

Ю.М. Васьковський, М.В. Пода, І.В. Кошикар

ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОР В СИСТЕМІ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

У статті розглядається система рекуперації енергії механічних коливань транспортних засобів в корисну електроенергію, яка накопичується в акумуляторній батареї. Одним з основних елементів такої системи є електрогенератор, який перетворює механічну енергію коливань шасі транспортного засобу в електричну енергію. Також розглянута проблема вибору та оптимізації конструкції і параметрів генератора. З огляду на особливості функціонування транспортного засобу найбільш доцільним типом генератора в такій системі є синхронний генератор з постійними магнітами, який має суттєві конструктивні відмінності від традиційних синхронних машин з постійними магнітами. Критерієм оптимізації генератора є максимальна величина діючого значення ЕРС, яка індукується в обмотці статора. За результатами моделювання на основі польової математичної моделі отримано сукупність значень узагальнених коефіцієнтів, які характеризують оптимальну геометрію генератора. Бібл. 4, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: система рекуперації електроенергії, синхронний генератор, постійні магніти, математична модель.

В статье рассматривается система рекуперации энергии механических колебаний транспортных средств в электроэнергию, которая накапливается в аккумуляторной батарее. Одним из основных элементов такой системы является электрогенератор, который преобразует механическую энергию колебаний шасси транспортного средства в электрическую энергию. Также рассмотрена проблема выбора и оптимизации конструкции и параметров генератора. Учитывая особенности функционирования транспортного средства наиболее целесообразным типом генератора в такой системе является синхронный генератор с постоянными магнитами, который имеет существенные конструктивные отличия от традиционных синхронных машин с постоянными магнитами. Критерием оптимизации генератора является наибольшая величина действующего значения ЭДС, индуцированной в обмотке статора. По результатам моделирования на основе полевой математической модели получена совокупность значений обобщенных коэффициентов, характеризующих оптимальную геометрию генератора. Библ. 4, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: система рекуперации электроэнергии, синхронный генератор, постоянные магниты, математическая модель.

Вступ. Вимоги щодо розширення функціональних можливостей сучасних транспортних засобів (ТЗ) загального і спеціального призначення обумовлюють використання на борту ТЗ нових пристроїв і систем, для роботи яких потрібні додаткові потужності джерел електроживлення. Оскільки уся енергія, яку отримує ТЗ для свого функціонування, надходить від використання запасів первинного енергоносія (зазвичай це паливо двигуна внутрішнього згорання), то додаткові джерела електроживлення можна отримати лише на основі принципів енергозбереження – шляхом виявлення зайвих втрат енергії в ТЗ і розробки систем перетворення частини цих втрат в корисні запаси електроенергії акумуляторної батареї (АБ). Однією з таких є система електромеханічного перетворення енергії механічних коливань (СПЕМК) шасі ТЗ, які виникають під час руху ТЗ. Розробка та дослідження таких систем вже проводиться рядом закордонних компаній – Bose, Levant Power Corp, Audi [1-3]. Наприклад, потужність системи eROT для легкового автомобіля фірми Audi складає до 613 Вт на поганому покритті, а на звичайних трасах – 100-150 Вт. В Україні зазначені розробки тільки починаються, причому їх використання може бути найбільш доцільним та ефективним для великовантажних ТЗ.

Метою статті є отримання за результатами математичного моделювання оптимальних параметрів синхронного генератора, що входить до складу системи електромеханічного перетворення енергії механічних коливань шасі транспортного засобу.

Загальний аналіз. При рівномірному русі ТЗ по ідеально рівній поверхні (дорозі) існує рівновага сил

тяжіння підресореної маси (ПрМ) ТЗ і реакції пружного елемента підвіски. При цьому ПрМ не робить вертикальних коливань, а енергія двигуна витрачається тільки на подолання сили тертя коліс об поверхню. При наявності на дорозі сходинки униз глибиною h , колеса ТЗ швидко опускаються вниз, і під дією виниклого дисбалансу сил ПрМ опускається вниз, зменшуючи свою потенційну енергію на величину

$$\Delta W = mgh, \quad (1)$$

де m – маса ПрМ, g – прискорення вільного падіння.

