

Перспективи застосування двигуна швидкого внутрішнього згоряння у приводі мобільної техніки – Частина II: Енергетична ефективність теплового двигуна

П. М. Гащук¹ • С. В. Нікіпчук²

¹ Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна;

² Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Received: 12 March 2020 / Accepted: 25 May 2020

Анотація. *Отто-двигун виявився переможцем у технічному протистоянні з Дизель-двигуном. Та все ж його позиції трактують як хисткі і намагаються віднайти засоби принципового його удосконалення. В роботі з'ясовано, що більшість нетипових схем двигунів внутрішнього згоряння – так звані Z-, Scuderi-, Zajac-, DIRO-двигуни, п'ятитактний Schmitz-двигун тощо – не вносять принципових змін у технологію перетворення теплоти у механічну роботу. Тому нема підстав сподіватись на істотні зрушення в напрямі підвищення ефективності енергоперетворення. Проте в інших відношеннях нововведення є істотними: Z-двигун обов'язково кращий від звичного за масогабаритними параметрами; у DIRO-двигуні пальна суміш набуває можливості згоряти триваліше і якісніше; Zajac-двигун втілює ефективний процес неперервного зовнішнього згоряння тощо.*

Загалом теорія, «сумніваючись» в ефективності перелічених ідей, натомість обов'язково визнає ефективність керування структурою робочих циклів, як вона беззастережно визнає ефективність вимикання циліндрів чи керування частотою робочих циклів в двигуні за змінних навантажень. Значної користі є підстави сподіватись від просування технології об'ємного запалювання гомогенізованої робочої суміші стисненням – технології, відомої як Homogeneous Charge Compression Ignition. Це гранично підсилює корисний ефект від швидкого внутрішнього згоряння, властивого саме Отто-двигуну. Відтак є підстави вважати реальними можливості істотного удосконалення саме двигуна Отто, придатного для приводу мобільних машин з великим ступенем автономності.

Ключові слова: *двигун швидкого внутрішнього згоряння, коефіцієнт корисної дії, робочий об'єм, мобільна техніка, енергетична ефективність, екологічність*

Вступ

Двигун швидкого внутрішнього згоряння (Отто-двигун) виявився переможцем у технічному протистоянні з більшістю теплових двигунів для машин високого рівня автономності, і зокрема – у протистоянні з Дизель-двигуном, який майже завжди вважався взірцевим втіленням енергетичної ефективності. Але відтоді, як був винайдений, Отто-двигун практично не зазнав жодних змін по-справжньому революційного рівня. Тому постійно здається, що вже час принципово втрутитися в його будову й засади роботи, спираючись на, здавалося б, дуже вагомі новітні досягнення науки й технології. Тож не дивно, що час-від-часу інженерна думка таки продукує ідеї істотного удосконалення такого стибу теплового двигуна. Серед багатьох інших особливу увагу привертають ідеї так званих Z-, Scuderi-, Zajac-, DIRO-, Schmitz-двигунів тощо. Але минають роки, і, здавалося б, ці істотні за задумом удосконалення вже мали б знайти своє втілення в реальних конструкціях двигунів. Та насправді цього не стається. Отже практика не схильна беззастережно визнавати їх ефективність.

Важливо підкреслити, що згадані ідеї продукує не теорія як така, а впливають вони з інженерного середовища. Але було б логічно, аби теорія висунула на догоду практиці також і свій присуд.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Серед багатьох напрямів удосконалення двигуна внутрішнього згоряння тільки окремі з них на тривалий час привернули до себе загальну увагу інженерів і вчених. Серед них – спроба поєднати в одному двигуні

✉ С. В. Нікіпчук
nikipch@gmail.com

✉ П. М. Гащук
petroh@meta.ua

двотактність і чотиритактність [1, 2]. Ще приклад: втілення принципу Homogenous Charge Progressive Combustion [3] – варіації принципу Homogeneous Charge Compression Ignition Engine. Цікавою виявилась ідея п'ятитактного двигуна [4, 5], яка знову таки передбачає поєднання чотири- і двотактної схеми роботи двигуна [6–9]. Не менш цікавою виявилась зовсім відроджена ідея шеститактного двигуна [10, 11]. Можливість використання шести тактів досліджувалась, можна казати, всебічно й ретельно [12–16]. Відокремлені від робочого циліндра комори згоряння і нагрівання впроваджено також і в шеститактний двигун Баюлаза [17, 18]. Нового втілення набула теорія керування структурою робочих циклів [19–21]. Не можна ігнорувати й перспективи використання відносно давньої технології керування структурою робочих циклів [22].

Перелічені можливості удосконалення двигуна навряд чи сумісні одна з одною. Але навіть окремо кожна із згаданих тут ідей не знайшла загального визнання і широкого втілення в реальних конструкціях двигунів внутрішнього згоряння. Тож виникає проблема критичного оцінювання перспектив удосконалення двигунів.

Мета та завдання дослідження

Мета статті – з'ясувати, наскільки нарізлі на сьогодні претензії до звичного двигуна внутрішнього згоряння є об'єктивними, які альтернативи йому загрожують і якими можуть бути перспективи його застосування в приводі мобільної техніки з високим рівнем автономності і далекого радіусу дії. Для досягнення мети були окреслені такі завдання:

- визначити технічні рішення, що потенційно спрямовані на принципове за задумом й істотне за можливим ефектом удосконалення двигуна внутрішнього згоряння;
- провести критичний аналіз ефективності найвагоміших ідей удосконалення робочого циклу двигуна;
- на основі добутої інформації оцінити перспективи застосування двигунів швидкого внутрішнього згоряння для приводу машин з високим рівнем автономності й далекосяжності.

Методи та результати дослідження енергетичної ефективності двигунів внутрішнього згоряння

Компанією AumetOy (Фінляндія) було запропоновано особливий принцип роботи двигуна внутрішнього згоряння [1, 2]. Так званий Z-двигун (Z-engine) ніби поєднав в собі двотактність і чотиритактність (рис. 1: ВМП і НМП – верхнє і нижнє мертві положення механізму). Як і в двотактному двигуні, робочий цикл здійснюється впродовж одного оберту колінчастого вала, але при цьому двигун послуговується як впускними, так і випускними клапанами. Випуск відпрацьованих газів як і в звичайному чотиритактному двигуні здійснюється за допомогою витіснення робочого тіла поршнем, а не за допомогою продування свіжим повітрям. Тож є можливість уникати втрат свіжого заряду на протизагаду традиційному двотактному двигуну. Але часткове стиснення повітря відбувається поза робочим циклом – поршневим компресором. Це ніби втілення зовнішнього такту стискування (ідеї французького інженера Філіпа Лебона від 1801 року). Загальний геометричний ступінь стискування робочої суміші становить 15,5. Значна частина відпрацьованих

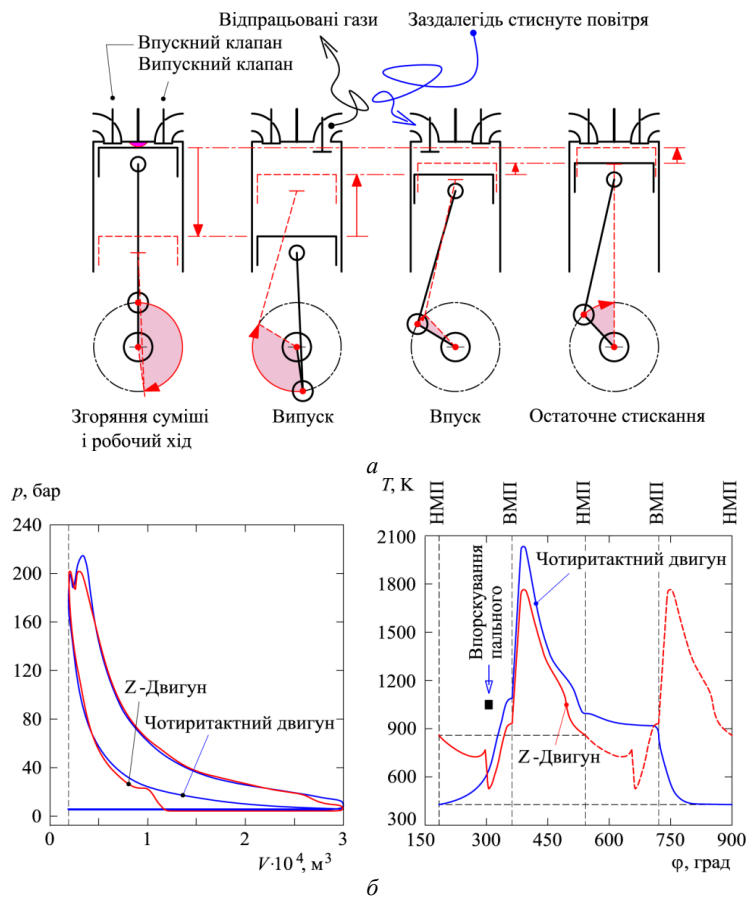


Рис. 1. Схема, що ілюструє принцип роботи Z-двигуна: а – такти робочого циклу; б – порівняльний приклад індикаторних діаграм

газів не полишає циліндр – цю обставину можна трактувати як своєрідну внутрішню газову рециркуляцію і використати її для організації НССІ-процесу згоряння свіжої пальної суміші.

