



Прийнято 20.02.2025. Прорецензовано 02.03.2025. Опубліковано 23.06.2025.

УДК 656.13

DOI: 10.31471/1993-9965-2025-1(58)-36-50

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ В СИЛОВИХ ПРИВОДАХ НАФТОГАЗОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Криштопа С. І.*

Доктор технічних наук, професор

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-1880-9505>

e-mail: auto.ifntung@ukr.net, sviatoslav.kryshtopa@nung.edu.ua

Криштопа Л. І.

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-5274-0217>

e-mail: liudmyla.kryshtopa@nung.edu.ua

Добуш А. І.

Студент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0009-0008-5038-4299>

e-mail: andrii.dobush-a13324@nung.edu.ua

Мисів О. О.

Студент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0009-0002-2116-9887>

e-mail: oleh.mysiv-a133-23@nung.edu.ua

Запропоноване посилання: Криштопа, С. І., Криштопа, Л. І., Добуш, А. І., Мисів, О. О., Сем'янчук, А. І., Козак, Ф. В. (2025). Аналіз можливостей використання енергетичних систем стисненого повітря в силових приводах нафтогазового технологічного транспорту. Науковий вісник ІФНТУНГ, 1(58), 36-50. doi: 10.31471/1993-9965-2025-1(58)-36-50

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Сем'янчук А. І.

Студент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0009-0008-5038-4299> <https://orcid.org/0009-0005-3664-7716>

e-mail: andrii.semianchuk-a13324@nung.edu.ua

Козак Ф. В.

Кандидат технічних наук, професор

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-9147-883X>

e-mail: fedir.kozak@nung.edu.ua

Анотація. Проведено аналіз можливостей використання енергетичних систем стисненого повітря в силових приводах технологічного транспорту нафтової та газової промисловості. Розглянуто переваги та обмеження застосування пневматичних систем у порівнянні з традиційними гідравлічними та електромеханічними приводами. Визначено ключові технічні параметри, що впливають на ефективність таких систем, зокрема енергоспоживання, рівень втрат енергії та надійність роботи в умовах підвищених навантажень. Оцінено перспективи впровадження сучасних технологій акумуляції та регулювання стисненого повітря для підвищення продуктивності й екологічної безпеки обладнання. Представлено можливі напрями оптимізації систем, що сприятимуть зниженню експлуатаційних витрат та підвищенню енергоефективності технологічних процесів. Енергетичну систему, що працює на стисненому повітрі без викидів, можна використовувати як основне джерело живлення або як допоміжну силову одиницю в автомобільному транспорті з перевагами нульових викидів вуглецю та покращеної загальної енергоефективності інтегрованої енергетичної системи. В статті представлено детальну технологічну розробку енергетичних систем зі стисненим повітрям. Узагальнені дослідження силових агрегатів, що працюють на стисненому повітрі, у транспортному секторі, включаючи розробку нових технологій клапанів, розробки прототипів та інтеграцію системи. Крім того, детально представлено гібридні технології на основі стисненого повітря, які використовують різні методи пневматичної гібридизації, щоб забезпечити глибоке розуміння переваг і обмежень різних енергетичних пневматичних гібридизацій. Обговорюються можливості та виклики технології на основі стисненого повітря у застосуванні в силових приводах технологічного транспорту нафтової та газової промисловості. Можна очікувати, що трансформація енергетичних систем в силових приводах технологічного транспорту нафтової та газової промисловості, сприятиме технологічному розвитку та впровадженню рішень зі стисненим повітрям без викидів.

Ключові слова: нафтогазовий технологічний транспорт; стиснене повітря; пневмопривод; силовий привід; енергетична система.

Вступ

Сучасні технологічні процеси у нафто- та газовій промисловості потребують ефективних, надійних і екологічно безпечних рішень для силових приводів транспортних і технологічних установок. Традиційні гідравлічні та електромеханічні приводи мають низку обмежень, зокрема високий рівень енергоспоживання, складність обслуговування та екологічні ризики. У цьому контексті перспективним напрямом є застосування енергетичних систем стисненого повітря, що характеризуються екологічною безпекою, енергоефективністю та можливістю роботи в складних умовах. Як одна з потенційних технологій, яка потенційно може досягти суттєвого покращення енергоефективності, двигуни на стисненому повітрі для застосування в силових приводах технологічного транспорту нафтової та газової промисловості привертають значну увагу.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

До винаходу двигуна внутрішнього згорання на викопному паливі трансмісія зі стисненим повітрям широко використовувалася як джерело енергії в локомотивному транспорті, понад півстоліття завдяки її простоті, безпеці та низькій вартості. Локомотивні двигуни, що приводились в рух стисненим повітрям, були широко освоєні протягом 1880-х і 1890-х років у США [1].

У той час локомотиви з повітряним приводом також використовувались у вугільних шахтах. Локомотив зі стисненим повітрям не буде генерувати величезного тепла або іскри під час роботи, що виключає ризик вибуху і, отже, безпечніше, ніж його основний конкурент – двигун внутрішнього згорання [2]. Застосування стисненого повітря на транспорті почало скорочуватися в 1930-х роках у зв'язку

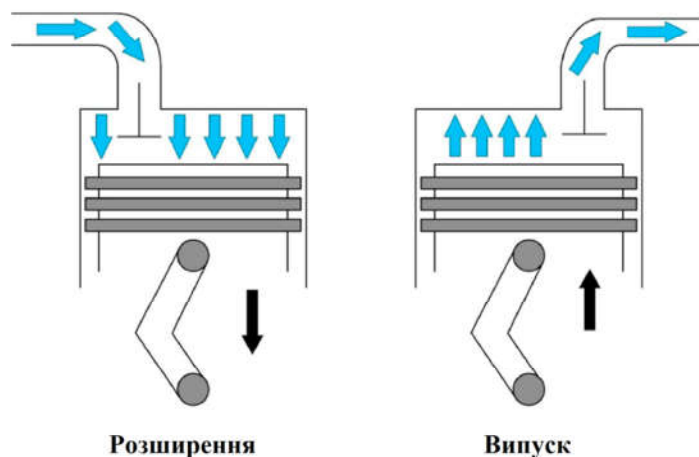


Рисунок 1 – Робочий процес поршневого двигуна на стисненому повітрі

з появою високоефективного ДВЗ, що працював на викопному паливі.

