

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЕННЯ В СИСТЕМІ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ КОЛИВАНЬ ШАСІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Ю.М. Васьковський*, докт. техн. наук, М.В. Пода**
НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.
E-mail: vun157@gmail.com, poda.mv@gmail.com

Представлено комплексну математичну модель системи рекуперації енергії механічних коливань транспортних засобів, що рухаються в складних дорожніх умовах. Зазначена система є додатковою системою електроживлення, яка розширює функціональні можливості сучасних транспортних засобів. Математична модель враховує усю сукупність процесів поетапного перетворення енергії механічних коливань в наступній послідовності: механічна енергія зворотно-поступального коливального руху шасі транспортного засобу – механічна енергія обертального руху валу електрогенератора – електрична енергія змінного струму електрогенератора – електрична енергія постійного струму акумуляторної батареї. Досліджено режими роботи системи, що забезпечують ефективні процеси зарядки акумуляторної батареї. На конкретному прикладі системи наведено дані щодо часу заряджання акумуляторної батареї вантажного автомобіля. Бібл. 9, рис. 7.

Ключові слова: система рекуперації енергії, шасі транспортного засобу, синхронний генератор з постійними магнітами, акумуляторна батарея.

Постановка задачі. Розрахункові оцінки та досвід експлуатації важких транспортних засобів (ТЗ) свідчить, що у разі руху ТЗ в складних дорожніх умовах за наявності дорожніх перешкод витрати палива на 1 км дистанції руху, а значить і втрати енергії приводного двигуна, збільшуються на 50...70%, а швидкість руху ТЗ зменшується на 35...40% [1]. Ці втрати енергії зазвичай поглинаються ресорами і амортизаторами під час механічних коливань шасі ТЗ. За умови створення відповідних технічних систем частина цих втрат може бути перетворена в корисні запаси електроенергії акумуляторної батареї (АБ) з її подальшим цільовим використанням. З огляду на рівень зазначених втрат енергії первинного енергоносія, значну кількість важких ТЗ сумарний енергозберігаючий ефект від впровадження таких систем може бути суттєвим, що підкреслює актуальність їхнього створення. Актуальність підсилюється також необхідністю розширення функціональних можливостей сучасних спеціальних ТЗ шляхом використання на їхньому борту нових пристроїв і систем, для роботи яких необхідні додаткові джерела електроживлення. В перспективі використання таких систем може бути актуальним і в електромобілях, які отримують додаткове джерело заряджання тягової АБ під час руху.

Однією з таких є система *електромеханічного перетворення (рекуперації) енергії механічних коливань* (СПЕМК) шасі ТЗ [2]. Принцип побудови СПЕМК ґрунтується на поетапному перетворенні механічної енергії коливань шасі рухомого ТЗ в електричну енергію постійного струму зарядженої АБ. При цьому використовуються коливання у вертикальній площині під час руху ТЗ по нерівній дорозі підресореної маси (ПМ) (кузов, вантаж та ін.) ТЗ відносно його непідресореної маси (НПМ) (кола, шини, гальмівні барабани та ін.).

Ідея створення СПЕМК уперше була реалізована в системах електромагнітної активної підвіски ТЗ – Active Suspension (AS) [3-7]. Системи AS, побудовані на основі електромеханічних компонент, замінюють традиційні амортизатори шасі ТЗ і призначені для зменшення коливань шасі ТЗ та забезпечення комфортних умов руху. У даний час системи AS для легкових ТЗ, у тому числі і для електромобілів, розробляють і впроваджують провідні автомобілебудівні компанії світу – Audi, Ford, Toyota тощо [3, 4 і інш.]. СПЕМК в складі AS використовується як підсистема рекуперації енергії, головним призначенням якої є зменшення значних витрат електроенергії на функціонування потужної AS. При цьому за результатами досліджень відмічається, що доступна для рекуперації енергія під час роботи СПЕМК у порівнянні з енергією рекуперативного гальмування ТЗ на нерівному дорожньому покритті сягає 70% і

більше [9]. Відомі і спеціалізовані відокремлені варіанти СПЕМК. Наприклад, компанія Audi розробила СПЕМК під назвою eROT для використання в легковому автомобілі, потужність якої, коливається від 3 Вт на рівному асфальті до 613 Вт на поганому дорожньому покритті [3]. Наукові дослідження і розробки таких систем проводяться в країнах ЄС, США, Китаї, РФ [5].

Найбільш доцільною сферою використання відокремлених СПЕМК можуть бути важкі і спеціальні ТЗ, які за своїм призначенням часто рухаються в складних дорожніх умовах. В таких випадках СПЕМК формує на борту ТЗ додаткове джерело електроживлення, але при цьому майже не виконує функції амортизатора, оскільки її стабілізуючий електромагнітний момент у порівнянні з інерційним моментом шасі ТЗ є малим. У важких ТЗ СПЕМК повинна працювати спільно зі штатними ресорами і амортизаторами. Очевидно, що СПЕМК може повернути в АБ лише частку енергії, що втрачається під час коливань шасі ТЗ. У разі використання СПЕМК необхідно приймати до уваги існуючу систему електроживлення на борту ТЗ. Якщо в складі ТЗ є електрогенератор, який під час руху ТЗ заряджає штатну АБ, то для СПЕМК потрібна додаткова АБ меншої ємності, енергія якої використовується для живлення бортових систем.