Ще у 1891 році американська Backus Water Motor Company невеликими серіями спробувала виготовляти двигуни з так званим розділеним робочим циклом (Split-Cycle Combustion Engine – SCC-двигун). Через понад сто років ця ідея знову ожила у Scuderi-двигуні (власне американець Кармело Скудері – автор нової розробки). У Scuderi-двигуні чотири паралельні циліндри працюють двома парами: один з пари бере на себе виконання тактів впуску й стискування (це власне компресор чи холодний циліндр), а другий – виконання робочого і випускного тактів (це власне двигун, чи гарячий циліндр), рис. 2: p – тиск в циліндрі, S – переміщення поршня, S_m – хід поршня. Циліндри сполученні між собою каналом через клапанний механізм. Циліндр-компресор має впускний клапан, а циліндр-двигун – випускний клапан. Сполучний канал обслуговують два перепускні клапани (вони відкриваються назовні циліндрів).

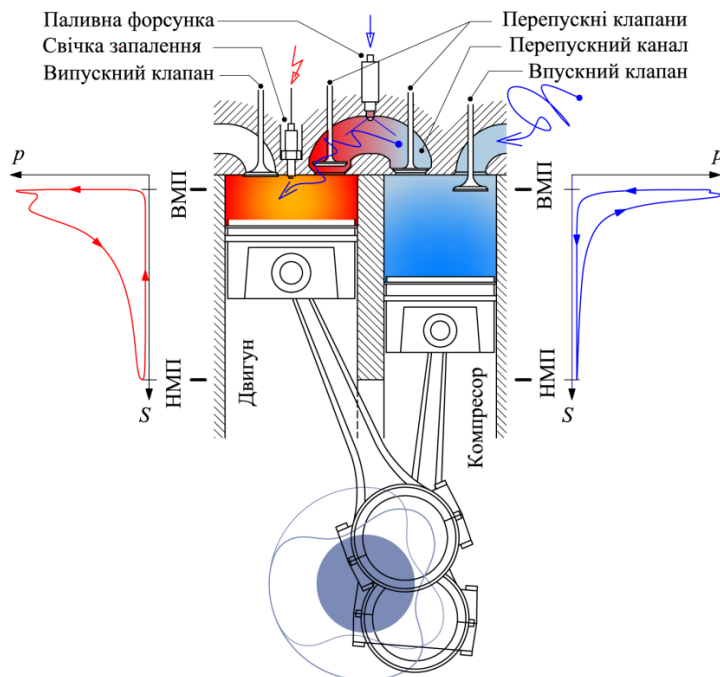


Рис. 2. Принципова схема Scuderi-двигуна

Робочий такт здійснюється з кожним оборотом колінчастого вала (але один-єдиний на два циліндри!). Запалення суміші відбувається після того, як робочий поршень двигуна починає рухатись від верхнього мертвого положення ВМП до нижнього мертвого положення НМП, – без випередження. Ходи й діаметри поршнів можна співвідносити по-різному.

Додатковий циліндр-компресор, що покликаний обслуговувати, так би мовити, основний циліндр-двигун, загалом в тепловій машині провокує додаткові втрати на тертя (механічне й немеханічне) – як і, зрештою, компресор, що обслуговує Z-двигун. На привід циліндра-компресора в Scuderi-двигуні, як і на привід компресора в Z-двигуні, відбирається механічна робота – власне готовий корисний продукт теплової машини (турбонаддув, зауважмо, використовує енергію відпрацьованих газів, що зазвичай губиться в глушнику за приблизно однакового протитиску на виході з робочого циліндра). Якщо в звичайному двигуні процес згоряння триває до 100 град повороту колінчастого вала, то в Scuderi-двигуні – 8...12 град. Таке швидке згоряння навряд чи можна вважати корисним ефектом в термодинамічному сенсі, а от в сенсі механіки-динаміки виникають підстави для занепокоєння через зростання нерівномірності обертання вала теплової машини. Та й загалом конструкція двигуна дуже далека від задоволення усталених вимог до сучасних транспортних двигунів, наприклад, навряд чи задоволеною стане вимога досягнення питомої потужності двигуна внутрішнього згоряння хоч би рівня 100 к.с./ $(\text{дм}^3 \text{ робочого простору})$.

До Scuderi-двигуна можна долучити повітряний ресивер, рис. 3. Це за задумом конструкторів дозволить реалізувати принаймні чотири режими роботи двигуна: звичайний для цього двигуна (ресивер від'єднано за допомогою додаткового клапана); компресорний, коли робочий циліндр від'єднано, а компресорний нагнітає повітря в ресивер, рекуперуючи енергію, приміром, у процесі сповільнення автомобіля; енергоощадний акумуляторний, коли компресорний циліндр від'єднано, а в робочий циліндр надходить стиснуте заздалегідь в

ресивері повітря та пальне; еспандерний акумуляторний, коли працює тільки робочий циліндр за рахунок акумульованої в ресивері енергії повітря цілком без надсилання пального.

Звісно, не можна зважати на декларовані, часом, твердження: що відпрацьовані гази Scuderi-двигуна з повітряним ресивером містять в собі на 80 % менше вуглекислого газу та окисів азоту, ніж відпрацьовані гази звичайного чотиритактного двигуна; що коефіцієнт корисної дії (ККД) Scuderi-двигуна на 5...10 % більший ніж у сучасних дизелів; що залучення турбонаддуву дозволить збільшити перевагу цього двигуна за рівнем ККД на 25...50 %. Наведені цифри цілком неправдиві, не мають жодних навіть реальних підстав.

Принцип поділяння робочого циклу на окремі частини втілено також і в інших двигунах, наприклад, в Tour-двигуні (автор ідеї – Х. Тур, США) чи НСРС-двигуні (НСРС – Homogenous Charge Progressive Combustion), що є різновидом НССІ-двигуна [3].

Американський інженер Джон Зейджак висунув іншу концепцію двигуна внутрішнього згоряння Zajas Motors з розділеним робочим циклом, але в певному сенсі близьку до концепції Scuderi-двигуна (рис. 4): повітря з циліндра стиснення потрапляє в комору згоряння, в якій створюється тиск пальної суміші, деє на 40 % вищий за звичайний для бензинових двигунів рівень. Комора згоряння загалом, її форма, принцип роботи, конструкція і матеріали, з яких вона виготовлена, – особливі.

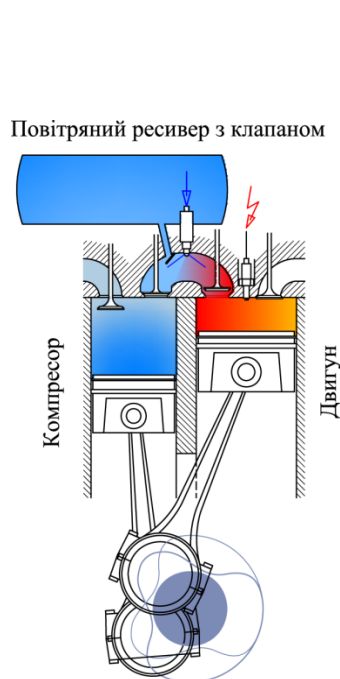


Рис. 3. Схема Scuderi-двигуна з повітряним ресивером

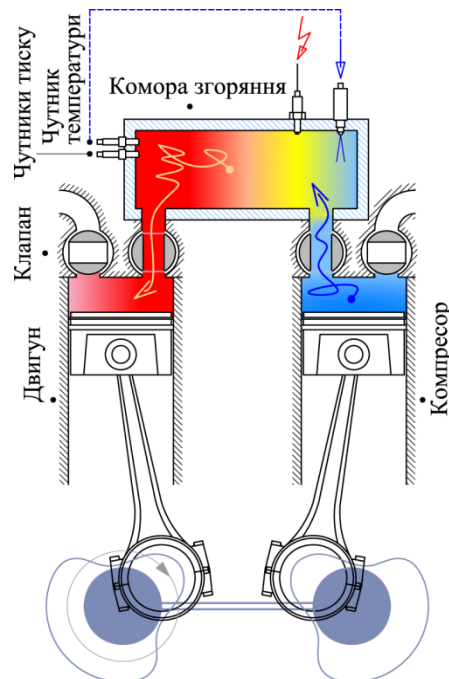


Рис. 4. Схема і модель Zajas-двигуна

Тож Zajas-двигун – теплова машина зовнішнього згоряння. Повітря змішується з паливом і займається в зовнішній коморі з теплоізоляційною оболонкою-кожухом. Процес згоряння суміші за часом набагато триваліший, ніж у звичайному двигуні внутрішнього згоряння. У середині комори створюється особливе середовище – досягнуті в ній температура і тиск зберігаються в 10...100 разів довше, ніж у коморі згоряння звичайного двигуна. Далі, розжарені гази через спеціальний клапан з комори згоряння потрапляють в робочий циліндр.