Перший транспортний засіб зі стисненим повітрям називається аеромобіль Troyan, розроблений винахідником Джозефом П. Трояном з використанням повітряного маховика в закритій системі [3]. Наприкінці 1970-х Віллард Труїтт представив свій винахід повітряного автомобіля, який пізніше був проданий армії США та НАСА в 1982 році. У 1974 році Рассел Р. Браун з Техасу заявив, що виготовив перший транспортний засіб зі стисненим повітрям [4]. У 1975 році Соргато використав стиснене повітря для приводу автомобіля в Італії, який використовував 9 балонів з повітрям під тиском 28,4 МПа. У 1976 році Рей Старбард виготовив вантажівку зі стисненим повітрям у Ваківілі, Каліфорнія [5].

Інтерес до автомобіля на стисненому повітрі був стимульований оголошенням прототипу для комерційного виробництва. У 1992 році французький інженер Гі Негре запропонував проект транспортного засобу зі стисненим повітрям. Як описано в проекті, прототип транспортного засобу міг пробігти 200 км, використовуючи 300 л стисненого повітря (при тиску 30 МПа), що зберігався в баках з вуглецю або скловолокна. За експериментами, щоб заповнити повітряний резервуар, потрібно було приблизно 2-3 хвилини за ціною 1,5 євро [6].

Формулювання цілей статті

Це дослідження має на меті представити комплексний огляд дослідницьких проблем і потенційних майбутніх стратегій розвитку застосування енергетичних технологій стисненого повітря в силовій системі технологічних або транспортних засобів. В якості альтернативи традиційним приводам енергетичний блок стисненого повітря може бути інтегрований зі

звичайним двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ), утворюючи гібридну систему. Гібридну систему трансмісії можна розпізнати як перехідну силову установку технологічного або транспортного засобу між двигуном внутрішнього згоряння, що працює на викопному паливі, і силовою системою з нульовим рівнем викидів, такою як установка на стисненому повітрі. На відміну від раніше опублікованих статей, ця стаття містить обговорення технології виробництва енергії на стисненому повітрі та підсумовує можливості її застосування в силових приводах нафтогазового технологічного транспорту.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Принципи роботи двигунів на стисненому повітрі

У силовому приводі зі стисненим повітрям енергія зазвичай перетворюється двигуном у механічну через розширення стисненого повітря в циліндрі. Рисунок 1 ілюструє робочий процес звичайного двигуна, що працює на стисненому повітрі. Поршнева конструкція схожа на структуру звичайного двигуна внутрішнього згоряння, за винятком того, що двигун, який працює на стисненому повітрі, не має паливного інжектора чи свічки запалювання. Робочий цикл двигуна складається з двох тактів, відомих як розширення і випуск. 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 виштовхується з циліндра рухом поршня вгору.

В роботі [7] провели перехідний аналіз поля потоку в циліндрі двигуна, що працює на стисненому повітрі, щоб вивчити розподіл енергії під час його робочого процесу, і виявили, що турбулентність поблизу впускного отвору може призвести до серйозних втрат енергії стисненого повітря. Дослідницька група з Пекінського університету авіації та астронавтики провела віртуальне моделювання та аналіз продуктивності двигуна, що працює на стисненому повітрі [8, 9]. Імітаційна модель, розроблена [8] цією командою, була перевірена на повітряному двигуні APE [9]. Етиловий спирт використовується як теплообмінне середовище в системі температурної компенсації і результати моделювання показали, що ефективність двигуна, що працює на стисненому повітрі, можна було б підвищити майже на 30 %, якщо застосувати температурну компенсацію. В роботі [10] розроблено подвійний кривошипно-шатунний механізм для оптимізації продуктивності поршневого двигуна. Результати показали, що тиск у циліндрі майже не залежав від частоти обертання двигуна, коли двигун оснащений подвійним кривошипно-шатунним механізмом, але енергоефективність можна було підвищити в 1,86-2,86 рази.

Прототип гвинтового розширювача, як показано на рис. 2, був виготовлений на основі описаного вище принципу, та була створена експериментальна установка для дослідження продуктивності [11]. Результати показали, що найвищий загальний ККД може досягати 55 % при тиску всмоктування 1,5 МПа на швидкості 2800 об/хв., тоді як найбільший крутний момент може досягати майже 100 Н·м, а найбільша вихідна потужність може становити близько 22 кВт з найменшим споживанням повітря приблизно 60 кг/кВт·год.

Проектування та оптимізація клапанної системи

Процеси перетворення енергії стисненого повітря визначають продуктивність двигуна, що працює на стисненому повітрі. Тому надзвичайно важливо контролювати та оптимізувати процеси впуску та випуску, щоб зменшити втрати потоку. Було проведено багато досліджень щодо проектування, моделювання та експериментів з системою клапанів для досягнення оптимізованої продуктивності та ефективності двигуна, що працює на стисненому повітрі.



Рисунок 2 – Фото прототипу одногвинтового розширювача

Наприклад, в [12] досліджували процес зниження тиску стисненого повітря під час процесу всмоктування та дійшли висновку, що енергоефективність може бути покращена на 15-40 % у разі застосування зниження тиску за допомогою розширювача замість дросельної скидання тиску, а здатність перетворення енергії стисненого повітря може бути збільшена на 10-60 %, якщо прийнято двоступеневе зниження тиску. Крім того, для системи автомобіля, що працює на стисненому повітрі, був розроблений клапан вмикання/вимкнення високого тиску з відповідним алгоритмом керування. В [13] була запропонована система обертового клапана, що приводиться в рух зірочкою, з'єднаною з колінчастим валом. Створено математичну модель процесу впуску та випуску на основі ротаційної системи клапанів, а також досліджено вплив фаз газорозподілу на продуктивність двигуна, що працює на стисненому повітрі. Результати показали, що найбільш оптимізованою фазою газорозподілу є те, що впускний клапан відкривається у верхній мертвій точці (ВМТ).