Структуру СПЕМК зображено на рис.1. Вона складається з наступних основних елементів: механічний пристрій для перетворення зворотно-поступального руху шасі в одно напрямлений обертовий рух вихідного валу такого пристрою; мультиплікатор, який збільшує частоту обертання вихідного валу для забезпечення ефективних режимів електромеханічного перетворення енергії; електрогенератор змінного струму, що з'єднується з мультиплікатором; випрямляч; LC-фільтр і АБ. Поетапне перетворення енергії в СПЕМК відбувається в наступній послідовності: механічна енергія зворотно-поступального руху ПМ ТЗ – механічна енергія одно направленного обертального руху механічного перетворювача і ротора електрогенератора – електрична енергія змінного струму обмотки статора електрогенератора – електрична енергія постійного струму АБ.

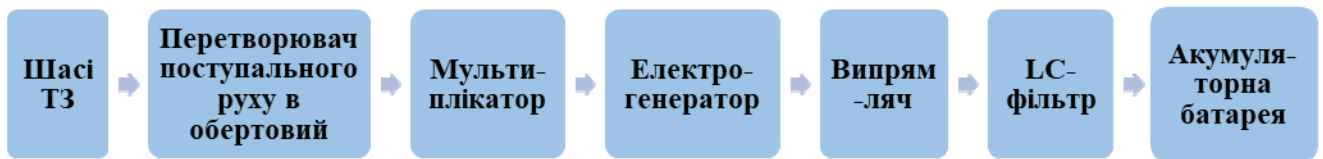


Рис. 1

З огляду на значну масу ПМ важких ТЗ і доступні енергетичні характеристики СПЕМК шасі для СПЕМК можна вважати джерелом нескінченної механічної потужності. При цьому основна задача проектування ефективної СПЕМК полягає у виборі оптимальних параметрів її елементів, які з урахуванням усіх обмежень забезпечують максимальний відбір енергії з цього джерела. СПЕМК є системою з великою кількістю варіюваних параметрів, визначення оптимальної сукупності якої являє складну пошукову задачу. Будь-яка неузгодженість параметрів окремих вузлів СПЕМК зводить нанівець її ефективність у цілому. Очевидним є також суттєвий вплив дорожніх умов – профілю дороги, по якій рухається ТЗ. Тому важливою умовою створення ефективних СПЕМК є розробка відповідного інструментарію для моделювання процесів в СПЕМК. Таким чином розробка комплексної математичної моделі, яка базується на міждисциплінарних принципах взаємодії фізичних процесів різної природи є актуальним завданням, вирішення якого конче необхідно для подальших успішних розробок СПЕМК.

Метою статті є розробка комплексної математичної моделі СПЕМК, яка дає змогу проаналізувати усю сукупність фізичних процесів перетворення енергії, та оцінка на її основі ефективності функціонування СПЕМК.

Математична модель СПЕМК. Математична модель (ММ) складається з сукупності диференціальних рівнянь, математичних виразів і співвідношень, які описують фізичні процеси перетворення механічної енергії коливань шасі ТЗ в електричну енергію зарядженої АБ.

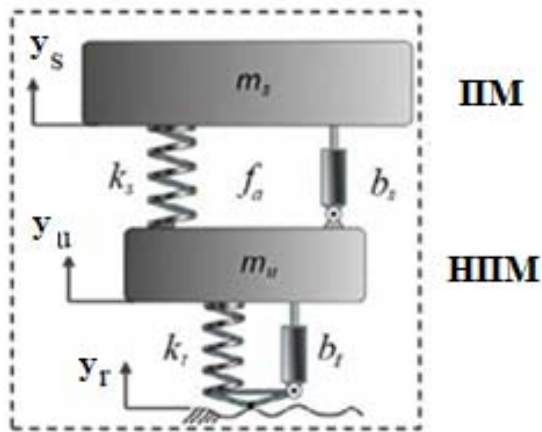


Рис. 2

ТЗ. В загальному випадку з урахуванням пружних властивостей шин коліс ТЗ коливальну систему шасі потрібно розглядати як двомасову коливальну систему, що показана на рис. 2.

Система рівнянь коливального руху шасі ТЗ з одним (вертикальним) ступенем вільності руху є

$$m_s \frac{d^2 y_s}{dt^2} = -b_s \left(\frac{dy_s}{dt} - \frac{dy_u}{dt} \right) - k_s (y_s - y_u) + f_a, \quad m_u \frac{d^2 y_u}{dt^2} = -b_s \left(\frac{dy_s}{dt} - \frac{dy_u}{dt} \right) - k_s (y_s - y_u) + f_a + b_t \left(\frac{dy_r}{dt} - \frac{dy_u}{dt} \right) + k_t (y_r - y_u), \quad (1)$$

де m_s, m_u – відповідно маси підресореної і непідресореної частин ТЗ; y_s, y_u, y_r – вертикальні координати (переміщення) ПМ, НПМ і профіля дороги; k_s, k_t – коефіцієнти жорсткості ПМ і НПМ (колеса); b_s, b_t – коефіцієнти демпфірування коливань ПМ і НПМ (колеса); f_a – зовнішня сила, яка впливає на коливальний процес. Під час розгляду вільних коливань зовнішня прикладена до шасі сила дорівнює нулю $f_a = 0$. Невідомими (шуканими) функціями в системі рівнянь (1) є функції $y_s(t), y_u(t)$, які описують вертикальні переміщення ПМ і НПМ, а функція $y_r(t)$, що характеризує зміну профілю дороги у часі, задається з урахуванням дорожніх умов і швидкості руху ТЗ.

