

Використання енергії амортизаційної системи в організації руху електромобіля

Пономарьов О. М.¹, Марченко О. Л.¹, Бабайцев В. А.¹

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Анотація. Метою роботи є розкриття основних переваг та принципу роботи пневматичної амортизаційної системи для рекуперації та генерації енергії. При русі автомобіля в результаті деформації пружин підвіски виникають коливання рами або кузова, котрі гасяться амортизаторами. В рамках заходів енергозбереження пропонується акумулювати енергію коливальних рухів у вигляді пневматичної енергії стисненого повітря з можливістю подальшого використання в різноманітних системах автотранспорту. Показана ефективність та доцільність запровадження подібних заходів, особливо в гібридних схемах автомобілів в яких одночасно відбувається перетворення теплової та електричної енергії. Результати дослідження вказують на перспективність та доцільність впровадження нових схем в напрямку підвищення ефективності знов створюваних систем рекуперації в підвісках автомобілів.

Ключові слова: амортизація; пневматика; рекуперація енергії; акумулювання.

Вступ

Наш світ не стоїть на місці, та кожен день привносить в наше життя все нові інноваційні продукти та винаходи. Вже досить давно люди вигадали такий винахід як «Електромобіль», який досить швидко увійшов в наше повсякденне життя і на ринку існує конкуренція між виробниками, які прагнуть зробити свій товар більш досконалим. Але всі винаходи рано чи пізно вимагають покращень та змін.

У наш час електромобілі стали одним із основних рішень екологічних проблем, які створює автотранспорт на традиційних видах палива. Електромобілі мають величезну перевагу перед традиційним транспортом, а саме:

- високий ККД (90-95%) порівняно з ККД транспортних засобів з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) (22-42%);
- малий рівень шуму за рахунок незначної кількості рухомих елементів;
- низький викид шкідливих речовин і т.п.

Але в них також є свої недоліки такі як:

- відносно малий запас ходу;
- витрати на бортові системи;

– витрати енергії акумуляторів, які йдуть на обігрів салону.

Тому нам варто замислитися над питанням: «Звідки взяти додаткову енергію?».

Так, вже відома та використовується система рекуперації механічної енергії за рахунок гальмування. При гальмуванні електромобіля його силовий агрегат відключається від джерела живлення (акумулятора) і переходить на генераторний режим, самостійно виробляючи енергію. Чим частіше гальмує автомобіль, тим більше заряджається акумуляторна батарея. Хоча у цієї системи ККД досить великий (60-70%), але для невеликих автомобілів, і тим самим у міському потоці, ця система мало ефективна за рахунок невеликої маси електромобіля і невеликої швидкості гальмування (система мало ефективна якщо початкова швидкість перед гальмуванням менше 60 км/год).

Відповідь на питання про додаткову енергію насправді лежить на поверхні. Дорожнє покриття не є ідеально рівним і це означає, що можливо використовувати цю ваду як додаткове джерело енергії, що виникає за рахунок коливань амортизаційної системи автомобіля.

Аналіз публікацій

Еволюція систем трансмісії транспортних засобів дозволила дуже ефективно витратити енергію палива або заряд акумуляторної батареї. В сучасних автомобілях та інших засобах вже втілено багато рішень, що дозволяють підвищувати енергоефективність за рахунок рекуперації механічної енергії, яка звичайно витрачається марно.

У першому випадку втрата енергії відбувається через рух автомобіля під час його гальмування до ситуації зупинки, коли механічна енергія, обумовлена рухом маси транспортного засобу, перетворюється в теплову енергію в гальмівній системі, встановленої на колесах транспортного засобу.

У другому випадку рекуперації розсіяної енергії повітряний компресор замінює гальмівну систему ходового транспортного засобу. Дійсно, збільшення кінетичної енергії рухомої маси протягом певного періоду часу дорівнює роботі, виконаній тією самою силою, що викликає рух, протягом того самого періоду часу.

Під час фази гальмування транспортного засобу вироблена робота двигуна, трансформована в кінетичну енергію маси, представлену самим транспортним засобом, що рухається, розсіюється у вигляді тепла, тобто зводиться до нуля, дією гальм, що працюють у заздалегідь визначений період часу, обов'язково короткий час. Гальмівна система, здатна відновити кінетичну енергію $\frac{1}{2}(mV^2)$ транспортного засобу, яка в будь-якому випадку буде розсіюватися через втрату тепла, відповідно до звичайних систем, замінена повітряним компресором зі змінним ступенем стиснення відповідно до швидкості яка необхідна для дії гальмування.

Стиснене повітря, отримане шляхом рекуперації розсіяної енергії, з повітряного компресора зі змінним ступенем стиснення, який замінює гальмівну систему, передається і зберігається в резервуарі і після цього передається в якості робочого тіла для допоміжного двигуна або пневматичного стартера.

