УДК 621.541: 62-192
DOI: https://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2018.83.137493

Дослідження рекуперації енергії в процесі гальмування на гібридних автомобілях з використанням пневмодвигуна

М.М. Яцина

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна

Received: 07 June 2018 / Accepted: 18 September 2018

Анотація. *У статті розроблено методи формування параметрів рекуперації енергії за допомогою досліджень результатів навантажень 3D моделі гальмівного вузла з маховиковим рекуператором енергії на базі пневморушія. Також розглянуто тенденції розвитку застосування гібридних транспортних засобів, зокрема з рекуперацією енергії в режимі гальмування при використання пневмодвигуна у якості додаткового силового агрегату. Представлено методику створення енероефетивності конструкції в рекуперацийному гальмуванні, оскільки гальмівна система є одним з елементів активної безпеки, то це вимагає її детального дослідження та вивчення. Тому, альтернативне джерело енергії для силових установок транспортних засобів можуть бути використані інерційні (маховичні, мехатронні) накопичувачі енергії, в яких енергія запасається у вигляді механічної енергії диска або циліндра, який швидко обертається. Кінетична енергія обертання, накопичена в обертовому тілі (маховику). На основі чого встановлено, що проведення розрахунків найбільш доцільно скористатися вхідними даними встановленими у нормативних документах. Зазначено, що під час випробувань транспортних засобів, обладнаних пневмоприводом та системою рекуперації енергії, доля участі пневматичної системи рекуперативного гальмування не повинна перевищувати мінімального рівня, гарантованого конструкцією системи.*

Ключові слова: гібридний транспортний засіб, рекуперація енергії, пневмодвигун, параметри, стабільність, гістограма, маховик.

Вступ.

Обмеженість запасу енергії стисненого повітря у балонах пневмоавтомобіля вимагає детального аналізу умов руху, динаміки розгону, активності гальмування, стану дорожного покриття та інших чинників, які безпосередньо визначають затрати потужності впродовж експлуатації транспортного засобу. Рух транспортного засобу відбувається по прямолінійних і криволінійних ділянках траєкторії, з прискореннями та гальмуванням; стан дорожного покриття може мати суттєві відмінності. При цьому наявність та відсутність корисного навантаження змінює динаміку руху пневмокара. Однак, пневматичні рушії в ролі основного силового агрегату транспортного засобу в сучасному світі майже не використовується у міському та міжміському сполученні, а переважно для внутрішньо цехових перевезень. Але, в свою чергу, останнім часом пневмодвигун все більше застосовується як додатковий силовий агрегат на гібридному транспортному засобі в поєднанні з двигуном внутрішнього згорання. Таким чином, виникає питання рекуперації енергії в процесі гальмування, що широко використовується в гібридних транспортних засобах з рушіями типу ДВЗ-електродвигун. Однак, рекуперація енергії сти снутого повітря в сучасному автомобілебудуванні практично не розглядається і потребує поглибленого дослідження [1, 3].

Об'єкт досліджень

На гібридних транспортних засобах використовуються різноманітні види рекуператорів, що здатні працювати в різних режимів руху транспортного засобу. В свою чергу, для пневморекуператорів застовують конструкцію з використанням маховика, як елемента накопичення моменту енерції в режимі гальмування.

Для визначення оптимального ступеня зарядки накопичувачів енергії, вихідними даними за результатами розрахунку будуть кількість енергії, яка рекуперована транспортним засобом під час гальмування та відношення цієї енергії до загальної ємності накопичувачів енергії [2]. А, в свою чергу, зміна радіуса та маси маховика в

✉ М.М. Яцина
jnn19844@gmail.com

© Mechanics and Advanced Technologies, 2018

моделі дослідження рекуперaційної системи призводить до встановлення параметрів рекуперації стиснутого повітря та визначення раціональних показників ступеня рекуперації в режимі гальмування.

Мета досліджень

Встановити раціональний ступень зарядки накопичувачів енергії з використанням маховиків різної маси та, відповідно, регулювання ступеня зарядки, для забезпечення максимально ефективну їх роботу, що дозволить на стадії проектування транспортних засобів проведення більш достовірні розрахунки їх експлуатаційних показників.

Постановка задач

Максимальна початкова швидкість гальмування становить близько 70 км/год, що обумовлено можливістю знехтувати процесом заносу та зміщення еластичного колеса при гальмуванні на більш високихшвидкостях. Оскільки відсутні затяжні спуски, то враховувати температурні режими, що виникають при нагнітанні повітря, недоцільно [3]. При цьому зазначена видкість дасть змогу забезпечити максимальну акумуляцію рекуперованої енергії, що також обумовлене впровадженням управління пневмодинамічним гальмуванням, для регулювання початкового ступеня зарядки балонів-акумуляторів від умов експлуатації [3].