Після виникнення згасаючих коливань, в результаті яких зазначена енергія розсіюється в амортизаторах підвіски, режим рівномірного руху ТЗ відновлюється. При наявності на дорозі сходинки вверх потенційна енергія ПрМ збільшується за рахунок енергії приводного двигуна. В процесі коливань відбувається взаємне переміщення непідресореної (НПрМ) і підресореної мас ТЗ у вертикальній площині, яке дозволяє створити системи електромеханічного перетворення енергії механічних коливань в корисну електроенергію. При наявності на дорозі ряду сходинок (нерівностей, ям) зазначений процес циклічно повторюється. В реальних умовах повторюваність ям на дорозі і їх глибина носять випадковий характер. Однак для оцінки додаткових витрат енергії, викликаних вертикальними коливаннями ТЗ при русі по нерівній дорозі, можна вести еквівалентну частоту повторюваності процесу коливань f в умовах однакової глибини ям h . Частота власних коливань ПрМ ТЗ зазвичай налаштовується на величину 1...2 Гц, і вони завдяки потужним амортизаторам загасають за декілька коливань.

© Ю.М. Васьковський, М.В. Пода, І.В. Кошикар

Розглянемо приклади важких ТЗ: 1) вантажний автомобіль КрАЗ-253Б, його споряджена маса (СМ) становить 11,5 т; 2) бронетранспортер БТР-4 Буцефал – СМ дорівнює 21,9 т. Припускаючи, що співвідношення НПрМ і ПрМ дорівнює 1:15, що характерно для будь-яких ТЗ, величини ПрМ дорівнюють відповідно 10,7 і 20,4 тонн. За одне коливання такої маси на глибину $h = 0,05$ м зміна потенційної енергії ПрМ складе відповідно $\Delta W = 5,24$ і 10 кДж. Якщо при русі ТЗ по пересіченій місцевості такі коливання постійно повторюються, наприклад, з частотою $f = 0,2$ Гц (період коливання 5 с), то потужність, що втрачається в амортизаторах ТЗ дорівнює:

$$\Delta P = \Delta W \cdot f \quad (2)$$

або відповідно $\Delta P = 1,05$ і 2 кВт. Отримана оцінка свідчить про значні втрати потужності двигуна ТЗ в амортизаторах, що робить доцільним її перетворення в електричну енергію, накопичення її в АБ і подальше використання в споживчих системах ТЗ.

Для інтегральної оцінки потужності механічних коливань з урахуванням різних факторів, що впливають на її величину, можна ввести коефіцієнт потужності механічних коливань

$$k_e = mh f, \quad (\text{т} \cdot \text{м} / \text{с}). \quad (3)$$

Так, для наведених прикладів при $\Delta P = 1,05$ кВт маємо $k_e = 0,107$, а при $\Delta P = 2$ кВт коефіцієнт дорівнює $k_e = 0,204$. Очевидно, що такі ж величини ΔP можна отримати при інших значеннях маси, глибини ступені і частоти повторення коливань. Наприклад, $\Delta P = 1,05$ кВт можна отримати при $m = 5,36$ т, $h = 0,05$ м і $f = 0,4$ Гц або при $m = 8$ т, $h = 0,06$ м і $f = 0,223$ Гц. З урахуванням виразів (1) і (2) маємо просту універсальну формулу для оцінки величини потужності, що втрачається при русі ТЗ по нерівній дорозі:

$$\Delta P = g k_e. \quad (4)$$

Взаємне переміщення ПрМ і НПрМ при русі ТЗ в складних дорожніх умовах надає принципові можливості для створення СПЕМК ТЗ.

Структурна блок-схема СПЕМК представлена на рис. 1.

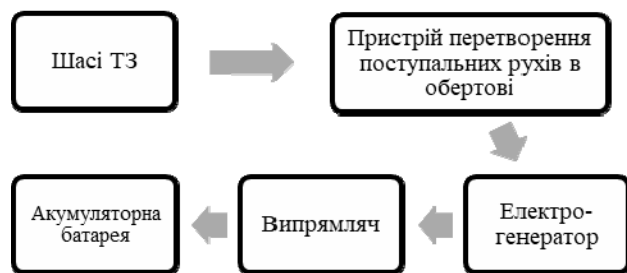


Рис. 1 Структурна блок-схема СПЕМК

Робота СПЕМК відбувається наступним чином. Взаємні зворотно-поступальні переміщення ПрМ і НПрМ через механічний перетворювальний пристрій перетворюються в односпрямований обертальний рух ротора електрогенератора, в якому здійснюється перетворення механічної енергії в електричну енергію. Змінна напруга на виході генератора випрямляється у випрямлячі і заряджає АБ. Таким чином, в СПЕМК відбувається перетворення параметрів енергії в наступній послідовності: «механічна енергія зворотно-

поступального руху – механічна енергія обертового руху – електрична енергія змінного струму електрогенератора – електроенергія постійного струму АБ».