Крім того, в той же час вищезазначене повітря може надходити у розпорядження двигуна внутрішнього згорання як наддув, необхідний для правильного згорання, іншими словами, як засіб для досягнення максимальної ефективності робочого циклу двигуна, встановленого на транспортному засобі. [1]. Так, дану тему розкривають декілька схожих

патентів. Нижче наведені декілька з них.

Винахід відноситься до рекуператорів для транспортних засобів, він може бути використаний для всіх видів наземного транспорту – автомобільного та електротранспорту. При використанні рекуператора досягається важливий результат – економиться паливо не тільки в автомобілях, а й при використанні електротранспорту, на електростанціях.

Для цього пара роторних гідроприводів у режимі гальмування машини закачують у ресивер рідину для акумулювання енергії стисненої повітряної подушки. Акумульована енергія стиснутої повітряної подушки в ресивері може підтримуватися або витратитися під час розгону та руху транспортного засобу. Рідина, що витісняється стисненим повітрям з ресивера, змушує обертатися пару роторних гідроприводів. Вони передають через трансмісію рух колесам. Додаткова енергія при тривалому гальмуванні передається від додаткової роторної гідромашини електрогенератору. Невелику частину додаткової енергії пропонується отримувати ще й від амортизаторів, зі спеціальними циліндрами, які перекачують поршнями частину рідини в загальну гідравлічну систему накопичення енергії гальмування. Управління процесами руху потоків рідини забезпечується клапанною системою.

Автор винаходу прагнув використовувати всі можливі способи рекуперації в одному пристрої, і тому головним недоліком цієї пропозиції є маса рекуператора. Наприклад, в ресивері необхідно розмістити не тільки об'єм рідини, що закачується, але і передбачити місце для стисливої повітряної подушки. На перекачування рідини в ресивер двома роторними гідромашинами потрібна ще додаткова ємність. Разом з додатковою третьою роторною гідромашиною, електрогенератором та циліндрами на амортизаторах маса рекуператора буде такою, що витрати палива в транспортному засобі на його постійне перевезення будуть вищими, ніж очікуваний вигащ у його економії. Звісно ж, немає потреби мати рекуператор під усі умови руху на дорогах, оскільки найбільш напружений цикл роботи транспорту, отже, і максимальне використання енергії гальмування можливе лише у міському циклі [2].

Але ми не плануємо використовувати всі можливі рекуператори енергії через їх велику вагу. Ми вважаємо, що рекуперації від амортизаційної системи буде достатньо для жив-

лення деяких бортових приладів, так і для запуску автомобіля.

Наступний винахід в цілому відноситься до гідравлічних двигунів і насосів, а більш конкретно до аксіально-поршневих двигунів та насосів прямого витіснення. Цей винахід був розроблений в першу чергу для використання з вузлом насос/двигун, який є частиною системи рекуперативного приводу (RDS).

В одному варіанті застосування блок циліндрів і поверхня клапана розташовані коаксіально навколо первинного ведучого валу, таким чином уникаючи необхідності використання проміжних передач, ланцюгів, пасів або інших елементів передачі. При використанні в поєднанні з відповідним акумулятором отримана система регенеративного приводу забезпечує систему для використання раніше витраченої енергії гальмування транспортного засобу, зберігання цієї енергії та подальшого вивільнення її назад у трансмісії, якщо це необхідно в умовах прискорення, навантаження, або перемикання передач. Така система RDS значно покращує загальну ефективність двигунів і систем трансмісії автомобіля. Система RDS також виконує роль ефективного допоміжного гальмівного механізму в режимі накопичення енергії [3].

Для аналізу систем амортизації нижче наведено приклади патентів пневматичних амортизаторів.

Винахід відноситься до підвісок транспортних засобів, зокрема пристроїв для рекуперації енергії коливань транспортного засобу. При наїзді колеса на нерівність дороги підвіска, стискаючи пружний елемент, переміщується разом з колесом вгору, рухаючись навколо осі шарнірного кріплення і захоплюючи зубчасту рейку за дугою відповідно закріплену на підвісці.

Пристрій для рекуперації енергії коливань транспортного засобу, що містить встановлений на підресореній частині транспортного засобу генератор, вал якого пов'язаний рейковою передачею з невідресореною частиною транспортного засобу, що відрізняється тим, що, з метою підвищення ефективності, статор і ротор генератора встановлені з можливістю обертання навколо його валу і на них закріплені конічні шестерні, зачеплені з сателітами, закріпленими на осях корпусу, що розташовані у вертикальній поперечній площині, і три муфти вільного ходу, одна з яких розташована між валом і статором, дру-

га між валом і ротором, а третя між ротором та відповідною конічною шестернею, при цьому напрямок вільного ходу першої муфти відмінно від напрямку вільного ходу двох інших муфт [4].

Інший винахід відноситься до амортизаторів, зокрема до пневматичних амортизаторів з рекуперацією енергії коливання. Ціль винаходу – підвищення ефективності амортизатора автомобіля. Амортизатор працює наступним чином.