Враховуючи, що пневматична система транспортного засобу представляє собою не лише додатковий силовий рушій, а й також систему гальмування, клімат-контроль та систему охолодження в транспортних засобах з рефрижераторами, то розрахунок раціональних параметрів розмірів маховика рекуператора та його маси необхідно проводити в комплексі.

Отже, проведення аналізу динамічних навантажень ланок системи рекуперації енергії в режимі гальмування з перед усім, складових гальмівного вузла, визначення закономірностей обумовленості контактного тиску конструктивними параметрами елементів системи та удосконалення конструкції гальмівної системи з рекуперативною складовою за допомогою встановлення раціональних параметрів маховика рекуператора, що дасть можливість для встановлення тиску повітря при його нагнітання в режимі рекуперативного гальмування за потрібною динамікою сповільнення транспортного засобу та визначення умов і способів підтримування динаміки руху при зміні тиску в резервуарі зі стисненим повітрям [3].

Методи і алгоритми

В міському циклі руху транспортного засобу відбувається, зазвичай, службове гальмування. Під час цього гальмування поглинається кінетична енергія. Якщо ж це гальмування здійснюється під час руху автомобіля на ухилі, то також необхідно врахувати і потенціальну енергію. Тоді, в загальному вигляді, кількість енергії, яка буде вивільнена під час електродинамічного гальмування та, відповідно, яка повинна бути поглинута накопичувачами енергії становитиме [4-5]

$$A_{\text{ж}} = \Delta E_к + \Delta En = \frac{G_a \cdot \left(V_n^2 - V_к^2\right)}{2g} + G_a \sin\alpha = \\ = \frac{G_a}{2}\left(\frac{\left(V_n^2 - V_к^2\right)}{g} + t\sin\alpha\left(V_n - V_к\right)\right) \quad (1)$$

де, $\Delta E_к$ - зміна кінетичної енергії транспортного засобу, Дж;
ΔE_n - зміна потенціальної енергії транспортного засобу, Дж;
t - час здійснення гальмування, с;
G_a - вага автомобіля, Н;
v_n - початкова швидкість транспортного засобу, м/с;
$v_к$ - кінцева швидкість транспортного засобу, м/с;
α – кут спуску (ухилу), °;
S - шлях, який долає автомобіль під час електродинамічного гальмування, м;
g - прискорення вільного падіння, дорівнює 9,81 м/с2.

Варто звернути увагу на ряд припущень та спрощень, введених у залежності (1):

- оскільки гальмування здійснюється лише за допомогою пневматичного двигуна, гальмівні сили механічного складника рівні 0;
- транспортний засіб рухається з відносно невеликою швидкістю, тому опором повітря можна знехтувати, тобто Pw=0.

Швидкість, з якої здійснюється гальмування, під час пневмодинамічного гальмування на етапі проектування доцільно вибирати з циклів руху, які використовуються під час визначення паливної економічності транспортних засобів.

Зважаючи на те, що після гальмування транспортний засіб в будь-якому випадку переходить у тяговий режим, то можна стверджувати, що в тяговому режимі уся накопичена енергія буде витрачена, тому ступінь зарядки накопичувачів енергії перед початком гальмування повинен бути таким, щоб можна було забезпечити

поглинання усієї рекуперованої енергії. Для цього з вище наведених їздових циклів достатньо вибрати максимальне значення швидкості. Кінцева швидкість гальмування, це значення швидкості, при якому припиняється рекуперація енергії, приймається 1,5 м/с. Час, протягом якого здійснюється пневмодинамічне гальмування, можна визначити із залежності [6]

$$t = \frac{\left(V_n^2 - V_к^2\right)}{J_\tau} \tag{2}$$

де, j_τ – сповільнення, яке розвиває транспортний засіб, під час пневмодинамічного гальмування. Приймається, на основі розрахункових даних та результатах випробувань, близько 1,0 м/с2. Однак, при розрахунках необхідно також враховувати зовнішні фактори, зокрема поздовжній профіль дороги. У [6] описано методику розрахунку кількісних та якісних показників поздовжнього дорожнього профілю для різних місцевостей, застосовуючи які можна досить точно розрахувати необхідний ступінь зарядки накопичувачів автомобіля. На даний момент відмічаються тенденції автовиробників спрямовані на здешевлення гібридних та пневматичних транспортних засобів. Вони проявляються у виконанні автомобілів із загальною ємністю накопичувачів енергії у відповідності до вимог споживачів. Тобто з'являється можливість отримати транспортний засіб якнайбільше адаптований до реальних умов експлуатації та вимог споживача.