В [14] розробили математичну модель двигуна, що працює на стисненому повітрі, і підтвердили моделювання в експериментальному прототипі. Для вивчення методу розрахунку структурних параметрів розроблено та впроваджено впускний клапан з компенсацією тиску. Розробники прийшли до висновку, що ефективність силового двигуна на стисненому повітрі залежить від тиску вихлопу, кута тривалості впуску та зазорів в циліндрах. За оптимальних робочих умов продуктивність повітряного двигуна може бути покращена з початкових до 20-50 %, а середній вихідний крутний момент збільшився з 20 до 22 Н·м [15].

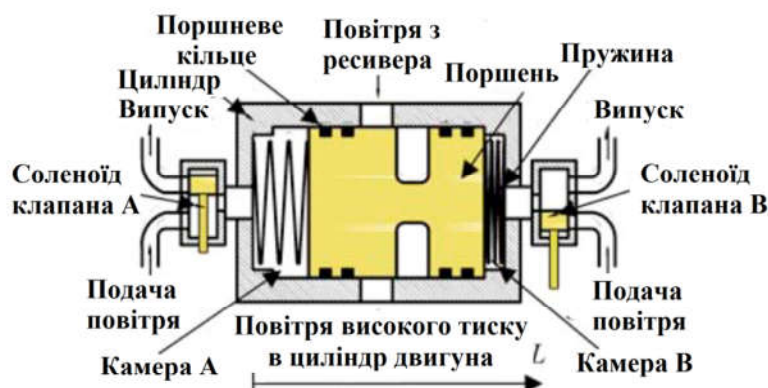


Рисунок 3 – Схеми електропневматичної системи регульованих клапанів пневмодвигуна

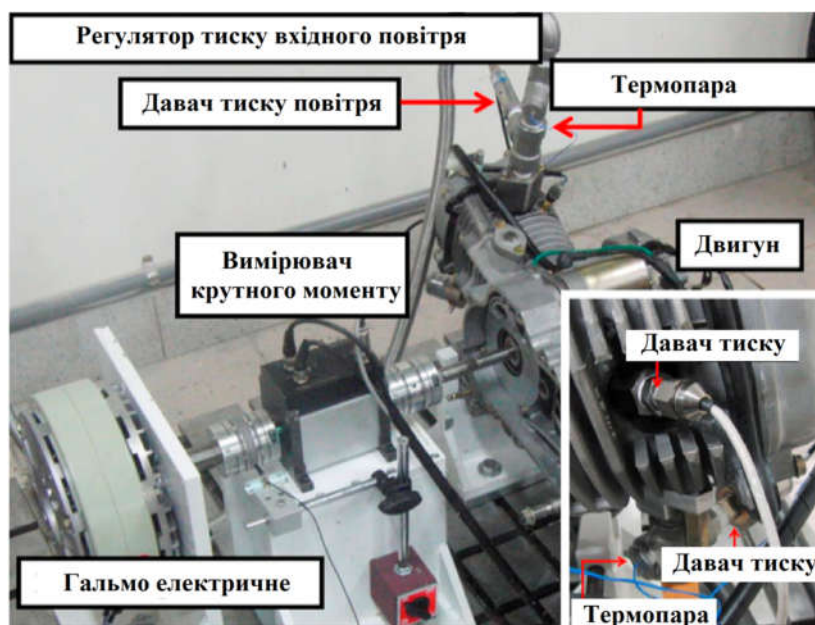


Рисунок 4 – Прототип двигуна на стисненому повітрі, який створено в Національному університеті Tsing Hua

Повністю регульована електрична активація клапанів (система FVVA) також може бути застосована для оптимізації конструкції клапанної системи двигуна, що працює на стисненому повітрі. Система FVVA може також гнучко змінювати фази газорозподілу відповідно до робочого стану двигуна. Принципова схема такої системи зображена на рис. 3.

Експериментальні дослідження прототипів

Експериментальні дослідження двигуна, що працює на стисненому повітрі, є важливими, оскільки забезпечують цінні кількісні дані для підтвердження теоретичних досліджень системи та оптимізації стратегій керування клапанами. Більшість прототипів побудовані в дослідницьких організаціях, як модифікаціями звичайних ДВЗ.

Наприклад, команда науковців з Чжецзянського університету модифікувала одноцилін-

дровий дизельний двигун у прототип двигуна на стисненому повітрі [16]. Під час модифікації головка блоку циліндрів оригінального двигуна була видалена та замінена системою поворотних клапанів [17]. Експериментальна система була створена для вивчення продуктивності прототипу та зображена на рисунку 4.

Результати показали, що максимальна досягнута потужність становила 2,6 кВт при тиску на вході 0,8 МПа. Потужність зменшувалася лінійно зі швидкістю, коли прототип працював під постійним тиском на вході, тоді як споживання повітря зі швидкістю різко зростало. Під час роботи на постійній швидкості потужність зростала зі збільшенням тиску на вході, при цьому спостерігалось падіння споживання повітря. Було зроблено висновок, що двигун, що працює на стисненому повітрі, може досягти найкращих характеристик, коли він працює на режимах з низькою швидкістю та високим на-



Рисунок 5 – Перший транспортний засіб зі стисненим повітрям у Китаї, розроблений та випробуваний в університеті Zhejiang

вантаженням, що є характерним для низькооборотних малофорсованих двигунів, які традиційно використовуються в силових приводах нафтогазової галузі.

Незважаючи на те, що дослідники також застосовували інші підходи з використанням альтернативних розширювальних машин для двигунів, що працюють на стисненому повітрі, основною темою цього дослідження є поршневий двигун з рекуперацією. Тут варто відзначити роботу [18], де розроблено прототип двигуна на стисненому повітрі на основі спірального розширювача. Для вивчення експлуатаційних характеристик прототипу була створена експериментальна установка. Результати показали, що споживання повітряної маси та вихідна потужність збільшувалися зі збільшенням обертів двигуна. Максимальна витрата повітря становила 800 кг/год, а максимальна потужність досягала 8,112 кВт при тиску на вході 2 МПа.