В ряді важливих випадків колесо можна вважати абсолютно жорстким тілом. У таких випадках траєкторія руху колеса повторює профіль дороги і тому можна вважати, що $y_u = y_r$. При цьому необхідно розглядати коливання лише підресореної маси ТЗ, а коливальну систему можна розглядати як одномасову. У таких випадках система рівнянь (1) має одне рівняння

$$m_s \frac{d^2 y_s}{dt^2} + b_s \frac{dy_s}{dt} + k_s y_s = b_s \frac{dy_r}{dt} + k_s y_r \quad \text{або} \quad \frac{d^2 y_s}{dt^2} + 2\beta \frac{dy_s}{dt} + \omega_0^2 y_s = 2\beta \frac{dy_r}{dt} + \omega_0^2 y_r \quad (2)$$

де $\omega_0 = \sqrt{k_s / m_s}$ – частота власних коливань ПМ, $\beta = b_s / 2m_s$ – коефіцієнт затухання коливань. Якщо після проходження дорожньої перешкоди, яка викликала відхилення ПМ від положення рівноваги на величину H , надалі ТЗ рухається по рівній дорозі ($y_r = 0$ і $dy_r/dt = 0$), то рівняння вільних затухаючих коливань набуває виду

$$\frac{d^2 y_s}{dt^2} + 2\beta \frac{dy_s}{dt} + \omega_0^2 y_s = 0. \quad (3)$$

Розв'язок рівняння (3) для координати ПМ і вираз для швидкості вертикальних коливань як функції часу мають наступний вигляд:

$$y_s(t) = He^{-\beta t} \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (4)$$

$$v_s(t) = dy_s/dt = He^{-\beta t} [\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) - \beta \sin(\omega_0 t + \varphi_0)], \quad (5)$$

де $\varphi_0 = \arctg(\omega_0 / \beta)$ – початкова фаза коливань, яка визначається з початкової умови $v_s(0) = 0$.

Вхідною функцією (функцією збурення) в ММ є задана функція профілю дороги, по якій з заданою швидкістю рухається ТЗ. Зазвичай перешкодами на дорозі є локальні заглиблення (ямки) або підйоми (горбики). Вихідною величиною, яка характеризує ефективність функціонування СПЕМК за заданих дорожніх умов, є час безперервного руху ТЗ до повного заряду АБ заданої ємності. ММ містить ряд величин, які пов'язані між собою в рівняннях складових СПЕМК.

Математична модель коливань шасі ТЗ. Під час подолання транспортним засобом дорожньої перешкоди відбуваються затухаючі вертикальні коливання шасі ТЗ, причому затухаючий характер коливань забезпечується амортизаторами і ресорами шасі

Функція профілю дороги. Коливання шасі ТЗ відбуваються внаслідок нерівного профілю дороги. Характеристики профілю визначають амплітуду імпульсів коливань, причому кожна нерівність дороги може спричинити серію коливань, які збуджуються послідовно через кожне колесо різних колісних пар. Від швидкості руху ТЗ залежить частота імпульсів, ці імпульси можуть посилювати або послаблювати коливальний процес. Очевидно, що кількість варіантів профілю дороги та умов руху по ній ТЗ є надзвичайно великими, і моделювання СПЕМК за випадковим профілем дороги є малоінформативним, важко піддається узагальненню і тому є недоцільним.

Задля проведення детермінованого аналізу коливань шасі ТЗ введемо *узагальнену функцію* профілю дороги з обмеженою кількістю параметрів. Профіль дороги має метричну міру, але під час моделювання динамічних процесів СПЕМК потрібно задати функцію збурення коливань шасі як функцію часу. Така функція показана на рис. 3 і складається з сукупності періодичних імпульсів, які

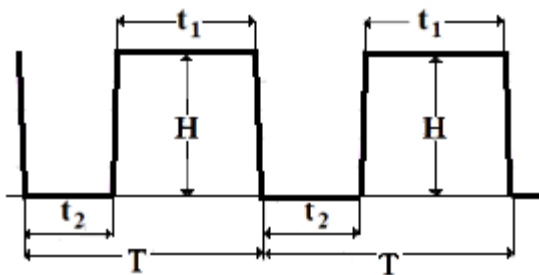


Рис. 3

мають однакову амплітуду H і повторюються з періодом T . Імпульси імітують форму перешкод на дорозі і мають форму трапеції з крутим фронтом, причому верхня сторона трапеції дорівнює t_1 (с), а нижня $T - t_2$ (с), де t_2 – час (пауза) між двома суміжними імпульсами. Згідно з такою функцією ТЗ долає крутий підйом висотою H , по якому рухається протягом часу t_1 , потім спускається вниз (в ямку), по якій рухається протягом часу t_2 і надалі цей процес періодично повторюється. Ці відрізки часу пов'язані з довжиною перешкод і швидкістю V руху ТЗ: $t_1 = L_1/V$, $t_2 = L_2/V$, де L_1, L_2 – довжини горбика і ямки.

