

НЕЛІНІЙНА МОДЕЛЬ РЕКУПЕРАТИВНОГО АМОРТИЗАЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ

В даній статті досліджена нелінійна модель рекуперативного амортизаційного пристрою динамічної системи та проведена оцінка ефективності перетворення механічної енергії коливань в електричну. Розглянуто актуальні тенденції рекуперації енергії в будівельній та транспортній галузі. Особливу увагу приділено рекуперації енергії гідродарного пристрою з використанням прямого та зворотного п'єзо ефекту. В статті наведено результати формування та дослідження нелінійної моделі амортизаційного гідродарного пристрою. Обґрунтовано інтегрування нелінійного диференціального рівняння за допомогою методу Рунге-Кутта в системі Mathcad з побудовою графіків параболічної залежності зведеної жорсткості динамічної системи від амплітуди коливань. Встановлені залежності кінематичних та енергетичних параметрів коливального процесу від реакції віддачі та визначений рівень потужності коливального процесу, частину якої доцільно перетворити в електричну енергію за допомогою п'єзогенератора. Розглянута науково-технічна проблема, яка, полягає в визначенні характеру негативного впливу зовнішніх збурень різного виду на функціонування гідродарного пристрою. Оцінено проблеми забезпечення, в процесі рекуперації, стабілізації динамічних процесів та визначення їх раціональних параметрів. Доведено, що вибір параметрів пружних елементів доцільний з урахуванням рекомендацій з використання пружних елементів з симетричною нелінійною характеристикою, жорсткість яких прогресивно збільшується при відхиленнях від точки статичної рівноваги. Запропоновано рішення, коли рекуперативний амортизаційний пристрій динамічного робочого органу є частиною комплексу, де втрачається значна кількість енергії, що спричинено тертям та розсіюванням енергії у вигляді тепла, і тому саме таку енергію розсіювання доцільно перетворювати в електричну.

В наведеній роботі проаналізовано використання різних типів п'єзокерамічних перетворювачів, в різних системах динамічних коливань та збурень, та обґрунтована ефективність їх запровадження в конструкції п'єзогенераторів для ефективної рекуперації енергії.

Ключові слова: нелінійна модель, числові методи, рекуперація, амортизаційний пристрій, гідромолот, потужність, коливання, п'єзогенератор.

Вступ

На сьогодні підвищення енергоефективності, досягнення автономності джерел енергії в промисловості є актуальною задачею.

Зазвичай енергія механічних коливань часто марно втрачається в перехідних елементах, ресорах, амортизаторах, гасниках коливань технічних засобів. Так в секторі будівельної та гірничої техніки широке застосування знайшли імпульсні виконавчі органи, які руйнують гірські породи та міцні ґрунти, але їх застосування викликає реакцію віддачі та шкідливу вібрацію [1]. В секторі експлуатації транспортних засобів виникнення вібрації та її демпфірування пов'язане з дисипацією енергії вібрації в амортизаторах та її перетворення в тепло. Тому, наприклад, останнім часом ряд провідних транспортнобудівних компаній світу проводять дослідження та розробляють системи електромеханічного перетворення енергії механічних коливань [2-4], в електричну енергію. Наявність систем рекуперації механічної енергії коливань забезпечує економію палива двигуна і розширює функціональні можливості машин за рахунок появи додаткового джерела електроживлення.

Отже є актуальним розвивати технології рекуперації енергії, яка інакше була б втрачена, і таким чином підвищуючи загальну ефективність використання енергії. З іншого боку, застосування систем рекуперації можуть негативно впливати на основне призначення і основний технологічний процес, що може призвести до дестабілізації динамічної системи, підвищення коефіцієнту динамічності та, відповідно, зниження надійності системи.

Проблема забезпечення, в процесі рекуперації, стабілізації динамічних процесів та визначення їх раціональних параметрів полягає в розробці ефективних математичних моделей з використанням аналітичних та числових методів для пошуку розв'язків початкових задач з нелінійними характеристиками жорсткості та в'язкості.

В імпульсних виконавчих органах гірничих машин та пристроях їх подачі, амортизаторах транспортних засобів, характеристики жорсткості та дисипації частіше істотно нелінійні. Головна особливість істотно нелінійних систем полягає в тому, що до них не можна використати принцип

суперпозиції, а форма й показники перехідного процесу залежать від величини й форми зовнішнього впливу, тому для розв'язку диференціальних рівнянь їх руху доцільно застосовувати числові методи інтегрування [5].