Комора згоряння – зовнішній елемент, який збільшує об'єм двигуна без прямого сприяння зростанню продуктивності (потужності). Винахідник наполягає, що його двигунощадніший на 15 % за дизельний і на 30 % за бензиновий аналоги за потужністю. Але прозорі сутнісні докази цьому не знаходять.

Для концепцій Scuderi Group, Zajas Motors, Tour Engine Inc. та НСРС спільним є те, що в робочому циклі двигуна внутрішнього згоряння процесові згоряння пального надано статус цілком окремого, особливого і самостійного. Таку саму концепцію сповідує також німецька фірма DIRO Konstruktions GmbH & Co. KG (свої рішення вона огородила німецьким, американським, японським патентами в 2001 році). У головку циліндра DIRO-двигуна (його означено як п'ятитактний) вмонтовано ротор, що містить в собі дві комори згоряння, рис. 5. Комори згоряння з інтервалом 180 град періодично з'єднуються з робочим простором циліндра – в кінці

такту стиснення і на початку такту робочого ходу. Ротор з камерами згоряння (комірний ротор) здійснює один оберт за чотири оберти колінчастого вала. При цьому забезпечується достатній час для ефективного згоряння паливо-повітряної суміші в кожній коморі.

Газорозподіл може здійснювати звичайний клапанний механізм (рис. 5, ліворуч). Або ж в роторі можна передбачити ще й додатково канали газорозподілу (рис. 5, праворуч). В цьому другому випадку можна вирізнити різні фази робочого циклу теплового двигуна, пов'язані, зокрема, з роботою однієї з комор згоряння (рис. 6: розпізнавані перерізи двигуна відповідають схемі ротора на рис. 5 праворуч). Процес сумішоутворення й згоряння, по суті, виділено в окремий такт. Вирізнено загалом такі такти, рис. 7: 1 – всмоктування; 2 – стискання; 3 – продукування робочого газу (впорскування пального і його випаровування та згоряння утвореної суміші); 4 – робочий хід (розширення робочого газу в циліндрі); 5 – випуск відпрацьованого газу (φ – кут повороту колінчастого вала, p_0 – тиск у довікллі). В чотиритактному двигуні такти 2 і 3 ніби суміщені в один такт.

Розосередити пальне в середовищі заряду повітря ідеально практично неможливо. Через неоднорідність пальної чи робочої суміші в просторі згоряння знайдуться осередки надмірної збідненості, де горіння взагалі неможливе через локальну нестачу пального, а також місця надмірного збагачення, де кисню з повітря для цілковитого окиснення пального не вистачить. Натомість істотна надмірність повітря в суміші, спровокує хімічну реакційність азоту повітря з відповідними втратами на це енергії і негативними наслідками для екології. Гомогенність обмежена ще й нерівномірністю розподілу температури в просторі і неоднорідністю його хімічного складу. До того ж, полум'я (як і будь-яка інша хвиля) поширюється з певною швидкістю, а не миттєво. До певної міри сприятливим є те, що пальне спалюють ізохорно в коморі згоряння ротора впродовж доволі тривалого за кутом повороту колінчастого вала періоду.