Іншим варіантом завдання профілю дороги є синусоїдний профіль з перепадом висоти H і довжиною хвилі нерівності L . Найбільш близький до синусоїдного профілю мають найжджені ґрунтові дороги. Висота нерівності на цих дорогах коливається в межах 20 ... 200 мм, а довжина хвилі нерівності – 0,5 ... 13,0 м. Координата y_r такого профілю дороги в залежності від горизонтальної координати x описується виразом

$$y_r(x) = 0,5H \sin(2\pi x / L). \quad (6)$$

Математична модель механічного перетворювача зворотного-поступального руху в однонаправлений обертовий рух. Механічний перетворювач поступального руху шасі ТЗ в однонаправлений обертовий рух ротора електрогенератора (МППО) є надважливим елементом СПЕМК, оскільки саме він “відбирає” механічну енергію від шасі ТЗ для подальшого її перетворення. На рис. 4 схематично зображено кінематичну схему МППО, побудованого на основі храпового механізму, аналіз якої дає змогу визначити його оптимальні геометричні параметри. Система координат XY розташована так, що її вісь OX співпадає з віссю колісної пари ТЗ в стані спокою (за відсутності коливань шасі), а вісь OY проходить через кінець штока CM , який має довжину l і з'єднує МППО з НПМ. МППО кріпиться до ПМ, причому вісь центра обертання рукоятки МППО зміщена по відношенню до системи координат на величини x_0 і y_0 . Під час коливань шасі ТЗ шток l зміщується разом з НПМ відносно точки K центра обертання рукоятки на величину y_s , повертаючи при цьому за допомогою шарнірних з'єднань рукоятку MK , яка має радіус R , і відбувається перетворення поступального руху ПМ в обертовий рух вихідного валу МППО.

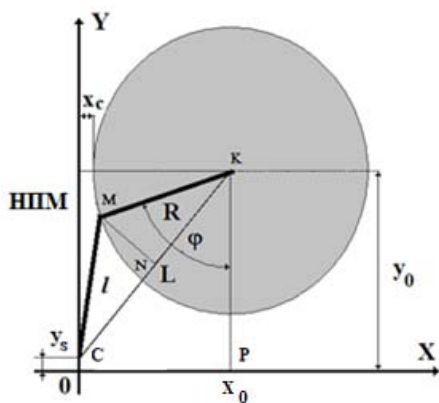


Рис. 4

Задля запобігання зміни напрямку обертання валу у разі переміщення ПМ в зворотному напрямку в рукоятку вбудовано храповий механізм, який передає обертовий момент тільки в одному напрямку. Кут φ вимірюється між поточним положенням рукоятки і вертикальним відрізком KP . На рис. 4 позначено також: $L(y_s)$ – відстань від центру обертання рукоятки до місця з'єднання

штока з НПМ, яка залежить від поточного зміщення y_s ; x_c – мінімальна відстань від крайньої точки кругової траєкторії обертання рукоятки до осі Y. Очевидно, що $x_0 = x_c + R$, причому x_c вибирається, виходячи з конструктивних чинників. Згідно з зазначеною схемою знаходимо: сторону $L = \sqrt{(y_0 - y_s)^2 + (x_c + R)^2}$; напівпериметр і висоту трикутника КМС $p = (L + R + l) / 2$; $h = 2\sqrt{p(p-L)(p-R)(p-l)} / L$; катет KL трикутника KML $L_{\pi} = \sqrt{R^2 - h^2}$. Далі знаходимо кут відхилення рукоятки від вертикальної лінії КР

$$\varphi(y_r) = \left[\arccos\left(\frac{y_0 - y_s}{L}\right) + \arccos\left(\frac{L_{\pi}}{R}\right) \right]. \quad (7)$$

Кутова швидкість обертання вихідного валу МППО визначається похідною по часу кута повороту рукоятки МППО $\omega_{in}(t) = d\Delta\varphi(t) / dt$, де $\Delta\varphi(t) = \varphi(y_s(t)) - \varphi(0)$. Як видно з формули (7) кут $\Delta\varphi$ залежить від геометричних параметрів R, l, y_0, x_c , що вимагає їхнього оптимального вибору з урахуванням передбачуваної амплітуди вертикальних коливань шасі ТЗ. Кутова швидкість обертання валу ротора генератора з урахуванням наявності мультиплікатора

$$\omega_{out}(t) = \omega_{in}(t) \cdot z_{out} / z_{in} = [d\Delta\varphi(t) / dt] \cdot z_{out} / z_{in}, \quad (8)$$

де $\omega_{in}(t), \omega_{out}(t)$ – вхідна та вихідна миттєві кутові швидкості мультиплікатора; z_{out}, z_{in} – кількість зубців вихідного і вхідного коліс мультиплікатора. Дія храпового механізму полягає у тому, що вихідна кутова швидкість обертання валу збільшується лише у разі зростання кута повороту рукоятки, але за умови, що вона перевищує швидкість, яка була отримана під час попереднього коливання. В інших випадках ротор здійснює затухаючий обертовий рух під впливом гальмівного електромагнітного моменту генератора. Це відображається наступними виразами:

$$\omega_{out}(t) = \begin{cases} \text{формула(8), якщо } d\Delta\varphi(t) / dt > 0 \text{ і } \omega_{max} - (\int M_{EM} dt) / J > 0 \\ \text{інакше } \omega_{max} - (\int M_{EM} dt) / J \end{cases}, \quad (9)$$

де ω_{max} – максимальна кутова частота обертання, отримана ротором під час попереднього коливання; J – сумарний момент інерції ротора генератора, мультиплікатора і механічного перетворювача; M_{EM} – гальмівний електромагнітний момент генератора.

Механічна енергія, яка передається на вал генератора за одне коливання шасі ТЗ, дорівнює

$$W_{MEX} = M_{MEX} \Delta\varphi_{max} = F_{MEX} R \Delta\varphi_{max}, \quad (10)$$

де $\Delta\varphi_{max}$ – максимальний кут повороту рукоятки. Якщо вважати, що сила F_{MEX} , яка тисне на шток, залежить лише від масово-пружних характеристик шасі ТЗ і не залежить від параметрів МППО, то найбільша енергія передається за максимумом геометричної характеристики $(R\Delta\varphi)_{max}$.