При впливі ролика на шток поршень стискає повітря в підпоршневій порожнині і в міру зростання тиску послідовно відкриваються відповідні пластинчасті клапани, що всмоктують. Перший їх по ходу відкривається і випускає повітря ще за зворотному ході штока. Якщо хід збільшений, то кожен попередній поршень упирається в наступний і продовжує рух як один складовий поршень, поки пружність повітря або ресори не врівноважують сили на шток. Кожне нове коливання створює щаблі зростаючих тисків у підпоршневих порожнинах по ходу повітря, що перепускається та регулюється клапаном. Зворотний хід, що створює необхідні перепади тиску для відкриття клапанів поршня зі штоком і проміжних поршнів, здійснюється пружним зв'язком (пружини і повітря, що залишилося). При досягненні максимального тиску в останній під час ходу повітря підпоршневої порожнини відкривається і перепускає повітря клапан регульованого тиску і частина повітря переходить у магістраль. Для створення запасу стисненого повітря та зменшення пульсації паралельно магістралі встановлено ресивер [5].

Ще декілька років тому були запропоновані амортизатори, які здатні виробляти електричну енергію за рахунок нерівності дорожнього покриття. Коливання автомобіля на нерівностях заряджатимуть акумулятор машини. За словами розробників, такі амортизатори дозволять заощадити до 8% палива. Розробники представили два варіанти амортизатора: перший є магнітною трубкою, поміщеною в іншу трубку, всередині якої знаходиться спіраль провідника. Коливання підвіски автомобіля призводять до руху осердя всередині спіралі, після чого виникає струм, який відправляється в акумулятор. Другий варіант має в своєму принципі дії таку ж технологію, але дещо ускладнену компактним механізмом, який посилює зміщення і тим самим збільшує кількість енергії [6, 7].

Коли машина підскакує на купині або вібрає, ковзаючі трубки або генератор, що обертається, виробляють електричну напругу. Розробники заявили, що легкові автомобілі на 100 км/год зможуть виробляти до 400 Вт на нормальних дорогах, а на менш рівних ділянках – до 1500 Вт. Вантажівки та позашляховики зможуть виробляти, залежно від якості дороги, 1–10 кВт. Енергія, яка виробляється в амортизаторі, буде направлена в акумулятор і використана в живленні бортової електроніки. Енергоспоживання автомобіля в середньому коливається від 250 до 350 Вт. З цього випливає, що такий тип амортизатора знижуватиме навантаження на акумулятор, сприяючи тим самим економії палива або заряду акумуляторної батареї [6, 7].

Новий тип амортизатора цілком може бути вживлений в сучасні машини замість існуючих амортизаторів, в яких коливальна енергія викидається у вигляді тепла. Додаткова модифікація підвіски не потрібна. Автори винаходу вважають, що вартість встановлення нового амортизатора окупиться за 3–4 роки для легкових автомобілів та за 1–2 роки для вантажівок [6, 7].

Мета та постановка задачі

Метою роботи є розкриття основних переваг та принципу роботи пневматичної амортизаційної системи для рекуперації та генерації енергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- огляд сучасного стану проблеми та аналіз існуючих засобів рекуперації механічної енергії;
- провести дослідження пневматичних агрегатів, розробити механізм реалізації запропонованої системи, принципову схему;
- провести аналіз переваг та недоліків системи рекуперації механічної енергії при застосуванні в автомобільному транспорті.

Електричне гальмування

Електричне гальмування здійснюється шляхом перемикання електродвигунів на генераторний режим при гасінні енергії в опорах (реостатне гальмування) або передачі в контактну мережу (рекуперативне гальмування). Електричне гальмування застосовується усіма сучасними видами рухомого складу міського електротранспорту і, зокрема, тролейбусами. При цьому найбільшого поширення

набуло реостатне гальмування; рекуперативне гальмування застосовується лише на тролейбусах із електродвигунами змішаного збудження [8].

Спосіб гальмування, при якому рекуперативне гальмування, що починається при високій швидкості, автоматично переходить у реостатне при нижчій швидкості, іноді називають рекуперативно-реостатним. Цей спосіб електричного гальмування на тролейбусах поширення не набув [8].

У разі застосування електродвигунів змішаного збудження обидва види електричного гальмування – реостатне та рекуперативне – як правило, використовуються окремо та керуються від різних педалей. Застосування реостатного гальмування на тролейбусах дозволяє суттєво знизити витрати на гальмівні колодки та знос гальмівної системи, забезпечує зручне регулювання гальмівної сили у процесі уповільнення для зупинки машини [8].

Система електричного гальмування повинна задовольняти наступні основні вимоги:

- мати електричну стійкість при всіх можливих експлуатаційних режимах. Електрична стійкість характеризується властивістю відновлювати стійку електричну рівновагу внаслідок будь-яких перехідних процесів;
- забезпечувати необхідні гальмівні характеристики; при реостатному гальмуванні тролейбусів ці характеристики повинні бути достатньо «м'якими» для того, щоб допускати гальмування на одному ступені регулювання в широкому діапазоні швидкості; при рекуперативному гальмуванні жорсткість характеристик обмежена допустимими коливаннями струмів та тягових (гальмівних) сил при коливаннях напруги мережі, а також при переходах з одного ступеня на інший;
- забезпечувати швидкий перехід на гальмівний режим та зручне керування гальмівним процесом за мінімального додаткового обладнання;
- мати достатню простоту і надійність в експлуатації, стійкість за комутаційними, тепловими та ізоляційними властивостями електричних машин і апаратів [8].