Інтеграція для транспортних засобів – поточний статус комерціалізації

Багато виробників автомобілів робили численні спроби розробки транспортних засобів на стисненому повітрі. Дослідні зразки автомобілів на стисненому повітрі також розроблялися в науково-дослідних інститутах. У 2004 році Державна головна лабораторія рідинно-газової передачі енергії університету Zhejiang розробила та виготовила транспортний засіб зі стисненим повітрям [19]. Прототип транспортного засобу, показаний на рис. 5, мав масу

1820 кг і був оснащений 4 повітряними баками об'ємом 50 л. Для живлення на транспортному засобі був встановлений двигун зі стисненим повітрям, модифікований з 4-циліндрового бензинового двигуна. Під час дорожніх випробувань початковий тиск в баку становив 12 МПа, а тиск на впуску двигуна – 1,2 МПа. Результати показали, що середня потужність транспортного засобу становила 2,673 кВт при швидкості 30 км/год., а адіабатичний тепловий ККД досягав 24,15%. Прототип автомобіля міг проїхати 1870 м без зарядки стисненим повітрям. На додаток до досліджень, згаданих вище, існують інші дослідження, що включали моделювання транспортного засобу на стисненому повітрі [20] і розробку нечіткого логічного керування [21].

Резюме

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, наприклад, автомобілі з електричними приводами.

Головні технологічні бар'єри такі:

- відносно низька щільність енергії стисненого повітря може призвести до поганих динамічних характеристик двигуна або автомобіля. Авторами даної статті підраховано, що

щільність енергії стисненого повітря становить 370 кДж/кг при тиску зберігання 20 МПа, що нижче, ніж у дизельного або бензинового двигуна;

- щоб забезпечити постійну подачу стисненого повітря під час роботи, необхідно обмежити потужність двигуна або швидкість автомобіля. Об'єм повітряного резервуара повинен бути великим, щоб вмістити достатню кількість стисненого повітря, що призводить до труднощів у розташуванні повітряних баків на невеликих транспортних базах;

- через різні втрати енергії, ККД двигуна, що працює на стисненому повітрі є нижчий, порівняно зі звичайним ДВЗ. Як моделювання, так і експерименти показали, що ефективність двигуна, що працює на стисненому повітрі, становить близько 20-25 %, що є головним недоліком систем.

Гібридна силова установка зі стисненням повітрям

Трансмсія, що працює на стисненому повітрі, демонструє унікальну перевагу завдяки своїй екологічній користі, оскільки повітря є єдиним викидом з силової установки такого типу. Однак застосування двигуна, що працює на стисненому повітрі, обмежене через кілька технічних недоліків, включаючи низьку ефективність і джерело стисненого повітря. Трансмсія, що працює на стисненому повітрі, може бути більш придатною для використання в якості допоміжної силової установки в гібридній силовій схемі.

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 проводились 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 [22]. 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.

Автори [23] проводили дослідження щодо гібридної силової установки на стисненому повітрі. За винятком рекуперативного гальмування та привода пневматичного двигуна, стиснене повітря, відновлене під час фази гальмування, використовувалось для наддуву двигуна, щоб забезпечити короткочасне підвищення

вихідної потужності під час інтенсивного прискорення. Позитивний ефект пневматичного наддуву полягає у тому, що конструкцію двигуна можна було оптимізувати для максимальної потужності, отже, можна було досягти зменшених масогабаритних характеристик конструкції, в т.ч. для економії споживання палива.

Чисельні дослідження були виконані на основі двигуна Renault J4S [24]. Результати показали, що загальне споживання палива за Новим європейським циклом руху (NEDC) може бути зменшено на 15%. Економію палива можна збільшити до 31 % шляхом оптимізації максимального тиску в баку, об'єму бака та об'єму двигуна [25]. Однак в [26] зазначено, що рекуперативне гальмування застосовне лише для певних умов гальмування, щоб розсіяти кінетичну енергію під час фази уповільнення. В [27] запропонували проміжний бак з підігрівом у конструкції пневматичного гібридного двигуна внутрішнього згорання. Вихлопний газ, що утворюється під час звичайного режиму двигуна внутрішнього згорання, використовувався для підвищення температури стисненого повітря. Моделювання [28] та експериментальне дослідження одноциліндрового двигуна з іскровим запалюванням робочим об'ємом 347 см³ показало, що економія споживання палива може досягати 26% за циклом NEDC.

Автори [29] оголосили, що гібридна система стисненого повітря може поглинати та виробляти лише низькі рівні потужності, отже її застосування було обмежено легковим автомобілем. Щоб розширити застосування до великовантажних транспортних засобів, оригінальну гібридну конструкцію стисненого повітря було вдосконалено шляхом розміщення двох повітряних резервуарів з різними рівнями тиску. Моделювання показало, що міський автобус із гібридною силовою установкою на стисненому повітрі може досягти зниження споживання палива приблизно на 23 %.

В [30] розробили приводи пневматичних клапанів і переобладнали дизельний двигун Scania D12 для гібридної роботи зі стисненим повітрям (див. рис. 6). На лабораторній установці перевіряли як компресійно-гальмівний режим, так і режим пневмодвигуна. Ефективність регенерації, визначена як співвідношення між енергією, виробленою в режимі пневмодвигуна, та енергією, відновленою під час компресійного гальмування, становила близько 33 %. Випробуваний двигун в [31] був також оснащений клапаном резервуара з компенсацією тиску з більшим діаметром головки



Рисунок 6 – Модифікований гібридний двигун на стисненому повітрі Scania D12

клапана (28 мм). Результати показали, що ефективність регенерації можна збільшити до 48 %, якщо збільшити діаметр клапана.

Доніц та ін. [32] встановили, що найбільш ідеальною концепцією гібридного двигуна зі стисненим повітрям є поєднання пневматичної гібридизації та зменшення габаритів двигуна. На основі термодинамічного моделювання було проведено аналіз як двотактного, так і чотиритактного робочого процесу двигуна, який приводиться в рух чистим стисненим повітрям. Результати показали, що показники чотиритактного процесу з пневматичним приводом не були значно нижчими, ніж результати двотактного аналога. Завдяки своїй схожості зі звичайним двигуном чотиритактну концепцію гібридного двигуна на стисненому повітрі з фіксованими розподільними валами для впускних і випускних клапанів можна легко реалізувати на практиці [33]. Пізніше цю концепцію було підтверджено після того, як двоциліндровий бензиновий двигун був модифікований у прототип гібридного двигуна зі стисненим повітрям MPE750, після чого початкові вимірювання були завершені на випробувальному стенді. Моделювання показало, що комбінація зменшення розміру двигуна та пневматичної гібридизації досягла зниження споживання палива на 34 % за циклом руху MVEG-95. Крім того, за допомогою цієї концепції можна подолати «турбозатримку», яка зазвичай пов'язана зі значним зменшенням габаритів, використовуючи стиснене повітря з бака для наддуву двигуна під час прискорення турбокомпресора [34].