Математична модель електрогенератора. Важливим елементом СПЕМК є електрогенератор. Найбільш оптимальним типом електрогенератора в складі СПЕМК є трифазний синхронний генератор зі збудженням від постійних магнітів (СППМ). Використання постійних магнітів як джерела магнітного потоку є оптимальним рішенням з урахуванням особливостей функціонування СПЕМК, а також ряду інших переваг генераторів такого типу (відсутність електричних втрат в роторі, відсутність рухомого електричного контакту і ін.). Механічний момент, що приводить СППМ в обертання, має змінний характер, і генератор не має усталеного режиму роботи – завжди працює в перехідних режимах зі змінною частотою обертання валу. В системі координат статора рівняння фаз обмотки статора і рівняння руху ротора записуються в загальному вигляді

$$u_k = i_k R_s + d\Psi_k / dt, (k = a, b, c); J \cdot d\omega_{out} / dt = M_{зоб} - M_{EM} - M_{мер}, \quad (11)$$

де $\Psi_a = L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + \Psi_{\mu a}$, $\Psi_b = M_{ba} i_a + L_b i_b + M_{bc} i_c + \Psi_{\mu b}$, $\Psi_c = M_{ca} i_a + M_{cb} i_b + L_c i_c + \Psi_{\mu c}$ – повні магнітні потокозчеплення фаз обмотки статора; L_a, L_b, L_c – власні індуктивності фаз статора; $M_{ab} = M_{ba}, M_{ac} = M_{ca}; M_{bc} = M_{cb}$ – взаємні індуктивності між фазами; $\Psi_{\mu a}, \Psi_{\mu b}, \Psi_{\mu c}$ – магнітні потокозчеплення фаз статора з магнітним потоком постійних магнітів; R_s – активний опір фази статора; J – су-

марний момент інерції ротора СГПМ; $M_{зов}$ – зовнішній механічний момент, який спричиняє рух ротора генератора, M_{EM} – гальмівний електромагнітний момент, $M_{мер}$ – гальмівний момент, обумовлений тертям. На відміну від традиційних СГПМ для генератора, що працює в складі СПЕМК, не висувається вимога щодо синусного розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку. Тому ЕРС і струми статора не обов'язково мають змінюватися у часі за синусоїдним законом, оскільки навантаженням СГПМ в складі СПЕМК є випрямляч і надалі АБ. Критерієм вибору параметрів постійних магнітів СГПМ є *максимальна величина діючого значення* ЕРС обмотки статора. В роботі [8] показано, що оптимальна форма ЕРС наближена до трапецеїдальної. Для такого випадку за умови, що усі фази статора мають однакову індуктивність, яка не залежить від положення ротора, фази статора з'єднані в зірку, система рівнянь у формі Коші записується так

$$di_a/dt = -i_a R_s + [2u_{ab} + u_{bc} + \Psi_\mu p \omega_{out} (k_b + k_c - 2k_a)] / L_s, \quad (12)$$

$$di_b/dt = -i_b R_s + [2u_{bc} - u_{ab} + \Psi_\mu p \omega_{out} (k_a + k_c - 2k_b)] / L_s, \quad (13)$$

$$di_c/dt = -(di_a/dt + di_b/dt), \quad (14)$$

$$J \cdot d\omega_{out}/dt = M_{зов} - M_{EM} - M_{мер}, \quad \theta = \int \omega_{out} dt, \quad (15)$$

$$M_{EM} = \Psi_\mu p (i_a k_a + i_b k_b + i_c k_c), \quad (16)$$

де L_s – індуктивність фази обмотки статора; Ψ_μ – магнітний потік постійних магнітів на один полюс, який визначається через розрахунок магнітного поля СГПМ за допомогою польової математичної моделі [9]; θ – кут повороту ротора; k_a, k_b, k_c – безрозмірні коефіцієнти, які відображають залежності

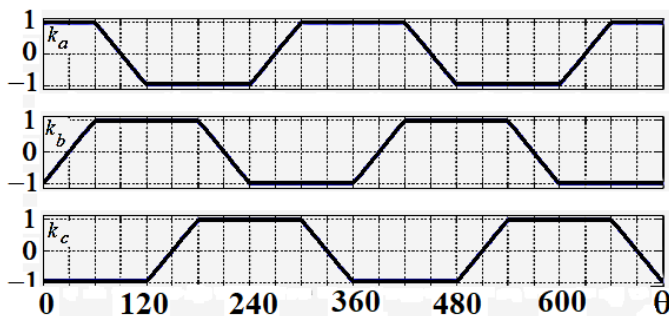


Рис. 5

ЕРС фаз статора від кута θ , змінюються в діапазоні $(-1 \dots 1)$ і показані на рис. 5.

Вхідною величиною під час корисного руху ПМ вниз є задана функція частоти обертання ротора $\omega_{out}(t)$, яка формується на виході механічного МППО. При цьому розв'язуються лише рівняння фаз обмотки статора (12) – (14) за заданої функції $\omega_{out}(t)$. Під час зворотного руху ПМ вверх МППО і вал генератора роз'єднуються, і генератор здійснює затухаючий рух під дією власного електромагнітного моменту.

Чисельний розв'язок системи (12) – (16) виконано з використанням блоку “Permanent Magnet Synchronous Machine” в програмі Matlab-Simulink, який реалізує модель трифазної синхронної машини з постійними магнітами і трапецеїподібною формою ЕРС обмотки якоря.

