

Мокряк Б.Ю.

*Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна***АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПНЕВМАТИЧНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ**

Стиснене повітря вже активно застосовується в енергетичних установках різного типу: для наддуву в двигунах внутрішнього згоряння, у комбінованих енергетичних системах при часткових режимах роботи двигуна, у комплексних установках зі змінним циклом роботи, що комбінує ДВЗ і пневматичний двигун, де використовується лише стиснене повітря. При цьому вихлопне повітря з залишковим тиском може бути повторно застосоване в інших циліндрах або збережене в балонах для подальшого використання. Повітря можна зберігати під дуже високим тиском без втрат навіть через тривалий час. Стиснене повітря є найбільш стійким джерелом енергії. Воно не залежить від змін температури чи погодних умов. Після стиснення повітря може бути використане в будь-який момент без втрати тиску.

Визначено недоліки пневматичних автомобілів. Зокрема, навіть за умов високого тиску стиснене повітря містить значно менше енергії порівняно з іншими джерелами енергії для транспорту, такими як рідке чи газоподібне паливо та акумулятори. Низька енергетична щільність стисненого повітря є значною перешкодою, яка може спричинити низьку динамічну продуктивність двигуна чи транспортного засобу. Для забезпечення безперервного постачання стисненого повітря під час роботи необхідно обмежувати потужність двигуна чи швидкість транспортного засобу. Крім того, балони для зберігання повітря повинні мати значний об'єм, щоб вмішувати достатню кількість стисненого повітря, що ускладнює просторову організацію транспортного засобу.

Запроновано пневмотрансмісію, яка складається з пневматичної виконавчої частини та електронної частини забезпечення і керування. Електронна частина забезпечення і керування (електробатарея і контролер) задіяна для живлення компресора і керування клапаном подачі стисненого повітря. Пневматична виконавча частина забезпечує формування робочого тіла (стисненого повітря) і його подачу до виконавчого шибєрного мотора.

Ключові слова: пневматичні автомобілі, стиснене повітря, пневматична трансмісія, шибєрний мотор, пластинчастий мотор.

ВСТУП

Використання сучасних енергетичних установок у транспорті з двигунами внутрішнього згоряння не здатне повністю вирішити екологічні питання, зумовлені трафіком, особливо у густонаселених міських районах із населенням понад мільйон осіб. Одним із перспективних напрямків покращення екологічної безпеки транспорту є застосування двигунів, які використовують стиснене повітря як робоче середовище. Це зумовлено низкою переваг пневматичних двигунів у порівнянні з іншими енергетичними системами: високий рівень безпеки, простота транспортування, екологічність, низька собівартість виробництва пневматичних транспортних засобів і стисненого повітря, а також легкість утилізації повітряних батарей і енергетичних систем.

Стиснене повітря вже активно застосовується в енергетичних установках різного типу: для наддуву в двигунах внутрішнього згоряння, у комбінованих енергетичних системах при часткових режимах роботи двигуна, у комплексних установках зі змінним циклом роботи, що комбінує ДВЗ і пневматичний двигун, де використовується лише стиснене повітря. При цьому вихлопне повітря з залишковим тиском може бути повторно застосоване в інших циліндрах або збережене в балонах для подальшого використання. Сьогодні такі компанії, як MDI, TATA тощо, вже створили пневматичні автомобілі, які підготовлені до серійного виробництва або вже випускаються, наприклад, на Гаваях. Харківський національний автомобільно-дорожній університет також займається дослідженням і розробкою пневматичних двигунів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У системі пневматичного приводу енергія зазвичай перетворюється двигуном у механічну потужність шляхом розширення стисненого повітря в циліндрі [1].

Поршневий механізм схожий на конструкцію стандартного двигуна внутрішнього згоряння, за винятком того, що в двигуні на стисненому повітрі відсутні форсунки або свічки запалювання. Робочий цикл такого двигуна складається з двох тактів: розширення та випуску. Важливо зазначити, що впускний процес відбувається на початку такту розширення. Впускний клапан відкривається зазвичай тоді, коли поршень досягає Верхньої Мертвої Точки, після чого стиснене повітря надходить у циліндр із повітряного балона. Коли впускний клапан закривається, стиснене повітря, що залишилося в циліндрі, розширюється далі, доки поршень не дійде до Нижньої Мертвої Точки.

Випускний клапан відкривається після завершення фази розширення, і стиснене повітря виходить із циліндра під час зворотного руху поршня.

Наприкінці 1970-х років австралійський винахідник Анджело Ді П'єтро розробив принципово новий двигун, який не має циліндрів і поршнів [2]. У його конструкції в корпусі обертається кільце, що спирається на спеціальні ролики, закріплені на валу. Розподіл повітря між камерами, утвореними лопатями, забезпечує спеціальна система. Змінюючи об'єм камер, ця система приводить у рух ротор, який передає силу безпосередньо на колеса. Двигун Анджело Ді П'єтро вирізняється своєю легкістю, простотою конструкції та відсутністю необхідності в коробці передач, оскільки здатний забезпечувати максимальний обертовий момент на низьких обертах.

Цей двигун має ряд переваг. Завдяки компактності й простоті конструкції пневмомотори можна встановлювати безпосередньо на колеса. До того ж здатність видавати максимальний крутний момент на дуже низьких обертах усуває потребу в коробці передач.