Як альтернативне джерело енергії для силових установок транспортних засобів можуть бути використані інерційні маховикові накопичувачі енергії, в яких енергія запасається у вигляді механічної енергії диска або циліндра, який швидко обертається. Кінетична енергія обертання, накопичена в обертовому тілі .

$$E = \frac{1}{2} J\omega^2 \tag{3}$$

де J – момент інерції маси щодо осі обертання маховика,кг·м^2;
– кутова швидкість, рад/с.

Для простих форм маховика, відомі кінцеві вирази моменту інерції:
- для полого циліндра

$$J = \frac{1}{2} m(R^2 + r^2) \tag{4}$$

де m - маса порожнього циліндра, кг;
R, r – зовнішній та внутрішній радіус циліндра, м;
- для тонкостінного циліндра

$$J = mR^2 \tag{5}$$

- для суцільного циліндра

$$J = \frac{1}{2} mR^2 \tag{6}$$

Отже, розузгодження на чутливому елементі порушуватиме баланс витрат через робочі кромки. Це розузгодження виникає внаслідок подавання керуючого впливу на чутливий елемент.

В загальному випадку рівняння руху ротора матиме вигляд:

$$J\frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2}\frac{dJ}{d\varphi} = M - M_1 sign\,\omega - M_2 \tag{7}$$

де, J – момент інерції мас, ω – кутовашвидкість ротора, φ – кут повороту ротора, M – рушійний момент, M_1 – момент сил тертя, M_2 – момент сил корисного опору.

На відміну від пелюсткового пенвмодвигуна, пневмодвигун з кільцевим ротором має особливість в роботі кільця. Кільце призначене для врівноваження системи пелюсток – ротор, та має свій крутний момент M_3 , що співпадає з напряком рушійного моменту. Тоді рівняння руху ротора, без врахування сігнатури, матеме наступний вигляд:

$$J\frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2}\frac{dJ}{d\varphi} = M - M_1 - M_2 + M_3 \tag{8}$$

Рушійний момент, що виникає в i-й камері визначаємо з виразу:

$$M_i = l_к\left(p_i - p_{i+1}\right)\cdot\left(R_в^2 - R^2\right)/2 \tag{9}$$

де, $l_к$ – висота кільця, $R_в$ – радіус-вектор, R – радіус кільця, p_i – тиск в *i*-й камері, p_{i+1} – тиск в наступній камері по ходу руху ротора.

Таким чином, рівняння ротора буде мати остаточний вигляд:

$$J\frac{d\omega}{dt}=\left\{l_к\cdot\left[\begin{array}{l}\sum_{i=1}^{z-1}(p_i-p_{i+1})\cdot\left(\left(e\cdot(1-\cos\varphi_i)+R\right)^2-R^2\right)+\\ \sum_{i=1}^{z-1}(p_{i+1})\cdot\left(\left(e\cdot(1-\cos\varphi_i)+R\right)^2-R^2\right)\end{array}\right]\right\}- \tag{10}$$

$$-M_1-M_2+\left(\left(2\pi\rho_к l_к\cdot\left(R^2-R_{вк}^2\right)\right)\frac{d\omega}{dt}\cdot\left(R+e\cdot(1-\cos\varphi_i)\right)\right)$$

Кінетична енергія тіла, що рухається поступово, дорівнює сумі кінетичних енергій всіх n матеріальних точок на які це тіло можна розбити [5,7]

$$E_k=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{2}m_i v_i^2 \tag{11}$$

Якщо тіло обертається навколо нерухомої осі з кутовою швидкістю, то лінійна швидкість *i*-ої точки дорівнює, м/с

$$v_i=\omega r_i \tag{12}$$

де *ri* - відстань від точки і до осі обертання, м

Кінетична енергія тіла, що обертається

$$E_k=\frac{\omega^2}{2}\sum_{i=1}^{n}m_i r_i^2=\frac{J\omega^2}{2} \tag{13}$$

Робота, яка виконується при обертанні тіла, і зміна його кінетичної енергії пов'язані співвідношенням

$$A=\frac{J\omega_2^{\,2}}{2}-\frac{J\omega_1^{\,2}}{2} \tag{14}$$

де 1, 2 – початкова і кінцева кутова швидкість, рад/с

У загальному випадку рух твердого тіла можна представити у вигляді сумидвох рухів – поступального зі швидкістю, рівної швидкості центра інерції тіла, і обертового з кутовою швидкістю навколо миттєвої осі, що проходить через центр інерції. При цьому вираз для кінетичної енергії тіла перетвориться до виду

$$E_k=\frac{mv^2}{2}\frac{J_c\omega^2}{2} \tag{15}$$

де *Jc* – момент інерції тіла відносно миттєвої осі обертання.

