

Криштопа С.І., Криштопа Л.І., Добуш А.І., Мисів О.О., Матвієнко Р.М., Копильців Д.В.
Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, Україна

ОГЛЯД ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОВІТРЯНИХ СИСТЕМ НА ТРАНСПОРТІ

Проаналізовані можливості використання енергетичних систем на основі стисненого повітря в силових приводах автомобільного транспорту. Проаналізовано переваги та обмеження пневматичних систем у порівнянні з традиційними гідравлічними та електромеханічними приводами. Визначено основні технічні параметри, що впливають на ефективність таких систем, зокрема рівень енергоспоживання, втрати енергії та надійність роботи в умовах підвищених навантажень. Розглянуто перспективи впровадження сучасних технологій акумулювання та регулювання стисненого повітря для підвищення продуктивності та екологічної безпеки обладнання. Запропоновано шляхи оптимізації систем, що сприятимуть зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню енергоефективності транспортних засобів. Встановлено, що енергетичні системи, що працюють на стисненому повітрі, можуть застосовуватися як основне джерело живлення без викидів або як допоміжна силова установка в автомобільному транспорті, забезпечуючи нульові викиди вуглецю та покращену загальну енергоефективність інтегрованих конструктивних рішень. У статті представлено детальну технологічну розробку енергетичних систем на базі стисненого повітря, узагальнено дослідження силових агрегатів, що працюють на цій технології у транспортному секторі. Особливу увагу приділено розробці нових технологій, створенню прототипів і інтеграції пневматичних систем. Крім того, детально розглянуто гібридні технології на основі стисненого повітря, які використовують різні методи пневматичної гібридизації, що дозволяє краще використовувати їхні переваги та обмеження. Обговорюються перспективи та виклики впровадження технологій на основі стисненого повітря у силових приводах автомобільного транспорту. Очікується, що модернізація енергетичних систем у цьому секторі сприятиме технологічному розвитку та впровадженню екологічно чистих рішень без викидів на транспорті.

Ключові слова: автомобільний транспорт, повітряні технології, пневмосистеми, стиснене повітря, гібридні силові приводи, енергоефективність.

ВСТУП

Гібридна трансмісія на даний момент є одним із найбільш цікавих рішень для покращення економії палива та скорочення викидів із відносно низькими загальними капітальними витратами порівняно з електричними трансмісіями, що використовують літій-іонні батареї. Гібридний силовий агрегат складається з двох силових агрегатів, включаючи двигун внутрішнього згоряння та допоміжний силовий агрегат із екологічно чистим джерелом енергії, таким як акумулятор або блок стисненого повітря. Гібридна трансмісія дозволяє звичайним ДВЗ на викопному паливі працювати в оптимізованих умовах із меншим споживанням палива та викидами забруднюючих речовин.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Перший одноциліндровий двигун на стисненому повітрі, у якому нагрівач бака з гарячою водою використовувався для нагрівання стисненого повітря перед розширенням у циліндрі двигуна розробив у 1886 році Луїс Мекарські [1]. Роберт Гарді розвинув цю концепцію, застосувавши передову систему повторного підігріву на двигуні з одноступеневим розширенням із можливістю регенерації енергії гальмування двигуном [2]. Двоступінчастий повітряний двигун під назвою Hoadley-Knight system був розроблений з метою подовження робочого шляху локомотива до перезаправлення системи [3]. Системи Хоадлі використовувалися в Нью-Йорку протягом 1880–1900 рр., при цьому стиснене повітря подавалося з парової компресорної станції потужністю 1500 кінських сил. Після Другої світової війни різке зниження цін на викопне паливо сприяє комерціалізації та розвитку бензинових і дизельних двигунів для транспортних засобів або локомотивів, що призвело до зменшення кількості двигунів, що працюють на стисненому повітрі.

Проте дослідницькі інтереси та технологічні розробки в системі двигунів зі стисненим повітрям знову виникли в 1970-х роках через занепокоєння енергетичною кризою та екологічними проблемами. У 1979 році Террі Міллер розробив автомобіль з пружинним приводом і продемонстрував, що стиснене повітря є ідеальним середовищем для зберігання енергії [4]. У 1993 році Террі Міллер спільно з Тобі Баттерфілдом розробив двигун з пневматичним приводом, і автомобіль був названий повітряним автомобілем Spirit of Joplin. Винаходи Террі Міллера є важливою віхою в дослідженнях застосування двигунів на стисненому повітрі в транспортних засобах. Протягом наступних десятиліть було проведено кілька досліджень, натхненних роботою Террі Міллера.

Більшість досліджень, проведених протягом останнього десятиліття щодо двигуна, що працює на стисненому повітрі, ґрунтувалися на поршневій структурі. Лю створив математичні моделі двигуна, що працює на стисненому повітрі [5], і проаналізували робочі характеристики двигуна, як при одноступінчастому, так і при двоступінчастому розширенні. Результати показали, що двигун із зворотно-поступальним поршнем є ідеальною структурою для двигуна, що працює на стисненому повітрі. В [6] проаналізував теоретичний цикл двигуна, що працює на стисненому повітрі, і дійшли висновку, що робоча потужність двигуна була в лінійній позитивній кореляції з початковою температурою процесу розширення, і можливим методом збільшення робочої потужності двигуна є впровадження багатоступеневого, квазіізотермічного розширення стисненого повітря.

Автори [7] повідомили про оптимізаційний дизайн теоретичного циклу двигуна, що працює на стисненому повітрі, використовуючи метод багатоцільової оптимізації. Дослідження продемонструвало, що максимальна ефективність циклу може бути отримана при ступені стиснення 13. Оптимальна конструкція для траєкторії зворотно-поступального руху поршня також була запропонована шляхом впровадження подвійного механізму колінчастого вала [8]. Моделювання показало, що поршень може залишатися нерухомим до того, як тиск у циліндрі підніметься до тиску впуску, коли буде прийнята оптимізована траєкторія поршня. Крім того, швидкість поршня може бути лінійно залежною від площі потоку впускного клапана, доки тиск у циліндрі двигуна не досягне максимуму, а потім залишається постійним після закриття впускного клапана.

Віртуальний прототип із новою розробленою системою клапанів був створений для вивчення динамічних характеристик повітряного двигуна [9], а також досліджено і оптимізовані стратегії керування клапанами, що внесло внесок у теоретичне розуміння технології повітряного двигуна. Після попереднього прогресу команда продовжила розвиток динамічного теплообміну для дослідження падіння температури під час робочих умов повітряного двигуна. Крім того, була запропонована технологія температурної компенсації [10] для усунення ризику блокування льодом внаслідок ефекту дроселювання стисненого повітря.