Випрямляч. Електричним навантаженням СГПМ є виконаний по схемі “зірка Ларіонова” некерований (на діодах) випрямляч, який реалізується в програмі Matlab-Simulink стандартним блоком “Universal Bridge”.

Акумуляторна батарея. Розглядається модель заряду літій-іонного акумулятора, яка реалізується в програмі Matlab-Simulink стандартним блоком “Battery”.

Представлена комплексна математична модель описує усю сукупність фізичних процесів перетворення енергії в СПЕМК і реалізована в програмі Matlab-Simulink.

Результати досліджень. Показником ефективності функціонування СПЕМК є час, потрібний для повного зарядження АБ заданої ємності. Цей час залежить від великої кількості параметрів вузлів, що входять до складу коливальної системи шасі ТЗ і до складу СПЕМК (МППО, СГПМ тощо), а також від наявних дорожніх умов – профілю дороги, по якій рухається ТЗ, і швидкості руху ТЗ.

На рис. 6 показано розрахункові осцилограми, що відображають фізичні процеси в СПЕМК на прикладі вантажного ТЗ, яка має наступні основні параметри. Параметри шасі:

$m_s = 16000 \text{ кг}$; $m_u = 500 \text{ кг}$; $k_s = 1,2 \cdot 10^5 \text{ н/м}$; $k_t = 4 \cdot 10^5 \text{ н/м}$; $b_s = 15 \cdot 10^3 \text{ н} \cdot \text{с/м}$; $b_t = 2,02 \cdot 10^3 \text{ н} \cdot \text{с/м}$.
 Параметри МППО: $R = 15 \text{ см}$, $l = 16 \text{ см}$, $y_0 = 14 \text{ см}$, $x_c = 1 \text{ см}$. Параметри СГПМ: розрахункова потужність 400 Вт ; число пар полюсів $p = 5$; $R_s = 0,469 \text{ Ом}$; $L_s = 0,00136 \text{ Гн}$; $\Psi_\mu = 0,08 \text{ Вб}$. Параметри літій-іонної АБ: номінальна напруга $12,8 \text{ В}$; ємність $5 \text{ А} \cdot \text{год}$.

На лівих графіках зверху вниз представлено наступні часові залежності: функція профілю дороги (ТЗ з періодичністю в $2,2 \text{ с}$ долає ямки глибиною $H = 0,1 \text{ м}$, причому тривалість руху ТЗ по горбику і ямці однакова і складає 1 с); величина вертикальних коливань НПМ шасі (з урахуванням жорсткості підвіски амплітуда коливань дорівнює $0,05 \text{ м}$); кутова швидкість обертання ротора генератора; струм обмотки статора генератора. На правих графіках зверху вниз представлено: гальмівний електромагнітний момент генератора; відсоток енергії АБ; струм заряджання і напруга АБ. З представлених даних видно, що за перші 10 с за заданого режиму руху ТЗ АБ заряджається на $0,41\%$ від повної ємності батареї, яка дорівнює $5 \text{ А} \cdot \text{год}$.