До 1991 року інженер-випробувач Гай Негре був одним із провідних конструкторів двигунів для Формули-1. Він заснував компанію Motor Development International (MDI) [2]. Перший розроблений Гаєм Негре двигун мав можливість працювати не лише на стисненому повітрі, а й на природному газі, бензині та дизельному паливі. Цю силову установку випробували на хетчбеку Citroen AX. На швидкостях до 60 км/год автомобіль рухався за рахунок енергії стисненого повітря, а при збільшенні швидкості установка автоматично переходила на бензин.

На перетворення пускового режиму пневматичного приводу в робочий знадобилося понад 10 років. Заснована групою однодумців компанія отримала назву Motor Development International. Її початковий проєкт не можна було назвати повноцінним пневмомобілем. Перший двигун Гає Негре працював не лише на стисненому повітрі, а й на природному газі, бензині чи дизельному паливі. У двигуні MDI всі ключові процеси – стиснення, займання горючої суміші та робочий цикл – відбувалися у двох циліндрах різного об'єму, з'єднаних сферичною камерою.

Силова установка була випробувана на хетчбеку Citroen AX. На швидкостях до 60 км/год, коли споживана потужність не перевищувала 7 кВт, автомобіль рухався виключно за рахунок енергії стисненого повітря. При перевищенні цієї швидкості двигун автоматично переходив на бензин, що дозволяло досягати потужності до 70 кінських сил. Витрата рідкого палива на шосе становила всього 3 літри на 100 км, що робило установку конкурентною навіть із сучасними гібридними автомобілями.

Команда MDI продовжила вдосконалювати двигун, працюючи над створенням повністю пневматичного автомобіля без використання рідкого чи газового палива. Першим прототипом став Taxi Zero Pollution, але він не привернув уваги розвинених країн, які сильно залежали від нафтової промисловості. Проте ідея зацікавила Мексику, де в 1997 році був підписаний договір про заміну таксопарку Мехіко, одного з найбільш забруднених міст світу, на транспорт, що працює на стисненому повітрі.

Наступною розробкою став Airpod, оснащений напівкруглим склопластиковим кузовом і 80-кілограмовими балонами для зберігання стисненого повітря, яких вистачало на 150–200 кілометрів шляху. Пізніше компанія представила проєкт OneCat — сучасніший аналог мексиканського таксі Zero Pollution. У карбонових балонах OneCat можна зберігати до 300 літрів стисненого повітря під тиском 300 бар.

Двигун MDI працює за таким принципом: у малий циліндр засмоктується повітря, яке стискається поршнем до тиску 18–20 бар і нагрівається. Потім підігріте повітря потрапляє у сферичну камеру, де змішується з холодним повітрям із балонів. Це холодне повітря миттєво розширюється, нагріваючись, і збільшує тиск на поршень великого циліндра, що передає зусилля на колінчастий вал.

Пневмомобілі можуть ефективно використовуватися в муніципальному та промисловому транспорті, а також як частина гібридних систем. Розробка таких двигунів сприяла появі нового типу транспорту – PHEV (pneumatic-hybrid electric vehicle), у якому пневматичний двигун комбінується з електродвигуном.

Сьогодні MDI повертається до своїх початкових ідей, розробляючи універсальний двигун, здатний працювати не лише на стисненому повітрі, але й на рідкому або газоподібному паливі.

Упродовж останнього десятиліття більшість досліджень двигунів на стисненому повітрі були зосереджені на поршневій конструкції. Лю та інші [3,4] створили математичні моделі таких двигунів і проаналізували їхню роботу в умовах одноетапного та двоетапного розширення. Результати підтвердили, що поршнева конструкція є оптимальним рішенням для двигунів на стисненому повітрі. Ю та інші [5] дослідили теоретичний цикл таких двигунів і виявили, що вихідна потужність двигуна має лінійну залежність від початкової температури розширення. Збільшити продуктивність можна за

допомогою багатоступеневої, квазіізотермічної експансії стисненого повітря. Лю та інші [6] запропонували оптимізаційний підхід до теоретичного циклу двигуна, використовуючи метод багатокритеріальної оптимізації. Максимальна ефективність досягалася при співвідношенні тиску впуску та коефіцієнта стиснення 32 та 13 відповідно. Для траєкторії поршня був розроблений механізм з подвійним колінчатим валом [6], який забезпечує зупинку поршня, доки тиск у циліндрі не зрівняється з впускним, а також дозволяє лінійну залежність швидкості поршня від площі впускного клапана.

Ху та інші [7] провели аналіз потоків у циліндрі двигуна, що дозволило виявити, що турбулентність біля впускного порту значно знижує енергоефективність через втрати стисненого повітря. Група з Пекінського університету аеронавтики й астронавтики виконала віртуальне моделювання роботи двигуна [8,9], створивши модель, перевірену за допомогою пневматичного двигуна (APE) [9]. Команда розробила нову систему клапанів для дослідження динамічних характеристик і створила оптимальні стратегії керування клапанами, що розширило теоретичні знання про технологію пневматичних двигунів. Дослідження також охоплювало моделювання теплових процесів [10], яке показало значне зниження температури під час роботи. Для уникнення ризику замерзання через ефект дроселювання запропонували технологію компенсації температури [11], де етанол використовувався як теплообмінне середовище. Це дозволило підвищити ефективність двигуна на 30%. Ю та інші [12] запропонували механізм подвійного колінчатого з'єднання, що забезпечило стабільність тиску в циліндрі та підвищення енергоефективності в 1,86–2,86 рази.

