зниженні їхнього об'єму. Наприклад, фольксвагеновський мотор 1,4 TSI, визнаний кращим двигуном 2010 року, при обсязі 1390 см^3 розвиває потужність до 178 к.с. Тобто, з кожного літра знімається 127 к.с.! Отже питома витрата палива за минулі 20-30 років була знижена майже у два рази. А раз знижується витрата палива, відповідно знижується й викид шкідливих речовин, та й запаси нафти можна розтягти на більший строк.

Усі перераховані вище заходи знижують шкідливі викиди, так би мовити побічно, за рахунок поліпшення технічних характеристик. Але вже є ряд систем, призначення яких – безпосередньо зменшувати кількість шкідливих речовин у вихлопних газах.

Насамперед це, звичайно ж, каталітичний нейтралізатор і система рециркуляції вихлопних газів EGR. У нейтралізаторі шкідливі речовини, що містяться у вихлопних газах, вступають у хімічну реакцію з речовинами, нанесеними на його щільник. У результаті реакції шкідливі речовини розкладають на нешкідливі складові.



Рисунок 14.3 – Процес зарядки електромобіля у сучасному західноєвропейському місті

Система EGR (Exhaust Gas Recirculation) має більш "вужку" спрямованість. Вона призначена для зниження вмісту оксидів азоту у вихлопних газах на режимах прогріву й різкого прискорення, коли двигун працює на збагаченій суміші. Принцип роботи системи полягає в перенапрямку частини вихлопних газів назад у циліндри. Це викликає зниження температури горіння й, відповідно, концентрації оксидів азоту. При роботі двигуна не всі вихлопні гази попадають у випуск

систему. Частина їх проривається в картер. Для запобігання їхнього потрапляння в атмосферу використовується система вентиляції картера. Пари бензину так само, як і вихлопні гази, містять шкідливі для людини речовини. Тому на сучасних автомобілях вже встановлюється система поглинання пар бензину. Використання таких систем на всіх нових та розроблюваних автомобілях у найближчий час теж має стати обов'язковим для всіх автовиробників.

Усі перераховані вище системи універсальні, тобто використовуються як на бензинових моторах, так і на дизельних. Однак вихлопні гази дизеля відрізняються підвищеною концентрацією оксидів азоту й сажі. Тому у випускній системі дизелів додатково встановлюється сажевий фільтр.



Рисунок 14.4 – Електровантажівка Scania під час руху по "e-highway" на сході центральної Швеції

У деяких конструкціях може використовуватися **система SCR (Selective catalytic reduction)** або, у вільному перекладі - упорскування сечовини. Принцип роботи цієї системи: водяний розчин сечовини впорскується у вихлопну систему перед каталізатором. У результаті хімічної реакції майже половина високотоксичних оксидів азоту пере-

творюється у звичайний нешкідливий азот.

Вибір підходящого типу двигуна залежить від класу автомобіля. Згідно досліджень проведених компанією Bosch, сучасний дизельний двигун споживає до 25 % менше палива й менше забруднює навколишнє середовище, проте бензиновий має меншу вартість, його страхування й експлуатація обходяться дешевше. Однак якщо річний пробіг перевищує 15 000 кілометрів, купувати дизель вигідніше.

Сучасні бензинові силові агрегати досить ефективні в компактних автомобілях, а нинішні дизелі дозволяють досягати низької витрати палива й дають задоволення від водіння в більших універсалах. Бензинові мотори забезпечують чудову динаміку "гарячим" спортивним автомобілям, а високий крутний момент дизелів як не можна до речі пасує позашляховикам та великим вантажівкам.

Підсумовуючи сказане можна стверджувати, що в найближчі десятиліття ми будемо і надалі співіснувати із двигунами внутрішнього згоряння. Для цього є вагомі технічні й економічні причини. Налаштованість технології виробництва ДВЗ забезпечує їх порівняно низьку вартість. Удосконалювання робочого процесу дозволило одержати високі характеристики й знизити шкідливі викиди.

Ріст продажів "зелених" автомобілів – електрокарів, багато в чому стимульований урядовою підтримкою. А тому як тільки держава згортає програму знижок на такі "екологічні автомобілі", попит на них стрімко падає.

Отже об'єктивний факт – на сьогоднішній день, всі численні спроби створити гідну альтернативу ДВЗ поки що так і не увінчалися успіхом. Якщо ж навіть принципово новий двигун незабаром і з'явиться, то для його впровадження в серійне виробництво знадобляться величезні капіталовкладення й тривалий проміжок часу.

А у нинішній нестабільній економічній ситуації у світі, коли існує переконлива загроза настання довготривалої економічної рецесії у провідних західних економіках, жоден провідний автоконцерн не ризикує йти на такі колосальні фінансові витрати.

Ще одним переконливим доказом того що традиційні ДВЗ ще далекі від занепаду є щорічний звіт про перспективи енергетичних ринків Міністерства енергетики США - Annual Energy Outlook (EIA). Так згідно їхніх розрахунків, на основі урахування усіх сучасних технологій, однозначно стверджується, що електромобілі не будуть користуватися масовим попитом навіть у 2040 році.