Мета та завдання

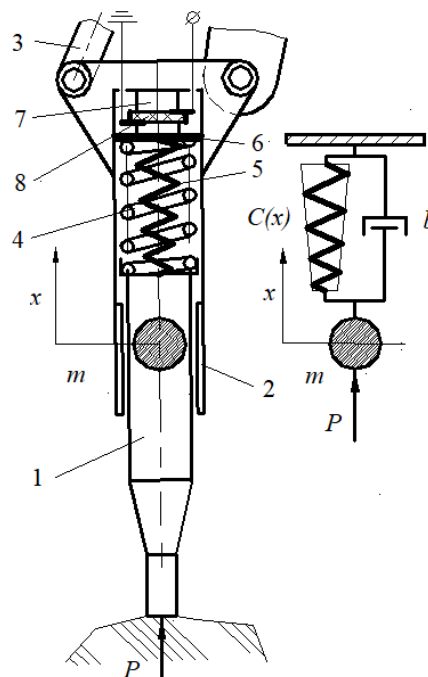
Метою цього дослідження є розробка нелінійної моделі амортизаційного пристрою динамічної системи та обґрунтування параметрів рекуперації механічної енергії, з перетворенням її в електричну з використанням п'єзоелектричного генератора, який встановлений безпосередньо в конструкції амортизатора динамічного пристрою.

Задачами є: формування математичної моделі на основі нелінійного диференціального рівняння системи амортизації корпусу гідромолота встановленого на маніпуляторі гідравлічного екскаватора; застосування числового методу інтегрування нелінійного диференціального рівняння в системі Mathcad; обґрунтування силової характеристики амортизатора у вигляді кубічної параболи; визначення характеристик коливального процесу та енергії коливань амортизатора; аналіз параметрів та характеристик п'єзогенераторів та елементів п'єзокерамічних перетворювачів.

Матеріал і результати досліджень

В якості динамічної системи досліджувалась підвіска ударного пристрою на маніпуляторі, яка мала характеристики жорсткості та дисипації істотно нелінійні. Тоді дослідження динамічних процесів з істотно нелійними елементами доцільно проводити числовими методами, оскільки аналітичні методи використати досить проблематично, а в більшості й неможливо. Доведено, що використання числових методів (Рунге-Кутта та інших) достатньо ефективно для одномасових систем, для яких точний розв'язок знаходиться методом "склеювання" окремих попередньо лінеаризованих ділянок [6].

Розглянемо рекуперативний амортизаційний пристрій гідромолота з елементами пружно-дисипативного захисту маніпулятора, базової машини та оператора від коливань за умови лінійних та нелінійних пружних елементів з застосуванням в конструкції системи рекуперації з п'єзогенератором для перетворення енергії коливань в електричну енергію (рис 1). Вибір параметрів пружних елементів доцільний з урахуванням рекомендацій з використання пружних елементів з симетричною нелінійною характеристикою, жорсткість яких прогресивно збільшується при відхиленнях від точки статичної рівноваги [7].



1 – гідромолот; 2 – направляюча; 3 – елементи маніпулятора; 4, 5 – пружні елементи з жорсткостями відповідно лінійною – c_0 , нелінійною – $c_1 \cdot x^2$ в залежності від переміщення x , та коефіцієнтом затухання b в залежності від швидкості x' ; 6 – опорна плита; 7 – п'єзогенератор; 8 – п'єзоелемент

Рисунок 1 – Розрахункова схема та нелінійна модель елемента рекуперативного амортизаційного пристрою

Рекуперативний амортизаційний пристрій (рис.1) включає гідромолот 1, направляючу 2, яка кріпиться до елементів маніпулятора 3, два паралельно підімкнутих пружних елемента 4 і 5, які мають відповідно лінійну жорсткість c_0 та нелінійну жорсткість $c_1 \cdot x^2$, що в сукупності утворюють зведену жорсткість $C(x)=c_0+c_1 \cdot x^2$. Тоді нелінійна сила опору пружини характеризується кубічною характеристикою сили опору $N(x)=C(x) \cdot x=c_0 \cdot x+c_1 \cdot x^3$. Сила опору пружини навантажує плиту 6, а через неї п'єзогенератор 7 з п'єзоелементом 8.