Окрім поршневих двигунів, дослідження охоплювали й інші конструкції двигунів на стисненому повітрі.

Однак поршневий експандер має низку недоліків, таких як низька загальна ефективність, складна конструкція, швидке зношування та високий рівень шуму. У зв'язку з цим Хе та ін. [13] запропонували та спроектували одношнековий експандер для усунення цих проблем. Робочий цикл одношнекового експандера включає три основні етапи: впуск повітря, розширення повітря та його викид. На початку процесу стиснене повітря закачується під певним тиском, змушуючи ротор обертатися, при цьому роторна щелепа рухається синхронно з ротором. У фазі розширення повітря заповнює закритий об'єм, що утворюється спіральним жолобом, щелепою ротора та корпусом експандера. На основі цього принципу був створений прототип шнекового експандера, а також розроблена експериментальна установка для оцінки його продуктивності [14]. Тестування показало, що максимальна загальна ефективність досягає 55% при впускному тиску 1,5 МПа та швидкості 2800 об/хв. Найвищий момент обертання сягає 100 Н·м, а максимальна вихідна потужність – близько 22 кВт при мінімальному споживанні повітря близько 60 кг/кВт·год.

Сюй та ін. [15] представили новий тип двигуна на стисненому повітрі, що базується на механізмі з двома роторами. Однією з ключових переваг цієї конструкції є здатність змінювати об'єм кожного циліндра в чотири рази протягом одного оберту вихідного валу завдяки спеціальній системі диференціального швидкісного приводу. Таким чином, двигун із двома роторами можна прирівняти до пневматичного поршневого двигуна з 32 циліндрами однакового об'єму. Результати моделювання засвідчили, що максимальний момент обертання двигуна з двома роторами досягає 100 Нм при швидкості 450 об/хв і тиску впуску 0,6 МПа, що майже втричі перевищує показники традиційного поршневого двигуна.

Навіть за умов високого тиску стиснене повітря містить значно менше енергії порівняно з іншими джерелами енергії для транспорту, такими як рідке чи газоподібне паливо та акумулятори. Зокрема, енергетичний вміст стисненого повітря становить лише 0,5% від енергії бензину та 1,5% від енергії стисненого природного газу (CNG). Подібним чином енергоємність стисненого повітря суттєво поступається акумуляторам, зокрема свинцево-кислотним (Pb-acid), нікель-кадмієвим (NiCd), нікель-металогідридним (NiMH) та літій-іонним (Li-ion). Хоча акумулятори значно важчі за стиснене повітря і характеризуються меншою питомою енергією на одиницю маси, за обсягом вони залишаються ефективнішими. Для порівняння, стиснене повітря забезпечує лише 12% енергії, доступної в літій-іонних акумуляторах [16, 17].

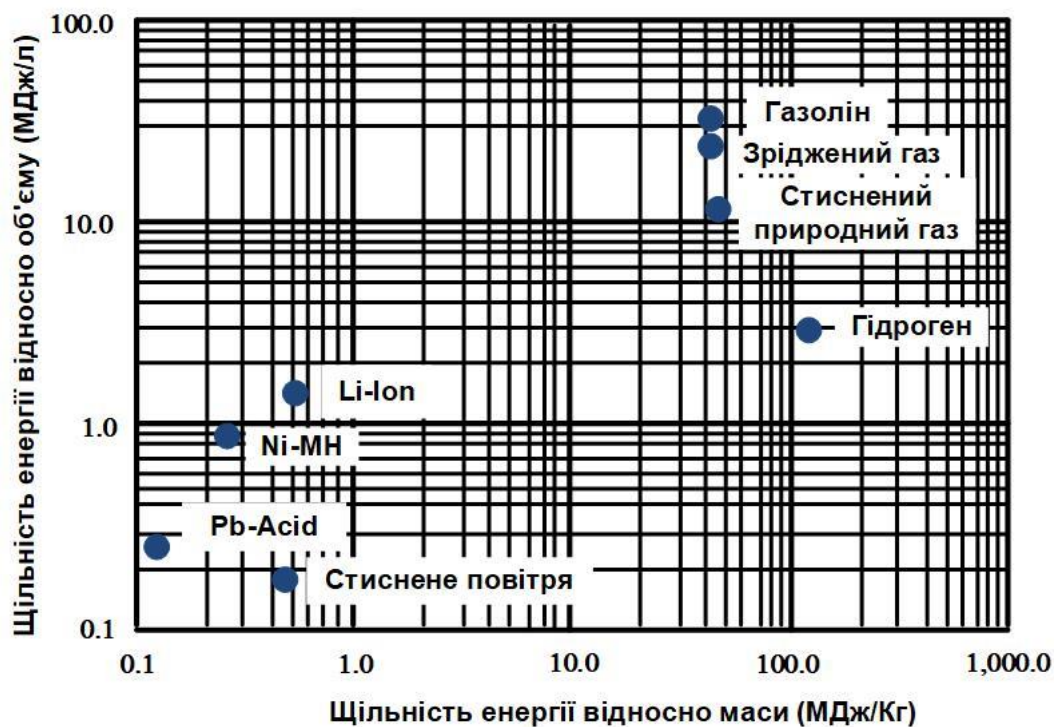


Рисунок 1 – Інфограма енергетичної ефективності різних джерел енергії [16]