Електрогенератор створює гальмуючий електромагнітний момент, який протидіє вимушеним коливанням шасі ТЗ. Таким чином, СПЕМК здійснює дві корисні функції: а) перетворює частину енергії механічних коливань ТЗ в корисну електричну енергію АБ; б) сприяє гасінню коливань шасі, тобто частково виконує функції амортизатора. Слід зазначити, що друга функція в важких ТЗ не є основною, оскільки СПЕМК в важких ТЗ не може замінити традиційні амортизатори, а може лише в незначній мірі доповнювати їх. Таким чином, головною функцією СПЕМК є створення на борту ТЗ додаткового джерела електроживлення.

Моделювання та дослідження електрогенератора СПЕМК. Важливим елементом, який в значній мірі визначає ефективність рекуперації енергії в СПЕМК, є електрогенератор. Аналіз показує, що з урахуванням особливостей функціонування СПЕМК, оптимальним типом генератора є трифазний синхронний генератор змінного струму з постійними магнітами на роторі (СПІМ).

Застосування постійних магнітів (ПМ) як джерел магнітного потоку збудження є оптимальним технічним рішенням. При цьому у генератора немає тривалого сталого режиму роботи – він завжди працює в перехідних режимах зі змінною швидкістю обертання валу. Механічний момент, що приводить генератор в обертання, має випадковий імпульсний характер, обумовлений дорожніми умовами руху ТЗ. Головними питаннями проектування електрогенератора є: а) оптимізація конструкції генератора за обраним критерієм з урахуванням імовірнісних змінних характеристик руху ТЗ; б) оцінка можливої частки енергії механічних коливань ТЗ, яка може бути перетворена в електричну енергію з урахуванням допустимих габаритних характеристик СПЕМК.

Враховуючи реальні умови функціонування СПІМ в складі СПЕМК його конструкція і параметри мають ряд суттєвих відмінностей від СПІМ традиційного виконання. А саме:

1. Аналіз доцільної конструктивної компоновки СПІМ на шасі ТЗ показує, що загальна конфігурація генератора повинна бути «довгою» – відношення довжини осердя статора до його зовнішнього діаметра лежить в діапазоні значень $l_s / D_j = 2,5 \dots 3,5$.

2. Середня швидкість обертання ротора, яку може отримати генератор в складі СПЕМК, є відносно невеликою: $n_2 = 200 \dots 400$ об/хв. Тому для отримання прийнятної величини ЕРС обмотки статора СПІМ, яка пропорційна швидкості зміни у часі магнітного потокозчеплення (частоті), генератор повинен мати достатню велику кількість полюсів – кількість пар полюсів дорівнює $p = 4 \dots 5$.

3. З урахуванням можливостей розміщення багатополосної трифазної обмотки статора в осерді малого діаметра кількість котушок на полюс і фазу обмотки статора дорівнює $q = 1$, а кількість пазів осердя статора дорівнює $Z_1 = 24 \dots 30$. З урахуванням цих даних проектування статора виконується по загальним методикам проектування електричних машин змінного струму.

4. З метою забезпечення високого рівня надійності СГПМ доцільно використовувати ротор з ПМ, які мають радіальний напрямок вектора намагнічування і закріплюються на поверхні феромагнітного ярма ротора. На рис. 2, як приклад, показано поперечний переріз активної зони варіанту СГПМ.