Рівняння руху гідромолота масою m (без врахування вагових характеристик) за принципом Даламбера, запишеться:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + b \cdot \frac{dx}{dt} + C(x) \cdot x = F(t), \quad (1)$$

де b – коефіцієнт затухання, Нс/м; m – зведена в динамічному відношенні маса гідромолота, кг; $F(t)$ – реакція віддачі гідромолота, Н. При стабільному функціонуванні гідромолота допустима апроксимація $F(t)=P \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$, де P – максимальна амплітуда реакції віддачі, Н; ω – частота коливань, рад/с; φ_0 – початкова фаза, рад. Для гідромолота з енергією удару 360 Дж, призначеного для монтажу на прохідницькому щиті для руйнування твердих гірських порід, щільних ґрунтів та валунів [9] зазначені параметри приймають значення: $m=65$ кг; $c_0=1,5 \cdot 10^4$ Н/м; коефіцієнт $c_1=1,5 \cdot 10^7$ Н/м³. В процесі розгону бойка на корпус гідромолота діє сила віддачі від поршневого пневмоакумулятора з діаметром поршня $d = 0.08$ м, з тиском в камері акумулятора (в середньому) $p_a = 1,1$ МПа. Тоді максимальна амплітуда реакції віддачі складає $P=2,16 \cdot 10^3$ Н. При роботі гідромолота з лінійною частотою $f = 5$ Гц, кругова частота складає $\omega=31,416$ рад/с, приймається $\varphi_0=0$.

На рис.2 наведені характеристики складових зведеної жорсткості та сила опору $N(x)$.

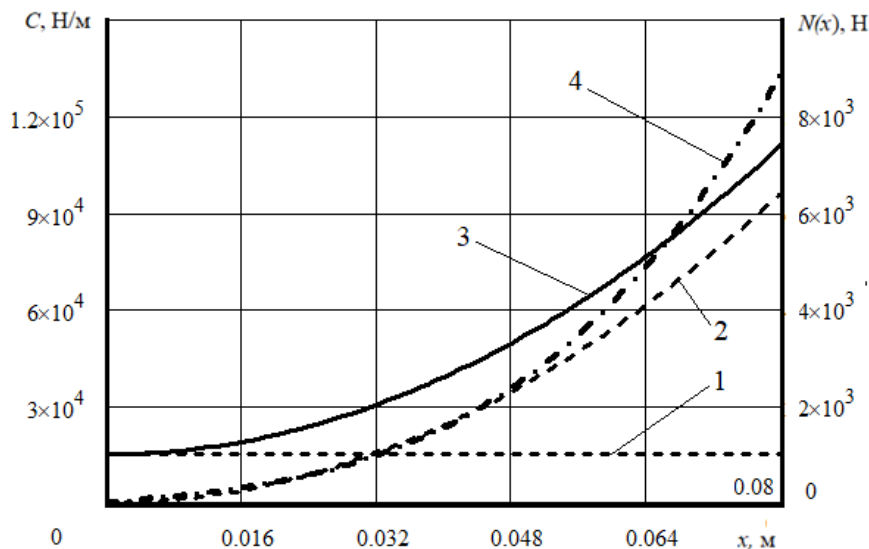


Рисунок 2 – характеристики: 1, 2 – відповідно складові жорсткості $c_0 = 1,5 \cdot 10^4$ Н/м, $c_1 \cdot x^2$, де коефіцієнт $c_1 = 1,5 \cdot 10^7$ Н/м³; 3 – квадратична характеристика зведеної жорсткості $C(x)$; 4 – кубічна характеристика сили опору $N(x)$

Рівняння другого порядку (1) зводиться до двох рівнянь першого порядку

$$\frac{dx}{dt} = X_1, \quad (2)$$

$$\frac{dX_1}{dt} = -\frac{b}{m} \cdot X_1 - \frac{C(X_0)}{m} \cdot X_0 + \frac{F(t)}{m}.$$

Початкові дані для розрахунків в Mathcad: $P=3,595 \cdot 10^4$ Н; максимальне відхилення, яке допустиме в конструкції для стиснення п'єзоелементів, $x_0=0,08$ м; початкова швидкість $v_0=0$; $m=65$ кг; $\omega=31,416$ рад/с; зведена жорсткість характеризується коефіцієнтами

$$c = \begin{pmatrix} 1,5 \cdot 10^4 \\ 1,5 \cdot 10^7 \end{pmatrix},$$

та крайовими умовами: допустиме пружними елементами максимальне переміщення корпусу гідромолота 0,08 м, та початкова швидкість дорівнює нулю, тобто:

$$X_0 = \begin{pmatrix} 0,08 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Праві частини системи (2) утворюють функцію:

$$F(t) = \left[\begin{matrix} X_1 \\ -\frac{b}{m} \cdot X_1 + \frac{-C(X_0)}{m} \cdot X_0 + \frac{P}{m} \cdot \sin(\omega \cdot t) \end{matrix} \right], \quad (3)$$

З параметрами обчислення: за часом в межах до 1 секунди, тобто $t_0=0$, $t_N=1$ з числом ітерацій $N=10000$.