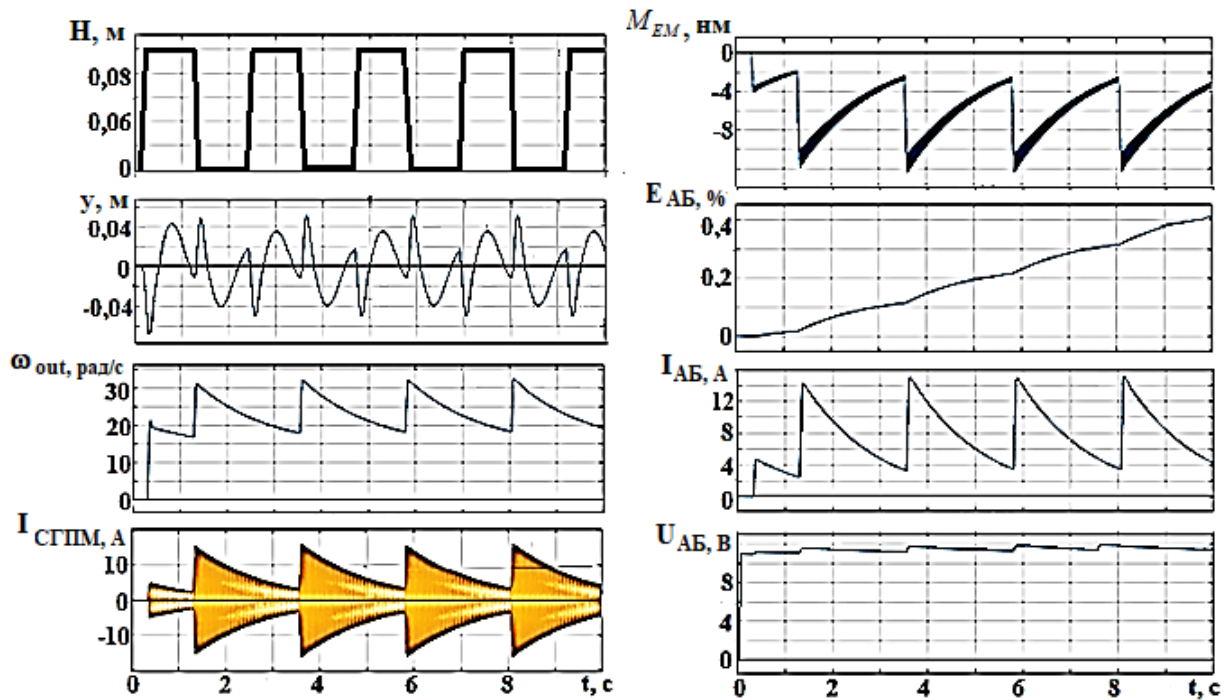


Рис. 6

Моделювання процесу подальшого заряджання показало, що час *повного* заряджання АБ ємністю $5 \text{ А} \cdot \text{год}$ дорівнює 41 хвилину безперервного руху ТЗ в заданих дорожніх умовах. Час заряджання батареї, яка була розряджена до 50% її максимального заряду, складає $22 \dots 25$ хвилин. ММ дозволяє отримати аналогічні дані і для будь-яких інших АБ.

Ефективність заряджання АБ є найбільшою, якщо коливання НПМ наближуються до резонансних. Показані на рис. 6 коливання не є резонансними, що збільшує час заряджання. На рис. 7 показано три випадки профілю дороги, за яких коливання шасі ТЗ наближуються до резонансних.

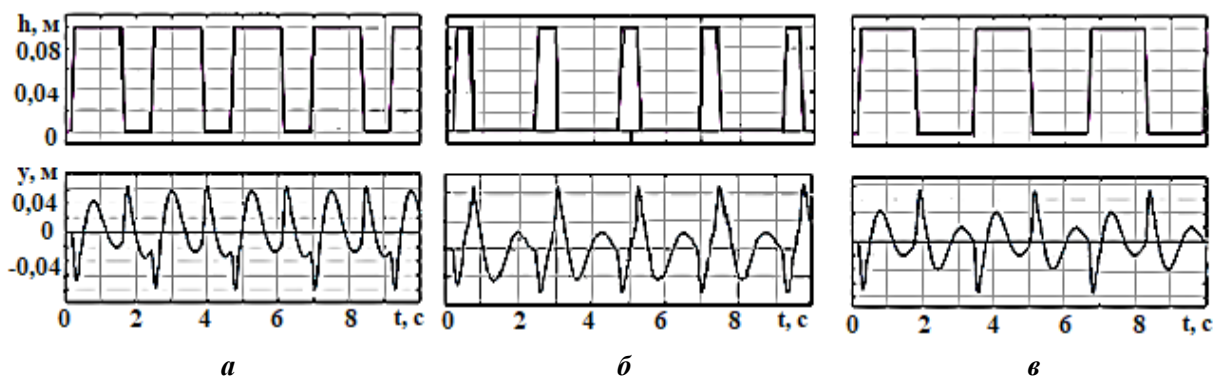


Рис. 7

На рис. 7, а показано функції профілю дороги і вертикальних коливань НПМ, коли період коливань дорівнює 2,2 с (як і на рис. 6), але час руху по горбику складає 1,5 с, а в ямці – 0,5 с. У такому випадку напрям дії імпульсів вібробуджуючої сили під час підйому на горбик і спуску співпадають з миттєвим напрямком коливального руху ПМ шасі, що підсилює коливальний процес. За 10 с руху ТЗ по такому профілю АБ заряджається на 0,5% від повної ємності батареї, тобто в 1,2 рази швидше, ніж в попередньому випадку. На рис. 7, б показано аналогічні функції за тривалості руху по горбику 0,4 с і в ямці – 1,8 с. Відсоток заряду АБ за 10 с складає 0,58% (в 1,4 рази швидше, ніж у варіанті на рис. 6).

На рис. 7, в показаний випадок, коли період коливань НПН збільшується до 3 с (в 1,5 рази зменшується частота коливальних імпульсів). І хоча кількість імпульсів сили зменшується, ефективність заряджання залишається такою ж, як і у випадку на рис. 6.

Результати досліджень засвідчили, що вибрані в певний спосіб “оптимальні” параметри СПЕМК можуть забезпечувати найбільшу енергоефективність системи лише за певних умов руху ТЗ і дорожніх умов і не будуть достатньо ефективними за інших умов, оскільки при цьому змінюються не тільки амплітуди, але й характер коливань шасі. Тому оптимізація параметрів СПЕМК можлива лише “у середньому” з урахуванням типу ТЗ, вірогідних умов його руху і інших чинників його функціонування. Очевидно, що представлені вище результати є оціночними, оскільки однакові умови руху ТЗ на протязі тривалого часу є маловірогідними. Проведені розрахунки показали, що СПЕМК не потребує значних габаритів для свого розміщення і легко вбудовується в конструкцію шасі ТЗ. Фінансові витрати на створення і експлуатацію СПЕМК можна оцінити лише в рамках конкретних проєктів. Але її очікувана оціночна вартість є невеликою, оскільки СПЕМК складається з достатньо нескладних вузлів і компонентів і є простою в обслуговуванні.

Висновки. Найкращим сегментом ТЗ для застосування СПЕМК з метою рекуперації енергії механічних коливань шасі є великовантажні і спеціальні ТЗ, що тривалий час рухаються в складних дорожніх умовах і втрачають на подолання дорожніх перешкод значну частину палива.

Уперше розроблена і реалізована комплексна математична модель СПЕМК описує усі взаємопов’язані процеси різної фізичної природи, що відбуваються під час поетапного перетворення енергії механічних коливань шасі ТЗ в електричну енергію зарядженої АБ, і забезпечує вибір оптимальних параметрів СПЕМК для будь-якого конкретного проєктного завдання. Результати проведених багатоваріантних досліджень СПЕМК за різних ймовірних умов руху ТЗ показали ефективність системи з точки зору прийнятних витрат часу на заряджання АБ, а значить і доцільність використання СПЕМК як додаткової системи електроживлення на борту ТЗ, що надає перспективність їхнім подальшим розробкам і впровадженням.