Рекуперативне гальмування може також забезпечити робоче повітря, необхідне для гальмування та пневматичних операцій, і зменшити використання компресора, що приводиться в дію двигуном [35]. Крім того, стиснене повітря може забезпечити миттєве прискорення двигуна з турбонаддувом для кращої продуктивності та економії палива.

На основі шестициліндрового дизельного двигуна було оцінено потенціал зниження витрати палива [36]. Двигун, оснащений повністю змінним приводом клапана (FVVA), був сконструйований для перевірки здійсненості концепції двигуна на стисненому повітрі. Результати показали, що маса палива, спожитого під час циклу NEDC, становила 677 г для стандартного транспортного засобу та 631,2 г для гібридного автомобіля зі стисненим повітрям, що вказує на те, що можна досягти ефекту економії палива на 8-10 %.

У таблиці 1 наведено інші дослідження гібридних силових агрегатів зі стисненим повітрям, заснованих на рекуперативному гальмуванні автомобіля.

Утилізація відпрацьованого тепла

Рекуперативне гальмування є основною формою пневматичної гібридизації автомобіля, яка може відновлювати енергію гальмування, збережену у вигляді стисненого повітря, а потім повторно використовувати цю частину енергії під час прискорення автомобіля. Пневматична гібридизація не обмежується рекуперативним гальмуванням, протягом останніх десятиліть також застосовувалися інші методи відновлення енергії.

Таблиця 1 – Дослідження гібридної силової установки зі стисненим повітрям на основі рекуперативного гальмування автомобіля

№ з/п	Рік	Автор	Тип	Висновки
1	2008	Hyungsuk та ін. [37]	Надпотужний дизельний двигун 22 л	Підвищення ефективності становило 4–18 % у широкому діапазоні режимів.
2	2009	Wang та ін. [38]	Дизельний двигун 10,8 л	Потенційне покращення економії палива на 6–20 % порівняно з вантажівкою, оснащеною традиційним базовим дизельним двигуном, було оцінено залежно від конкретного циклу водіння.
3	2009	Іванко та ін. [39]	Автомобіль середнього класу з бензиновим двигуном 1,6 л	Зниження споживання палива на 25 %. Рекомендувалося використовувати систему охолодження двигуна для нагрівання стисненого повітря перед його надходженням у двигун.
4	2010	Basbous та ін. [40]	Вітро-дизельна система генерації	Отримана значна економія палива до 60 %, особливо при невеликих навантаженнях.
5	2011	Ібрагім та ін. [41]	Вітро-дизельна система генерації	Зниження споживання палива на 30 %, однак існували деякі обмеження на систему, включаючи межу проникності впускних клапанів.
6	2012	Лу та ін. [42]	Двигун мотоцикла	Пневматичний гібридний мотоцикл підвищував ефективність за допомогою удосконаленого режиму.
7	2017	Лі та ін. [43]	7-літровий дизельний двигун для комерційних автомобілів	Загальне споживання палива зменшилось на 13 % при застосуванні гібридної трансмісії зі стисненим повітрям на міському автобусі із шестициліндровим дизельним двигуном масою 16550 кг.
8	2019	Димитрова та ін. [44]	Комерційний автомобіль класу С з бензиновим 3-циліндровим двигуном	Підвищення ефективності на 20–50 % спостерігалось після впровадження гібридної трансмісії зі стисненим повітрям, а результати споживання палива для міського використання склали 51 г CO ₂ /км.
9	2022	Лі та ін. [45]	Дизельний генератор	Споживання палива гібридною системою стисненого повітря становило лише 50 % для одnodизельного агрегату та 77 % для подвійного дизельного агрегату.
10	2023	Wang та ін. [46]	2-циліндровий дизельний двигун	Результати циклу водіння в міських умовах показали, що споживання палива легкого транспортного засобу з пневматичною гібридною системою зменшено на 18 %.

Наприклад, відпрацьоване тепло, що утворюється під час згоряння палива традиційного двигуна, займає приблизно 60 % загальної енергії палива у формі охолоджувальної рідини двигуна та вихлопної енергії [47], демонструючи великий потенціал у рекуперації відпрацьованого тепла. Стиснене повітря може виграти від рекуперації відпрацьованого тепла, оскільки його доступність підвищується після поглинання тепла, що призводить до кращої продуктивності, коли двигун приводиться в рух стисненим повітрям [48].

Автори [49] дійшли висновку, що приблизно 13,5 % і 6,7 % енергії з викидних газів і охолоджувальної рідини звичайного двигуна може бути поглинене стисненим повітрям при застосуванні послідовної гібридної системи, тоді як паралельна система дозволяє стисненому повітрю відновити 26 % і 20 % енергії з викидних газів і охолоджувальної рідини відповідно. Крім того, вентилятор охолодження та радіатор для звичайного двигуна можуть бути відсутніми завдяки наявності двигуна на стисненому повітрі.

В [50] представили інший вид гібридної системи зі стисненим повітрям, яка складається з бензинового двигуна, повітряного компресора та пневматичного двигуна. Під час роботи системи бензиновий двигун працював на постійній швидкості для приводу повітряного компресора. Щоб реалізувати рекуперацію відпрацьованого тепла, вихлоп двигуна змішувався зі стисненим повітрям, виробленим повітряним компресором, потім суміш надходила в пневматичний двигун для розширення [51]. Перевага системи полягала в тому, що економію палива бензинового двигуна можна було оптимізувати за рахунок відсутності коливань робочих умов, водночас мінімізуючи викиди забруднюючих речовин.

Горіння, кероване струменем стисненого повітря

Порівняно з рекуперативним гальмуванням і рекуперацією відпрацьованого тепла, контрольоване горіння струменем стисненого повітря є іншим способом пневматичної гібридизації, оскільки стиснене повітря не бере безпосередньої участі в механічній роботі. Ідея згорання, керованого струменем стисненого повітря, є розгалуженням реактивного запалювання від стиснення, щоб реалізувати контроль фази згорання в системі згорання гарячої суміші дизеля.