За винятком двигуна поршневого типу з поршневим рухом, також були зроблені спроби дослідження інших типів двигунів, що працюють на стисненому повітрі. Типові двигуни на стисненому повітрі з різними типами розширювальних машин наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Двигуни на стисненому повітрі з різними типами розширювальних машин

Рік	Автор	Тип двигуна	Особливості
2009	Shen та ін. [11]	повітряний двигун лопатевого типу	Ефективність вище 70% при швидкості мотоцикла понад 20 км/год. Споживання електроенергії становить близько 0,073 кВт-год на кілометр порівняно з 0,127 кВт-год на кілометр для звичайного мотоцикла з двигуном внутрішнього згорання. Слід покращити транспортну відстань.
2015	Він та ін. [12]	одновинтовий розширювач	Найвищий загальний ККД становить 55 %, найбільший крутний момент становить майже 100 Н·м, найбільша вихідна потужність становить близько 22 кВт, а найменше споживання газу становить близько 60 кг/кВт-год.
2019	Чжан та ін. [13]	розширювач прокрутки	Максимальна масова витрата повітря 800 кг/год, максимальна потужність 8,112 кВт, максимальний ККД всього 0,26.
2023	Сю та ін. [14]	двоторний поршневій двигун	Максимальний вихідний момент становить 100 Н·м при 450 об/хв при тиску газу 0,6 МПа.

Закордонні джерела достатньо докладно описують дослідницькі проблеми в застосуванні енергетичних технологій стисненого повітря в силових приводах автотранспортних засобів. Але не усі питання, які стосуються оптимального використання технології стисненого повітря в автотранспортних засобах вирішені на сьогоднішній день

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Це дослідження має на меті представити комплексний огляд дослідницьких проблем і потенційних майбутніх стратегій розвитку застосування енергетичних технологій стисненого повітря в силових системах автотранспортних засобів. Ця стаття містить всебічне обговорення технології виробництва енергії на стисненому повітрі та підсумовує її можливе сучасне застосування в транспортному секторі, аналізує особливості конструктивного проектування, компонент і технічні нюанси гібридної технології стисненого повітря для застосування в автотранспортних засобах.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Особливості конструкції двигунів на стисненому повітрі

У силовій системі зі стисненим повітрям енергія зазвичай перетворюється двигуном у механічну через розширення стисненого повітря в циліндрі. Поршнева структура схожа на структуру звичайного двигуна внутрішнього згоряння, за винятком того, що двигун, що працює на стисненому повітрі, не має паливного інжектора чи свічки запалювання. Робочий цикл двигуна складається з 2 тактів, відомих як розширення і вихлоп. Слід зазначити, що процес всмоктування відбувається на початку такту розширення. Впускний клапан зазвичай відкривається, коли поршень рухається до верхньої мертвої точки (ВМТ), і стиснене повітря надходить у циліндр з повітряного бака. Після закриття впускного клапана стиснене повітря, що потрапило в циліндр, продовжує розширюватися, поки поршень не досягне нижньої мертвої точки (НМТ). Випускний клапан відкривається після процесу розширення, і стиснене повітря викачується з циліндра рухом поршня вгору.

Об'ємні машини, такі як поршневі розширювачі, спіральні розширювачі та гвинтові розширювачі, популярні як агрегати для виробництва енергії. Однак поршковий розширювач має недоліки через низьку загальну ефективність, складну конструкцію та високий рівень шуму. Тому дослідники [15] прийняли та розробили одногвинтовий розширювач для потенційного вирішення вищезазначених проблем. Робочий процес одногвинтового розширювача (рис. 1) складався з трьох етапів: впуск повітря, розширення повітря та випуск повітря. Спочатку стиснене повітря на вході з певним тиском штовхало обертовий ротор, а шибєрний ротор обертався разом з ротором. Під час процесу розширення стиснене повітря розширювалося в закритому об'ємі, утвореному спіральною канавкою, зубом шибєрного ротора та корпусом під час обертання ротора.

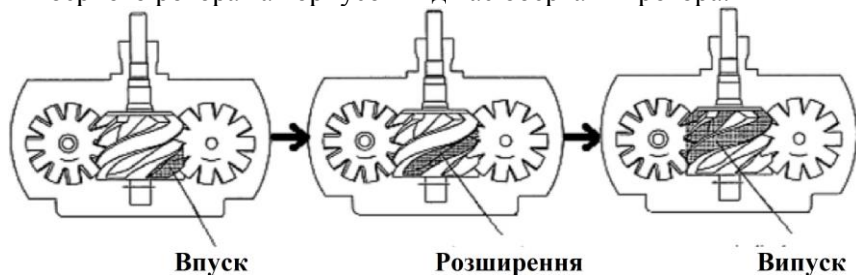


Рисунок 1. Процес роботи одногвинтового розширювача

Нові типи двигунів зі стисненим повітрям

В [16] було запропоновано новий тип двигуна зі стисненим повітрям на основі двороторного механізму. Результати показали, що попередньою перевагою двороторної конструкції було те, що вона дозволяла змінювати об'єм кожного циліндра чотири рази протягом одного оберту вихідного вала завдяки спеціальній системі приводу диференціальної швидкості. Таким чином, двороторний поршковий двигун був еквівалентним повітряному поршковому двигуну з 2 циліндрами однакового робочого об'єму. Результати моделювання показали, що максимальний крутний момент двороторного двигуна зі стисненим повітрям становив 100 Н·м при 450 об/хв під тиском впуску 0,6 МПа, що майже в три рази більше, ніж у поршневого двигуна з поршковим рухом.