5. Важливе значення має правильний вибір параметрів ПМ. При цьому необхідно обґрунтувати критерії, за якими цей вибір повинен виконуватися. На відміну від традиційних СГПМ для генератора, що функціонує в складі СПЕМК, не висувається вимога щодо синусоїдного розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку уздовж полюсної поділки. 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 (рис. 1). Критерієм вибору параметрів ПМ є *максимальна величина діючого значення ЕРС обмотки статора при виконанні інших рівних умов.*

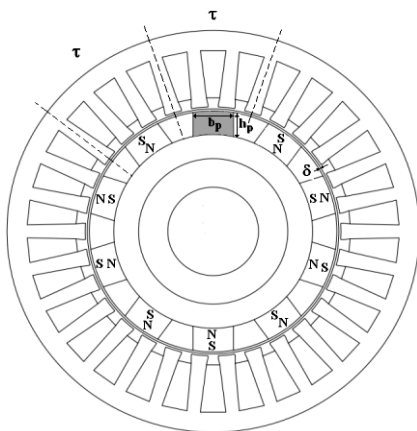


Рис. 2. Поперечний переріз активної зони СГПМ

Узагальненими геометричними параметрами, які характеризують ПМ в конструкції СГПМ, є:

- коефіцієнт форми магніту – відношення ширини магніту до його висоти $k_p = b_p / h_p$. Зазвичай, з огляду на вимоги щодо простоти та технологічності виконання ротора, ПМ виконують у вигляді призми з прямокутною формою поперечного перерізу;
- коефіцієнт полюсного перекриття – відношення ширини магніту ротора до полюсної поділки ротора $\alpha = b_p / \tau$;
- коефіцієнт висоти магніту, який характеризує відношення висоти ПМ до радіусу ротора $k_R = h_p / R_2$;
- коефіцієнт відносної величини повітряного проміжку – відношення висоти повітряного проміжку між статором і ротором до полюсної поділки ротора $k_\delta = \delta / \tau$.

Варіювання зазначених коефіцієнтів при оптимізації параметрів магніту повинно відбуватися за умови незмінності в кожному варіанті площі перерізу (об'єму) ПМ $S_p = b_p \cdot h_p = \text{const}$, оскільки збільшення об'єму ПМ, а значить і його магнітного потоку, само по собі збільшує ЕРС статора і тому не дозволяє визначити оптимальну геометрію СГПМ.

Зазначені коефіцієнти характеризують не тільки геометрію самого ПМ, але й його співвідношення з геометрією інших елементів активної зони СГПМ. Таким чином задача оптимізації зводиться до знахо-

дження екстремуму функції мети – *максимуму діючого значення ЕРС обмотки статора* при варіюванні зазначених коефіцієнтів з урахуванням обмежень на їх величини, які витікають з можливостей конструктивного виконання генератора. Така оптимізація виконується шляхом математичного моделювання.

Математична модель СГПМ. Розглядається польова математична модель СГПМ з рухомих ротором, яка дозволяє проаналізувати у часі електромагнітні процеси, що виникають при обертанні ротора [4]. Рівняння для функцій часу записуються так:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}, \quad (5)$$

$$E_j(t) = \frac{2nal\delta}{S_p} \int_{S_i} E_n(t) ds, \quad (6)$$

де: \mathbf{A} – векторний магнітний потенціал; \mathbf{B}_r – вектор залишкової магнітної індукції ПМ; μ, γ – магнітна проникність і електропровідність матеріалу (задаються для кожної з підобластей розрахункової області згідно з їх характеристиками – ПМ, повітряний проміжок, феромагнітна сталь, тощо); \mathbf{v} – вектор швидкості руху ділянок ротора відносно системи координат статора; $J = I_p n a / S_p$ – густина струму в обмотці статора, яка визначається за заданими значеннями струму, числом послідовно з'єднаних провідників в пазу статора n та частиною площі перетину паза статора S_p , яка приходить на одну паралельну гілку.

Вектор \mathbf{B}_r повинен відображати обраний напрям намагнічування ПМ. Вектор швидкості визначається через задану кутову швидкість ротора ω_R і радіус-вектор поточної точки ротора $\mathbf{v} = \omega_R \mathbf{r}$.

Рівняння (5) доповнюється відповідними граничними умовами. Зазвичай це однорідні граничні умови першого роду на зовнішній границі розрахункової області – ярмі осердя статора.