Низька енергетична щільність стисненого повітря є значною перешкодою, яка може спричинити низьку динамічну продуктивність двигуна чи транспортного засобу. Ліу та ін. [18] підрахували, що енергетична щільність стисненого повітря становить 370 кДж/кг при тиску зберігання 20 МПа, що значно менше, ніж у дизельного чи бензинового палива. Для забезпечення безперервного постачання стисненого повітря під час роботи необхідно обмежувати потужність двигуна чи швидкість транспортного засобу. Крім того, балони для зберігання повітря повинні мати значний об'єм, щоб вміщувати достатню кількість стисненого повітря, що ускладнює просторову організацію транспортного засобу.

Високі енергетичні втрати під час роботи є ще одним суттєвим технічним бар'єром. Через низьку енергетичну щільність необхідно підвищувати тиск зберігання стисненого повітря, що призводить до значних втрат під час регулювання тиску. У пневматичних двигунах тиск у циліндрі після розширення повітря зазвичай залишається вищим за атмосферний, що свідчить про неповне перетворення енергії стисненого повітря на вихідну потужність. Це може також викликати втрати енергії через насос двигуна під час викиду. Крім того, втрати потоку виникають під час впуску повітря через високу швидкість потоку та конструктивні особливості клапанної системи [19].

Загалом, через ці втрати ефективність пневматичного двигуна є досить низькою порівняно з традиційними двигунами внутрішнього згоряння. Експериментальні та симуляційні дослідження показують, що ефективність пневматичного двигуна становить приблизно 20%, що є головним недоліком цієї технології порівняно з BEV та HEV.

Процес регулювання стисненого повітря створює низькі температури в певних ділянках труб чи клапанів через ефект Джоуля-Томсона, що може спричинити обмерзання двигуна після тривалої роботи.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є аналіз використання автомобілів з пневматичними двигунами, визначення переваг і недоліків автомобілів з пневматичним приводом. Також формування конструктивної схеми пневмотрансмісії автомобіля. Для реалізації мети статті необхідно визначити, які конструкції пневматичних двигунів використовуються в автомобілях, визначити, який двигун буде використовуватися і основні його робочі характеристики, запропонувати пневмотрансмісію дослідного зразка автомобіля.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Повітря є природним ресурсом і вільно доступне в атмосфері. Його можна зберігати після стиснення до необхідного тиску, наприклад, 90–150 psi. Це єдине джерело, яке можна зберігати під

дуже високим тиском без втрат навіть через тривалий час. Стиснене повітря може бути ефективною альтернативою для легкових транспортних засобів, які наразі спричиняють забруднення через використання викопного палива, що негативно впливає на екологічний баланс та здоров'я населення.

Стиснене повітря є найбільш стійким джерелом енергії. Воно не залежить від змін температури чи погодних умов. Після стиснення повітря може бути використане в будь-який момент без втрати тиску. Таким чином, його застосування є більш вигідним, ніж використання інших альтернатив викопному паливу. Наприклад, акумулятори потребують постійного обслуговування під час заряджання та розряджання, воднева енергетика має проблеми зі зберіганням і є дуже дорогою, а вітряні турбіни та сонячні батареї потребують додаткових пристроїв для зберігання енергії (наприклад, високовольтних конденсаторів або акумуляторів), що спричиняє додаткові витрати.

За конструкцією автомобільні повітряні двигун поділяються на дво- і чотиритактні поршневі, шибєрні (пластинчасті) двигуни.

При подачі стисненого повітря в робочу камеру пневматичного пластинчастого двигуна виникають сили, що діють на пластини 3, обмежуючи обсяг камери (рисунк 2). У зв'язку з ексцентричним розташуванням ротора 1 щодо статора 2 ділянки пластин різні, тому і сили, що діють на них, розрізняються за розмірами. У точці, після якої обсяги робочих камер починають зменшуватися, робиться отвір для відведення відпрацьованого повітря. З отриманих всіх прикладених зусиль виникає крутний момент, який призводить до обертання ротора, під час якого збільшується обсяг частини робочих камер, за рахунок чого стиснене повітря, що міститься в цих камерах, розширюється. Розширювальні роботи, що виконуються при цьому, перетворюються в додаткову механічну енергію обертання ротора.

Кількість пластин пневматичного двигуна визначає його ККД, умови пуску і швидкість розгону (розгін), а також рівномірність обертання. Стандартні конструкції мають 3-5 пластин, в особливих випадках їх кількість збільшують до 10. Доступні як реверсивні, так і неревєрсивні пластинчасті пневматичні двигуни.

До недоліків ковзаючих пневматичних двигунів можна віднести необхідність рясного мастила і низьку герметичність робочих камер, що призводить до підсмоктування повітря, а значить і до зниження ККД. Діапазон потужностей пластинчастих пневматичних двигунів становить 0,05 – 20 кВт, діапазон швидкостей – 30 – 20000 об/хв.