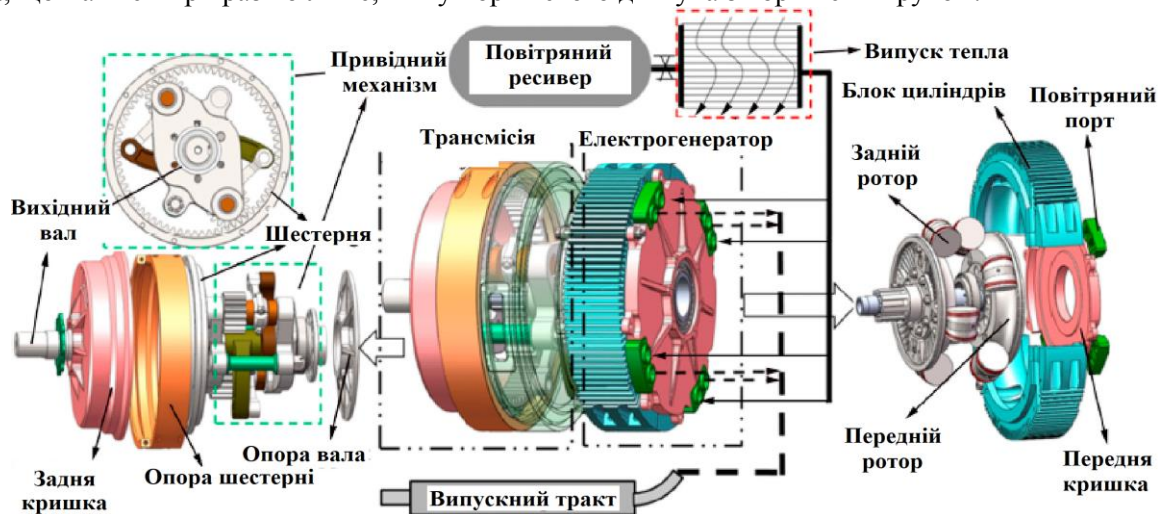


Рисунок 2. Схема двороторного повітряного двигуна

Автори [17] розробили клапанну систему з поліноміальним профілем кулачка та змоделювали вплив кута та максимального підйому клапана на коефіцієнт наповнення. Було зроблено висновок, що розроблений профіль кулачка повинен використовувати мінімальний підйом клапана для отримання максимального коефіцієнта наповнення. Дослідники [18] застосували ортогональну схему з аналізом Грея для оптимізації параметрів фаз газорозподілу двигуна, що працює на стисненому повітрі, і запропонували ідеальні значення кута підйому кулачка та кута повернення кулачка.

В [19] було розроблено електропневматичну систему змінного підйому клапана, що керується відпрацьованою енергією під час процесу зниження тиску стисненого повітря. Як показано на рис. 3, система складається з поршня, пневматичного циліндра, двох стандартних триходових електромагнітних клапанів, поршневих кілець і пружин. Перед операцією один з електромагнітних клапанів був налаштований на відкриття, а інший на закриття. Коли на електромагнітні клапани подавали напругу, керуюче повітря, що вироблялося під час процесу зниження тиску, надходило у камеру і штовхало поршень у одну сторону, утворюючи шлях потоку стисненого повітря від повітряного бака до циліндра двигуна. Коли обидва електромагнітні клапани були знеструмлені, керуюче повітря надходило в камеру, щоб штовхати поршень у другу сторону, таким чином перекриваючи подачу повітря в двигун.

Для перевірки гнучкості електропневматичної системи клапанів була створена ще одна експериментальна система [20]. Час газорозподілу клапанів можна регулювати, змінюючи час електричного імпульсу, що подається на електромагнітні клапани. Результати показали, що робоча частота клапанної системи досягає 30 Гц, що відповідає швидкості двигуна 2000 об/хв., майже охоплюючи весь діапазон швидкостей двигуна, що працює на стисненому повітрі.



Рисунок 3. Прототип двигуна зі стисненим повітрям та електромагнітною системою змінного підйому клапанів

Експериментальні дослідження двигунів зі стисненим повітрям

Експериментальні дослідження двигунів, що працюють на стисненому повітрі, забезпечують цінні практичні дані для підтвердження теоретичних досліджень системи та оптимізації стратегій керування двигунами. Більшість прототипів побудовані в дослідницьких модифікаціях звичайних ДВЗ.

Дослідники [21] з Національного університету Цин Хуа розробили прототип двигуна на стисненому повітрі, модифікованого на основі 100 см³ ДВЗ, який спочатку використовувався на мотоциклі. Для системи клапанів прототипу-повітряного двигуна, було збережено оригінальний кулачковий механізм ДВЗ. Профіль кулачка було модифіковано, щоб змінити роботу двигуна з 4-тактного на 2-тактний, причому максимальний підйом клапана зменшено з 5 мм до 2 мм. Експериментальні результати показали, що максимальна потужність досягається при тиску на вході 0,9 МПа, а швидкість потоку стисненого повітря змінюється від 500 л/хв. до 1050 л/хв., коли частота змінюється від 500 об/хв. до 2000 об/хв. Найвищий ККД, який спостерігався під час експериментів, склав 23 %, що, ймовірно, було викликано обмеженням клапанної системи на потоки впуску та випуску.

Для вирішення проблеми та оптимізації конструкції клапанної системи було запропоновано замінити оригінальний розподільний вал на поворотну систему впуску та випуску [22]. Нова система клапанів працювала при тиску повітря до 1,3 МПа, і тиск у робочому циліндрі зростав швидше, ніж у попередній системі зі звичайним кулачковим механізмом.

Прототип двигуна з новою роторною системою впуску та вихлопу видавав вихідну потужність 2,15 кВт і крутний момент 15,97 Нм при тиску на впуску 1,3 МПа. Його встановили на мотоцикл для проведення дорожніх випробувань [23]. Результати випробувань показали, що мотоцикл з двигуном на стисненому повітрі може рухатися на максимальній швидкості близько 60 км/год. протягом 5 км.

Поточний стан комерціалізації двигунів зі стисненим повітрям

Виробники автомобілів робили різні спроби розробки транспортних засобів на стисненому повітрі. Перший прототип автомобіля на стисненому повітрі під назвою AIRPod, показаний на рис. 4, був випущений компанією MDI в 1998 році. Пізніше MDI випустила серію прототипів, включаючи OneFlowAir, CityFlowAir, MiniFlowAir і MultiFlowAir.



Рисунок 4. Транспортний засіб зі стисненим повітрям AirPod

Tata Motors з Індії є ще одним виробником автомобілів, що працює над транспортними засобами із двигунами на стисненому повітрі. У 2009 році компанія Tata планувала випустити автомобіль з пневматичним приводом із двигуном на стисненому повітрі. У лютому 2017 року Тім Левертон, президент і голова відділу вдосконаленої техніки Tata Motors оголосив про комерціалізацію концепції та випуск першого автомобіля [24]. Tata також розглядає плани відродження версії Tata Nano зі стисненим повітрям, яка раніше розглядалася в рамках їхньої співпраці з MDI [25].

Крім MDI і Tata Motors, були й інші компанії, які працювали над двигуном на стисненому повітрі. Наприклад, компанія EngineAir з Австралії розробила роторний повітряний двигун під назвою «мотор Di Pietro» (див. рис. 5) на основі обертового поршня [26]. На відміну від існуючих роторних двигунів, двигун Di Pietro використовує простий циліндричний обертовий поршень (привідний вал), який котиться всередині циліндричного статора.