Генерація енергії пневматичними амортизаторами

Пропонується використовувати коливальні рухи амортизаційної системи для вироблення

стисненого повітря та подальше закачування та накопичення його у певному резервуарі. Потім використовувати накопиченого стисненого повітря для початку руху електромобіля бо саме на його цей етап потрібно найбільше енергії. За умови надлишку запасу стисненого повітря можна також використовувати його в якості робочого тіла для живлення генератора електричної енергії для заряджання акумуляторної батареї.

Енергія стисненого повітря

Стиснення повітря здійснюється, як правило, за допомогою повітряних компресорів. Повітряні компресори втягують повітря на вхідний клапан, потім стискають його до необхідного об'єму і випускають стиснуте повітря через нагнітальний клапан в ємність для зберігання. Процес стиснення зазвичай приводиться в дію електродвигуном [9].

В різноманітних галузях давно відомі пневматичні акумулятори – пристрої, що накопичують газ або повітря під тиском, і повертаючи цю енергію в моменти найбільшого споживання з перетворенням енергії або без цього перетворення. Можна навести багато прикладів застосування пневматичних акумуляторів – пневматична система гальмування автомобіля, пневматичні інструменти на виробництві, в ракетній техніці є застарілий термін «повітряний акумулятор тиску». Установка акумуляції, як правило складається з компресора, газової турбіни чи пневмонасоса, резервуара для стисненого повітря та генератора. Також є деякі цікаві альтернативні винаходи та патенти на тему генерації стисненого повітря.

Системи стиснутого повітря можуть працювати на основі двох видів витіснення повітря:

- позитивне усунення – найбільш поширений метод стиснення; компресори, що працюють на принципі позитивного зміщення, проштовхують повітря в обмежений простір, зазвичай за допомогою руху механічного пристрою;

- динамічне розміщення – у порівнянні з компресорами позитивного зміщення, які фізично зменшують об'єм захопленого повітря, компресори динамічного зміщення забезпечують розгін повітря до найвищої швидкості. Створювана при цьому енергія збільшує тиск повітря [9].

Пневматичні системи

Для реалізації системи рекуперації пропонується використовувати пневматичні двигуни, які будуть запускатися за рахунок накопиченого амортизаційною системою повітря в процесі руху автомобіля.

Одна з вагомих переваг – це те, що пневматичні двигуни, особливо малої потужності, мають досить малу вагу. А якщо цей пристрій буде встановлюватися на електромобіль, то це хороший показник, тому що не потрібна буде додаткова енергія на перевезення додаткової ваги пневматичного двигуна. Також пневматичні двигуни стійкі до перевантажень, значним плюсом є те, що вони досить прості у своїй конструкції, надійні в експлуатації та дешеві у виготовленні [10].

Як приклад, в наш час на деяких автомобілях-самоскидах БелАЗ з вантажопідйомністю 80–120 т застосовується пневматичний стартер потужністю в номінальному режимі до 60 кВт з частотою обертів 3000 об/хв, з максимальним робочим тиском 0,9...1,5 МПа та питомою витратою повітря 0,01...0,014 м³/с·кВт. Ресурс стартера встановлено не менше 10 тис. циклів роботи під навантаженням та при дворазовій заміні пластин ротора. Запас повітря зберігається у двох балонах об'ємом по 250 літрів кожен [11].

Перевага пневматичного стартера перед пневматичною системою полягає в тому, що при подачі стисненого повітря в ДВЗ використовується в 10-15 разів більший тиск, ніж у пневматичному стартері. І пневматичний стартер не потребує зняття з автомобіля на відміну від пневматичної системи. До переваг пневматичного стартера можна віднести:

- відсутня акумуляторна батарея, або зі зменшеною масою, і тому ця система має меншу вагу в порівнянні з електростартером;
- при сильно зниженій температурі (-20 °С) потужність пневматичного стартера не знижується, тоді як потужність електростартерної системи падає приблизно на 30-40%;
- заряджання балона відбувається за невелику кількість часу.

Але в цієї системи, як і в інших, є недолік – обмежена кількість запусків за одного заряду балона.

Передбачається, що пневматична система рекуперації енергії коливань може знизити витрату палива у звичайних і гібридних машин приблизно на 2-10%. Так само дана система може бути встановлена на абсолютно

будь-який автомобіль. Для електромобілів пропонується використовувати цю систему як перший «поштовх» при початку руху, тому що на це використовується досить багато енергії. Система може накопичувати стиснене повітря і тільки потім використовуватися для подачі стисненого повітря в пневматичний стартер, але допустиме і використання цієї системи для заряджання машинного акумулятора або живлення бортових приладів.