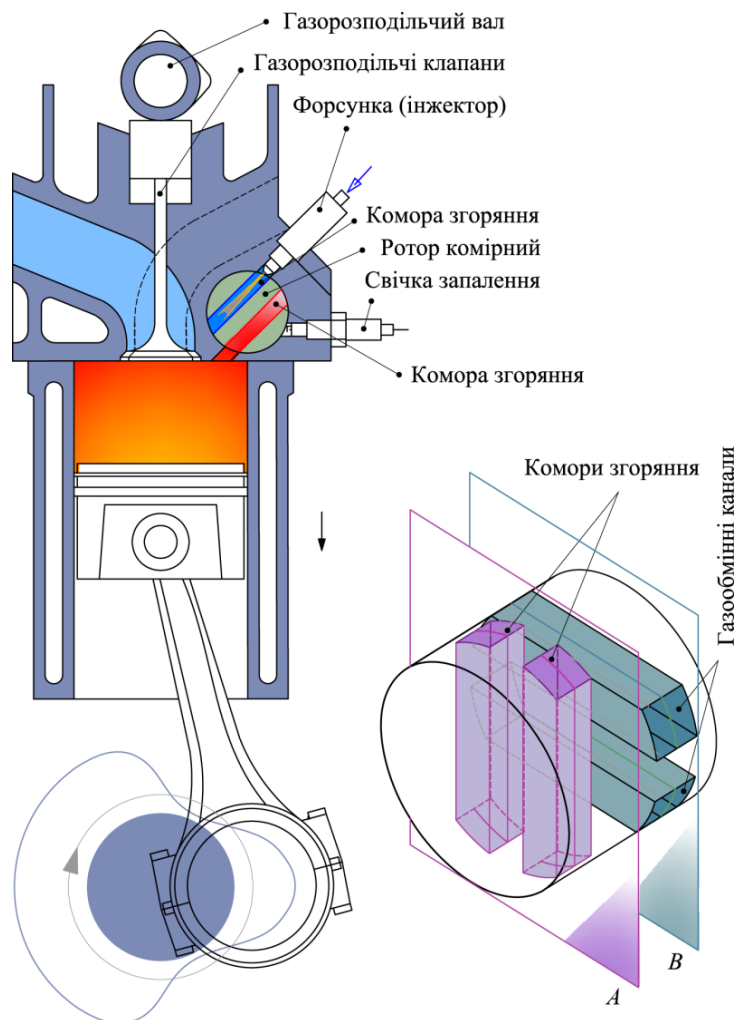


Рис. 5. Принципова схема DIRO-двигуна

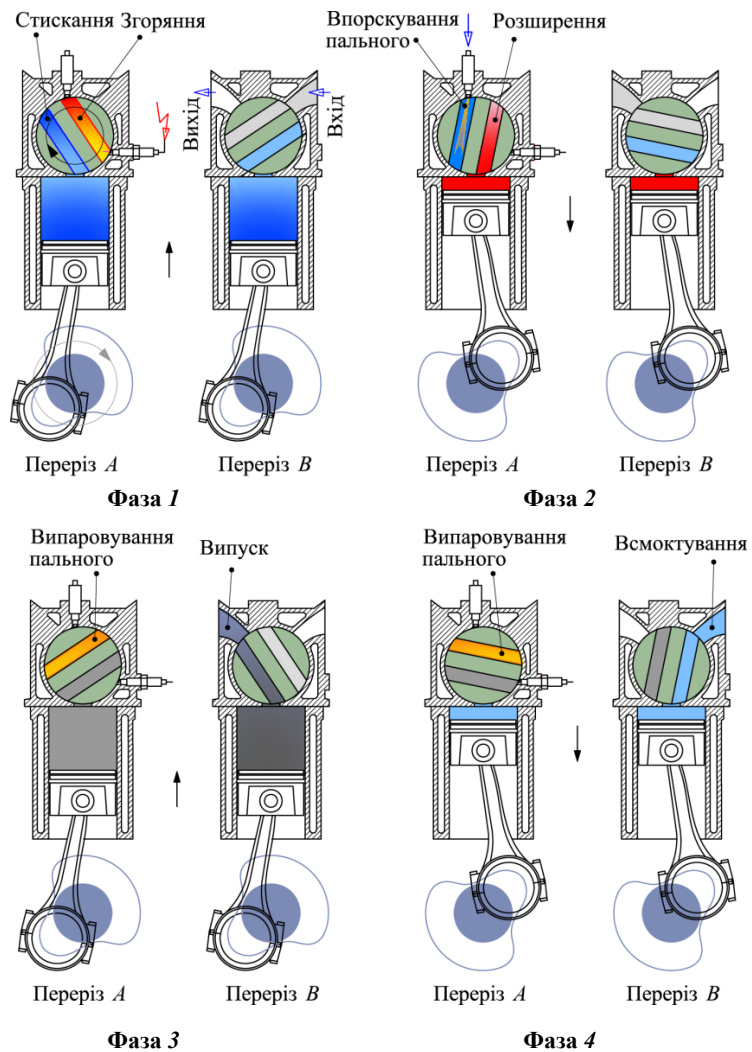


Рис. 6. Окремі фази робочого циклу DIRO-двигуна

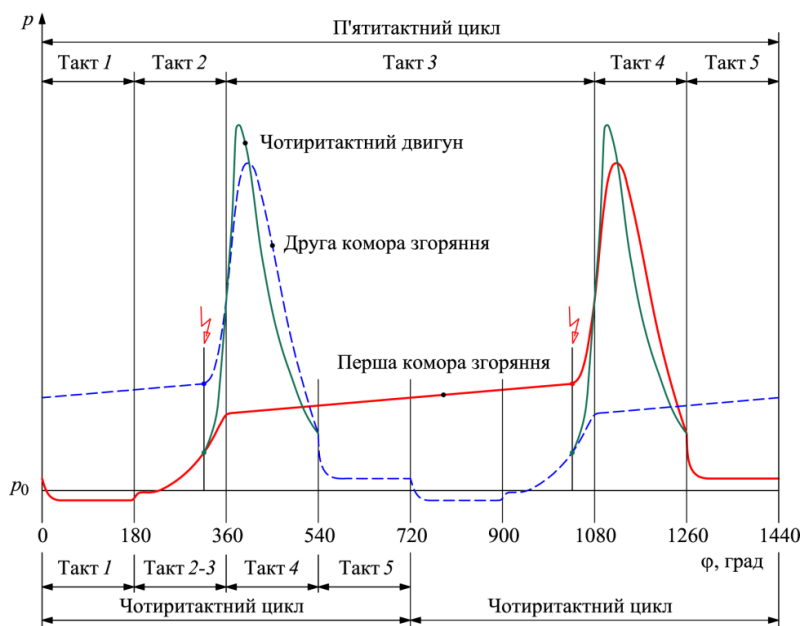


Рис. 7. Індикаторні діаграми робочого циклу DIRO-двигуна

П'ятитактний двигун трактувати можна й цілком по-іншому [4, 5]. Концепція, приміром, бельгійського винахідника Гергарда Шмітца (Gerhard Schmitz) у реалізації англійської компанії Imrog Engineering (рис. 8), відомої своїми двигунами для перегонних автомобілів, полягає у поєднанні чотири- і двотактної схеми роботи двигуна [6–9]. Меншого діаметра перший і третій циліндри високого тиску з трьох працюють за звичайним чотиритактним циклом. Більшого діаметра середній циліндр низького тиску – на залишковому розширенні відпрацьованих газів в двотактному режимі. Один розподільчий вал (що обертається синхронно з колінчастим валом) обслуговує чотири клапани циліндра низького тиску, а інший (що обертається вдвічі повільніше) – пари клапанів циліндрів високого тиску.

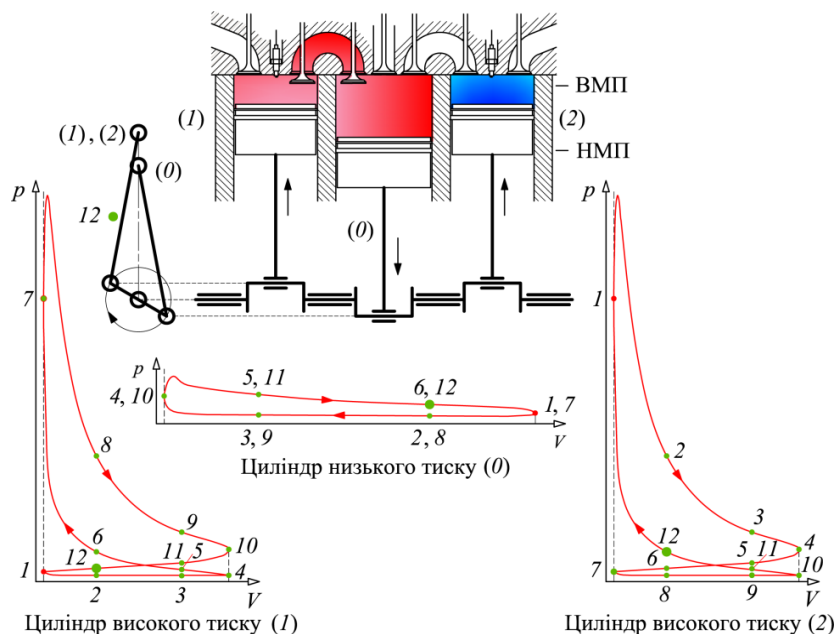


Рис. 8. Загальна будова і фази роботи п'ятитактного (назва умовна) двигуна

Тож під час перших трьох тактів суміш, як завжди, всмоктується, стискається і здійснює робочий хід в циліндрах малого діаметру. Під час четвертого такту відпрацьовані газы переміщуються з циліндрів малого діаметра у великий і стискаються. Остаточне розширення відпрацьованих газів у великому циліндрі – це п'ятий (і знову робочий) такт. Тут реалізована ідея подовження такту розширення робочих газів. Але досягається це ціною “непродуктивного” збільшення літражу двигуна. В дослідній моделі двигуна робочий об'єм кожного основного циліндра високого тиску становив 350 см^3 , а робочий об'єм додаткового циліндра низького тиску – 778 см^3 . Геометричний ступінь стиснення, а отже й ступінь розширення, в циліндрах високого тиску становив 8, тоді як ступінь розширення в циліндрі низького тиску (а отже й загальний) досягав 15 (а можна казати умовно, що й 30).

Робочий процес п'ятитактного двигуна складають такі фази (див. рис. 8 – схема внизу).

Фаза А: поршні в циліндрах високого тиску (ВТ) рухаються від ВМП до НМП, а поршень в циліндрі низького тиску (НТ) – від НМП до ВМП; у першому циліндрі ВТ відбувається всмоктування свіжого заряду, а в другому циліндрі ВТ – робочий хід (згоряння й попереднє розширення); у циліндрі НТ відбувається випуск газів.

Фаза В: поршні в циліндрах ВТ рухаються від НМП до ВМП, а поршень в циліндрі НТ – від ВМП до НМП. У першому циліндрі ВТ здійснюється стиснення свіжого заряду, в другому циліндрі ВТ – витіснення випускних газів в циліндр НТ, а в циліндрі НТ – процес додаткового розширення випускних газів з другого циліндра ВТ.

Фаза С: поршні в циліндрах ВТ рухаються від ВМП до НМП, а поршень в циліндрі НТ – від НМП до ВМП; у першому циліндрі ВТ здійснюється робочий хід (згоряння й попереднє розширення), в другому циліндрі ВТ – всмоктування свіжого заряду, у циліндрі НТ – випуск газів.

Фаза D – аналогічна Фазі В, але перший і другий циліндри ВТ міняються своїми функціями.

Випускний клапан циліндра ВТ відкривається відразу, як його поршень у процесі ходу розширення досягне малого околу перед НМП, дозволяючи відпрацьованому газу відразу попрямувати в циліндр НТ. Відтак туди ж (в циліндр великого діаметру) можна впорснути воду, яка швидко перетвориться на пару.

Тож робочий цикл п'ятитактного двигуна здійснюється впродовж двох обертів колінчастого вала. Поняття робочого об'єму двигуна тут є важко означуваним. Співвідношення між об'ємами циліндрів є таким, що можна провести аналогію з чотирициліндровим чотиритактним двигуном, у якому два циліндри "зобов'язали" синхронно працювати в режимі низького тиску подібно до циліндра НТ у п'ятитактному двигуні. Тож навряд чи можна це вважати успішним рішенням в загальному сенсі.