При обертанні маховика в газовому середовищі виникають аеродинамічні втрати, що викликають відповідний момент опору обертанню. Для маховика циліндричної форми величина моменту визначається з виразу, кгс·м [8,9]

$$M=C_f\cdot\rho\cdot\omega^2\cdot R^4(R+2{,}5H) \tag{16}$$

– кінематична в'язкість повітря, м2/с.

Для маховиків складної форми (рис. 1), величину моменту аеродинамік них опорів можна обчислити за емпіричною формулою, кгс·м [11]

Для практичного визначення вибігу маховика користуються формулою

$$E=\sum_{i=1}^{n}\frac{J\Delta\omega}{4{,}84\cdot10^{-4}\cdot C_R\cdot\left(\frac{\omega_i+\omega_{i+1}}{2}\right)^{1.8}+f_H\cdot G_M\cdot\frac{d}{2}} \tag{19}$$

де можна з достатньою точністю прийняти $\Delta\omega=\frac{\omega}{5...6}$

Аналогічно визначаються основні параметри розгону маховика зарядним двигуном. Рівняння руху маховика при розгоні

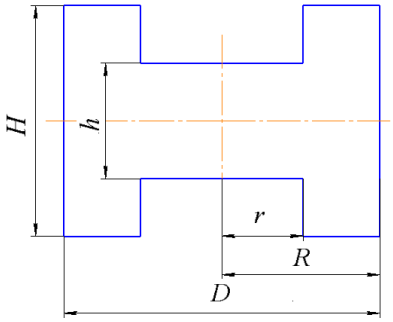


Рис. 1. Схема маховика складної форми

$$J\frac{d\omega}{dt}=\frac{M_з\cdot\eta_з}{i_з}-(M+M_n) \tag{20}$$

де М*з, ηз, із* – відповідно момент зарядного двигуна, ККД передачі від заря дного двигуна до маховика і її передаточне число. При наявності характеристики зарядного двигуна М*(ω)* для визначення часу зарядки використовується формула

$$E=\sum_{0}^{\omega_0}\frac{J\Delta\omega}{\frac{M_з\cdot\eta_з}{i_з}-(M+M_n)} \tag{21}$$

Однак, в процесі рекуперації енергії - енергія від моховика, встановленого на ведучому колесі, в режимі гальмування призводить до подовження часу зарядки енергозберігаючого елемента додаткового силового агрегату. Зокрема, при використанні в якості додаткового двигуна в гібридному транспортному засобі, енергія стиснутого повітря використовується робочій камері пневмодвигуна для перетворення в крутний момент $M_{кр}$, що передається на ведуче колесо через шарнір рівних кутових швидкостей (ШРКШ) [11].

В свою чергу гальмівний процес призводить до введення в дію рекуперaційного механізму, в результаті чого виникає енергія рекуперації $E_{рк}$ (рис. 2).