Дана система окупиться вже через кілька років, а також допоможе зменшити споживання пального, або збільшення запасу ходу для електромобілів, та відповідно знизити забруднення навколишнього середовища.

Пневмогідроакумулятор

Відомий спосіб акумулювання надлишкової рекуперативної енергії за допомогою пневмогідроакумуляторів. Ці акумулятори призначені для акумулювання енергії робочої рідини, і видачі її у гідросистему під час різкого збільшення витрати робочої рідини. Акумулювання енергії робочої рідини відбувається у період відсутності чи незначного споживання гідравлічної енергії у гідросистемі. Принцип дії цього акумулятора полягає в тому, що акумулювання та повернення робочої рідини відбуваються в результаті стиснення та розширення газу [12].

Пневмогідроакумулятор є ємністю, заповненою стисненим газом з початковим тиском зарядки. При надходженні в ємність робочої рідини з гідросистеми відбувається стискання та підвищення тиску газу до максимального значення тиску в гідросистемі. При розрядженні робоча рідина витісняється з ємності внаслідок розширення газу [12].

Акумулювання стисненого повітря

Акумулятор тиску складається із резервуару під тиском із теплоізоляцією або частіше без неї. Якщо використовується вологий газ, то може виникнути потреба у системі відведення вологи.

Рівняння акумулювання:

$$dQ + (U + Pv)dm_{\text{вх}} - (U + Pv)dm_{\text{вих}} = d(U \cdot m)_{\text{ак}} + P_{\text{ак}}dV_{\text{ак}} \quad (1)$$

де U - внутрішня енергія газу в акумуляторі; v - питомий об'єм газу ($v = 1/\rho$); P - тиск газу; $V_{\text{ак}}$ - об'єм акумулятора.

Розглянемо випадок, коли відсутнє надходження тепла $dQ=0$ і відсутні витрати робочого тіла з внутрішнього об'єму акумулятора $dm_{\text{вих}}=0$. Оскільки акумулятор не змінює свій об'єм, це означає відсутність механічної роботи, то $P_{\text{ак}}dV_{\text{ак}}=0$. Тоді отримаємо:

$$(U + Pv)dm_{\text{вх}} = d(U \cdot m)_{\text{ак}},$$

або

$$(U + Pv)dm_{\text{вх}} = U \cdot m_{\text{ак}} + m_{\text{ак}}dU. \quad (2)$$

З розгляду роботи такого акумулятора випливає, що:

$$dm_{\text{вх}} = dm_{\text{ак}}. \quad (3)$$

Тоді:

$$Udm_{\text{ак}} + Pvdm_{\text{ак}} = Udm_{\text{ак}} + m_{\text{ак}}dU; \quad (4)$$

$$Pvdm_{\text{ак}} = m_{\text{ак}}dU. \quad (5)$$

$m_{\text{ак}} = \rho V_{\text{ак}}$ підставимо в (5):

$$PvV_{\text{ак}}d\rho = \rho V_{\text{ак}}dU. \quad (6)$$

Враховуючи, що $U = C_v T$ отримаємо:

$$Pvd\rho = \rho C_v dT. \quad (7)$$

Запишемо рівняння стану ідеального газу:

$$Pv = RT = (C_p - C_v)T. \quad (8)$$

Тоді (7) набуде вигляду:

$$(C_p - C_v)Td\rho = \rho C_v dT. \quad (9)$$

Поділимо рівняння (9) на C_v :

$$(k - 1)Td\rho = \rho dT; \quad (10)$$

$$(k - 1)\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dT}{T}. \quad (11)$$

Після інтегрування отримаємо:

$$\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{k-1} = \frac{T}{T_0}. \quad (12)$$

Співвідношення (12) пов'язує між собою

щільність і температуру на режимі зарядки з акумулятора із стиснутим робочим тілом, індекс «0» відноситься до початкових умов.

Розрядка в ізотермічному режимі

Такий режим може бути реалізований, якщо розрядка відбувається дуже повільно і завдяки теплообміну з навколишнім середовищем температура всередині акумулятора буде підтримуватися постійною. Для виведення рівняння, яке буде сполучати параметри стисненого повітря при розрядці в ізотермічному режимі, розглянемо рівняння теплового акумулявання. Після відповідних перетворень ми можемо отримати рівняння, яке за вище сказаних умов у лівій частині матиме складову dQ :

$$\frac{dQ}{V_{ак}} + Pvd\rho_{ак} = \rho dU. \quad (13)$$

При ізотермічному режимі $dU = C_v dT = 0$, з урахуванням теплообміну можна записати:

$$\frac{dQ}{V_{ак}} + RTd\rho_{ак} = \rho C_v dT. \quad (14)$$

Для ізотермічного режиму права частина співвідношення (14) також дорівнює нулю. Прирівнюючи вирази для $dQ/V_{ак}$ із співвідношення (13) і (14) ми отримаємо співвідношення, яке пов'язує параметри з рівняння ідеального стану газу, впливає, що на ізотермічному режимі розрядки (за наявності теплообміну з навколишнім середовищем) ρ і P будуть пов'язані співвідношенням:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{P}{P_0}. \quad (15)$$

Розглядаючи співвідношення (15) і порівнюючи його з $\frac{P}{\rho} = RT$ можна дійти до висновку, що ємність акумулятора при ізотермічному режимі збільшується порівняно з адіабатичним акумуляванням.