1. Электрокомпоненты для колесных транспортных средств. URL <https://privod-n.ru/nashi-proekty/elektrokomponenty-dlya-kolesnykh-transportnykh-sredstv/> (дата доступу 20.02.2021)
2. Васьковський Ю.Н., Пода М.В. Моделирование электромеханических систем рекуперации энергии колебаний транспортных средств. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 4. С. 33 – 40. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.033>.
3. Audi: https://www.volkswagenag.com/en/news/2016/8/shock_absorber_system.html (дата доступу 16.01.2021).
4. Bose: <https://www.thedrive.com/news/20996/> (дата доступу 16.02.2021).
5. Okladnikov D.L., Zeer V.A, Grazhdantsev E.V, Avdeev R.M., Akhremov S.A. Energy recovery method of damping oscillations of the vehicle suspension. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 537. P. 032074. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032074>.
6. Zhanwen Wang, Tianming Zhanga, Zutao Zhanga, Yanping Yuana, Yujie Liub. A high-efficiency regenerative shock absorber considering twin ball screws transmissions for application in range-extended electric vehicles. *Energy and Built Environment*. 2020. Vol. 1. Issue 1. Pp. 36-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2019.09.004> URL: <https://www.researchgate.net/publication/336175260>. (дата доступу 16.02.2021)
7. Pham T.H., Jacob J., Wilkins S., Lauwerys C., Dhaens M. Integrated Model for Battery Electric Vehicles with Energy Harvesting Active Suspension System. *12th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies*. Monte Carlo, Monaco, April 11-13, 2017. Pp. 6–15.
8. Васьковський Ю.М., Пода М.В., Кошикар І.В. Електрогенератор в системі рекуперації енергії механічних коливань транспортних засобів. *Електротехніка і електромеханіка*. 2018. № 5. С. 24 – 28. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.04>.
9. Васьковський Ю.М., Гайденок Ю.А. Дослідження електромагнітних процесів в синхронних машинах з постійними магнітами на основі коло-польових математичних моделей. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С. 47 – 54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.047>

MODELING OF ENERGY CONVERSION PROCESSES IN THE SYSTEM VIBRATION ENERGY RECOVERY OF VEHICLE CHASSIS

Yu. Vaskovsky, M. Poda

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: vun157@gmail.com, poda.mv@gmail.com.

The article presents a complex mathematical model of the energy recovery system for mechanical vibrations of vehicles moving in difficult road conditions. Such a system is an auxiliary power supply system that enhances the functionality of modern vehicles. The mathematical model takes into account the entire set of processes for converting the energy of mechanical vibrations in the following sequence: mechanical energy of the reciprocating oscillatory motion of the vehicle chassis - mechanical energy of the rotational motion of the electric generator shaft - electrical energy of the alternating current of the generator - direct current electrical energy of the battery. The modes of operation of the system are investigated, which provide efficient processes of charging the battery. For a specific example, data on the charging time of a truck battery is given. References 9, figures 7.

Keywords: energy recovery system, vehicle chassis, permanent magnet synchronous generator, storage battery.

1. Electric components for wheeled vehicles: <https://privod-n.ru/nashi-proekty/elektrokomponenty-dlya-kolesnykh-transportnykh-sredstv/> (accessed at 20.02.2021). (Rus)
2. Vaskovsky Yu., Poda M. Modeling of electromechanical systems of energy recovery of vehicle oscillations. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 4. Pp. 33–40. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.033>.
3. Audi: https://www.volkswagenag.com/en/news/2016/8/shock_absorber_system.html (accessed at 16.01.2021).
4. Bose: <https://www.thedrive.com/news/20996/> (accessed at 16.01.2021).
5. Okladnikov D.L., Zeer V.A., Grazhdantsev E.V., Avdeev R.M., Akhremov S.A. Energy recovery method of damping oscillations of the vehicle suspension. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 537. P. 032074. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032074>.
6. Zhanwen Wang, Tianming Zhanga, Zutao Zhanga, Yanping Yuana, Yujie Liub. A high-efficiency regenerative shock absorber considering twin ball screws transmissions for application in range-extended electric vehicles. *Energy and Built Environment*. 2020. Vol. 1. Issue 1. Pp. 36 – 49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2019.09.004>. URL: <https://www.researchgate.net/publication/336175260>. (дата доступу 16.02.2021)
7. Pham T.H., Jacob J., Wilkins S., Lauwerys C., Dhaens M. Integrated Model for Battery Electric Vehicles with Energy Harvesting Active Suspension System. 12th International Conference on *Ecological Vehicles and Renewable Energies*. Monte Carlo, Monaco, April 11-13, 2017. Pp. 6–15.
8. Vaskovsky Yu., Poda M., Koshikar I. Electric generator in the system of energy recovery of mechanical vibrations of vehicles. *Electrical Engineering and Electromechanics*. 2018. No 5. Pp. 24 – 28. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.04>.
9. Vaskovsky Yu., Gaidenko Yu. Investigation of electromagnetic processes in synchronous machines with permanent magnets based on circular field mathematical models. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 2. Pp. 47 – 54. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.047>.

Надійшла 04.03.2021

Остаточний варіант 20.05.2021