Дуже давню історію мають і шеститактні двигуни – ще від двигуна С. Гріфіна (S. Griffin, Англія, 1883 р.) [10]. Американський інженер Б. Кровер (Bruce Crower) віродив цю ідею (рис. 9) в конструкції двигуна, в циліндри якого після завершення звичного четвертого такту випуску відпрацьованих газів надсилається вода під тиском 15 МПа [11]. Переймаючи теплоту від нагрітих поверхонь комори згоряння, вода випаровується. Пара розширяється і з ходом поршня від ВМП до НМП здійснює корисну роботу. Це п'ятий такт роботи двигуна – паровий робочий хід. З ходом поршня від НМП до ВМП (шостий такт) здійснюється випуск відпрацьованої пари. Відпрацьована пара надсилається не у довкілля, а в конденсатор, де охолоджується, знову перетворюючись на воду. Можливість використання шести тактів досліджувалась всебічно й ретельно [12–16], але ця технологія не знайшла таки широкого застосування – практика висуває надто жорсткі вимоги.

Технологію впорскування в робочий простір води – речовини, здатної змінювати фазовий стан, – широко застосовували під час Другої світової війни в авіаційних двигунах літаків з метою їх форсування. Системами впорскування води оснащували, приміром, німецькі авіамотори Daimler Benz серії 605 і BMW 801D для Messerschmitt Bf 109, Junkers Jumo 213 A1 для FockeWulf 190D, американський авіамотор Pratt&Whitney J57 для B-29 Stratofortress тощо. Згодом воду замінили на суміш з однакових частин води й метанолу, збільшуючи завдяки цьому потужність двигунів на 25...30 %.

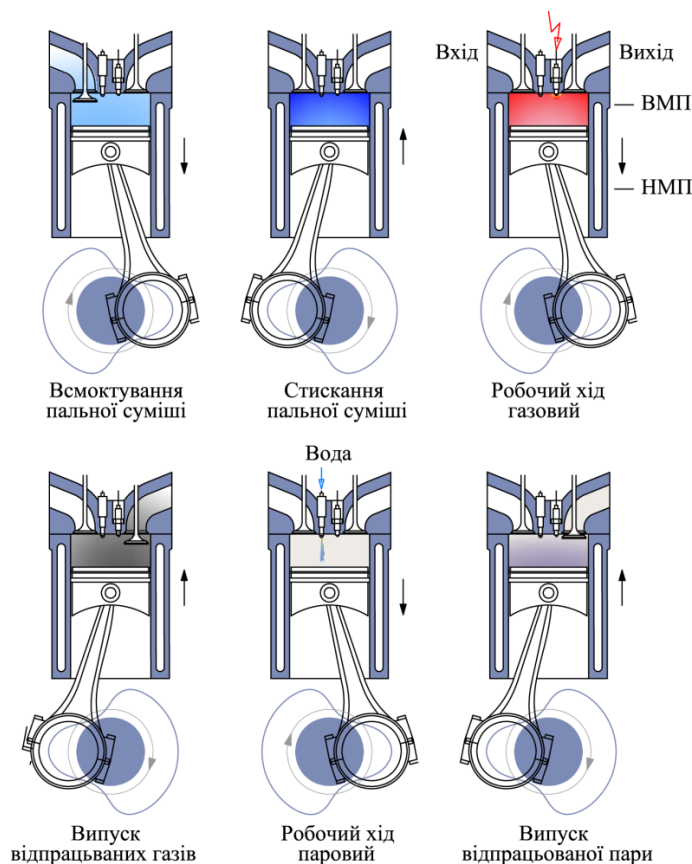


Рис. 9. Принцип роботи шеститактного (4+2-тактного) двигуна

Звісно, необхідно потурбуватись про засоби зберігання на об'їмку робочої чи транспортної машини недешевої в наш час дистильованої води, про засоби її конденсації та засоби запобігання замерзанню в зимовий період. Для виготовлення двигуна, звісно, потрібні особливі, не схильні до кородування від дії води матеріали.

Вочевидь, розглянуті схеми двигунів внутрішнього згоряння не вносять принципових змін у технологію перетворення теплоти у механічну роботу, а лише втілюють різні варіації типово вмотивованого робочого циклу теплової машини – варіації з тих, зокрема, що наведені на рис. 10. В такому разі важко сподіватись на істотні зрушення в напрямі підвищення ефективності енергоперетворення.

Відокремлені від робочого циліндра камери згоряння і нагрівання впроваджено також в шеститактний двигун Баюлаза (S. A. Bajulaz, Швейцарія) із запалюванням від стиску [17, 18]. Тут визначальну роль відведено утилізації теплоти відпрацьованих газів (завдяки окремій коморі для нагрівання повітря). Робочий цикл містить (окрім тактів всмоктування й випускання) два такти стискування і два робочих ходи – паливний і повітряний (газовий), а отже здійснюється впродовж трьох обертів колінчастого вала. Керування робочим циклом значно складніше, ніж у звичайному двигуні.



Рис. 10. Варіації робочого циклу Отто-двигуна

Канадська компанія Revelation Power Technology доклалася до розробки навіть восьмитактного двигуна, в двоциліндровому модулі якого поршень другого циліндра рухається із запізненням на 90 град відносно поршня першого циліндра. Перший циліндр оснащений впускним клапаном для подачі паливно-повітряної суміші і перепускним клапаном, що сполучає перший і другий циліндри. Другий циліндр має впускний клапан для подачі повітря і випускний клапан для видалення відпрацьованих газів. Робочий цикл здійснюється за два оберти колінчастого вала, але двома циліндрами до спілки.

Додані (додаткові, розділені) такти, звісно, потенційно сприяють підвищенню паливної економії двигуна, приміром, за рахунок чи продовженого розширення робочого тіла (двигуни, що втілюють цикли Аткинсона і Міллера), чи утилізації теплоти, відведеної від нагрітих поверхонь камери згоряння (Bajulaz-двигун чи двигуни із впорскуванням в робочий простір води)... Проте формування додаткових тактів за інших однакових умов посилює прояв прихованих супутніх можливостей втрати ефективності. Приміром, винесення камери згоряння поза робочий простір двигуна веде до збільшення площі поверхонь з високим температурним потенціалом і відповідного зростання витоків теплоти у довкілля. Запровадження у робочий цикл додаткових тактів неминуче веде до зниження літрової потужності двигуна з погано вимірюваними/оцінюваними негативними наслідками.

В цьому аналізі взято до уваги тільки такі напрямки удосконалення двигуна швидкого внутрішнього згоряння, які можна оперти на тверде теоретичне підґрунтя. А існують ще безліч патентних пропозицій, об'єктивно оцінити які з позицій теорії або неможливо, або нема сенсу (через надуману аргументацію).

Обговорення результатів дослідження

Теплота повинна надходити в циліндр відразу з початком робочого ходу. Час, який відводиться на згоряння в межах робочого простору швидкісного двигуна (мілісекунди) часто є надто малим, аби забезпечити повне і якісне згоряння. Циклічне спалювання енергоносіїв в окремих коморах згоряння поза робочими

циліндрами впродовж безумовно довшого часу насправді не дуже й сприяє підвищенню ефективності процесу теплотворення. Навіть в такому разі часу занадто мало для бездоганного згоряння енергоносіїв в швидкохідних двигунах. Тож природно визріла ідея вдатися до неперервного спалювання (як у Zajas-двигуні). Ідея евристично прозора: Zajas-двигун – своєрідний аналог парової машини, в якому за робоче тіло правлять продукти згоряння, а не водяна пара.

Виносячи комору згоряння поза робочий циліндр та штучно збільшуючи тривалість й улаштувавши стабільність процесу згоряння пальної суміші (як у Zajas-двигуні), доводиться миритися з тим, що зростають поверхня і температурний градієнт витоків тепла у систему охолодження й доквілля. Тож перехід від циклічного до неперервного спалювання речовин-енергоносіїв із створенням так званого гарячого валу (стіни) несе з собою не тільки користь. До того ж, темп теплотворення в коморі згоряння повинен раціонально співвідноситись з темпом теплоспоживання в робочому просторі двигуна. Тож свобода у виборі оптимальної тривалості процесу згоряння пальної суміші є доволі примарною. Можливості стабілізації процесу також є дуже відносними.