Часто конструкція пластинчастого пневматичного двигуна включає в себе додаткові комплектуючі: редуктор (частіше планетарний), який забезпечує необхідну споживачеві швидкість обертання, і відцентровий регулятор. Останній дозволяє обмежити обороти холостого ходу і забезпечити його сталість в певних межах при коливаннях навантаження.

Пластинчасті пневматичні двигуни широко використовуються в різноманітних спеціальних пристроях і пристроях, що працюють на стисненому повітрі.

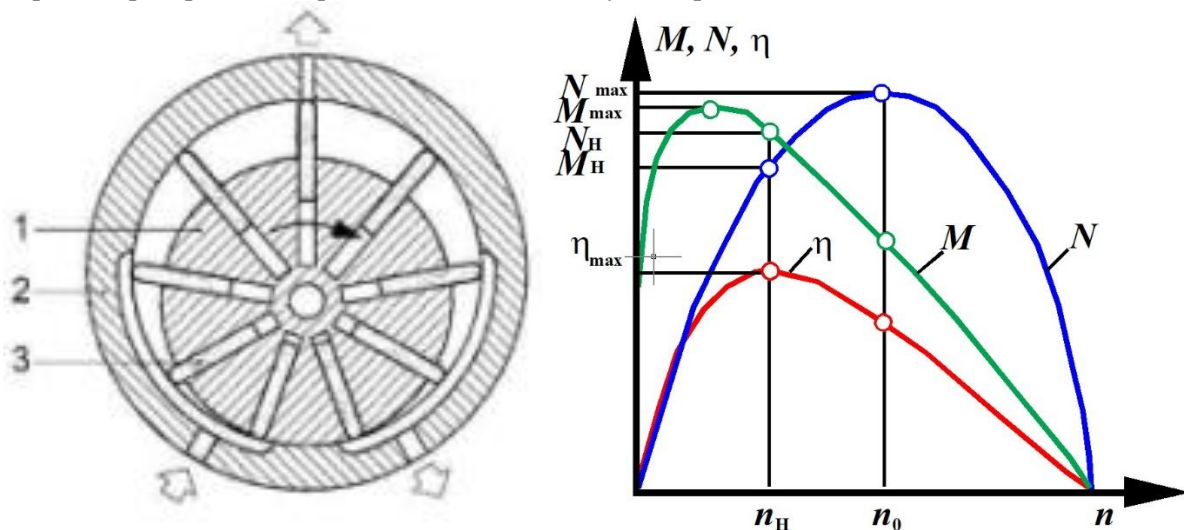


Рисунок 2 – Шибєрний (пластинчастий) мотор
Рисунок 3 – Основні робочі характеристики пневмомоторів

У роботі пневматичних двигунів необхідна наявність такого стійкого стану, при якому досягається максимальна продуктивність машини. Цей режим відповідає статичним характеристикам крутного моменту M , потужності N і загальному ККД, визначеним теоретично або експериментально при постійній частоті обертання n (рисунок 3).

Як видно з рисунка 3, потужність пневматичного двигуна досягає максимального значення $N_{\max}$ при частоті обертання $n_0 \sim 0,5 n_{\text{хх}}$ (де $n_{\text{хх}}$ - частота обертання холостого ходу), крутний момент має найбільше значення $M_{\text{таq}}$ при частоті обертання, близької до нуля.

Номінальною частотою обертання пневматичного двигуна прийнято вважати його величину, при якій відбувається максимальний ККД двигуна. Для двигунів загального призначення з додатним об'ємом $v=(0,30\ldots 0,35)N_{\text{хх}}$. Найбільший ККД пневматичного двигуна досягається саме при номінальній частоті обертання, а найбільший технічний ККД досягається при максимальній потужності.

У паспортних характеристиках пневматичних двигунів зазвичай вказується максимальна потужність і відповідна частота обертання при робочому тиску стисненого повітря, а також номінальна частота обертання.

Пропонується пневмотрансмісія, яка складається з пневматичної виконавчої частини та електричної частини забезпечення і керування (рисунок 4). Електрична частина забезпечення і керування (електробатарея і контролер) задіяна для живлення компресора і керування клапаном подачі стисненого повітря. Пневматична виконавча частина забезпечує формування робочого тіла (стисненого повітря) і його подачу до виконавчого шибєрного мотора.