Характеристики стисненого повітря

Компонентами забруднень стисненого повітря є вода та компресорне мастило в рідкому та пароподібному стані, тверді та газоподібні забруднення.

Стиснення повітря, що надійшло в компресор, супроводжується підвищенням температури на 100-130 °С. У процесі стиснення вміст вологи в питомому обсязі повітря збільшується пропорційно до зростання тиску, але при цьому внаслідок підвищення температури його відносна вологість значною мірою знижується. Так, при тиску в системі 0,7 МПа та відносній вологості повітря, що всмоктується, 80% стиснене повітря на виході з компресора має відносну вологість 6-10%. Під час руху трубопроводами та іншими елементами системи повітря охолоджується внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем, відбувається перенасичення повітря водяними парами та їх конденсація [12].

Здатність стисненого повітря утримувати пари води зменшується зі зниженням температури та підвищенням тиску. При цьому його відносна вологість зростає, а після досягнення стану насичення відбувається конденсація надлишкової кількості пари та поява води в рідкому стані (конденсату). Температура, за якої це відбувається, називається точкою роси. При вищій температурі (і тому ж тиску) конденсація водяної пари не відбувається [12].

Джерелами забруднення стисненого повітря мастилом можуть бути мастило компресорів і пневматичних пристроїв, масляні фільтри на лінії всмоктування компресорів, пари та розпилену олію в навколишньому повітрі. У стислому повітрі олія зазвичай знаходиться в пароподібному та рідкому стані. Гранична концентрація парів мастила у повітрі, як і парів води, зменшується зі зниженням температури та підвищенням тиску [12].

Концентрація, дисперсний склад та природа твердих забруднень стисненого повітря залежить від забрудненості повітряного басейну в зоні всмоктування компресора, стану, режимів експлуатації та обслуговування трубопроводів та пневматичних пристроїв. Основна кількість твердих забруднень вноситься при передачі стисненого повітря трубопроводами та з'єднаннями.

Основну частину газоподібних забруднень, що потрапляють у системи разом із атмосферним повітрям, становлять димові гази від спалювання палива; гази, що утворюються за хімічних процесів; пари кислот та лугів; розчинники та ін. [12].

Для підвищення довговічності та надійності пневматичних систем управління було б ідеальним повне видалення забруднень стис-

неного повітря. Однак присутність певної кількості забруднень у ряді пристроїв практично не позначається на їхній працездатності. Тому повне очищення стисненого повітря, пов'язане із значними витратами, в більшості випадків економічно недоцільне. Вимоги до очищення повітря залежать від конструктивного виконання та матеріалу елементів систем керування та механізмів, розмірів та точності, величини зазорів та отворів, від вимог до надійності та довговічності, від експлуатаційних умов та характеру впливу забруднень. Встановлено, що інтенсивність зношування пристроїв тим вища, чим вища твердість частинок, а збільшення твердості та пористості поверхонь, що труться, підвищують зносостійкість. Абразивний знос і заклинювання можуть бути значно знижені, якщо розмір твердих частинок, що надходять у пристрій з повітрям, не перевищує 3/4 величини найменшого зазору пар, що труться [13].

Принципова схема системи рекуперації та генерації енергії

На основі проведених досліджень пневматичних агрегатів та систем [14, 15] була розроблена принципова схема системи рекуперації та генерації енергії, рис. 1.

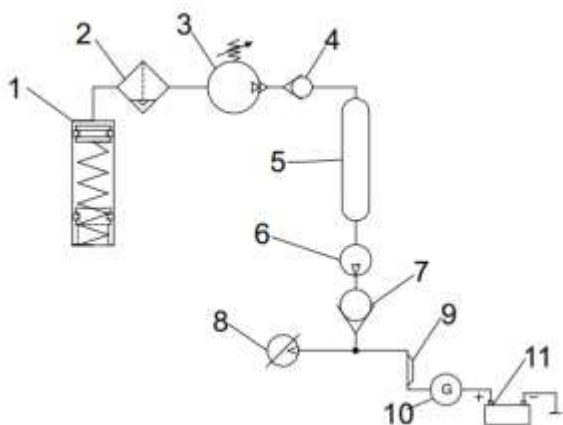


Рис. 1. Принципова схема системи рекуперації та генерації енергії

Установка працює наступним чином: від коливань автомобіля пневмоамортизатор 1 генерує стиснене повітря, яке проходить фільтр-вологовідділювач 2 і за допомогою пристрою підвищення тиску стисненого повітря 3 проходить через клапан 4 і потрапляє в ресивер 5. Потім за допомогою компресора 6 стиснене повітря надходить до клапану 7. Далі є два можливих шляхи використання накопиченого раніше стисненого повітря:

– надходження енергії повітря на пневмостартер 8 і здійснюється початок руху автомобіля або допомога в русі;

– подача повітря на турбіну на 9 і за допомогою генератора 10 віддає електричну енергію в акумулятор електричної енергії 11.