На відміну від звичайного дифузійного згорання дизеля, паливо та повітря попередньо змішуються за допомогою розширеної синхронізації впорскування палива, потім суміш запалюється зовнішнім стимулятором, таким як струмінь полум'я LPG [52]. Було доведено, що такий вид спалювання має більш високу теплову ефективність і менші викиди забруднюючих речовин. Стиснене повітря може служити одним із зовнішніх стимулів для запалювання попередньо змішаної дизельно-повітряної суміші, оскільки струмінь високого тиску може різко підвищити тиск у циліндрі та задовольнити межу займання.

В роботі [53] створили модель реактивного горіння, керованого стисненим повітрям, на основі одноциліндрового дизельного двигуна робочим об'ємом 0,418 л. Щоб уникнути самозаймання, ступінь стиснення дизельного двигуна була знижена до 12. Стиснене повітря подавалося в камеру згорання через зворотний клапан, розташований вертикально по центру головки блоку циліндрів. Вплив температури та тиску струменя стисненого повітря, тривалості струменя та часу аналізувались за методами моделювання [54]. Було зроблено висновок, що низький тиск потоку і висока темпера-

тура потоку можуть призвести до оптимізованої термічної ефективності двигуна, тоді як значна тривалість струменя стисненого повітря може призвести до високого пікового тиску на першій стадії високотемпературної реакції, а коротка тривалість струменя повітря може призвести до високої ефективності згорання. Крім того, існує оптимальний час для отримання найвищої ефективності горіння та найкоротшої тривалості горіння.

Проблеми та можливості для енергетичних систем стисненого повітря нафтогазового технологічного транспорту

Силовий привод з виключно стисненим повітрям може бути непридатним для силової установки транспортного засобу через низьку ефективність і низьку щільність енергії, тоді як застосування гібридної трансмісії зі стисненим повітрям може зменшити споживання палива звичайним ДВЗ за допомогою таких методів, як рекуперативне гальмування та пневматичне керування.

Інтерес до гібридної силової установки зі стисненим повітрям значно менший, ніж до електричних аналогів, оскільки електрика вважається джерелом живлення нового покоління для автомобіля. Деякі критики навіть стверджують, що в майбутньому звичайний автомобіль з ДВЗ буде повністю замінений на електромобілі, оскільки останні не забруднюють атмосферу, тому дослідження технології економії палива для звичайного автомобіля з ДВЗ та гібридним пневмоприводом безглузді. На думку авторів даної статті, фактичний вплив автомобіля з ДВЗ на навколишнє середовище слід оцінювати на основі життєвого циклу «від свердловини до колеса». Автори [55] проаналізували викиди парникових газів «від свердловини до колеса» на основі циклу виробництва електроенергії та дійшли висновку, що викиди парникових газів для електромобілів були вищими, ніж для звичайного автомобіля з ДВЗ у країнах з високою часткою викопного палива в структурі виробництва електроенергії, таких як Китай, Індія, Австралія, Польща, Німеччина та багато інших.

Аналіз викидів парникових газів «від свердловини до колеса», проведений в роботі [56] 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 ємність 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.

Основною проблемою для гібридної силової установки зі стисненим повітрям є загальна енергоефективність, оскільки продуктивність двигуна в режимі пневматичного приводу визначається масою та тиском стисненого повітря, відновленого під час фази гальмування, а також процесом перетворення енергії стисненого повітря. Згідно з поточними дослідженнями, легковий транспортний засіб з об'ємом бака менше 50 л міг проїхати лише коротку відстань за допомогою стисненого повітря, так як об'єм бака строго обмежений через просторове розташування. Для великовантажного комерційного транспортного засобу, в тому числі великогабаритного нафтогазового технологічного транспорту, можна розмістити повітряний резервуар більшого об'єму, ретельно визначивши тиск зберігання для транспортування.

Надійність повітряного резервуара може бути досягнута завдяки прогресу в розробці матеріалів резервуарів для зберігання. Компанії розробляють нові матеріали, такі як композит з вуглецевого волокна, для зберігання водню під високим тиском і тиск зберігання може досягати 70 МПа і більше [57]. Технологія зберігання під високим тиском також може бути застосована для зберігання стисненого повітря через його негорючість.

Висновки

Розглянуто та узагальнено сучасний стан енергетичних систем стисненого повітря та їх потенційне застосування для нафтогазового

технологічного 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 екологічну перевагу. 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 поєднає двигун на стисненому повітрі зі звичайним двигуном внутрішнього згоряння, може бути потенційним методом на важкому транспорті, до якого, поза сумнівом, відноситься і нафтогазовий технологічний транспорт.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Marvania D., Subudhi S. A comprehensive review on compressed air powered engine. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017. Vol. 70. P. 1119-1130.
2. Fang Y., Lu Y., Yu X., Roskilly A.P. Experimental study of a pneumatic engine with heat supply to improve the overall performance. *Appl. Therm. Eng.* 2018. Vol. 70. P. 78-85.