Миттєве значення ЕРС фази статора як функції часу визначається формулою (6), де інтегрування проводиться по сумарній площі поперечного перерізу провідників фази. Інтегрується нормальна складова вектора напруженості електричного поля $E_n(t)$ – складова вектора напруженості, яка направлена перпендикулярно до площі перерізу провідників обмотки. Напруженість електричного поля при умові, що скалярний електричний потенціал $\varphi = 0$, обчислюється, як $\mathbf{E}(t) = -\partial \mathbf{A} / \partial t$. Діюче значення ЕРС знаходиться на періоді T зміни функції $E_j(t)$

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E_j^2(t) dt}. \quad (7)$$

При обертанні ротора відбувається зміна конфігурації розрахункової області за рахунок зміни взаємного положення статора і елементів конструкції ротора, тобто координат усіх точок ротора. При обертанні ротора проти годинникової стрілки з постійною швидкістю приріст координат точок ротора $\Delta x, \Delta y$ за один крок по часу Δt визначається:

$$\begin{cases} \Delta x = \cos[\omega_R \cdot (t + \Delta t)] \cdot X - \sin[\omega_R \cdot (t + \Delta t)] \cdot Y - X \\ \Delta y = \sin[\omega_R \cdot (t + \Delta t)] \cdot X + \cos[\omega_R \cdot (t + \Delta t)] \cdot Y - Y \end{cases}, \quad (8)$$

де X, Y – поточні координати точок ротора.

Результати моделювання та оптимізації СГПМ. Розглянуто СГПМ, який має наступні дані: число фаз статора $m = 3$; число пар полюсів $p = 5$; активна довжина $l_\delta = 0,26$ м; зовнішній діаметр ярма статора $D = 0,1$ м; внутрішній діаметр ярма ротора, $D_0 = 0,022$ м; номінальна потужність $P_n = 400$ Вт; номінальна (діюча) фазна напруга обмотки статора $U_1 = 16$ В; номінальна частота обертання ротора $n_{\text{ном}} = 200$ об/хв. Постійний магніт має наступні характеристики: $B_r = 1,18$ Тл, $\mu_r = 1,065$.

На рис. 3 представлено часові залежності ЕРС статора для різних значень коефіцієнта полюсного перекриття: 1 – при $\alpha = 0,69$; 2 – $\alpha = 0,58$; 3 – $\alpha = 0,49$; 4 – $\alpha = 0,36$. З наведених залежностей видно, що зростання α призводить до збільшення ширини кривих, а значить до збільшення діючого значення ЕРС при практично незмінній її амплітуді. Тобто ширина ПМ суттєво впливає на величину E .

Розрахунки виконано в режимі холостого ходу генератора. На рис. 4, 5 представлено залежності амплітуди (пунктирна лінія) і діючого значення (суцільна лінія) ЕРС обмотки статора від відповідно коефіцієнту полюсного перекриття α і коефіцієнту форми магніту k_p при умові незмінності об'єму ПМ.

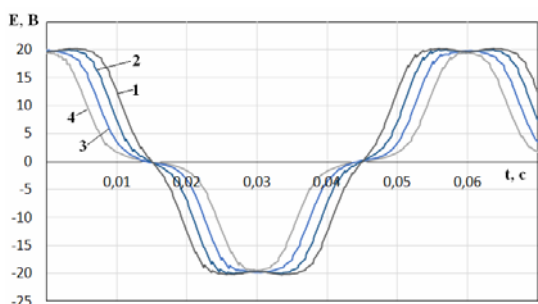


Рис. 3. Часові залежності ЕРС

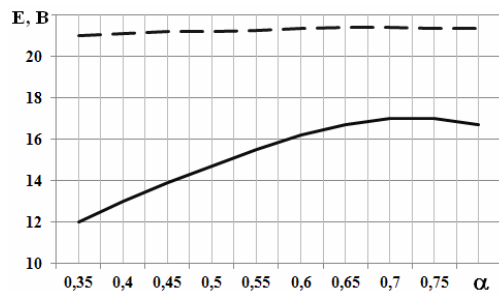


Рис. 4. Залежності ЕРС від коефіцієнту α

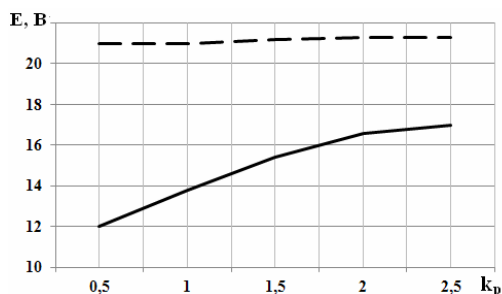


Рис. 5. Залежності ЕРС від коефіцієнту k_p

Наведені залежності свідчать, що при практично незмінній амплітуді ЕРС використання більш широкіх і не високих ПМ веде до зростання діючого значення ЕРС.