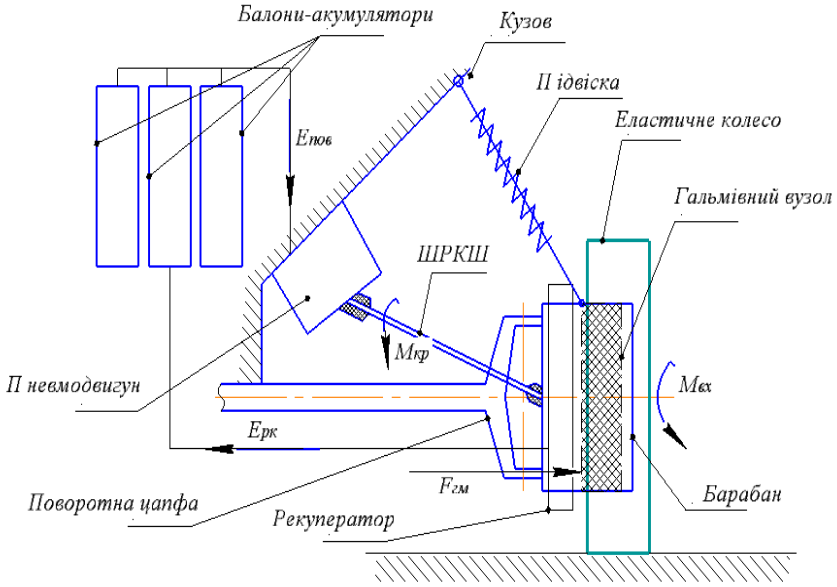
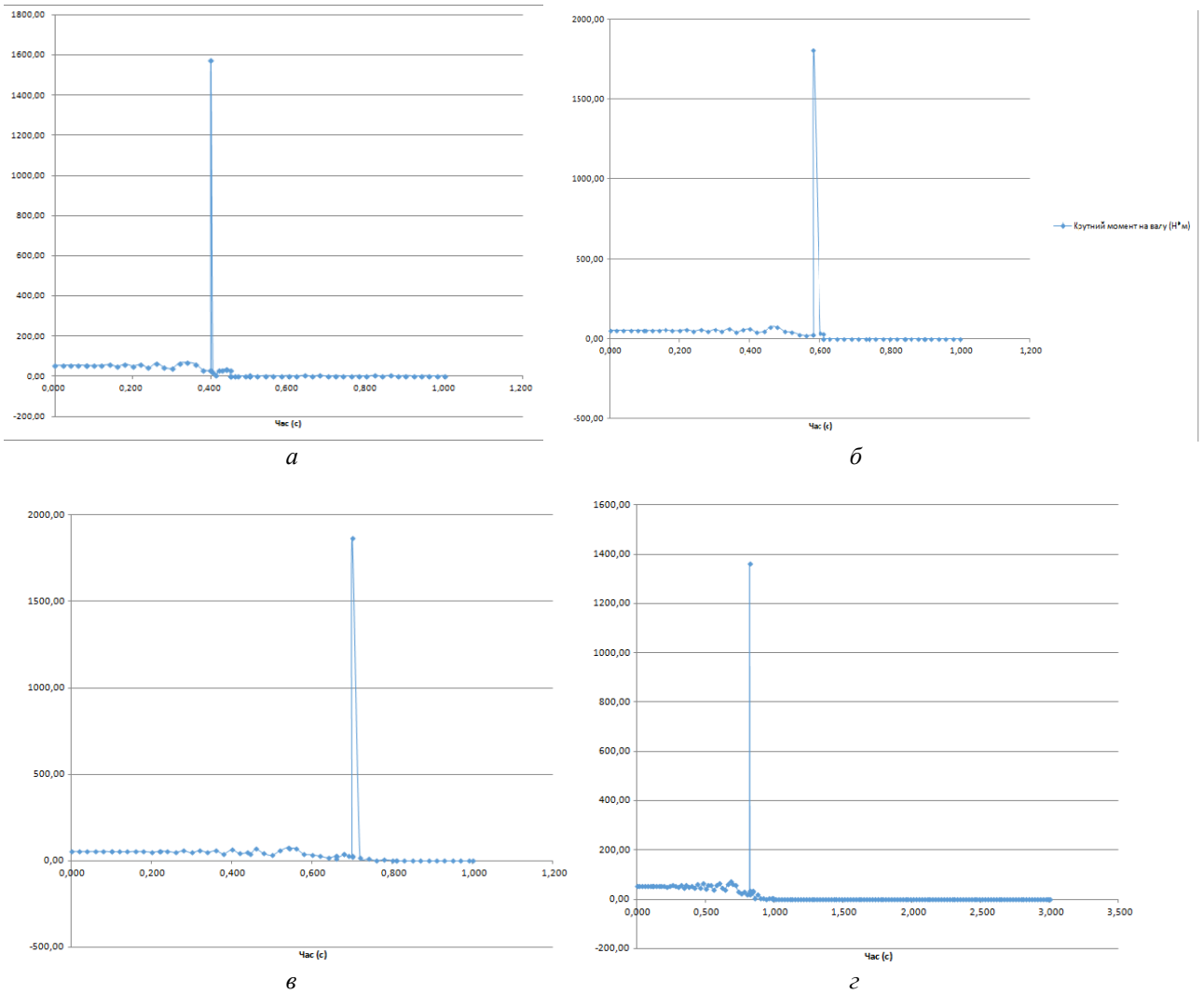


Рис. 2. Схематичне зображення конструкції ведучого керованого колеса гібридного транспортного засобу з рекуперaційним гальмуванням

Необхідно зазначити, що на рис. 2 зображено схематичне розташування додаткового силового агрегату на ведучі керовані колеса без приводу від основного рушія. Така конструкція обумовлена тим, що почерговий підвід крутного моменту від основного та додаткового рушія призводить до ускладнення конструкції трансмісії та шкворневого вузла ведучого керованого колеса, яка, в свою чергу, ускладнена встановленим на барабан колеса рекуператора енергії стиснутого повітря.