Рисунок 5. Транспортний засіб на стисненому повітрі EngineAir

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Таким чином, починаючи з 1990-х років було проведено кілька досліджень двигунів, що працюють на стисненому повітрі, що призвело до випуску різних прототипів двигунів і транспортних засобів. Однак застосування двигунів на стисненому повітрі в транспортних засобах не настільки популярне порівняно з іншими технологіями альтернативної енергії, такими як електромобілі. Кілька технологічних причин підсумовані нижче. Високі втрати енергії стисненого повітря під час роботи є головним технічним бар'єром. Через низьку щільність енергії необхідно збільшити тиск зберігання стисненого повітря, що може призвести до серйозних втрат стисненого повітря відносно дросельної заслінки, коли повітря випускається з повітряного бака. Під час робочого процесу двигуна, що працює на стисненому повітрі, тиск у циліндрі вищий, ніж після розширення стисненого повітря, що означає, що енергія стисненого повітря недостатньо перетворюється на вихідну потужність. Крім того, стиснене повітря може зазнавати великих втрат потоку під час процесу всмоктування через високу швидкість потоку та конструкцію системи клапанів. Процес дроселювання стисненого повітря створює низьку температуру в певних місцях труб або клапанів відповідно до ефекту Джоуля-Томсона, що може призвести до проблем блокування льодом двигуна після тривалої роботи.

Разом з тим трансмісія, що працює на стисненому повітрі, демонструє унікальну перевагу завдяки своїй екологічності, оскільки повітря є єдиним викидом. Однак застосування двигуна, що працює на стисненому повітрі, обмежене через низьку ефективність. Трансмісія, що працює на стисненому повітрі, може бути більш придатною для використання в якості допоміжної силової системи в гібридній силовій установці. Така гібридна система на стисненому повітрі може бути реалізована на транспортному засобі шляхом поєднання двох незалежних типів силової підсистеми, включаючи двигун зі стисненим повітрям і звичайний ДВЗ.

Протягом останніх кількох десятиліть повідомлялося про численні дослідження різних типів гібридних систем стисненого повітря. Наприклад, прототип «гібридного автомобіля на стисненому повітрі», розроблений компанією PSA Peugeot Citroen, був продемонстрований на Женевському автосалоні в 2013 році [27]. PSA стверджувала, що ця технологія має такий же вплив на економію палива, як і гібридна електрика, з меншою складністю в системі розташування та меншою вартістю. Ця технологія не єдина спроба використовувати стиснене повітря як альтернативне джерело енергії для руху транспортних засобів, про що буде докладніше пояснено в наступних розділах.

Принцип рекуперативного гальмування полягає у відновленні зайвої кінетичної енергії транспортного засобу під час фази гальмування та перетворенні в доступну енергію, таку як заряд акумулятора [28]. Подібним чином рекуперативне гальмування можна використовувати для виробництва стисненого повітря в гібридній системі повітря. Основна відмінність полягає в тому, що енергія акумулятора відновлюється в процесі заряджання на основі хімічної реакції, тоді як стиснене повітря виробляється в процесі стиснення компресора. Порівняно з гібридною електричною силовою установкою, гібридна система зі стисненим повітрям є більш компактною, оскільки стиснення та вихідна потужність можуть бути реалізовані на одному двигуні.

Дослідники в [29] представили новий термодинамічний цикл, який міг би забезпечити суттєве покращення економії автомобільного палива. Новий цикл міг реалізувати перетворення кінетичної енергії автомобіля в стиснене повітря. Перероблене стиснене повітря зберігалось в повітряному резервуарі та використовувалося для прискорення автомобіля. Процес гальмування транспортного засобу було замінено компресійним гальмуванням, під час якого впорскування палива двигуном припинялося, а двигун працював як поршневий двотактний компресор, що приводився в рух від ведучих коліс транспортним засобом. Повітря вводилося із зовнішньої атмосфери в циліндр, стискалося і витіснялося в повітряний резервуар. Робота, яку виконує поршень, поглинає кінетичну енергію транспортного засобу та реалізує гальмування, таким чином перетворюючи кінетичну енергію транспортного засобу в стиснене повітря. Двигун може бути повністю зупинений протягом часу зупинки. Під час прискорення двигун міг працювати і як пневматичний двигун, і як двигун внутрішнього згоряння в чотиритактному циклі з пневматичною підтримкою. Під час роботи в циклі живлення з підтримкою повітря стиснене повітря вводилося в циліндр двигуна, розширювалося та виконувало роботу під час першого ходу поршня вниз. Потім цей же заряд повітря використовувався в наступному процесі згоряння, виконуючи додаткову роботу над поршнем під час його другого ходу вниз. Двигун також міг працювати як двотактний пневматичний двигун, деактивувавши впорскування палива та вводячи стиснене повітря в циліндр для розширення та збільшення продуктивності.

Шехтер в [30] запропонував і виконав модифікації двигуна для реалізації нового циклу. Як показано на рис. 6, до кожного циліндра було додано додатковий зарядний клапан, який був з'єднаний із зарядним колектором і повітряним баком. У системі клапанів були рекомендовані електронні та змінні стратегії керування. Результати моделювання показали, що зниження споживання палива на 50 % може бути досягнуто за допомогою гібридного двигуна зі стисненим повітрям у міському циклі водіння, а ефективність перетворення та рекуперації енергії «туди й назад» оцінюється в 60–65 % [31]. Однак варто зазначити, що ефективність переміщення в обидві сторони значною мірою залежить від тиску повітря, що зберігається. Відносно високий загальний ККД може бути досягнутий лише тоді, коли накопичене повітря знаходиться в області низького тиску (нижче 5 бар). Коли збережене стиснене повітря працює в області високого тиску, більша частина механічної енергії буде втрачена у вигляді тепла під час процесу стиснення [32]. Тому необхідно розробити технологію зберігання теплової енергії для забезпечення високопродуктивної енергетичної системи стисненого повітря.

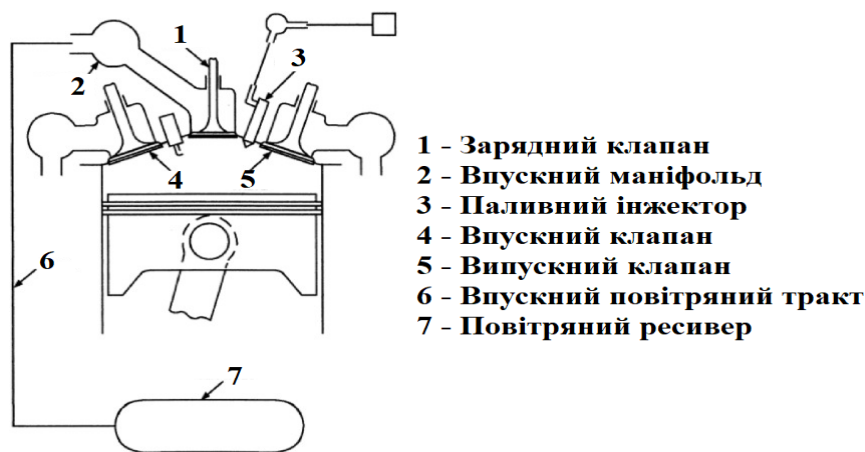


Рисунок 6. Схема гібридного двигуна на стисненому повітрі

На основі експериментальних результатів автори [33] провели дослідження моделювання гібридної системи стисненого повітря за допомогою програмного забезпечення GT-Power. Результати показали, що для пневматичного гібридного автобуса в Брауншвейзькому робочому циклі можна досягти зниження економії палива приблизно на 30 %. Відповідно основна частина зниження споживання палива була забезпечена функцією зупинки/старту системи, тоді як рекуперативне гальмування знизило витрату лише 8,4 % [34]. Крім того, близько 87 % гальмівної потужності може бути поглинене та перетворено на стиснене повітря, однак лише 20 % цієї частини енергії може бути перетворено на ефективну роботу [35].