Надмірне зростання ширини ПМ є недоцільним, оскільки воно обмежується збільшенням магнітних потоків розсіювання між ПМ, які розташовані поруч, а також конструктивними чинниками. Оптимальні значення коефіцієнтів: $k_p = 2,5 \dots 3$ і $\alpha = 0,75 \dots 0,8$.

Зазначений висновок підтверджують розрахункові залежності ЕРС від коефіцієнту висоти магніту $k_R = h_p / R_2$, зображені на рис. 6. Розрахунки виконані при незмінній ширині магніту $b_p = 6$ мм і варіюванні висоти магніту від 3 до 8 мм. При варіаціях об'єму магнітів збільшується в 2,67 разів. Наведені дані свідчать, що при $k_R > 0,2$ зростання ЕРС майже не відбувається, тобто виконання занадто високих магнітів є недоцільним.

Це обумовлено тим, що частина ПМ, розташована біля ярма ротора, практично «не приймає участі» у створенні магнітного потоку взаємодії ротора з обмоткою статора, а створює лише потоки розсіювання ПМ. Тому значення коефіцієнту висоти магніту лежать в діапазоні значень $k_R = 0,1 \dots 0,13$.

Величина повітряного проміжку між статором і ротором впливає на ЕРС обмотки статора. На рис. 7 зображено часові залежності ЕРС обмотки статора для величин: $\delta = 0,5$ мм (позначено цифрою 1); $0,75$ мм (цифра 2) і 1 мм (цифра 3), яким відповідають значення коефіцієнту відносної величини повітряного проміжку $k_\delta = \delta / \tau = 0,053$; $0,04$ і $0,0265$.

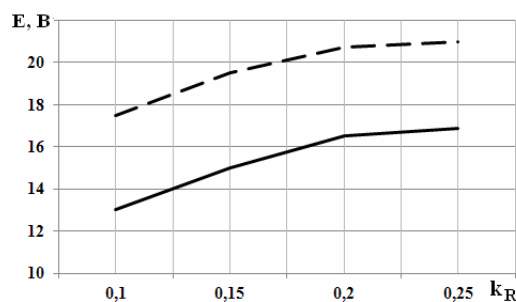


Рис. 6. Залежності ЕРС від коефіцієнту k_R

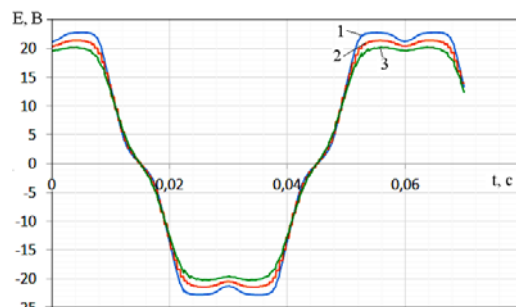


Рис. 7. Часові залежності ЕРС від коефіцієнту k_δ

Розрахунки проведені при фіксованому значенні ширини ПМ. З наведених даних видно, що навіть при двократному збільшенні δ в межах, які можуть бути обумовлені конструктивними чинниками, величина ЕРС зменшується лише на 13,7%.

Аналогічні числові дослідження проводилися і для інших типорозмірів СГПМ, в результаті чого було встановлено наступні представлені в таблиці оптимальні значення узагальнених геометричних коефіцієнтів, які доцільно використовувати при проектуванні СГПМ, що призначені для роботи в складі СПЕМК.

Величина ЕРС СГПМ, а значить і ефективність роботи СПЕМК в значній мірі залежить від швидкості обертання ротора генератора, яка визначається дорожніми умовами руху ТЗ. Тому енергоємність і параметри АБ, час її заряду, тощо потребують спеціального узгодження з параметрами СГПМ з урахуванням імовірних характеристик руху конкретного типу ТЗ.