Наближений розв'язок методом Рунге-Кутта реалізується в Mathcad за допомогою функції Rkadapt() у вигляді

$$Z(t, X) = \text{Rkadapt}(X_0, t_0, t_N, N, F).$$

Перетворення в природну форму фізичних величин заміною змінних запишеться:

$$t = Z^{(0)}; \quad X = Z^{(1)}; \quad Y = Z^{(2)}, \quad (4)$$

де t – час, X – переміщення (х, м), Y – швидкість (v, м/с).

На рис.3 наведені графіки залежностей від часу переміщень та швидкості зведеної маси - маси гідромолота.

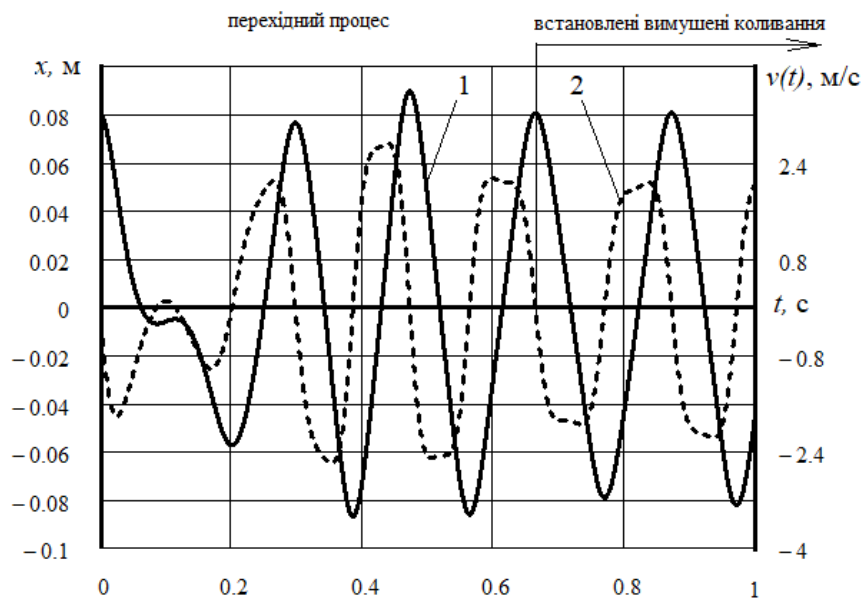


Рисунок 3 – Графіки залежностей від часу: 1 – переміщення, 2 – швидкості зведеної маси

Відповідно кінетична енергія зведеної маси та потенціальна енергія визначиться $T(t) = m \cdot Y^2/2$; $W(t) = X^2 \cdot C(0,04)/2$; де $C(0,04)$ – прийняте для оцінки енергетичного рівня усереднене значення зведеної жорсткості.

Повна енергія коливального процесу від дії реакція віддачі складе $E(T) = T(t) + W(t)$.

На рис.4 наведені енергетичні характеристики коливального процесу в межах часу одна секунда.

Виходячи з значення усередненого значення енергії $E_c = 170$ Дж з урахуванням частоти установлених коливань $f = 5$ Гц в межах часу $t = 1$ с, можна оцінити потужність, частину якої можливо за допомогою установки п'єзогенератора перетворити на електричний струм. Така потужність визначиться приблизною залежністю $U = E_c \cdot f/t$, і в межах однієї секунди складе 850 Вт, а в межах однієї години складе відповідно 3060 кВт, що підтверджує очевидну ефективність застосування п'єзогенераторів.