Пізніше випробування емуляції транспортного засобу були проведені на двох серійних легкових автомобілях компактного класу: Volkswagen Polo та Nissan Micra [36]. Обидва транспортні засоби були оснащені двигунами, які демонстрували приблизно таку ж номінальну потужність, як і MPE750. Результати експерименту показали, що витрата палива тестових автомобілів може бути зменшена на 35 % і 30 % за циклом MVEG-95 і FTP відповідно [37].

Voser та ін. [38] додатково вивчали наддув стисненим повітрям у циліндри двигуна з іскровим запалюванням із наддувом. Стратегія керування крутним моментом, заснована на дезактивованій системі клапанів із приводом від розподільного вала, була розроблена для компенсації турбозатримки під час перехідних умов, а пізніше була експериментально перевірена на кількох швидкостях двигуна та для різних ступенів крутного моменту [39].

Лі та ін. [40] досліджували економічно ефективну концепцію гібридного двигуна зі стисненим повітрям для автобусів і комерційних транспортних засобів. Як і в дослідженнях, описаних вище, стиснене повітря було перетворено в процесі гальмування транспортного засобу та могло використовуватися для приводу пневматичного стартера та досягнення рекуперативного гальмування для автобусів і транспортних засобів доставки з частими операціями «стоп-старт» [41].

Рекуперативне гальмування стисненим повітрям, в основному, застосовувалося до дизельних двигунів [42]. Це можна пояснити тим фактом, що і дизельний двигун, і двигун на стисненому повітрі працюють на відносно низькій швидкості. Слід також зазначити, що більшість досліджень базуються

на моделюванні, а не на експериментах, причому за останні роки було повідомлено про декілька прототипів гібридного двигуна на стисненому повітрі [43].

Утилізація енергії тепла

Відпрацьоване тепло, що утворюється під час згоряння палива традиційного двигуна, займає приблизно 60-65 % загальної енергії палива у формі охолоджувальної рідини двигуна та вихлопної енергії [44], демонструючи великий потенціал у рекуперації відпрацьованого тепла.

Zhai [45] запропонував гібридну систему стисненого повітря для відновлення відпрацьованого тепла від звичайного двигуна з метою підвищення ефективності двигуна на стисненому повітрі. Звичайний двигун і двигун на стисненому повітрі працювали в системі окремо. Гібридні форми були змодельовані за допомогою засобів моделювання, включаючи послідовний, паралельний і змішаний режими.

Ху та ін. [46] та Nie [47] продовжили дослідження Zhai, моделюючи гібридну систему стисненого повітря на основі окремої рекуперації тепла вихлопних газів і охолоджуючої рідини, довівши, що продуктивність і ефективність двигуна на стисненому повітрі можна покращити шляхом рекуперації відпрацьованого тепла від звичайного ДВЗ.

Автори [48] оцінили потенціал енергозбереження гібридної системи зі стисненим повітрям, моделюючи систему охолодження 4-циліндрового дизельного двигуна і дійшли висновку, що застосування пневматичної гібридизації може заощадити 50 % потужності вентилятора охолодження, оскільки відпрацьоване тепло, що міститься в охолоджувальній рідині, рекуперується стисненим повітрям.

Сумування енергії, що з'єднує вихлопну трубу двигуна та вихід повітряного компресора, також було вивчено за допомогою CFD моделювання та експериментів [49] (рис. 7). Було зроблено висновок, що на процес злиття енергії суттєво впливає площа поперечного перерізу з'єднувальної труби. І близько 80 % відпрацьованого тепла вихлопних газів може бути рекуперовано під оптимізованою площею поперечного перерізу [50]. Гібридна система була оцінена та продемонстрована в експерименті, який має потенціал для підвищення ефективності транспортного засобу приблизно до 40%, коли тиск стисненого повітря стабільний на рівні 8 бар [51].

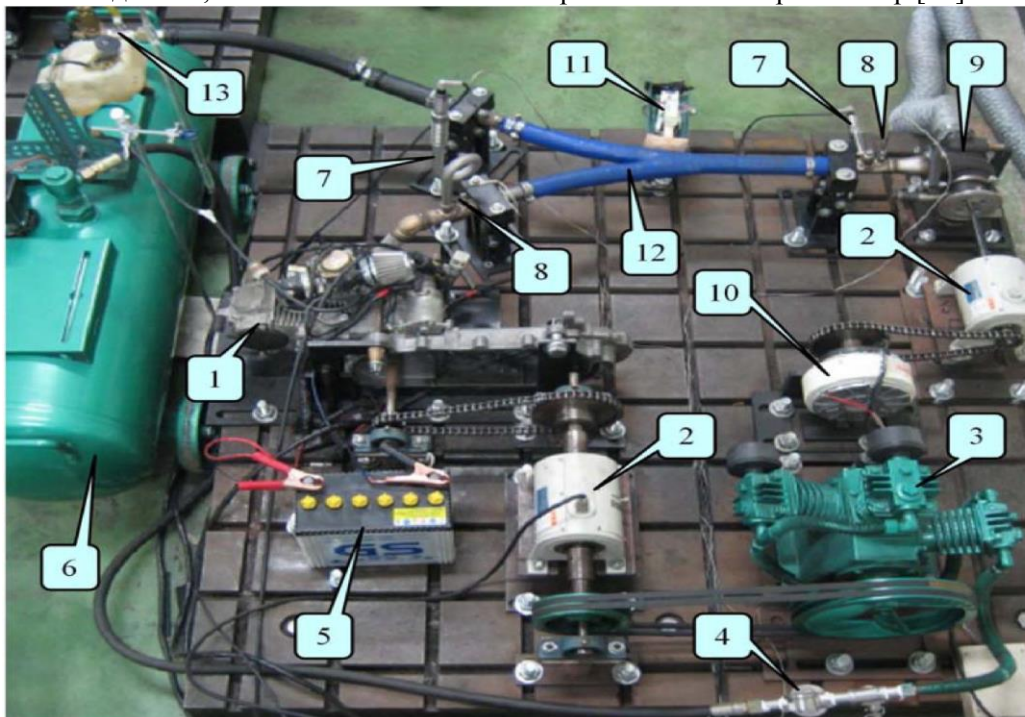


Рисунок 7. Гібридна пневматична енергетична система: 1 - Бензиновий двигун; 2 - Датчик крутного моменту; 3 - Повітряний компресор; 4 - Клапан стабілізатора напруги; 5 - Акумулятор; 6 - Бак для зберігання повітря; 7 - Датчик тиску; 8 - Датчик температури; 9 - Турбіна; 10 - Тензодатчик; 11 - Електричний двигун; 12 - Колектор; 13 - Регулюючий клапан.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Порівняно з трансмісією зі стисненим двигуном, гібридна трансмісія зі стисненим повітрям об'єднує двигун зі стисненим повітрям і звичайний ДВЗ шляхом модифікації традиційної системи