В ході досліджень роботи гібридних транспортних засобів (ТЗ) створено 3D модель ведучого пневмомотор- колеса з рекуперацією енергії в режимі гальмування за допомогою Solid Works, в якому гальмівний вузол розташований в барабані колеса, та жорстко поєднаний з шасі. Система керування, яка узгоджує дію цих приводів, веде до набуття пристроєм нових ознак – використання єдиної системи керування силовим агрегатом та гальмівною системою. Встановлення пневмодвигуна на шасі керованого колеса, а не безпосередньо на осі ведучого керованого колеса, дає можливість збільшити ремонтопридатність зазначеного вузла та збільшити динамічну сталість руху транспортного засобу під час маневру [3]. На основі створеної моделі були проведені дослідження виникнення крутного моменту в режимі гальмування з застосуванням маховика з різною масою [11]. Так, зокрема, досліджувались маховики масою 2кг (а), 4кг(б), 6кг(в) та 8кг(д). В результаті встановлено, що стрибок крутного моменту в процесі гальмування обумовлює викид невикористаної енергіє, що накопичується в процесі обертання маховика.

Випробування дослідного зразка пневматичного мотор-колеса, що заявляється, підтвердили його працездатність та істотне підвищення терміну служби пелюсток, що дозволяє збільшити міжремонтний термін служби пневматичних транспортних засобів і, відповідно, значно знизити витрати на їх експлуатацію [10].



а *б*

в *г*

Рис. 3. Результати досліджень створеної 3D моделі ведучого пневмомотор- колеса з рекуперацією енергії в режимі гальмування

Потужність двигуна витрачається на прискорення, а під час гальмування кінетична енергія автомобіля у встановленому режимі руху просто втрачається. Створена система рекуперації енергії при гальмуванні, за рахунок якої виконується підживлення енергією додаткового рушія при гальмуванні дає можливість частково відновити запас стиснутого повітря в балонах-акумуляторах, незважаючи, що процес сповільнення при руху у міському режимі становить не значний відсоток від загального часу руху транспортного засобу [3].

Однак, рекуперація енергії процесі гальмування з використанням пневморушія майже не досліджувалась, на відміну від електропривода (рис. 4).

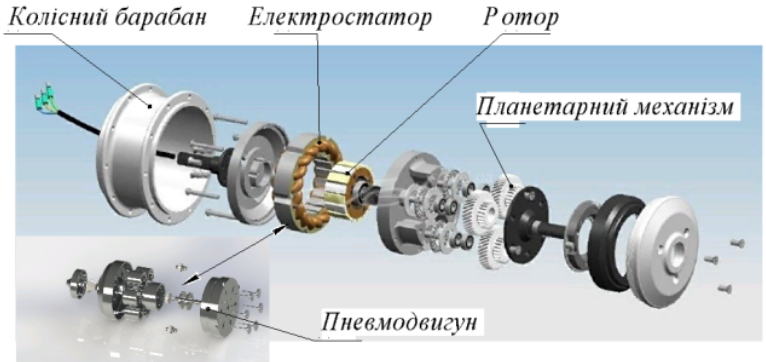


Рис. 4. Схема розташуванням елементів рекуперацийної гальмівної системи гібридного транспортного засобу з використання пневмодвигуна замість електродвигуна, у якості додаткового силового елемента

Таким чином, заміщений пневморекупеційний вузол являє собою агрегат, що поєднує колесо і вбудовану в нього силову передачу і гальмівну систему, а кожне мотор-колесо має індивідуальний привід. Встановлюється, як правило, в підвішеному до рами кронштейні у випадку, коли колесо не є керованим, або у встановленому в поворотній цапфі підшипнику. Живиться енергією від двигуна, через трансмісію, або, в якості додаткового джерела енергії, на транспортному засобі з двигуном внутрішнього згоряння, таких як гібридні автомобілі. Представлена конструкція може функціонувати в двох режимах - тяговому і компресорному. У тяговому режимі обертання передається з вала ротора пневмодвигуна, що працює в режимі розгона, через шпонкову передачу, що з'єднує ротор з фланцем ведучого колеса; в генераторному режимі, використовуваному для пневматичного гальмування, пневмодвигун переходить у компресорний режим роботи, а енергія стиснутого повітря перетворюється в тепло на гальмівному супорті[11,12].