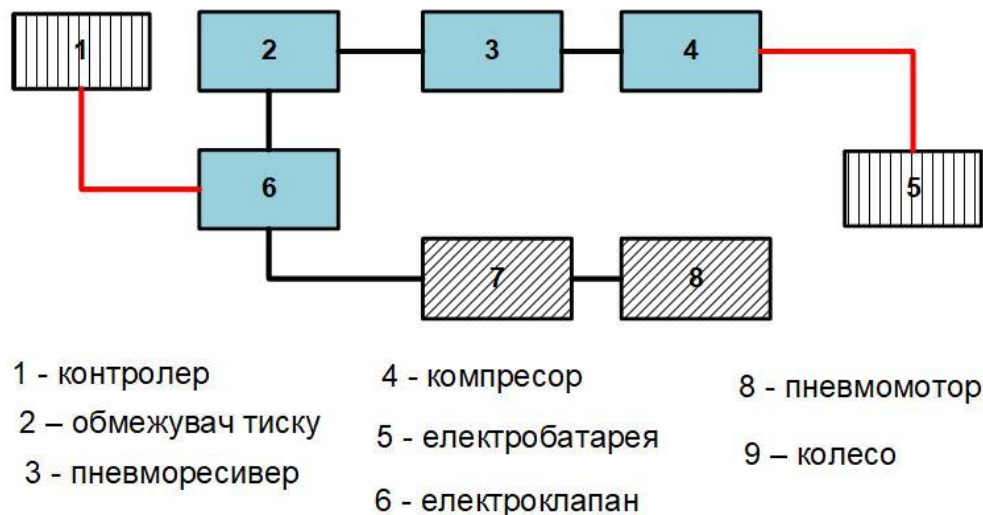


Рисунок 4 – Структурна схема пневмотрансмісії

Головною проблемою використання пневмодвигуна на мобільному (автономному) транспортному засобі залишається його малий пробіг, обумовлений обмеженим обсягом запасеного стисненого робочого тіла (балонами зі стисненим повітрям) і непродуктивними витратами енергії, пов'язаними з високими контактними тисками та, відповідно, виникаючими значними силами тертя у місцях рухомих спряжень, протіканнями повітря через рухомі спряження, динамічними перенавантаженнями окремих ланок кінематичного ланцюга. Отже, підвищення ефективності використання пневмодвигуна вбачається у визначенні раціональних параметрів елементів двигуна з кільцевим ротором та пошуку нових технічних рішень, направлених на зменшення статичних і динамічних сил опору руху, а також контактних тисків у місцях рухомих спряжень, оскільки існуючі конструкції двигунів такого типу передбачають значне навантаження рухомих ущільнень, проковзування робочого кільця відносно ротора, що веде до швидкого зношування ущільнень, зниження к.к.д. та перевитрати стисненого повітря (робочого тіла).

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Хоча САВ показує гірші результати порівняно з бензиновими та електричними автомобілями за показниками, наведеними в таблиці 1, можуть бути можливості для поліпшення життєздатності повітряних автомобілів. По-перше, можна застосувати стратегії для збільшення дальності руху САВ (хоча з компромісами). По-друге, повітряний автомобіль може мати вищу корисність у певних

застосуваннях, відмінних від міських автомобілів. Нарешті, якщо аналізувати за екологічними показниками, включаючи викиди з вихлопної труби та місцеві забруднюючі речовини, CAV можна вважати переважним у порівнянні з бензиновими автомобілями.

На даний момент CAV страждає від такої обмеженої дальності руху, що їх не можна використовувати як альтернативу існуючим автомобілям. Хоча можуть бути можливості для покращення цього фатального недоліку через різноманітні стратегії, спрямовані на підвищення енергетичного запасу, паливної економії або можливостей заправки, ці стратегії часто мають компроміси, які обмежують їх ефективність.

Дальність руху можна покращити, збільшивши максимальний тиск у баку зберігання, але ця перевага буде частково компенсована зниженням ефективності процесу розширення повітря. Додаткова вага пального також зменшить паливну економію. Крім того, майбутні дослідження повинні будуть розглянути більші термічні коливання, які виникатимуть при розширенні газу з таких великих тисків.

Альтернативно, дальність руху може бути покращена за рахунок збільшення розміру баків зберігання на борту. Однак маса додаткового пального значно збільшить загальну вагу автомобіля, що призведе до зменшення паливної економії. Крім того, буде важко встановити значно більший повітряний бак у маленькому корпусі CAV.

Третім варіантом для покращення дальності, запропонованим виробниками CAV, є обладнання автомобіля на борті компресором повітря. Ця стратегія дозволила б водіям заправляти свої автомобілі на ходу і не залежати від станцій заправки. Однак цей варіант має кілька проблем, зокрема обмеження енергії, необхідної для використання бортового пального для живлення пристрою для заправки автомобіля. Крім того, реалістичність розробки маленького, легкого компресора для застосувань з високим тиском є невизначеною. З огляду на ці проблеми, переваги цієї стратегії тут не оцінюються.

Нарешті, більш реалістичною стратегією може бути використання рекуперативного гальмування для підвищення дальності та паливної економії. Ця опція також зменшила б екологічні наслідки та експлуатаційні витрати без компромісів в продуктивності, властивих попереднім стратегіям. В рамках цієї стратегії під час гальмування пневматичний двигун діє як компресор, поглинаючи механічну потужність від осей для часткового поповнення баку з стисненим повітрям. Ця форма гібридизації була б аналогічною до гібридних гідравлічних вантажівок, які наразі експлуатуються. Деякі дослідження навіть вказують, що така стратегія може бути реалістичним і економічно вигідним варіантом [4].

Хоча CAV, як в даний час задумано для міського водіння, не є переконливою альтернативою існуючим автомобілям, можуть бути інші ситуації або ніші, в яких технологія більш підходить. Деякі з цих можливостей можуть потребувати подальшого вивчення.