ДВЗ для пневматичної гібридизації. Впорскування палива призупиняється під час фази гальмування, а впуск двигуна в повітряний резервуар здійснюється через додатковий зарядний клапан, розміщений на головці блоку циліндрів. Стиснене повітря може використовуватися для приводу двигуна під час фази запуску або прискорення. Таке пневматичне рекуперативне гальмування є ключем до пневматичної гібридизації, оскільки воно є єдиним джерелом енергії під час роботи гібридного двигуна зі стисненим повітрям.

Пряме розширення є основним методом перетворення енергії для стисненого повітря, відновленого під час фази гальмування. Поточні дослідження були зосереджені на оцінці ефекту пневматичної гібридизації на зниження споживання палива, тоді як кілька дослідників розглядали оптимізацію продуктивності, під час періоду роботи стисненим повітрям, шляхом рекуперації відпрацьованого тепла від звичайного ДВЗ. Крім того, потік стисненого повітря може використовуватися для контролю фази згоряння попередньо змішаної паливно-повітряної суміші. Проблема низької ефективності розширення стисненого повітря потенційно можна усунути за допомогою інноваційного запалювання від стиснення, керованого струменем стисненого повітря.

У таблиці 2 підсумовано характеристики різних гібридних силових агрегатів зі стисненим повітрям, про які йшлося раніше. Можна зробити висновок, що рекуперативне гальмування на основі стисненого повітря повинно стати важливим елементом гібридної силової установки зі стисненим повітрям, тоді як методи використання енергії стисненого повітря можна комбінувати або вибирати відповідно до різних умов.

Таблиця 2 – Порівняння різних гібридних силових агрегатів зі стисненим повітрям

Тип гібридних силових агрегатів зі стисненим повітрям	Переваги	Недоліки
Рекуперативне гальмування на основі стисненого повітря	Стиснене повітря може вироблятися під час гальмування автомобіля, без додаткових вимог до повітряних компресорів.	Споживання палива автомобіля можна зменшити. Ефективність двигуна в режимі стисненого повітря все ще нижча за 20%.
Гібридна система, заснована на рекуперації відпрацьованого тепла	Ефективність у режимі роботи стисненим повітрям можна підвищити шляхом рекуперації відпрацьованого тепла від звичайного двигуна.	Звичайний двигун може працювати в стабільних умовах, щоб зменшити споживання палива та викиди забруднюючих речовин. Джерело стисненого повітря залишається невирішеним, може знадобитися компресор з двигуном. Складність системи збільшується, оскільки звичайний двигун і двигун на стисненому повітрі розділені.
Компресійне запалювання з регульованим струменем стисненого повітря	Стиснене повітря не бере участі в прямій видачі електроенергії, що усуває проблеми з низьким ККД.	Ефект від компресійного запалювання струменя стисненого повітря потребує додаткової перевірки, оскільки поточні дослідження обмежуються моделюванням.

Аналіз викидів парникових газів «від свердловини до колеса», проведений в роботі [52] показав, що загальне споживання енергії та викиди парникових газів для електромобілів були на 20 % вищими, ніж для звичайного автомобіля з ДВЗ. Крім того, роль ДВЗ залишається непохитною для великовантажних комерційних автомобілів, до яких, беззаперечно, відноситься і нафтогазовий технологічний транспорт. З огляду на практичне застосування транспортних засобів, таких як важкі вантажівки, використання батареї як єдиного джерела живлення взагалі неможливе, оскільки велика вага акумуляторів різко зменшить смість вантажу. Повна заміна автомобілів з ДВЗ на електромобілі не настільки здійсненна, якщо тільки в найближчі десятиліття не відбудеться кардинального технологічного розвитку акумуляторів. Тому, як енергозберігаюча та екологічно чиста технологія, гібридна трансмісія зі стисненим повітрям має свою потенційну цінність на важкому транспорті, до якого, поза сумнівом, відноситься і нафтогазовий технологічний транспорт. Надійність повітряного резервуара може бути досягнута завдяки прогресу в розробці матеріалів резервуарів для зберігання.

Ряд компаній розробляють нові матеріали, такі як композит з вуглецевого волокна для зберігання водню під високим тиском, і тиск зберігання може досягати 80 МПа [53].

ВИСНОВКИ

Розглянуто та узагальнено сучасний стан енергетичних систем стисненого повітря та їх потенційне застосування для автомобільного транспорту. Використовуючи пневматичне рекуперативне гальмування енергію, розсіювану під час фази гальмування автомобіля, можна відновити та зберегти енергію у вигляді стисненого повітря та перетворити її на механічну потужність під час прискорення автомобіля. Водночас джерело стисненого повітря може бути забезпечене під час процесу старт-стоп автомобіля. Використання стисненого повітря для рекуперації відпрацьованого тепла від звичайного двигуна внутрішнього згоряння є ще одним методом гібридизації, який може покращити продуктивність системи двигуна, коли він працює виключно зі стисненим повітрям. Коли використовується технологія горіння, керована струменем стисненого повітря, низька ефективність пневматичного двигуна усувається, оскільки стиснене повітря не розширюється для механічної роботи. Цей інноваційний процес спалювання також можна розглядати як рішення для гібридизації стисненого повітря.