Умови згоряння після ВМП в такті робочого ходу звичного двигуна істотно змінюються – об'єм простору згоряння зростає, через що згодом тиск і температура газу знижуватимуться, а от площа поверхні, що охоплює робочий простір, і відповідно втрати теплоти натомість збільшуються. Часу не вистачає й на якісну гомогенізацію суміші. Тож на організацію і здійснення процесу згоряння потрібно або більше часу, або ці акції необхідно пришвидшити. Власне на це і спрямований НССІ-процес.

Видалення відпрацьованих газів з робочого простору двигуна внутрішнього згоряння – це в термодинамічному сенсі відведення теплоти у доквілля, плата Природі за можливість отримання механічної енергії за посередництва теплоти [23]. Тож теплоту, що полишає робочий простір з відпрацьованими газами в такому разі недоречно вважати енергетичними втратами. Але з іншого боку, якщо б була можливість збільшити хід поршня для забезпечення повного розширення газів до атмосферного тиску, то цим обов'язково слід було б скористатись (ідея Аткинсона), а це означає, що відпрацьовані гази виносять з собою певну частину енергії, яку є підстави вважати все-таки втратами. Енергію відпрацьованих газів можна використати й для приводу турбін системи наддуву або навіть для приводу додаткових силових турбін, що віддають механічну енергію безпосередньо на колінчастий вал. В першому випадку з'являється можливість мініатюризації (даунсайзінгу) двигуна, а в другому – трансформування його в турбокомпаундний гібрид.

Можна вважати істотною прогалиною в теорії теплових машин відсутність ідеалізованих оцінок ефектів від винесення комори згоряння за межі робочого циліндра (реалізації принципу зовнішнього згоряння), розділення робочого циклу (Split-Cycle Combustion Engine), штучного розширення робочого ходу, програмного керування структурою робочого циклу тощо. Приміром, застосовуючи апарат аналізу ідеальних термодинамічних циклів, можна відносно легко довести користь від впровадження циклу Аткинсона чи Міллера замість традиційного циклу Отто. Ця користь буде суттєво меншою у випадку дійсного циклу. Та все ж ідеалізація дозволила б розкрити причини і механізм удосконалення циклу. Виявляється, приміром, що ціною істотного збільшення робочого простору двигуна Аткинсона-Міллера можна певною мірою (явно не пропорційно) підвищити ККД двигуна на номінальному режимі, але на часткових режимах, що є переважними для будь-якої мобільної машини, корисний ефект в значній мірі втрачається.

Коли хочуть підкреслити, що розмір таки “має значення”, то згадують такий-собі закон “кубу – квадрату”: маса конструкції зростає пропорційно кубові лінійного розміру, а от її міцність – пропорційно квадратові лінійного розміру. Закон цей радше евристична гіпотеза, та сенс у цій гіпотезі таки є: зростання розмірів провокує зростання маси настільки, що ставить під загрозу міцність, а отже виникає потреба у підсиленні конструкції та відповідному її ускладненні. Ситуації зі зниженням літрової потужності двигуна не зарадити посиленням турбонаддуву. Тож збільшення габаритів і маси двигуна заради збільшення його ККД не є перспективним шляхом удосконалення технології перетворення енергії речовини на механічну енергію за посередництва теплоти.

Двигун автомобіля, приміром, перш за все повинен би забезпечувати належно високу швидкість пересування і швидкий розгін автомобіля, а також достатню тягу у разі руху його угору крутим узвозом. При цьому він повинен бути ще й енергоощадним (і екологічним). За однакових інших умов енергоощадність спонукає до зменшення робочого об'єму двигуна, а от потужна тяга – до збільшення.

У разі рівномірного руху з поміркованою швидкістю горизонтальною дорогою з досконалим покриттям автомобіль реалізує відносно малу тягу і відповідно малу потужність. А от розгін автомобіля практично завжди потребує значної тяги й потужності. В автомобільного двигуна внутрішнього згоряння номінальним режимом зазвичай є режим максимальної потужності (тільки в особливих випадках – тяги). Але ж мета розгону автомобіля – це здебільшого реалізація можливості рухатись з бажаною сталою швидкістю. Отже режим руху автомобіля зі сталою “крейсерською” швидкістю мав би превалювати. А в такому разі номінальним мав би бути саме відповідний крейсерській швидкості автомобіля режим роботи двигуна на одній з вищих передач в трансмісії. Це в загальних рисах спостерігається в електромобілі. Зокрема, малий робочий об'єм двигуна

внутрішнього згоряння можна поєднати хіба що або з високим рівнем форсування, або з акумулюванням енергії. Щоправда акумулятори стають додатком, що збільшує габарити і масу власне двигуна.

Тож існує проблема об'єктивності визнання й призначення тих чи параметрів двигуна номінальними. Як зазначалося, великий робочий об'єм двигуна потрібен у разі руху транспортного засобу, приміром, з високими швидкостями. Тому визнання режиму максимальної потужності номінальним виглядає цілком логічним. Але тривалість реалізації таких чи близьких до них режимів зазвичай є вкрай малою. Тож на переважаючих режимах пересування автомобіля (особливо в міських умовах) був би вигідним енергоощадний двигун з малим робочим об'ємом.

У процесі проектування двигуна всі зусилля, природно, спрямовують на забезпечення якнайкращих показників роботи саме на номінальному режимі, а всі інші режими вимушено залишаються поза увагою, оскільки забезпечити високу їх ефективність тими ж самими засобами, що й ефективність номінального, неможливо. Аби знайти компроміс, достатньо до “номінально великого” двигуна застосувати засоби регулювання робочого об'єму, можливо, разом з регулюванням ступеня стиснення. Це призведе до істотного підвищення ефективності двигуна саме на “часткових” режимах.

Але номінальним можна визнати в певному сенсі “малий” двигун. А в такому разі доведеться вдатися до засобів його форсування, аби досягнути потрібних значень потужності та обертового моменту на особливих режимах руху автомобіля. Відтак особливої ваги набувають засоби наддуву – механічного (об'ємного) за малих частот обертання вала двигуна та турбінного за великих частот.

Цілком по-іншому теорія сприймає керування структурою робочих циклів. Приміром, британська інжинірингова компанія Ricardo розробила 2/4SIGHT-двигун, здатний переходити з чотиритактного режиму роботи на двотактний і навпаки [19–21]. За малих і середніх навантажень двигун реалізує чотиритактний цикл, а от на режимах великих навантажень він переходить на роботу за двотактним циклом. Причому зміна структури відбувається без жодних затримок як на усталених, так і на перехідних режимах роботи двигуна.

Можливість переходу двигуна з чотиритактного на двотактний цикл у разі зростання навантаження дозволяє забезпечити необхідні тягово-швидкісні властивості автомобіля, застосовуючи двигун із зменшеним проти звичного робочим об'ємом. Зменшений робочий об'єм двигуна у чотиритактному режимі роботи забезпечує меншу витрату палива за відносно малих навантажень, а от зростання паливної економії у двотактному режимі відбувається за рахунок зростання механічного ККД, перш за все, завдяки зростанню середнього ефективного тиску та зниженню втрат енергії на додання тертя унаслідок зменшення кількості ходів поршня в робочому циклі. Цей двигун обслуговують система електрогідравлічного приводу клапанів, оскільки керування газорозподілом є доволі складним. Поєднання газотурбінної і механічної систем наддуву також сприяє формуванню раціональних тягових властивостей двигуна. Відтак теорія обов'язково визнає ефективність керування структурою робочих циклів, як вона беззастережно визнає ефективність вимикання циліндрів чи керування частотою робочих циклів в двигуні [22].

Висновки

1. Просторове рознесення тактів робочого циклу ускладнює будову двигуна і зазвичай призводить до істотного погіршення його масогабаритних показників. Потенційний вииграш від розділення, зокрема, процесів згоряння і розширення в значній мірі нівелюється провокованими при цьому енергетичними втратами при пересиланні газів з порожнини в порожнину, а також інтенсивнішими втратами теплоти у разі застосування окремої комори згоряння. Ідея “Split-Cycle Combustion”, як і дуже давня ідея залучати воду в робочий процес двигуна, не знаходять визнання досвідом і часом. Треба зважати також на “зайві” (порівняно зі звичними двигунами) циліндри (робочі простори), “надлишкові” механізми, супутні їхній роботі помпові і тертьові втрати енергії, які разом не роблять двигун насправді експлуатаційно досконалішим.