Рекуперативний амортизаційний пристрій динамічного робочого органу є частиною комплексу, де втрачається значна кількість енергії, що спричинено тертям та розсіюванням енергії у вигляді тепла, і тому саме таку енергію розсіювання доцільно перетворювати в електричну, за допомогою п'єзогенератора, який базується на п'єзоелектричних матеріалах. Основною перевагою п'єзоелектричних матеріалів для

отримання енергії (порівняно з іншими перетворювачами енергії) є велика питома потужність, яку можна отримати за їх допомогою, а також простота використання [8].

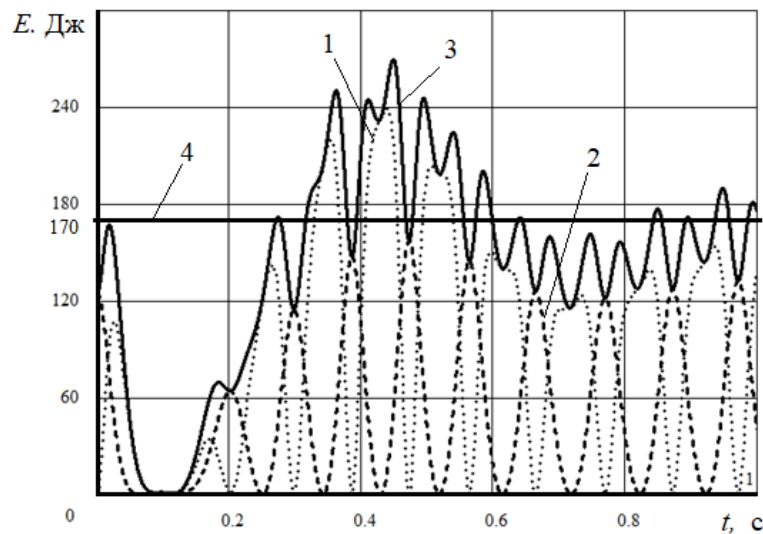


Рисунок 4 – Графіки залежностей від часу: 1 – кінетичної енергії, 2 – потенціальної енергії, 3 – сумарної енергії коливального процесу, 4 – усереднене значення максимальних амплітуд енергії з урахуванням встановленого процесу вимушених коливань

П'єзоелектричні матеріали мають властивість анізотропності, тобто властивості матеріалу залежать від напрямку сил і орієнтації електродів поляризації. П'єзоелектричний ефект перетворює механічний тиск в електричний струм або напругу [9].

В роботі [10] розглянута система збору електричної енергії на основі п'єзокерамічних перетворювачів, який складається з випрямляча, інвертора та понижувального перетворювача для зниження вихідної напруги до діапазону 0, ..., 3,3 В. За цих умов система збору електричної енергії генерує 244 мВт потужності з ефективністю 64%.

П'єзоелектричні приводи поділяються на низьковольтні та високовольтні. Для вибору п'єзокераміки з метою встановлення в рекуперативний амортизаційний пристрій варто порівняння матеріал та розміри, електричні властивості, температурних діапазонів та інші фізичні властивості. Виготовлення прототипів приводів нестандартних розмірів і продуктивності для елементів високої напруги набагато простіше, ніж для елементів низької напруги, і всі види п'єзокераміки можуть бути використані. Низьковольтні елементи використовують більшу кількість тонших активних шарів порівняно з високовольтними елементами, щоб отримати таку саму довжину активного стека. Це призводить до еквівалентно більшої електричної ємності.

В роботі [11] було проведено дослідження під час якого було досліджено матеріал PZT: PZT-4, PZT-8, PZT-5H. Зразки у дослідженні склалися з: чотирьох елементів PZT-матеріалу з пошаровою структурою паралельного з'єднання. Наведено результати залежності напруги на виході від частоти навантаження при величинах навантаження 300, 500, 1000 Н, які наведені у табл. 1, що є характерним для моделі (рис. 1) та отриманих характеристик (рис. 2, 3).

З таблиці видно що напруга матеріалу PZT залежить від частоти навантаження, від 1 Гц до 5 Гц напруга значно зростає, від 5 Гц до 10 Гц напруга зростає повільніше. Основним параметром матеріалу PZT є п'єзоелектричний модуль, який визначає рівень генерованої енергії.

Висновки

1. Амортизаційні пристрої, які встановлені для гасіння коливань, споживають велику кількість механічної енергії, перетворюючи її в тепло, що розсіюється в атмосферу. Таку енергію, без зниження ефективності функціонування, доцільно використовувати, шляхом застосування п'єзогенераторів, з застосуванням п'єзокераміки, для перетворення механічної енергії в електричну.