Отримані дані та результати показали, що силову установку виключно на стисненому повітрі важко досягти для застосування в легковому транспортному засобі, незважаючи на її унікальну перевагу в екологічній вигоді. Технічні недоліки, включаючи низьку ефективність і низьку щільність енергії двигунів на стисненому повітрі, все ще вимагають великих дослідницьких зусиль для просування технологічних розробок в легковому транспортному засобі. Гібридний двигун на стисненому повітрі, який поєднує двигун на стисненому повітрі зі звичайним двигуном внутрішнього згоряння, може бути потенційним методом на важкому вантажному транспорті та автобусах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.S. Robertson, A Brief History of Air Cars, 2015.
- 2.B. Habbie, Improvement in Compressed-Air Engines, Google Patents, 1879.
- 3.E. Bowers, Evolution of the Air-Compressed Car, 2013.
- 4.H. Liu, Y. Chen, G.L. Tao, G.Z. Jia, W.H. Ding, Research on the displacement and stroke-bore ratio of the air-powered engine, in: Proceedings of International Conference on Fluid Power Transmission and Control, 2005, pp. 381–384.
- 5.Y. Chen, H. Liu, G.L. Tao, Simulation on the port timing of an air-powered engine, Int. J. Vehicle Des. 38 (2005) 259–273.
- 6.X. Yu, G. Yuan, Y. Shen, Z. Liu, S. Su, Theoretical analysis of air powered engine work cycle, Jixie Gongcheng Xuebao/Chin. J. Mech. Eng. 38 (2002) 118–122.
- 7.L. Liu, X.-L. Yu, Optimal design of ideal cycle in air powered engine, Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.) 40 (2006). 1815–1818.
- 8.J.-Q. Hu, X.-L. Yu, L. Liu, X.-H. Nie, Dynamic characteristics of in-cylinder flow field in air-powered engine, Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.) 41 (2007) 1912–1915.
- 9.Q. Xu, M. Cai, Y. Shi, Dynamic heat transfer model for temperature drop analysis and heat exchange system design of the air-powered engine system, Energy 68. (2014) 877–885.
- 10.Y. Shi, J.P. Sun, M.L. Cai, Q.Y. Xu, Study on the temperature compensation technology of air-powered engine, J. Renew. Sustain. Energy 7 (2015).
- 11.Y.-T. Shen, Y.-R. Hwang, Design and implementation of an air-powered motorcycles, Appl. Energy 86 (2009) 1105–1110.
- 12.W. He, Y. Wu, C. Ma, G. Ma, Performance study on three-stage power system of compressed air vehicle based on single-screw expander, Sci. China Technol. Sci. 53 (2015) 2299–2303.
- 13.C.S. Zhang, S.S. Xiong, X.S. Ren, W. Li, Experimental study on output characteristics of scroll expander used as air powered vehicle engine, Electric. Power Energy Syst., Pts 1 and 2 (2019) 516–517.
- 14.H.J. Xu, L. Zhang, C.Y. Pan, X. Zhang, Design and dynamic characteristic prediction of air-powered twin-rotor piston engine, J. Cent. South Univ. 22. (2023) 4585–4596.
- 15.W. He, Y. Wu, Y. Peng, Y. Zhang, C. Ma, G. Ma, Influence of intake pressure on the performance of single screw expander working with compressed air, Appl. Therm. Eng. 51 (2013) 662–669.
- 16.G. Jia, X. Wang, G. Wu, Study on ultrahigh pressure and large flow rate pneumatic on-off valve, Jixie Gongcheng Xuebao/Chin. J. Mech. Eng. 40 (2004). 77–81.

- 17.Z. Zhang, R.B. Jia, Q.H. Yu, M.L. Cai, Study on design criteria and methods for the valve train of the compressed-air engine, *Adv. Mechatron. Contr. Eng., Pts 1-3*. (2013) 278–280.
- 18.Q.H. Yu, M.L. Cai, Y. Shi, C. Yuan, Dimensionless study on efficiency and speed characteristics of a compressed air engine, *J. Energy Resour. ASME* 137 (2015).
- 19.P.L. Chen, X.L. Yu, L. Liu, Simulation and experimental study of electropneumatic valve used in air-powered engine, *J. Zhejiang Univ. - Sci. A* 10 (2009). 377–383.
- 20.A. Koca, R. Bayindir, H. Gunes, M.A. Kunt, S. Sakar, Design and application of electromagnetic solenoid for valve mechanism on compressed air engines, *J. Fac. Eng. Archit. Gaz.* 26 (2011) 73–79.
- 21.C.-Y. Huang, C.-K. Hu, C.-J. Yu, C.-K. Sung, Experimental investigation on the performance of a compressed-air driven piston engine, *Energies* 6 (2013). 1731–1745.
- 22.C.M. Liu, J.J. You, C.K. Sung, C.Y. Huang, Modified intake and exhaust system for piston-type compressed air engines, *Energy* 90 (2015) 516–524.
- 23.Y.W. Wang, J.J. You, C.K. Sung, C.Y. Huang, The applications of piston type compressed air engines on motor vehicles, *Procedia Engineer* 79 (2014) 61–65.
- 24.S.B. Barooah, Tata Motors' Air-Powered Car Project Still on, to Be Launch Ready in 3 Years, 2017.
- 25.I.A. Blog, Tata Nano Could Spawn Electric, Hybrid & Air-Powered Variants-Report, 2017.
- 26.H. Liu, G. Tao, Study on air charging process of quick recharge station for air powered vehicle, *Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mech. Eng.* 18 (2007). 369–373.
- 27.Y. Shi, Y.X. Wang, H.W. Liang, M.L. Cai, Power characteristics of a new kind of air-powered vehicle, *Int. J. Energy Res.* 40 (2016) 1112–1121.
- 28.Y.-D. Fang, D.-F. Li, Y. Yang, X.-L. Yu, Analysis of intake flow loss in pneumatic engine, *Neiranji Gongcheng/Chin. Internal Combust. Engine Eng.* 34 (2013). 88–92.
- 29.M.M. Schechter, Operating a Vehicle with Braking Energy Recovery, United States Patents, 2007.
- 30.M.M. Schechter, Vehicle Operating Method and System, United States Patents, 2001.
- 31.M.M. Schechter, New Cycles for Automobile Engines, SAE International, 1999.
- 32.M.M. Schechter, Regenerative compression braking - a low cost alternative to electric hybrids, *SAE Int.* (2000).
- 33.S. Trajkovic, P. Tunestål, B. Johansson, A study on compression braking as a means for brake energy recovery for pneumatic hybrid powertrains, *Int. J. Powertrains* 2 (2013) 26–51.
- 34.S. Trajkovic, P. Tunestål, B. Johansson, A simulation study quantifying the effects of drive cycle characteristics on the performance of a pneumatic hybrid bus, in: *ASME 2010 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, 2010, pp. 605–618.
- 35.S. Trajkovic, P. Tunestål, B. Johansson, Vehicle driving cycle simulation of a pneumatic hybrid bus based on experimental engine measurements, *Sae Techn. Pap.* (2010) 2010–2011.
- 36.S. Trajkovic, *The Pneumatic Hybrid Vehicle - A New Concept for Fuel Consumption Reduction [Doctoral Thesis]*, Lund University, Sweden, 2010.
- 37.C. Voser, T. Ott, C. Donitz, C. Onder, L. Guzzella, In-cylinder boosting of turbocharged spark-ignited engines. Part 2: control and experimental verification, *Proc. Int. Mech. Eng. D-J. Aut.* 226 (2012) 1564–1574.
- 38.C. Voser, C. Donitz, G. Ochsner, C. Onder, L. Guzzella, In-cylinder boosting of turbocharged spark-ignited engines. Part 1: model-based design of the charge valve, *Proc. Int. Mech. Eng. D-J. Aut.* 226 (2012) 1408–1418.
- 39.C.-Y. Lee, H. Zhao, T. Ma, Analysis of a novel mild air hybrid engine technology, RegenEBD, for buses and commercial vehicles, *Int. J. Engine Res.* 13 (2012). 274–286.
- 40.C.-Y. Lee, H. Zhao, T. Ma, A simple and efficient mild air hybrid engine concept and its performance analysis, *Proc. Inst. Mech. Eng. - Part D J. Automob. Eng.* 227. (2012) 120–136.
- 41.C.-Y. Lee, H. Zhao, T. Ma, Pneumatic regenerative engine braking technology for buses and commercial vehicles, *SAE Int. J. Engines* 4 (2011) 2687–2698.
- 42.C.Y. Lee, H. Zhao, T. Ma, A low cost air hybrid concept, *Oil Gas Sci. Technol. – Revue de l'Institut Français du Pétrole.* 65 (2010) 19–26.
- 43.T.T.H. Ma, H. Zhao, Method of Operating an Internal Combustion Engine, Google Patents, 2008.
- 44.Y. Lu, A.P. Roskilly, X. Yu, K. Tang, L. Jiang, A. Smallbone, et al., Parametric study for small scale engine coolant and exhaust heat recovery system using different Organic Rankine cycle layouts, *Appl. Therm. Eng.* 127 (2017) 1252–1266.