Одним із альтернативних застосувань CAV може бути використання їх як повільних, короткоспрямованих автомобілів, подібно до електричних автомобілів для сусідства. Низька швидкість автомобіля підвищила б паливну економію, а короткі відстані, у поєднанні з маленькими компресорами повітря для домашнього використання, зменшили б обмеження дальності руху CAV. Якщо повітряні автомобілі можуть бути показані як конкурентоспроможні електричним автомобілям у цьому контексті, ці сусідські автомобілі можуть стати функціональною альтернативою існуючим виборам.

Крім того, CAV можуть бути доречними для використання в певних складних умовах. Унікальним аспектом CAV є відсутність згоряння або електричних іскр під час роботи. Ця риса може зробити повітряні автомобілі придатними для застосувань у погано вентильованих або з низьким рівнем кисню, що обмежує використання бензинових двигунів, або у вибухонебезпечному середовищі, що може бути проблематичним як для бензинових, так і для електричних автомобілів. Використання CAV у таких ситуаціях буде аналогічним до сучасного використання промислових пневматичних двигунів, які часто застосовуються в таких умовах.

Хоча повітряні автомобілі показують гірші результати порівняно з бензиновими та електричними автомобілями за показниками, проаналізованими в цьому дослідженні, є певні екологічні проблеми, в яких CAV перевершують бензинові автомобілі. Оскільки CAV не має викидів з вихлопної труби, він не сприяє локальному накопиченню критерійних та токсичних забруднюючих речовин. Якщо виробництво електрики для живлення CAV відбувається поза межами населених пунктів, повітряні автомобілі можуть мати менший загальний вплив на здоров'я, ніж бензинові автомобілі. Однак ретельний аналіз цих ефектів виходить за рамки цього документу.

Більш того, оскільки CAV можуть замінити бензинові автомобілі, вони можуть зменшити споживання нафти в транспортному секторі. Однак для того, щоб це зменшення мало вимірювальний вплив на загальне споживання нафти в США, необхідне широке впровадження CAV. Якщо CAV складали б 1.0% парку легкових автомобілів США, вони щорічно заміщували б 10.3 мільйонів барелів нафти, що становить 0.21% річного споживання в США [19, 20]. Проте ці додаткові вигоди не обмежуються лише CAV і також будуть реалізовані електричними автомобілями.

ВИСНОВКИ

Екологічні та економічні проблеми, які створюють легкові автомобілі, є значними і вимагають широкого спектру еволюційних та революційних рішень. Хоча CAV пропонують потенціал для вирішення цих проблем, аналіз, що міститься в цьому дослідженні, показує, що їх застосування обмежено поганою продуктивністю автомобілів та високими екологічними наслідками. CAV показує гірші результати, ніж бензинові та електричні автомобілі за показниками дальності руху, вуглецевого сліду та витрат на паливо.

Проведено огляд досліджень пневматичних приводів, що сприяло створенню різних прототипів двигунів і транспортних засобів. Починаючи з 1990-х років, було проведено чимало досліджень пневматичного приводу, що сприяло створенню різних прототипів двигунів і транспортних засобів. Однак пневматичний привід у транспортних засобах залишається менш популярним порівняно з іншими альтернативними енергетичними технологіями, такими як BEV або HEV.

Було виявлено, що однією з основних технічних перешкод є значні енергетичні втрати стисненого повітря під час роботи. Через низьку енергетичну щільність виникає необхідність у підвищенні тиску зберігання стисненого повітря, що, у свою чергу, може призводити до великих втрат під час регулювання тиску при вивільненні повітря з балона. Під час роботи пневматичного двигуна тиск у циліндрі зазвичай перевищує атмосферний після розширення стисненого повітря, що свідчить про недостатнє перетворення енергії на вихідну потужність. Це також може спричиняти втрати енергії через насос двигуна під час викиду. Додатково, через високу швидкість потоку та конструкцію системи клапанів можуть виникати суттєві втрати потоку під час впуску стисненого повітря.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Y. Fang, Y. Lu, X. Yu, A.P. Roskilly, Experimental study of a pneumatic engine with heat supply to improve the overall performance, *Appl. Therm. Eng.* 134 (2018) 78–85.
2. 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).
3. Verma, S. Air Powered Vehicles. *The Open Fuels & Energy Science Journal*, Vol. 1, 2008, pp. 54–56.
4. Транспортні енергетичні установи (традиційні, нетрадиційні та альтернативні), принцип роботи та особливості будови: [підруч. для студ. вищ. навч. закл.] / Ю.Ф. Гутаревич, Л.П. Мержиєвська, О.В. Сирота, Д.М. Тріфонов. К.: НТУУ, 2015. - 243 с.
5. 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 the Sixth International Conference on Fluid Power Transmission and Control*, 2005, pp. 381–384.
6. 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.
7. 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.
8. R. Song, X. Fu, M. Cai, Non-dimensional modeling and simulation analysis of air powered engine, *Appl. Mech. Mater.* 278–280 (2013) 307–314.
9. Q.Y. Xu, Y. Shi, Q.H. Yu, M.L. Cai, Virtual prototype modeling and performance analysis of the air-powered engine, *Proc. Int. Mech. Eng. C-J. Mech.* 228 (2014) 2642–2651.
10. 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.
11. 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).
12. Q.H. Yu, M.L. Cai, Y. Shi, Working characteristics of two types of compressed air engine, *J. Renew. Sustain. Energy* 8 (2016).