3. Y. Fang, Y. Lu, X. Yu, L. Su, Z. Fan, R. Huang, et al. Study of a hybrid pneumatic-combustion engine under steady-state and transient conditions for transport application. *Int. J. Engine Res.* 2019. P. 1-12.
4. Y. Shi, F. Li, M. Cai, Q. Yu. Literature review: present state and future trends of air-powered vehicles. *J. Renew. Sustain. Energy.* 2016. Vol. 8. Article 025704.
5. F. Wasbari, R.A. Bakar, L.M. Gan, M.M. Tahir, A.A. Yusof. A review of compressed-air hybrid technology in vehicle system. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017. Vol. 67. P. 935-953.
6. S. Thipse. Compressed Air Car. Special Feature: Air Pollution Control Technologies. 2008. URL: http://www.techmonitor.net/tm/images/1/18/08nov_dec_sf4.pdf
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.). 2007. Vol. 41. P. 1912-1915. View in ScopusGoogle Scholar
8. R. Song, X. Fu, M. Cai. Non-dimensional modeling and simulation analysis of air powered engine/ *Appl. Mech. Mater.* 2013. Vol. 278–280. P. 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.* 2014. Vol. 228. P. 2642-2651
10. Q.H. Yu, M.L. Cai, Y. Shi. Working characteristics of two types of compressed air engine. *J. Renew. Sustain. Energ.* 2016. Vol. 8. Google Scholar
11. 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.* 2013. Vol. 51. P. 662-669.
12. 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.* 2004. Vol. 40. P. 77-81.
13. 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.).* 2004. Vol. 38. P. 65-69.
14. 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.* 2015. Vol. 137.
15. Q.H. Yu, M.L. Cai, Y. Shi, Q.Y. Xu. Optimization study on a single-cylinder compressed air engine. *Chin. J. Mech. Eng.-En.* 2015. Vol. 28. P. 1285-1292. View in ScopusGoogle Scholar
16. Y.Q. Lian, B. Tian, S.Z. Wang. Simulation design of the control valve for air powered engine. *Intell. Syst. Appl. Mater., Pts 1 and 2.* 2012. Vol. 466–467. P. 1392-1396.
17. X. Zhai, X.-L. Yu, J.-L. Cai, Y.-M. Shen. Experimental study on performances of compressed-air engine. *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban) / J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.).* 2006. Vol. 40. P. 135-138.
18. 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*, 2013. Vol. 6. P. 1731-1745.
19. H. Liu, G. Tao. Study on air charging process of quick recharge station for air powered vehicle. *Zhongguo Jixie Gongcheng / China Mech. Eng.* 2007. Vol.18. P. 369-373. View in Scopus Google Scholar
20. 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.* 2016. Vol.40. P. 1112-1121. CrossrefView in ScopusGoogle Scholar
21. Q.H. Yu, Y. Shi, M.L. Cai, W.Q. Xu. Fuzzy logic speed control for the engine of an air-powered vehicle *Adv. Mech. Eng.* 2016ю Vol. 8. Doi: 10.1177/1687814016641838 Google Scholar
22. Schechter M.M. Regenerative compression braking – a low cost alternative to electric hybrids. *SAE Int.* 2000. Google Scholar
23. P. Higelin, A. Charlet. Thermodynamic Cycles for a New Hybrid Pneumatic–Combustion Engine Concept Consiglio Nazionale delle Ricerche (2001). Google Scholar
24. P. Higelin, A. Charlet, Y. Chamaillard. Thermodynamic simulation of a hybrid pneumatic-combustion engine concept. *Int. J. Therm.* 2002. Vol. 5. P. 1-11. View in ScopusGoogle Scholar
25. P. Higelin, I. Vasile, A. Charlet, Y. Chamaillard. Parametric optimization of a new hybrid pneumatic-combustion engine concept. *Int. J. Engine Res.* 2004. Vol. 5. P. 205-217. View in Scopus Google Scholar
26. P. Brejaud, A. Charlet, P. Higelin. Improving the Overall Efficiency of a Pneumatic-Combustion Hybrid Engine by Adding an Intermediate Heated Tank. *SAE Technical Paper.* 2013. Google Scholar ce and Technology - Revue de l IFP65(1) DOI: 10.2516/ogst/2009054

27. P. Brejaud, P. Higelin, A. Charlet, G. Colin, Y. Chamaillard. One dimensional modeling and experimental validation of single cylinder pneumatic combustion hybrid engine. *SAE Int. J. Engines*, 2011. Vol. 4. P. 2326-2337.
28. P. Brejaud, A. Charlet, Y. Chamaillard, A. Ivanco, P. Higelin. Pneumatic-combustion hybrid engine: a study of the effect of the valvetrain sophistication on pneumatic modes. *Oil Gas Sci. Technol. – Revue de l’Institut Français du Pétrole*. 2010. Vol. 65. P. 27-37. CrossrefView in ScopusGoogle Scholar
29. M. Andersson, B. Johansson, A. Hultqvist. An air hybrid for high power absorption and discharge. *Sae Brasil Fuels Lubricants Meet.* (2005)
30. S. Trajkovic, P. Tunestål, B. Johansson. Investigation of different valve geometries and vavle timing strategies and their effect on regenerative efficiency for a pneumatic hybrid with variable valve actuation. *Sae Int. J. Fuels Lubricants*. 2008. Vol. 1. P. 1206-1223. Crossref Google Scholar
31. S. Trajkovic, P. Tunestål, B. Johansson. Introductory study of variable valve actuation for pneumatic hybridization. *Sae Tech. Pap.* (2007). Google Scholar
32. C. Donitz, I. Vasile, C. Onder, L. Guzzella. Dynamic programming for hybrid pneumatic vehicles. *Proc. Am. Contr. Conf.* (2009), P. 3956-3963. CrossrefView in ScopusGoogle Scholar
33. C. Dönitz, I. Vasile, C. Onder, L. Guzzella. Realizing a concept for high efficiency and excellent driveability: the downsized and supercharged hybrid pneumatic engine. *Sae Techn. Pap.* (2013). Google Scholar
34. C. Donitz, I. Vasile, C.H. Onder, L. Guzzella. Modelling and optimizing two- and four-stroke hybrid pneumatic engines. *Proc. Int. Mech. Eng. D-J. Aut.*, 223 (2009), pp. 255-280. View in ScopusGoogle Scholar
35. C. Donitz, C. Voser, I. Vasile, C. Onder, L. Guzzella. Validation of the fuel saving potential of downsized and supercharged hybrid pneumatic engines using vehicle emulation experiments. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 133 (2011).
36. H. Zhao, C. Psanis, T. Ma, J. Turner, R. Pearson. Theoretical and experimental studies of air-hybrid engine operation with fully variable valve actuation. *Int. J. Engine Res.*, 12 (2011), P. 527-548. Crossref View in Scopus Google Scholar
37. H. Kang, C. Tai, E. Smith, X. Wang, T.C. Tsao, J. Stewart, et al. Demonstration of air-power-assist (APA) engine technology for clean combustion and direct energy recovery in heavy duty application. *SAE World Cong. Exhib.* (2008). Google Scholar
38. X.Y. Wang, T.C. Tsao, C. Tai, H.S. Kang, P.N. Blumberg. Modeling of compressed air hybrid operation for a heavy duty diesel engine. *J. Eng. Gas Turbines Power* (2009), p. 131.
39. A. Ivanco, A. Charlet, Y. Chamaillard, P. Higelin. Energy Management Strategies for Hybrid-Pneumatic Engine Studied on an Markov Chain Type Generated Driving Cycle. *SAE Technical Paper* (2009)
40. T. Basbous, R. Younes, A. Ilinca, J. Perron. Pneumatic hybridization of diesel engine in a hybrid wind-diesel installation with compressed air energy storage. 4th International Conference on Integrated Modeling & Analysis in Applied Control & Automation, Imaaca 2010 (2010), P. 73-82. View in ScopusGoogle Scholar
41. H. Ibrahim, R. Younes, T. Basbous, A. Ilinca, M. Dimitrova. Optimization of diesel engine performances for a hybrid wind-diesel system with compressed air energy storage. *Energy*, 36 (2011), P. 3079-3091.
42. C.H. Lu, Y.R. Hwang, Y.T. Shen. Modeling and simulation of a novel pneumatic hybrid motorcycle. *Int. J. Green Energy*, 9 (2012), pp. 467-486.
43. D. Li, L. Wang, H. Xu, Z. Fan, X. Yu. A pneumatic hybrid system with an integrated compressor/expander unit for commercial vehicles. *Sae Int. J. Alternative Powertrains*, 4 (2014), P. 1-10.
44. Z. Dimitrova, F. Marechal. Gasoline hybrid pneumatic engine for efficient vehicle powertrain hybridization. *Appl. Energy*, 151 (2015), P. 168-177.
45. Y. Li, A. Sciacovelli, X. Peng, J. Radcliffe, Y. Ding. Integrating compressed air energy storage with a diesel engine for electricity generation in isolated areas. *Appl. Energy*, 171 (2016), P. 26-36.
46. L. Wang, D.F. Li, H.X. Xu, Z.P. Fan, W.B. Dou, X.L. Yu. Research on a pneumatic hybrid engine with regenerative braking and compressed-air-assisted cranking. *Proc. Int. Mech. Eng. D-J. Aut.*, 230 (2016), P. 406-422.