Заміщення електродвигуна на пневмодвигун досягається тим, що на поворотну цапфу ведучого колеса встановлюється пневматичний двигун роторного типу, який має автономне джерело живлення. Таке розташування силового агрегату дає можливість, в першу чергу, збільшити дорожній просвіт та зменшити повну масу транспортного засобу за рахунок безтрансмісійної передачі крутного моменту та зменшення кількості інерційних зосереджених мас, які ведуть до зменшення енергії в передаточних вузлах[12]. Однак, різні галузі виробництва містять ряд факторів, що, в свою чергу, унеможливлюють використання іншого типу силового агрегату мобільного транспортного засобу, як пневмодвигуна, зокрема: вибухонебезпечні виробництва (вугільні шахти, які містять великі накопичення в атмосфері вугільного пилу та горючих газів, малярні цехи, млини, паливо-мастильні склади і т.д.), виробництва з високими санітарно епідеміологічними вимогами. Тому, для вирішення вказаних проблем на міжцеховий транспортний засіб встановлюється пневмодвигун, однак, до даного часу використання пневматичних силових агрегатів передбачало застосування трансмісії, або без використання трансмісії на некерованих колесах. Використання керованого пневмомотор-колесо було ускладнене через використання в такій конструкції поворотної цапфи та захисту гальмівного вузла від мастильних матеріалів, що містить відпрацьоване повітря [11].

При цьому необхідно враховувати, що відомі зразки конструкцій мотор-колеса застосовуються з використанням механічної або гідравлічної гальмівної системи, що, в свою чергу, унеможливлює рекуперацію енергії в процесі гальмування. Тому, для підвищення енергоефективності та зменшення кількості додаткових вузлів запропоновано використання пневматичної гальмівної системи, що в сукупності з пневмодвигуном, дає можливість максимально ефективно використовувати енергію стиснутого повітря.

Висновки

Запропонована конструкція рекуперaційної гальмівної системи з пневмодвигуном дає можливість встановити, що стрибок крутного моменту в процесі гальмування обумовлює викид невикористаної енергії, що накопичується в процесі обертання маховика, що призводить до покращення показників процесу зарядки балонів акумуляторів, а випробування дослідного зразка пневматичного мотор-колеса, підтвердили його працездатність та істотне підвищення терміну служби пелюсток, що дозволяє збільшити міжремонтний термін служби пневматичних транспортних засобів і, відповідно, значно знизити витрати на їх експлуатацію.

Дослідження застосування маховика в рекуперaційному механізмі довели, що раціональне використання конструкції такого типу дає можливість збільшити стрибок зосередженої енергії під час її вивільнення в режимі гальмування, та збільшити енергоефективність транспортного засобу, оснащеного гібридним рушієм з застосуванням пневмодвигуна, враховуючи режими руху транспортного засобу. На основі отриманих даних встановлених за допомогою 3D моделі рекуперaційного механізма пневмомотор-колеса встановлено можливість модернізації гібридних транспортних засобів з використання електричних рекуператорів шляхом повної заміни обладнання електрорушія на пневмомотор-колесо, що дасть можливість використання зазначених транспортних засобів у вибухонебезпечних зонах.

Исследование рекуперации энергии в процессе торможения на гибридных автомобилях с использованием пневмодвигателя

Н. Н. Яцына

Аннотация. *В статье разработаны методы формирования параметров рекуперации энергии с помощью исследований результатов нагрузок 3D модели тормозного узла с Маховиковым рекуператором энергии на базе пневмодвижетеля. Также рассмотрены тенденции развития применения гибридных транспортных средств, в частности с рекуперацией энергии в режиме торможения при использования пневмодвигателя в качестве дополнительного силового агрегата. Представлена методика создания энергетического эфективности в рекуперационных торможения, поскольку тормозная система является одним из элементов активной безопасности, то это требует ее детального исследования и изучения. Поэтому, альтернативный источник энергии для силовых установок транспортных средств могут быть использованы инерционные (маховичного,*

мехатронные) накопители энергии, в которых энергия запасается в виде механической энергии диска или цилиндра, который быстро вращается. Кинетическая энергия вращения, накопленная во вращающемся теле (маховике). На основе чего установлено, что проведение расчетов наиболее целесообразно воспользоваться входными данными установленными в нормативных документах. Отмечено, что во время испытаний транспортных средств, оборудованных пневмоприводом и системой рекуперации энергии, доля участия пневматической системы рекуперативного торможения не должна превышать минимального уровня, гарантированного конструкцией системы.