2. Вочевидь, більшість розглянутих схем двигунів внутрішнього згоряння – Z-, Scuderi-, Zajac-, DIRO-двигуни, п'ятитактний Schmitz-двигун тощо – не вносять принципових змін у технологію перетворення теплоти у механічну роботу, а лише втілюють різні варіації за типовими мірками вмотивованого робочого циклу теплової машини. В такому разі нема підстав сподіватись на істотні зрушення в напрямі підвищення ефективності енергоперетворення. Проте в інших відношеннях нововведення є істотними: Z-двигун обов'язково кращий від звичного за масогабаритними параметрами; у DIRO-двигуні пальна суміш набуває можливості згоряти триваліше і якісніше; Zajac-двигун втілює ефективний процес неперервного зовнішнього згоряння тощо.

3. Нове – це здебільшого втілення новими засобами давніх ідей. Зокрема, доречно наголосити, що трициліндрові двигуни із бічними циліндрами малого діаметру, які втілювали чотиритактний цикл, і середнім циліндром великого діаметру, який працював за двотактним циклом, були виготовлені ще Н. Отто і Р. Дизелем.

А тепер вони, не визнаванні впродовж тривалого часу, нам подані як п'ятитактні і відтак мають сумнівну перспективу. Такого самого ставлення заслуговують і віддавна відомі шеститактні двигуни.

4. Можливість переводити двигун з чотиритактного циклу на двотактний у разі зростання навантаження дозволяє забезпечити необхідні тягово-швидкісні властивості автомобіля, застосовуючи двигун із зменшеним проти звичного робочим об'ємом, розширюючи при цьому множину можливих режимів роботи двигуна та забезпечуючи водночас меншу витрату палива. Відтак теорія, сумніваючись в ефективності інших ідей, натомість обов'язково визнає ефективність керування структурою робочих циклів, як вона беззастережно визнає ефективність вимикання циліндрів за малих навантажень чи керування частотою робочих циклів в двигуні.

5. Існує проблема об'єктивності ухвалення тих чи інших параметрів двигуна номінальними. Приміром, на переважних режимах пересування автомобіля (особливо в міських умовах) був би вигідним енергоощадний двигун з малим робочим об'ємом. Саме параметри такого "малого" двигуна мали б набути статус номінальних (Downsizing-принцип). А от інші потрібні режими роботи двигуна – ті, що зустрічаються рідше, мали б стати результатом форсування. Форсувати двигун можна, збільшуючи продуктивність систем турбонаддуву і впорскування пального на швидкісних режимах. Форсувати ж обертовий момент на малих і середніх частотах обертання вала двигуна доцільно за допомогою механічного наддуву замість турбонаддуву. Звісно, про екстремальний форсаж з використанням, приміром, закису азоту не йдеться. Зменшення літражу двигуна суто за рахунок збільшення максимальної частоти обертання його вала також прийнятне тільки до певної межі, оскільки супроводжується втратами енергії на додання механічних і гідродинамічних сил опору, а також ускладненням та зростанням маси й габаритів трансмісії.

6. Практично значущим напрямом удосконалення теплового двигуна насправді є розвиток засобів гомогенізації пальної суміші і реалізації якнайінтенсивнішого процесу теплотворення в околі верхнього мертвого положення поршня. Особливої ваги таке удосконалення набуває у поєднанні з технологією керованої двотактності-чотиритактності. Принцип втілення об'ємного самозаймання у найбільшій мірі має можливість проявити свою ефективність саме в двигуні швидкого внутрішнього згоряння. Керована двотактність-чотиритактність двигуна за ефективністю протиставна регулюванню робочого об'єму двигуна вимиканням-вмиканням циліндрів чи робочих циклів.

References

1. Novel Two-Stroke Engine Concept, Feasibility Study / J. Tiainen, A. Saarinen, T. Gronlund, M. Larmi. // SAE Technical Paper Series. – 2003. – No. 2003-01-3211. – P. 1–15. <https://doi.org/10.4271/2003-01-3211>
2. Janhunen T. T. HCCI-Combustion in the Z Engine / T.T. Janhunen. // SAE Technical Paper Series. – 2012. – No. 2012-01-1573. – P. 1–16. <https://doi.org/10.4271/2012-01-1132>
3. Clean Diesel Combustion by means of the HCPC Concept / E. Musu, R. Rossi, R. Gentili, R. D. Reitz. // SAE Technical Paper Series, SAE Int. J. Engines. 3. – 2010. – No. 2010-01-1256. – P. 964–981. <https://doi.org/10.4271/2010-01-1256>
4. Newman L.G. Five stroke internal combustion engine / L.G. Newman. – U.S. Patent 6,776,144, 2004.
5. Schmitz G. Five-stroke internal combustion engine / G. Schmitz. — U.S. Patent 6,553,977, 2003.
6. Palanivendhan M. Five Stroke Internal Combustion Engine / M. Palanivendhan, H. Modi, G. Bansal. // International Journal of Control Theory and Applications. – 2016. – Vol. 13, No. 9. – P. 5855–5862.
7. Development and validation of a 5 stroke engine for range extenders application / A. Kéromnès, B. Delaporte, G. Schmitz, L. Le Moyne. // Energy Conversion and Management. – 2014. – No. 82. – P. 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.025>
8. Noga M. Determination of the Theoretical and Total Efficiency of the Five-Stroke SI Engine / M. Noga, B. Sendyka. // International Journal of Automotive Technology. – 2014. – Vol. 7, No. 15. – P. 1083–1089. <http://dx.doi.org/10.1007/s12239-014-0112-9>
9. Noga M. New Design of the five-stroke engine / M. Noga, B. Sendyka. // Journal of KONES Powertrain and Transport. – 2013. – Vol. 1, No. 20. – P. 239–246. <http://dx.doi.org/10.5604/12314005.1136161>
10. Griffin S. Method of operating gas engines / S. Griffin. – U.S. Patent 412,883, 1889.
11. Crower B. Method and apparatus for operating an internal combustion engine / B. Crower. – U.S. Patent 2007/0,022,977, 2007.
12. Makheeja D.A Review: Six Stroke Internal Combustion Engine / D. Makheeja. // Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). – 2015. – No. 12. – C. 7–11.
13. Kandari S. Six Stroke Engine / S. Kandari, I. Gupta. // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2013. – Vol. 10, No. 2. – P. 884–889.
14. Mohandas G. Review of Six Stroke Engine and Proposal for Alternative Fuels / G. Mohandas, V. Desai-Patil. // SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME). – 2015. – Vol. 10, No. 2. – P. 19–24. doi: 10.14445/23488360/IJME-V2I10P104

15. Conklin J.C. A highly efficient six stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery / J.C. Conklin, J.P. Szybist. // *Energy*. – 2010. – Vol. 4, No. 35. P. 1658–1664. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.012>
16. Karmalkar C. Analyzing the implementation of six stroke engine in a Hybrid Car / C. Karmalkar, V. Raut. // *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*. – 2014. – Vol. 1, No. 2. – P. 1–4. doi: 10.11648/j.ijmea.20140201.11
17. Bajulaz R. Method for the transformation of thermal energy into mechanical energy by means of a combustion engine as well as this new engine / R. Bajulaz. – U.S. Patent 06,442,799, 1985.
18. Bajulaz R. Internal Combustion Engine / R. Bajulaz. – U.S. Patent 4,809,511, 1989. <https://patents.google.com/patent/US4809511A/en>
19. Osborne R. The 2/4SIGHT Project – Development of a Multi-Cylinder Two-Stroke/Four-Stroke Switching Gasoline Engine / [R. Osborne, J. Stokes, D. Ceccarini et al.]. // *JSAE Paper 20085400 and JSAE Proceedings*. – 2008. – № 79-08. – P. 11–16.
20. Rebhan M. Two-stroke/four-stroke multi-cylinder gasoline engine for downsizing applications / M. Rebhan, J. Stokes. // *MTZ Worldwide*. – 2009. – Vol. 4, No. 70. – P. 40–45. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03226944>
21. Rueter D. 2-Stroke Scavenging in Conventional and Minimally-Modified 4-Stroke Engines for Heavy Duty Applications at Low to Medium Speeds / D. Rueter. // *Inventions*. – 2019. – Vol. 44, No. 4. P. 13.
22. Гащук П. Н. Энергетическая эффективность автомобиля / П. Н. Гащук. – Львів: Світ, 1992. – 208 с.
23. Гащук П. М. Енергія та упорядкований рух / Петро Миколайович Гащук. – Львів: Українські технології, 2004. – 608 с.