Тобто фахівці з міністерства енергетики США переконливо, з цифрами, доводять що навіть у віддаленому майбутньому електромобілі не зможуть потіснити автомобілі із традиційними двигунами внутрішнього згоряння, і майже 80 % автомобілів на дорогах будуть працювати за рахунок горючого палива. Фахівці порахували і довели, що автовиробники віддадуть перевагу створенню ефективних двигунів внутрішнього згоряння радикальним змінам свого модельного ряду.

Міністерство енергетики США зокрема дослідило питання про тип автомобілів, який буде домінувати в майбутньому. За даними експертів, в 2040 році 78 % автомобілів на дорогах США будуть оснащені двигунами внутрішнього згоряння, що працюють на горючому паливі природного походження.

При цьому мінімум 42 % усіх автомобілів із ДВЗ будуть оснащені системами - "старт-стоп" і рекуперативними гальмами, які дозволяють зберігати отриману від затримки машини енергію. Гібриди й "чисті" електромобілі що заряджаються від електромережі, складуть лише по 1 % автопарку відповідно. Традиційні гібриди, які користуються й ДВЗ, і електромотором, складуть близько 5 % автомобілів на дорогах.

У 2015 році топ-менеджери декількох найбільших у світі автомобільних корпорацій вже висловлювалися про те, що автомобілі, які повністю працюють на електротязі, позбавлені майбутнього. Гібриди із ДВЗ і електромоторами, навпаки, мають велике майбутнє, вважають автомобільні менеджери. У подібному ключі, зокрема, висловилися глави Toyota, Volvo і Renault-Nissan.

Раніше кількаразові маркетингові дослідження встановили, що великому попиту на електромобілі заважає висока вартість таких машин. Крім того, американське агентство JD Power установило, що майже половина нинішніх покупців електромобілів обирають таку машину тільки з іміджевих міркувань, а не керуючись турботою про екологію або прагненням заощаджувати.

Разом з тим, середня витрата палива автомобілів у США повинна скласти в 2040 році 6,3 л на 100 км шляху проти нинішніх 11 л. Проте, даний результат все-таки відстає від завдання, поставленою ще адміністрацією президента США Барака Обами на 2025 рік. На думку глави держави, на цей термін усі нові автомобілі на ринку США повинні споживати не більш 4,3 л на 100 км шляху.

За даними міністерства енергетики, з урахуванням постійного росту видобутку нафти, в 2040 році літр бензину буде коштувати у

США близько \$1,03. Такий же об'єм дизельного палива буде коштувати в 2040 році вже \$1,3. Варто відзначити, що легкові автомобілі з дизельними двигунами рідко зустрічаються в США: за прогнозом ЕІА їхня частка до 2040 року зросте лише до 4% з нинішніх 2%. Разом з тим, у міністерстві припускають, що кількість автомобільних поїздок до 2040 року збільшиться на 30%.

Отже у той час як світові лідери автопрому відмовляються від двигунів на електротязі, влади ряду європейських країн, навпаки, бачать в електромобілях певний потенціал і обнулюють мита на електромобілі. Стимулюючи таким чином автовиробників крупно вкладатися не тільки у виробництво електромобілів але й вести подальші наукові дослідження в цьому напрямку.

Питання для самоперевірки

1. Які суттєві недоліки властиві сучасним ДВЗ?
2. Які напрями розвитку силових установок вважають перспективними у вирішенні проблем економічного споживання палив нафтового походження і дотримування екологічних вимог?
3. Розгляньте можливі варіанти об'єднання різних видів двигунів в єдину силову установку.
4. Обґрунтуйте можливість застосування як моторного палива енергоносіїв з поновлювальних джерел.
5. Коротко розкажіть про екологічні стандарти Євро.
6. В чому полягає суть відповідності автомобільного палива екологічним стандартам Євро?
7. Що таке біопаливо?
8. Чи є на ваш погляд конструктивні резерви у традиційних ДВЗ для їхнього подальшого розвитку?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Основна

1. Транспортні енергетичні установки (традиційні, нетрадиційні та альтернативні), принцип роботи та особливості будови : навч. посіб. / Ю. Ф. Гутаревич та ін. К. : НТУ, 2015. 244 с.
2. Абрамчук Ф. І., Гутаревич Ю. Ф., Долганов К. Є. Автомобільні двигуни: Підручник. К. : Арістей, 2006. 476 с.
3. Загальний курс транспорту: Підручник / М. Ф. Дмитриченко, І. І. Кельман, Є. К. Вільковський, З. І. Пеклич, О. І. Мельниченко Львів, 2011. 524 с.
4. Двигатели внутреннего сгорания : Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. М. : Машиностроение, 1984. 384 с.
5. Двигатели внутреннего сгорания. Системы поршневых и комбинированных двигателей. Под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. М. : Машиностроение, 1985. 276 с.