Таблиця
Оптимальні геометричні коефіцієнти СГПМ

Найменування коефіцієнту	Числове значення
Відношення довжини осердя статора до його зовнішнього діаметру l_δ / D_j	2,6...3
Коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha = b_p / \tau$	0,68...0,75
Коефіцієнт форми магніту $k_p = b_p / h_p$	2,1...2,5
Коефіцієнт висоти магніту $k_R = h_p / R_2$	0,1...0,16
Коефіцієнт відносної величини повітряного проміжку $k_\delta = \delta / \tau$	0,04...0,05

Висновки.

1. Додатковим джерелом електроживлення на борту транспортного засобу може бути система електро-механічної рекуперації енергії механічних коливань шасі ТЗ під час його руху в електричну енергію АБ. Аналіз підтверджує наявність достатньої величини енергії, яка зазвичай втрачається амортизаторах ТЗ і яка може бути частково накопичена в АБ.

2. Досліджено параметри важливого елементу зазначеної системи – синхронного генератора з постійними магнітами, який з огляду на особливості його функціонування має суттєві відмінності від аналогічних генераторів традиційного виконання. Визначено оптимальні діапазони параметрів СГПМ. Їх чисельні значення представлені в таблиці і можуть використовуватися при розробці СГПМ в зазначених системах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Drive2 – Автомобильный журнал. Электромагнитная подвеска Bose. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.drive2.ru/b/721443/>.
2. Drive2 – Автомобильный журнал. GenShock — система подвески, выполняющая функцию регенерации энергии. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.drive2.com/b/668040/>.
3. Audi MediaCenter. The innovative shock absorber system from Audi. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.audi-mediacyber.com/en/press-releases/the-innovative-shock-absorber-system-from-audi-new-technology-saves-fuel-and-enhances-comfort-6551>.
4. Васьковський Ю.М., Гайдено 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: 10.15407/techned2018.02.047.

REFERENCES

1. Drive2 – Automobile Journal. *Electromagnetic suspension Bose*. Available at: <https://www.drive2.ru/b/721443/> (accessed 13 September 2016). (Rus).
2. Drive2 – Automobile Journal. *GenShock — suspension system performing the function of energy regeneration*. Available at: <https://www.drive2.com/b/668040/> (accessed 11 May 2016). (Rus).
3. Audi MediaCenter. *The innovative shock absorber system from Audi*. Available at: <https://www.audi-mediacyber.com/en/press-releases/the-innovative-shock-absorber-system-from-audi-new-technology-saves-fuel-and-enhances-comfort-6551> (accessed 20 June 2017).
4. Vaskovskiy Yu.M., Haydenko Yu.A. Research of electromagnetic processes in permanent magnet synchronous motors based on a «electric circuit – magnetic field» mathematical model. *Technical Electrodynamics*, 2018, no.2, pp. 47-54. (Ukr). doi: 10.15407/techned2018.02.047.

Надійшла (received) 15.06.2018

Васьковський Юрій Миколайович¹, д.т.н., проф.,
Пода Михайло Валерійович¹, аспірант,
Кошикар І.В.¹, магістр,

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
03056, Київ, пр. Перемоги, 37,
e-mail: vun157@gmail.com, poda.mv@gmail.com

Yu.M. Vaskovskiy¹, M.V. Poda¹, I.V. Koshikar¹
¹ National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

Electric generator in the recuperation system of the energy from mechanical oscillations in vehicles.

The paper deals with the system of mechanical energy recuperation of vehicles in the useful electric energy accumulated in the rechargeable battery. This system creates an additional power supply on board of the vehicle and, based on the principle of energy conservation, increases the efficiency of the use of the fuel of the primary engine. One of the main elements of such system is an electric generator, which transforms the mechanical energy of the oscillations of the vehicle's chassis into electric energy. The problem of choosing and optimizing the design and parameters of the generator is considered in the paper. Given the peculiarities of the functioning of the vehicle, the most appropriate type of generator in such system is a synchronous generator with permanent magnet, which has significant structural differences from conventional synchronous machines with permanent magnets. The criterion for optimizing the generator is the largest value of the effective value of the EMF, which is induced in the stator winding. On the basis of simulation results, based on the field mathematical model, a set of values of generalized coefficients that characterize the optimal generator geometry is obtained. References 4, table 1, figures 7.

Key words: electric energy recuperation system, synchronous generator, permanent magnets, mathematical model.