Ключевые слова: гибридное транспортное средство, рекуперация энергии, пневмодвигатель, параметры, стабильность, гистограмма, маховик.

Investigation of energy recovery during braking on hybrid cars using a pneumatic engine

M. M. Yatsyna

Abstract. *Purpose. The purpose of the article is to develop methods for generating energy recovery parameters by studying the results of loads of the 3D model of the brake assembly with the Makhovikov energy recuperator based on pneumatic weapons. Also, trends in the development of the use of hybrid vehicles, in particular with energy recovery in the braking mode when using a pneumatic motor as an additional power unit, are also considered. Methodology. The article presents a technique for creating an energy balance in recuperation braking, since the braking system is one of the elements of active safety, it requires its detailed study and study. Therefore, an inertial (flywheel, mechatronic) energy storage device can be used as an alternative source of energy for vehicle power units, in which energy is stored in the form of mechanical energy of a disk or a cylinder that rotates rapidly. Kinetic energy of rotation, accumulated in a rotating body (flywheel). Originality. It is established that the most expedient is to use the input data established in the regulatory documents. Results. When testing vehicles equipped with a pneumatic drive and an energy recovery system, the share of the pneumatic regenerative braking system should not exceed the minimum level guaranteed by the design of the system.*

Keywords: hybrid vehicle, energy recovery, pneumatic engine, parameters, stability, histogram, flywheel.

References

1. Карп І.Н. Кількісна оцінка впливу впровадження енергозберігаючих технологій на економіку газу / І.Н.Карп, Є.І. Сухін // Екотехнології та ресурсозбереження. – 2007 с.24-44.
2. Яцина М.М. Аналіз динаміки роботи пневмодвигуна мобільного транспортного засобу з автономним джерелом живлення / О.Ф. Саленко, М.М. Яцина // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 6/2013 (83). – С. 120–124.
3. Ситовський О.П. Методологія визначення оптимального ступеня початкового заряду транспортних засобів автомобілів енергії/ О.П.Ситовський, В.М. Дембицький // Вісник НТУ "ХПІ". Випуск 8/2014 (1051). с.54 -60
4. Саленко О. Ф. О возможности испльзования приводов на мобильных транспортних средствах с автономным источником питания / О. Ф. Саленко, М. М. Яцина // International Scientific Conference 20–21 November 2012, Gabrovo (Болгарія, Габрово), 2012. – С. 313–317.
5. Герц Е.В. Динамический расчет дискретных пневматических приводов / Е.В. Герц // Пневматика и гидравлика. М. : Машиностроение, 1973. – С 17–33.
6. Яцина М. М. Пневмодвигун із кільцевим ротором у механотронних системах / М. М. Яцина, Б. Я. Литвиненко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – Вип. 2/2008(49), част. 1. – С. 68–72 .
7. Солтус А. П. Теория эксплуатационных свойств автомобиля. учебное пособие / А. П. Солтус К. : Машиностроение, 2004. – 240 с.
8. Richer E.A. High Performance Pneumatic Force Actuator System / E.A. Richer // ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, September 2000. pp. 416-425.
9. Іванов, М. І. Сучасні тенденції розвитку систем гідрооб'ємного рульового керування / М. І. Іванов, О.М. Переяславський, С. А. Шаргородський, О. О. Моторна // Промислова гідравліка і пневматика. – 2011. - №4 (34) – С. 93-97.
10. Струтинський В.Б. Проектування функціональних елементів технологічних комплексів / В.Б. Струтинський, М.І. Покінтелиця // Технологічні комплекси, №1,2. – 2012. – С. 161-168.
11. Саленко О.Ф. Кероване пнемо-мотор колесо/ О.Ф. Саленко, А.М. Федотьєв, М.М. Яцина // Патент України на корисну модель № 108583, B60K7 / 00 - Бул. № 14 від 25.07.2016 р.
12. Неїжкашка Д.В. Керівний орган керованого пнемо-мотор колеса / Д.В. Неїжкашка, О.Ф. Саленко, М.М. Яцина // Патент України на корисну модель № 117027, B60K17 / 10 - Бюл. № 11 від 12/06/2017.