Perspectives of Application of Rapid Internal Combustion Engine in Drive of Mobile Technique: Energy Efficiency of a Heat-Engine

P. Hashchuk, S. Nikipchuk

Abstract. *Otto-engine has won the technical competition with Diesel-engine. However its positions are treated as unstable and the ways of its improvement have been developed. The presented work substantiates that the majority of the atypical internal combustion engines' designs, the so called Z-, Scuderi-, Zajac-, DIRO-engines, quintuple Schmitz-engine, etc., do not introduce considerable changes in the technology of transforming the heat into the mechanic work. Thus, there is little reason to expect any considerable advancement in the increase of the effectiveness of energy transformations. Nevertheless, in other terms the innovations are substantial: Z-engine unconditionally outweighs the conventional one in its mass and dimension parameters; the fuel mixture of DIRO-engine has the capacity to burn longer and more effectively; Zajac-engine implements the effective process of continual external combustion, etc.*

The general theory, reconsidering the effect of the above mentioned ideas, in its turn acknowledges the efficiency of controlling the structure of working cycles in a way it unconditionally acknowledges the efficiency of cylinders cutoff or controlling the frequency of working cycles in the engine under the changeable load. It is strongly believed that the substantial effectiveness can be expected from advancing the technology of volumetric ignition by compression of ideal homogenized working mixture, the technology known as Homogeneous Charge Compression Ignition. It extremely reinforces the effect of rapid internal combustion distinctive of the Otto-engine. Thus, the possibility to improve the Otto-engine is considered to be absolutely real, and can be employed in the gear of machinery with the high level of autonomy.

Keywords: *rapid internal combustion engine, efficiency, working volume (capacity), mobile machinery, energy effectiveness, environmental friendliness*

Перспективы применения двигателя быстрого внутреннего сгорания в приводе мобильной техники: Энергетическая эффективность теплового двигателя

П. М. Гащук, С. В. Никипчук

Аннотация. *Отто-двигатель оказался победителем в техническом противостоянии с дизель-двигателем. И все же его позиции трактуют как шаткие и пытаются найти средства принципиального его совершенствования. В работе установлено, что большинство необычных схем двигателей внутреннего сгорания — так называемые Z-, Scuderi-, Zajac-, DIRO-двигатели, пятитактный Schmitz-двигатель и прочие — не вносят принципиальных изменений в технологию преобразования теплоты в механическую работу. Поэтому нет оснований надеяться на существенные сдвиги в направлении повышения эффективности энергопреобразования. Однако в других отношениях нововведения являются существенными: Z-двигатель обязательно лучше от привычного по массогабаритным параметрам; в DIRO-двигателе горючая смесь приобретает возможность сгорать длительно и качественнее; Zajac-двигатель воплощает эффективный процесс непрерывного внешнего сгорания и тому подобное.*

В общем, теория, “сомневаясь” в эффективности перечисленных идей, вместо этого обязательно признает эффективность управления структурой рабочих циклов так, как она безоговорочно признает эффективность выключения цилиндров или управления частотой рабочих циклов в двигателе в случае переменных нагрузок. Есть основания ожидать значительной пользы от продвижения технологии объемного зажигания гомогенизированной рабочей смеси сжатием — технологии, известной как *Heterogeneous Charge Compression Ignition*. Это предельно усиливает положительный эффект от быстрого внутреннего сгорания, присущего именно отто-двигателю. Следовательно, есть основания считать реальными возможности существенного усовершенствования именно двигателя Отто, пригодного для привода мобильных машин с большой степенью автономности.

Ключевые слова: двигатель быстрого внутреннего сгорания, коэффициент полезного действия, рабочий объем, мобильная техника, энергетическая эффективность, экологичность

References

1. Tiainen, J., Saarinen, A., Grönlund, T. and Larmi, M. (2003), “Novel Two-Stroke Engine Concept, Feasibility Study”, *SAE Technical Paper Series*, no. 2003-01-3211, pp. 1–15. <https://doi.org/10.4271/2003-01-3211>
2. Janhunen, T.T. (2012), “HCCI-Combustion in the Z Engine”, *SAE Technical Paper Series*, №2012-01-1573, pp. 1–16. <https://doi.org/10.4271/2012-01-1132>
3. Musu, E., Rossi, R., Gentili, R. and Reitz, R.D., (2010), “Clean Diesel Combustion by means of the HCPC Concept”, *SAE paper*, №2010-01-1256, *SAE Int. J. Engines*, vol. 3, no. 1, pp. 964–981. <https://doi.org/10.4271/2010-01-1256>
4. Newman, L.G., (2004), *Five stroke internal combustion engine*, U.S., Pat. 6,776,144.
5. Schmitz, G., (2003), *Five-stroke internal combustion engine*, U.S., Pat. 6,553,977.
6. Palanivendhan, M., Modi, H. and Bansal, G., (2016), “Five Stroke Internal Combustion Engine”, *International Journal of Control Theory and Applications*, vol. 9, no. 13, pp. 5855–5862.
7. Kéromnès, A., Delaporte, B., Schmitz, G. and Moynes, L. Le., (2014), Development and validation of a 5 stroke engine for range extenders application”, *Energy Conversion and Management*, vol. 82, pp. 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.025>
8. Noga, M. and Sendyka, B. (2014), “Determination of the Theoretical and Total Efficiency of the Five-Stroke SI Engine”, *International Journal of Automotive Technology*, vol. 15, no. 7, pp. 1083–1089. <http://dx.doi.org/10.1007/s12239-014-0112-9>
9. Noga, M. and Sendyka, B. (2013), “New Design of the five-stroke engine”, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 20, no. 1, pp. 239–246. <http://dx.doi.org/10.5604/12314005.1136161>
10. Griffin, S. (1889), *Method of operating gas engines*, U.S., Pat. 412,883. <https://patents.google.com/patent/US412883>
11. Crower, B. (2007), *Method and apparatus for operating an internal combustion engine*, U.S., Pat. 2007/0,022,977.
12. Makheeta, D. (2015), “A Review: Six Stroke Internal Combustion Engine”, *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, vol. 12, no. 4, pp. 7–11.
13. Kandari, S. and Gupta, I. (2013), “Six Stroke Engine”, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 2, no. 10, pp. 884–889.
14. Mohandas, G. and Desai-Patil, V. (2015), “Review of Six Stroke Engine and Proposal for Alternative Fuels”, *SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME)*, vol. 2, no. 10, pp. 19–24. doi: 10.14445/23488360/IJME-V2I10P104
15. Conklin, J. C. and Szybist, J. P. (2010), “A highly efficient six stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery”, *Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 1658–1664. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.012>
16. Karmalkar, C. and Raut, V. (2014), “Analyzing the implementation of six stroke engine in a Hybrid Car”, *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, vol. 2, no.1, pp. 1–4. doi: 10.11648/j.ijmea.20140201.11
17. Bajulaz, R. (1985), *Method for the transformation of thermal energy into mechanical energy by means of a combustion engine as well as this new engine*, U.S., Pat. 06,442,799.
18. Bajulaz, R. (1989), *Internal Combustion Engine*, U.S., Patent 4,809,511. <https://patents.google.com/patent/US4809511A/en>
19. Osborne, R., Stokes, J., Ceccarini, D., Jackson, N., Lake, T., Joyce, M., Visser, S., Miche, N., Begg, S., Heikal, M., Kalian N., Zhao, H. and Ma T. (2008), “The 2/4SIGHT Project – Development of a Multi-Cylinder Two-Stroke/Four-Stroke Switching Gasoline Engine”, *Proceedings JSAE Annual Congress*, no. 79-08, pp. 11–16.
20. Rebhan, M. and Stokes, J. (2009), “Two-stroke/four-stroke multi-cylinder gasoline engine for downsizing applications”, *MTZ Worldwide*, vol. 70, no. 4, pp. 40–45. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03226944>
21. Rueter, D. (2019), “2-Stroke Scavenging in Conventional and Minimally-Modified 4-Stroke Engines for Heavy Duty Applications at Low to Medium Speeds”, *Inventions*, vol. 4, no. 44, pp. 1–13. DOI: 10.3390/inventions4030044
22. Hashchuk, P. M. (1992), *Energeticheskaya effektivnost' avtomobilya* [Automotive Energy Efficiency], Svit, Lviv, Ukraine. <http://hdl.handle.net/123456789/3806>
23. Hashchuk, P. M. (2004), *Energhija ta uporjadkovanyj rukh* [Energy and orderly movement], Ukraïnsjki tekhnologiji, Lviv, Ukraine. <http://hdl.handle.net/123456789/3790>