2. Запропоновано рекуперативний амортизаційний пристрій гідромолота з елементами пружно-дисипативного захисту маніпулятора, базової машини та оператора від коливань за умови лінійних та нелінійних пружних елементів з застосуванням в конструкції системи рекуперації з п'єзогенератором для перетворення енергії коливань в електричну енергію. Рекуперативний амортизаційний пристрій включає гідромолот, направляючу, яка кріпиться до елементів маніпулятора, два паралельно підімкнутих пружних елемента, які мають характеристику зведеної жорсткості у вигляді квадратичної параболи, а нелінійна сила опору пружних елементів характеризується кубічною характеристикою сили опору, яка відповідає вимогам оптимального віброзахисту обладнання.

Таблиця 1 – Напруга в режимі пікового навантаження 300 Н, 500 Н, 1000 Н

Тип	Частота, Гц	Напруга, В	Навантаження, Н
PZT-4	1	9,5	300
PZT-8		7,6	
PZT-5H		5	
PZT-4	5	14,5	
PZT-8		14	
PZT-5H		17	
PZT-4	10	15	
PZT-8		14,8	
PZT-5H		22	
PZT-4	1	15,1	500
PZT-8		12	
PZT-5H		19,5	
PZT-4	5	23	
PZT-8		23	
PZT-5H		27	
PZT-4	10	24,5	
PZT-8		24,5	
PZT-5H		36	
PZT-4	1	31	1000
PZT-8		25	
PZT-5H		17	
PZT-4	5	49	
PZT-8		47	
PZT-5H		57	
PZT-4	10	49,5	
PZT-8		49	
PZT-5H		70	

3. Запропонована методика інтегрування нелінійного диференціального рівняння руху гідромолота при дії реакції віддачі та встановлені кінематичні і енергетичні параметри рекуперативного амортизаційного пристрою. Виходячи з усередненого значення енергії віддачі 170 Дж, з урахуванням частоти установлених коливань 5 Гц, в межах часу 0,...,1 с, обґрунтована оцінка потужності в межах однієї години в 3060 кВт, частину якої можливо, за допомогою установки п'езогенератора, перетворити на електричний струм, що підтверджує очевидну ефективність застосування п'езогенераторів.

4. Наведені рекомендації по вибору елементів п'езогенератора в межах силових характеристик 300,...,1000 Н, з частотою 1, ...,10 Гц з можливістю генерації напруги 5,...70 В.

Список використаної літератури

1. Сліденко В.М. Шевчук С.П. Стабілізація функціонування гірничої машини з імпульсним виконавчим органом: монографія. Київ: НТУУ "КПІ", 2010. 192 с.;
2. Міжнародне енергетичне агентство. Світовий енергетичний огляд 2022. IEA Publications, 2022. 522 с. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary> (дата звернення: 18.06.2023).;
3. МакКеррачер К. Огляд електромобілів 2022. BloombergNEF. URL: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/> (дата звернення: 20.07.2023).;
4. Міжнародне енергетичне агентство. Вступаємо в десятиліття електроприводу?. IEA Publications, 2020. 273 с. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020> (дата звернення: 20.07.2023).
5. Сліденко А. М., Сліденко В. М. Models of hysteresis oscillation damping at pulse loadings. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Т. 1479. С. 012098. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1479/1/012098> (дата звернення: 21.07.2023);
6. Сліденко А. М., Сліденко В. М. The research of discrete and continuous models of impact devices by numerical methods. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Т. 1902, № 1. С. 012024. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012024> (дата звернення: 21.07.2023);
7. Сліденко В. М., Сліденко О. М. Математичне моделювання ударно-хвильових процесів гідроімпульсних систем гірничих машин : монографія. Київ : Політехніка, 2018. 220 с.;
8. Безвесільна О. М. Перетворювачі фізичних величин. Технічні засоби автоматизації : підручник. Житомир : НПО «Пріоритети», 2019. 809 с.;
9. Васьковський Ю. М., Пода М. В. Оцінка енергетичної ефективності систем рекуперативної енергії механічних. Коливань транспортних засобів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2020. № 3 (1357). С. 52–55. URL: <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2020.3.09> (дата звернення: 23.07.2023);

10. Халілі М., Ахмед С., Папагіаннакіс А. Використання п'єзоелектричної енергії для живлення нової системи зважування в русі. *Energy conversion and management*. 2022. № 15. С. 100259.