Висновки

Використання пневматики стало очевидним двигуном прогресу, знайшовши безліч застосувань у сучасному світі технологій [14]. Запропонована система з застосуванням пневматичних амортизаторів автомобільної техніки надає можливість отримувати додаткову енергію завдяки нерівностям дорожнього покриття. З проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

– запропонована система має прийнятні масо-габаритні характеристики і її можна легко встановити на будь-який автомобіль;

– в системі небагато рухливих елементів, що робить її доволі надійною;

– пневматичні амортизатори мають досить невелику вагу та не створюють додаткового впливу на рухливість автомобіля;

– система рекуперації та генерації енергії може використовувати енергію стисненого повітря для початку руху автомобіля за допомогою пневмостартера, для створення рухової сили, та здатна конвертувати енергію стисненого повітря в електричну для зарядки акумуляторних батарей;

– система рекуперації та генерації енергії може суттєво підвищити запас ходу електромобіля, або заощадити паливо в автомобілях з використанням традиційних видів палива.

– застосування системи рекуперації та генерації енергії з пневматичними амортизаторами може окупитися через невеликий проміжок часу;

– запропонована система є екологічною і дозволить знизити викиди шкідливих речовин в атмосферу.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Gianluigi, Reis (1996). *Recovery system for dissipated energy of an engine motor vehicle during itsrunning conditions*. (United States Patent No US00554.9174A).

2. Гулевский, А. Н. (2011). *Рекуператор*. (Россия Патент: RU 2410248 C1). Gulevskiy A. N. (2011). *Rekuperator*. [Rekuperator]. (Russia Patent: RU 2410248 C1). [in Russian].
 3. Rush, Allan (2003). *Decoupling mechanism for hydraulic pump/motor assembly*. (International publication number: WO2003106816A1).
 4. Аркелян, Н. А. (1989). *Устройство для рекуперации энергии колебаний транспортного средства*. (СССР Патент: SU 1449699 A1). Arkelyan, N. A. (1989). *Ustroystvo dlya rekuperatsii energii kolebaniy transportnogo sredstva*. [The device for recuperating the vibrational energy of the vehicle]. (USSR Patent: SU 1449699 A1). [in Russian].
 5. Камалов, М. Г. (1989). *Пневматический амортизатор с рекуперацией энергии колебаний*. (СССР Патент: SU 1346882 A1). Kamalov, M. G. (1989). *Pnevmaticheskiy amortizator s rekuperatsiey energii kolebaniy*. [Pneumatic shock absorber with oscillating energy recovery]. (USSR Patent: SU 1346882 A1). [in Russian]
 6. Li, Z., Zuo, L., Luhrs, G., Lin, L., Qin, Y. (2012). Electromagnetic energy-harvesting shock absorbers: design, modeling, and road tests. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 62(3), 1065-1074. [https://DOI: 10.1109/TVT.2012.2229308](https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2229308).
 7. Li, Z., Zuo, L., Kuang, J., Luhrs, (2012). Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier. *Smart materials and structures*, 22 (2):025008. [https://DOI: 10.1088/0964-1726/22/2/025008](https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/2/025008)
 8. Ефремов, И. С. (1969). *Троллейбусы (теория, конструкция и расчет)*. Изд. 3, испр. и доп. Учебник для вузов. М.: «Высш. школа». Efremov, I. S. (1969). *Trolleybusyi (teoriya, konstruktsiya i raschet)*. [Trolleybuses (theory, design and calculation)]. Izd. 3, ispr. i dop. Uchebnik dlya vuzov. M.: «Vyissh. shkola». [in Russian].
 9. Знакомство со сжатым воздухом. / CompAir. <https://www.compair.com/ru-ru/technologies/compressed-air>. Znakomstvo so szhatyim vozduhom / CompAir. [Introduction to compressed air / CompAir]. <https://www.compair.com/ru-ru/technologies/compressed-air>. [in Russian].
 10. Зеленецкий, С.Б., Рябков, Е.Д., Микеров, А.Г. (1976). Ротационные пневматические двигатели. Л.: Машиностроение. Zelenetskiy S.B., Ryabkov E.D., Mikerov A.G. (1976). *Rotatsionnyie pnevmaticheskie dvigateli*. [Rotary pneumatic engines]. L.: Mashinostroenie. [in Russian].
 11. Елагин, М.Ю., Сидоров, Е.М. (2014). Моделирование рабочего процесса ротационного пневматического двигателя с радиальными лопатками. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. Вып. 6. Elagin, M.Yu., Sidorov, E.M. (2014). *Modelirovanie rabocheho protsessa rotatsionnogo pnevmaticheskogo dvigatelya s radialnyimi lopatkami*. [Modeling of the working process of a rotary pneumatic engine with radial blades]. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. Vyip. 6. [in Russian].
 12. Герц, У.В. (1981). *Пневматические устройства и системы в машиностроении*. Справочник. М.: «Машиностроение». Gerts, U.V. (1981). *Pnevmaticheskie ustroystva i sistemyi v mashinostroenii*. *Spravochnik*. [Pneumatic devices and systems in mechanical engineering. Handbook]. М.: «Mashinostroenie». [in Russian].
 13. Warring, R. H. (1969). *Filters and filtration*. Morden, Surrey, Trade and Technical Press Ltd.
 14. Прокопов, М. Г., Ванеєв, С. М., Козін, В. М., Мерзляков, Ю. С. (2020). Конструкції елементів пневмоагрегатів: навчальний посібник. Суми: СумДУ. Prokopov, M. H., Vanieiev, S. M., Kozin, V. M., Merzliakov, Yu. S. (2020). *Konstruktsii elementiv pnevmoahrehativ: navchalnyu posibnyk*. [Designs of elements of pneumatic units: a study guide]. Sumy: SumDU. [in Ukrainian].
 15. Федорець, О. О., Саленко, О. Ф. (2009). *Гідравліка, гідро- та пневмопривод: підручник*. Київ: Знання. Fedorets, O. O., Salenko, O. F. (2009). *Hidravlika, hidro- ta pnevmopryvod: pidruchnyk*. [Hydraulics, hydraulic and pneumatic drive: textbook]. Kyiv: Znannia. [in Ukrainian].
- Пономарьов Олександр Миколайович¹**, к.т.н., доцент кафедри двигунобудування, тел. +380504530515, Ponomarov@ftf.dnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1032-5074.
- Марченко Олег Леонідович¹**, старший викладач кафедри двигунобудування, тел. +380977918977, marchenko@ftf.dnu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5112-1396.
- Бабайцев Віталій Андрійович¹**, студент, тел. +380731334307, babaitsev@ftf.dnu.edu.ua.
- ¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, 49010, Україна, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 72.
- Using the energy of the amortization system in the organization of the movement of an electric vehicle**
- Abstract. Problem. One of the areas of developing energy saving when using machines and mechanisms is the recovery of used energy for the purpose of reuse. At the same time, potential energy accumulated by massive mechanisms or kinetic energy of moving machine elements is used. Goal.*