13. 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 (2010) 2299–2303.
14. Y.-T. Shen, Y.-R. Hwang, Design and implementation of an air-powered motorcycles, *Appl. Energy* 86 (2009) 1105–1110.
15. L. Liu, X.-L. Yu, Optimal piston trajectory design of air powered engine, *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)* 40 (2006) 2107–2111.
16. Wang, M. GREET 1.5—Transportation Fuel Cycle Model. Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., 1999, Vol. 1, Table 3.3.
17. Linden, D., and T. Reddy. Secondary Batteries. In *The Battery Handbook*, McGraw-Hill, New York, 2001, Chap. 22.
18. 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.
19. J.-L. Cai, X.-L. Yu, G.-J. Yuan, Y.-M. Shen, Influence of port timing on work process of air-powered engine, *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)* 38 (2004) 65–69.
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.

REFERENCES

1. Y. Fang, Y. Lu, X. Yu, A.P. Roskilly, Experimental study of a pneumatic engine with heat supply to improve the overall performance, *Appl. Therm. Eng.* 134 (2018) 78–85.
2. 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).
3. Verma, S. Air Powered Vehicles. *The Open Fuels & Energy Science Journal*, Vol. 1, 2008, pp. 54–56.
4. Transportni enerhetychni ustanovy (tradytsiini, netradytsiini ta alternatyvni), pryntsyp roboty ta osoblyvosti budovy: [pidruch. dlia stud. vyshch. navch. zakl.] / Yu.F. Hutarevych, L.P. Merzhyievs'ka, O.V. Syrota, D.M. Trifonov. K.: NTU, 2015. – 243 s.
5. 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 the Sixth International Conference on Fluid Power Transmission and Control*, 2005, pp. 381–384.
6. 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.
7. 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.
8. R. Song, X. Fu, M. Cai, Non-dimensional modeling and simulation analysis of air powered engine, *Appl. Mech. Mater.* 278–280 (2013) 307–314.
9. Q.Y. Xu, Y. Shi, Q.H. Yu, M.L. Cai, Virtual prototype modeling and performance analysis of the air-powered engine, *Proc. Int. Mech. Eng. C-J. Mech.* 228 (2014) 2642–2651.
10. 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.
11. 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).
12. Q.H. Yu, M.L. Cai, Y. Shi, Working characteristics of two types of compressed air engine, *J. Renew. Sustain. Energy* 8 (2016).
13. 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 (2010) 2299–2303.
14. Y.-T. Shen, Y.-R. Hwang, Design and implementation of an air-powered motorcycles, *Appl. Energy* 86 (2009) 1105–1110.
15. L. Liu, X.-L. Yu, Optimal piston trajectory design of air powered engine, *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)* 40 (2006) 2107–2111.
16. Wang, M. GREET 1.5—Transportation Fuel Cycle Model. Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., 1999, Vol. 1, Table 3.3.
17. Linden, D., and T. Reddy. Secondary Batteries. In *The Battery Handbook*, McGraw-Hill, New York, 2001, Chap. 22.

18. 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.
19. J.-L. Cai, X.-L. Yu, G.-J. Yuan, Y.-M. Shen, Influence of port timing on work process of air-powered engine, *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)* 38 (2004) 65–69.
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.

B. Mokriak. Analysis of Research on Pneumatic Automotive Engines

Compressed air is already being actively used in various types of energy systems: for turbocharging internal combustion engines, in hybrid energy systems under partial engine operating conditions, in integrated installations with variable operating cycles combining an internal combustion engine (ICE) and a pneumatic engine where only compressed air is used. In such systems, exhaust air with residual pressure can be reused in other cylinders or stored in tanks for further use. Air can be stored under very high pressure without loss, even over a long period. Compressed air is the most stable source of energy. It is not dependent on temperature changes or weather conditions. Once compressed, air can be used at any moment without pressure loss.

The disadvantages of pneumatic vehicles have been identified. In particular, even under high pressure conditions, compressed air contains significantly less energy compared to other energy sources for transportation, such as liquid or gaseous fuels and batteries. The low energy density of compressed air is a significant obstacle that may lead to low dynamic performance of the engine or vehicle. To ensure continuous compressed air supply during operation, engine power or vehicle speed must be limited. Moreover, the air storage tanks must have a large volume to hold a sufficient amount of compressed air, which complicates the spatial layout of the vehicle.

A pneumatic transmission is proposed, consisting of a pneumatic actuator and an electric control and supply unit. The electric unit (battery and controller) is used to power the compressor and control the compressed air supply valve. The pneumatic actuator forms the working medium (compressed air) and delivers it to the vane-type actuator motor.

Keywords: pneumatic vehicles, compressed air, pneumatic transmission, vane motor, rotary vane engine.

МОКРЯК Богдан Юрійович, аспірант кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: bohdan.y.mokriak@lpnu.ua, <https://orcid.org/0009-0006-8990-4226>

Bohdan MOKRIAK, PhD student, Department of Machine Design and Automotive Engineering, Lviv Polytechnic National University, e-mail: bohdan.y.mokriak@lpnu.ua, <https://orcid.org/0009-0006-8990-4226>

DOI 10.36910/automash.v1i24.1736