11. Ceramic Materials (PZT) – Boston Piezo-Optics Inc. *Boston Piezo-Optics Inc.* URL: <https://www.bostonpiezooptics.com/ceramic-materials-pzt> (дата звернення: 25.07.2023).;

A. Novykov¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0002-7597-3013

V. Slidenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-9313-331X

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

NON-LINEAR MODEL OF A RECUPERATIVE SHOCK ABSORBER

This article examines the rationale for using a shock absorber with the function of recuperating mechanical energy into electrical energy. Current trends in the transport industry, regarding the need to use autonomous power sources in the transport infrastructure, are considered. This direction is promising due to the replacement of vehicles with internal combustion engines by electric transport, as well as the need for autonomous power supply of individual nodes and aggregates. The need for autonomy emerges acutely in the conditions of the energy crisis, and at the same time, the lack of energy resources. Special attention is paid to energy recovery using the direct and converse piezoelectric effect. The structure, chemical and physical properties, principle of operation and practical application of piezoceramic transducers, and the possibility of their use as energy harvesters (generators) are considered. The considered scientific and technical problem, which consists in determining the nature of the negative impact of various types of external oscillations on the functioning of structural elements of vehicles, to reduce which various shock absorbers or dampers are used. This work considers the use of a recuperative shock absorber of vibration loads with the use of a piezoelectric energy harvester as a converter of mechanical energy of vibrations into electrical energy. Piezoceramic inserts are used as an energy collector in the design of an automobile hydraulic shock absorber. An assessment of the efficiency of recuperation and conclusions regarding the feasibility of use and implementation are provided. The shock absorbers which are installed to absorb vibrations consume a large amount of mechanical energy, converting it into heat which is dissipated into the atmosphere. This energy, without reducing the efficiency of functioning, can be beneficially used by using a piezoelectric generator with piezoelectric ceramics to convert mechanical energy into electrical energy.

Keywords: non-linear model, numerical methods, recovery, shock absorbing device, hydraulic hammer, power, vibrations, piezoelectric generator.

References

1. V. M. Slidenko and S. P. Shevchuk, Stabilising the operation of a mining machine with a pulse actuator. Kyiv: NTUU "KPI", 2010;
2. International Energy Agency, "World Energy Outlook 2022", IEA Publications, Paris, World Energy Outlook 2022, Oct. 2022. Accessed: June 18, 2023 [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary>;
3. C. McKerracher. "EVO Report 2022 | BloombergNEF | Bloomberg Finance LP." BloombergNEF. <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/> (accessed July 20, 2023);
4. International Energy Agency, "Entering the decade of electric drive?", IEA Publications, Paris, Global EV Outlook 2020, Jun. 2020. Accessed: July 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>;
5. A. M. Slidenko and V. M. Slidenko, "Models of hysteresis oscillation damping at pulse loadings", *J. Physics: Conf. Ser.*, S. 1479, P. 012098, March 2020. Accessed: July 21, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1479/1/012098>;
6. A. M. Slidenko and V. M. Slidenko, "The research of discrete and continuous models of impact devices by numerical methods", *J. Physics: Conf. Ser.*, S. 1902, № 1, P. 012024, May 2021. Accessed: July 21, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012024>;
7. A. M. Slidenko and V. M. Slidenko., Mathematical modelling of shock-wave processes of hydraulic pulse systems of mining machines: monograph. Kyiv: Polytechnic, 2018;
8. O. M. Bezvesilna, Converters of physical quantities. Technical facilities for automation. Zhytomyr: NGO "Priorities", 2019;
9. U. M. Vaskovskyi and M. V. Poda, "Energy efficiency assessment for energy recovery systems of mechanical vibrations of vehicles", *Bull. NTU "Kharkiv Polytech. Institute"*, № 3 (1357), P. 52–55, Feb. 2020. Accessed: July 23, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2020.3.09>;
10. M. Khalili, S. Ahmed and A. T. Papagiannakis, "Piezoelectric Energy Harvesting for Powering a Novel Weigh-in-Motion System", *Energy Convers. Management*: X, P. 100259, June 2022. Accessed: July 25, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100259>;
11. "Ceramic Materials (PZT) - Boston Piezo-Optics Inc." Boston Piezo-Optics Inc. <https://www.bostonpiezooptics.com/ceramic-materials-pzt> (accessed July 25, 2023);

Надійшла: 23.08.2023

Received: 23.08.2023