The purpose of the work is to reveal the main advantages and principle of operation of the pneumatic damping system for energy recovery and generation. **Methodology.** The methodological basis of the work is the analysis, comparison and generalization of existing scientific research and inventions. The ever-increasing interest of domestic and foreign researchers in the direction of energy saving in road transport, the steady expansion of the list of inventions related to energy saving, such as the conversion of mechanical vibrations into electrical, thermal, hydraulic and other types of energy with subsequent accumulation and useful use, were noted. **Results.** When the car is moving, as a result of the deformation of the suspension springs, there are transverse and longitudinal vibrations of the frame or body, which are damped by shock absorbers. The most widely used are hydraulic and gas shock absorbers, which use the resistance of a viscous liquid or gas when passing through calibrated holes or limited valve diameters. The very process of dampening oscillations is reduced to the transformation of mechanical energy into thermal energy with subsequent removal of heat to the environment. **Originality.** As part of energy saving, the authors of the work propose to accumulate the energy of oscillating movements in the form of pneumatic energy of compressed air with the possibility of further use in various systems of automobile transport. They also show the effectiveness and expediency of introducing similar

measures, especially in hybrid schemes of cars in which the transformation of thermal and electrical energy takes place at the same time, point out the problems that arise when introducing energy accumulation in the form of compressed air, and propose measures to overcome negative phenomena that characteristic of this process. **Practical value.** The results of the study indicate the perspective and expediency of implementing new schemes in the direction of increasing the efficiency of newly created recuperation systems in car suspensions, expand the list of methods of providing energy-efficient technologies to increase reliability and durability depending on operating conditions.

Key words: amortization; pneumatics, energy recovery; accumulation, compressed air.

Ponomarov Oleksandr¹, PhD., Assoc. Prof.,
Department of Engine Construction,
tel. +380504530515, Ponomarov@ftf.dnu.edu.ua,
ORCID: 0000-0002-1032-5074.

Marchenko Oleh¹, Senior Lecturer, Department of
Engine Construction,
tel. +380977918977, marchenko@ftf.dnu.edu.ua,
ORCID: 0000-0001-5112-1396.

Babaitsev Vitalii¹, Student,
tel. +380731334307, babaitsev@ftf.dnu.edu.ua.

¹Oles Honchar Dnipro National University, Gagarina
Avenue, 72, Dnipro, 49010, Ukraine.