- 45.Y. Lu, Y. Wang, C. Dong, L. Wang, A.P. Roskilly, Design and assessment on a novel integrated system for power and refrigeration using waste heat from diesel engine, *Appl. Therm. Eng.* 91 (2015) 591–599.
- 46.J.-Q. Hu, X.-L. Yu, X.-H. Nie, P.-L. Chen, Feasibility of parallel air-powered and diesel hybrid engine, *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)* 43 (2009) 1632–1637.
- 47.X.-H. Nie, X.-L. Yu, Y.-D. Fang, P.-L. Chen, Experiment research on pneumatic diesel hybrid engine based on cooling water energy recovery, *Neiranji Gongcheng/Chin. Internal Combust. Engine Eng.* 31 (2010) 58–62.
- 48.Y. Fang, D. Li, Z. Fan, H. Xu, L. Wang, X. Yu, Study on pneumatic-fuel hybrid system based on waste heat recovery from cooling water of internal combustion engine, *Sci. China Technol. Sci.* 56 (2013) 3070–3080.
- 49.K.D. Huang, V.Q. Khong, Energy merger pipe optimization of hybrid pneumatic power system by using CFD, *Int. J. Green Energy* 7 (2010) 310–325.
- 50.K.D. Huang, K.V. Quang, K.T. Tseng, Experimental study of flow energy merger of hybrid pneumatic power system, in: 2008 Ieee International Conference on Sustainable Energy Technologies (Icset), Vols 1 and 2, 2008, 1151.
- 51.K.D. Huang, K.V. Quang, K.T. Tseng, Study of recycling exhaust gas energy of hybrid pneumatic power system with CFD, *Energy Convers. Manag.* 50 (2009). 1271–1278.
- 52.J. Woo, H. Choi, J. Ahn, Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions for electric vehicles based on electricity generation mix: a global perspective, *Transport. Res. Transport Environ.* 51 (2017) 340–350.
- 53.D.A. Carbot-Rojas, R.F. Escobar-Jiménez, J.F. Gómez-Aguilar, A.C. Téllez-Anguiano, A survey on modeling, biofuels, control and supervision systems applied in internal combustion engines, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 73 (2017). 1070–1085.

S. Kryshchopa, L. Kryshchopa, A. Dobush, O. Mysiv, R. Matvienko, D. Kopyltsiv. Review of the application of air power systems in transport

The possibilities of using compressed air-based energy systems in power drives of motor vehicles are analyzed. The advantages and limitations of pneumatic systems compared to traditional hydraulic and electromechanical drives are analyzed. The main technical parameters that affect the efficiency of such systems are determined, in particular the level of energy consumption, energy losses and reliability of operation under increased loads. The prospects for implementing modern technologies for accumulating and regulating compressed air to increase the productivity and environmental safety of equipment are considered. Ways of optimizing systems are proposed that will contribute to reducing operating costs and increasing the energy efficiency of vehicles. It is established that compressed air-based energy systems can be used as the main source of power without emissions or as an auxiliary power unit in motor vehicles, ensuring zero carbon emissions and improved overall energy efficiency of integrated design solutions. The article presents a detailed technological development of compressed air-based power systems, summarizes the research on power units operating on this technology in the transport sector. Special attention is paid to the development of new technologies, prototyping and integration of pneumatic systems. In addition, hybrid technologies based on compressed air, which use various methods of pneumatic hybridization, are considered in detail, which allows better use of their advantages and limitations. The prospects and challenges of implementing compressed air-based technologies in power drives of road transport are discussed. It is expected that the modernization of power systems in this sector will contribute to technological development and the implementation of environmentally friendly solutions without emissions in transport.

Keywords: road transport, air technologies, pneumatic systems, compressed air, hybrid power drives, energy efficiency

КРИШТОПА Святослав Ігорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, e-mail: auto.ifntung@ukr.net, ORCID 0000-0001-7899-8817,

КРИШТОПА Людмила Іванівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент каф. автомобільного транспорту, Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, e-mail: l.i.kryshchopa@gmail.com, ORCID 0000-0002-5274-0217,

ДОБУШ Андрій Ігорович, аспірант кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, e-mail: trans@nung.edu.ua, ORCID: немає

МИСІВ Олег Олегович, аспірант кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національній технічній університет нафти і газу, e-mail: trans@nung.edu.ua, ORCID: немає

МАТВІЄНКО Роман Михайлович, аспірант кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національній технічній університет нафти і газу, e-mail: trans@nung.edu.ua, ORCID: немає

КОПИЛЬЦІВ Дмитро Васильович, аспірант кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківській національній технічній університет нафти і газу, e-mail: trans@nung.edu.ua, ORCID: немає

Sviatoslav KRYSTOPA, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: auto.ifntung@ukr.net, ORCID 0000-0001-7899-8817,

Lyudmila KRYSTOPA, Ph.D., Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: l.i.kryshtopa@gmail.com, ORCID 0000-0002-5274-0217,

Andriy DOBUSH, Postgraduate of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: trans@nung.edu.ua,

Oleg MYSIV, Postgraduate of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: trans@nung.edu.ua,

Roman MATVIENKO, Postgraduate of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: trans@nung.edu.ua,

Dmytro KOPYLTIV, Postgraduate of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: trans@nung.edu.ua

DOI 10.36910/automash.v1i24.1730