47. 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), P. 1252-1266.
48. 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), P. 591-599
49. X. Zhai, X.-L. Yu, Z.-M. Liu. Research on hybrid of compressed-air and fuel. Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban) / J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.), 40 (2006), P. 610-614. View in Scopus Google Scholar
50. K.D. Huang, S.C. Tzeng, W.P. Ma, W.C. Chang. Hybrid pneumatic-power system which recycles exhaust gas of an internal-combustion engine. *Appl. Energy*, 82 (2005), P. 117-132.
51. K.D. Huang, S.C. Tzeng, W.C. Chang. Energy-saving hybrid vehicle using a pneumatic-power system. *Appl. Energy*, 81 (2005), P. 1-18.
52. Z. Hairong, Z. Weizheng, Y. Yanpeng, Z. Ti'en. Comparison of turbulence models for multi-phase-flow oscillating heat transfer enhancement. *Numer. Heat Tran. Part B Fundamentals*, 66 (2014), P. 268-280
53. X. Meng, M. Zuo, W. Long, J. Tian, H. Tian. Investigation of effects of air jet pressure and temperature on high-pressure air jet controlled compression ignition combustion based on a novel thermodynamic cycle. *Energy Fuel*, 30 (2016), P. 674-683.
54. W. Long, X. Meng, J. Tian, H. Tian, J. Cui, L. Feng. Effects of air jet duration and timing on the combustion characteristics of high-pressure air jet controlled compression ignition combustion mode in a hybrid pneumatic engine. *Energy Convers. Manag.*, 127 (2016), P. 392-403.
55. 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), P. 340-350
56. Q. Qiao, F. Zhao, Z. Liu, S. Jiang, H. Hao. Cradle-to-gate greenhouse gas emissions of battery electric and internal combustion engine vehicles in China. *Appl. Energy*, 204 (2017), P. 1399-1411
57. 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), P. 1070-1085.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF USING COMPRESSED AIR ENERGY SYSTEMS IN POWER DRIVES OF OIL AND GAS TECHNOLOGICAL TRANSPORT

Kryshtopa S. I.

Dr of Technical Sciences, professor
 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
 76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1880-9505>
 e-mail: auto.ifntung@ukr.net, sviatoslav.kryshtopa@nung.edu.ua

Kryshtopa L. I.

Candidate of Technical Sciences, associate professor
 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
 76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5274-0217>
 e-mail: liudmyla.kryshtopa@nung.edu.ua

Dobush A. I.

Student

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0008-5038-4299>

e-mail: andrii.dobush-a13324@nung.edu.ua

Mysiv O. O.

Student

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0002-2116-9887>

e-mail: oleh.mysiv-a133-23@nung.edu.ua

Semianchuk A. I.

Student

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0008-5038-4299> <https://orcid.org/0009-0005-3664-7716>

e-mail: andrii.semianchuk-a13324@nung.edu.ua

Kozak F. V.

Candidate of Technical Sciences, professor

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-9147-883X>

e-mail: fedir.kozak@nung.edu.ua

Abstract. This article analyzes the potential of using compressed air power systems in the power drives of process transport within the oil and gas industry. The advantages and limitations of pneumatic systems are considered in comparison with conventional hydraulic and electromechanical drives. Key technical parameters influencing the efficiency of such systems are identified, including energy consumption, energy losses, and operational reliability under high-load conditions. The paper assesses the prospects of integrating modern technologies for compressed air accumulation and regulation to enhance equipment productivity and environmental safety. Possible directions for system optimization are proposed, aimed at reducing operational costs and improving energy efficiency in industrial processes. A compressed air-based energy system with zero emissions can serve either as a primary power source or as an auxiliary power unit in transport applications, offering the benefits of carbon-free operation and increased overall energy efficiency. The article provides a comprehensive technological overview of compressed air power systems, summarizing current research in the transportation sector, including valve technology innovations, prototype development, and system integration. Furthermore, various pneumatic hybrid technologies are explored in detail, offering insights into the potential and constraints of different hybridization approaches. The opportunities and challenges associated with implementing compressed air technologies in the power drives of process transport are discussed. It is expected that the transition to such systems in the oil and gas sector will foster technological advancement and the adoption of zero-emission compressed air solutions.

Key words: oil and gas transport; compressed air; pneumatic drive; power drive; energy system.