Додаткова

6. Гроз Х., Русс Г. Бензиновые и дизельные двигатели. М. : "Издательство "За рулем", 2013. 272 с.
7. Курасов В. С. Теория двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие. Краснодар, КубГАУ. 2013. 86 с.
8. Кузнецов А. С. Устройство и работа двигателя внутреннего сгорания: учеб. пособие. М. : Издательский центр "Академия", 2011. 80 с.
9. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. М. : "За рулем", 2004. 480 с.
10. Системы управления и основы диагностики дизельных двигателей : учебное руководство. Германия : Mazda Motor Europe GmbH., 2010. 263 с.
11. Корнилов Э. В., Фока А. А., Бойко П. В. Судовые главные двигатели с электронным управлением. Одесса, Экспресс-Реклама, 2010. 224 с.
12. Возницкий И. В. Судовые Двигатели внутреннего сгорания : в 2 т. М. Моркнига, 2008. Т 1. 282 с.

13. Возницкий И. В. Судовые Двигатели внутреннего сгорания : в 2 т. М. Моркнига, 2008. Т 2. 470 с.
14. Автомобильные двигатели. Курсовое проектирование: учеб. пособие / М. Г. Шатров, И. В. Алексеев, С. Н. Богданов и др. ; под ред. М. Г. Шатрова. М. : Издательский центр "Академия", 2011. 256 с.
15. Тер-Мкртчян Г. Г. Двигатели внутреннего сгорания с нетрадиционными рабочими циклами М. : МАДИ, 2015. 80 с.
16. Пушкарева О. Б. Энергетические установки автомобилей и тракторов. Екатеринбург : ФГБОУ ВПО "Уральский государственный лесотехнический университет", 2015. 48 с.
17. Мищенко А. И. Применение водорода для автомобильных двигателей. К. : Наукова думка, 1984. 143 с.
18. Копытов В. Газификация конденсированных топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития. М. : Litres, 2017. 504 с.
19. Тер-Мкртчян Г. Г. Управление движением поршней в двигателях внутреннего сгорания. М. : Metallurgizdat, 2011. 304 с.
20. Кей Энтони Л. История разработки и создания реактивных двигателей и газовых турбин в Германии (1930-1945). Рыбинск : НПО Сатурн, 2006. 329 с.
21. Газотурбинные энергетические установки : учебное пособие для вузов / С. В. Цанев и др. ; под ред. С. В. Цанева. М. : Издательский дом МЭИ, 2011. 428 с.
22. Вертолетные газотурбинные двигатели / В. А. Григорьев, В. А. Зрелов, Ю. М. Игнаткин и др.; под общ. ред. В. А. Григорьева и Б. А. Пономарева. М. : Машиностроение, 2007. 491 с.
23. Автомобильные двигатели : учебник для студ. высш. учеб. заведений / М. Г. Шатров, К.А. Морозов, И. В. Алексеев и др. ; под ред. М.Г.Шатрова. М. : Издательский центр "Академия", 2011. 464 с.
24. Тер-Мкртчян Г. Г., Кутенев В. Ф., Яманин А. И. Вопросы теории двигателей с управляемым движением поршней с плоскими преобразующими механизмами. М. : НАМИ, 2004. 240 с.
25. Машиностроение. Энциклопедия. М. : Машиностроение, 2013. Т. IV-14 : Двигатели внутреннего сгорания / под ред. А. А. Александрова и Н.А. Иващенко. 784 с.
26. Ридер Г., Хупер Ч. Двигатели Стирлинга. М. : Мир, 1986. 464 с.
27. Уокер Г. Двигатели Стирлинга М. : Машиностроение, 1985. 408 с.
28. Трухов В. С., Турсунбаев И. А., Умаров С.Я. Расчет параметров

внутреннего теплообменного контура двигателя Стирлинга. Ташкент : Фан, 1979. 80 с.

29. Мышинский З. Л., Рыжков-Дудонов М. А. Судовые поршневые двигатели внешнего сгорания (двигатели Стирлинга). Л. : Судостроение, 1976. 76 с.

Інформаційні ресурси

30. A Compelling Alternative to the conventional Internal Combustion Engine URL: <http://www.scuderigroup.com/our-patents/> (дата звернення: 12.04.2019)
31. Platform for Complete Combustion <http://www.zajacmotors.com/technology.phtml> (дата звернення: 12.04.2019)
32. Tour Engine Technology URL: <http://www.touengine.com/technology> (дата звернення: 12.04.2019)
33. Alternative Motorentchnik bei Verbrennungsmotoren URL: <http://www.mein-werkstattwagen.de/wissen/alternative-motorentchnik-bei-verbrennungsmotoren/> (дата звернення: 12.04.2019)
34. Six-stroke engine high level of efficiency URL: <http://bajulazsa.com/Site/sixstroke.html> (дата звернення: 12.04.2019)