

Методика моделювання динамічних процесів електромеханічного амортизатору для вагону метрополітену

Б. Г. Любарський, Н. П. Лукашова, О. М. Петренко, Б. Х. Єрціян,
Ю. Д. Ковальчук, Л. В. Овер'янова

Для запропонованої конструкції електромеханічного амортизатору розроблено методика моделювання динамічних процесів. Такі амортизатори мають можливість рекуперувати частину енергії коливань в електричну енергію з подальшою можливістю її використання на рухомому складі. Методика основана на вирішенні рівняння Лагранжу для електромеханічної системи. Особливості моделі є наступними. Модель має вигляд задачі Коши, який сприятливий до вживання при моделюванні процесів роботи амортизатору. Обрані дві узагальнені координати (заряд та переміщення якорю). Ідентифіковані складові частини рівняння Лагранжу. За результатами розрахунку магнітного поля і подальшого регресійного аналізу отримано поліноміальні залежності похідних потокозчеплення по току і лінійному переміщенню якоря, які дають можливість ідентифікувати узагальнену математичну модель електромеханічного амортизатору. Проведено розрахунки магнітного поля методом скінчених елементів дозволили отримати цифрову модель магнітного поля електромеханічного амортизатору. Для отримання її безперервної моделі проведено регресійний аналіз дискретні моделі поля. Про виборі структури апроксимуючої моделі дотримана можливість аналітичного диференціювання часткових похідних по всіх координатах. За результатами моделювання вільних коливань встановлено, що максимальне по модулю значення струму складає 0,234 А, а напруги – 52,9 В. За близько 3 с. проходить процес повного погашення коливань за 4 періоду. Порівняно з базовою конструкцією амплітуда коливань ходу якоря та його швидкості знизилась від 13 до 85 % за перші три періоди, що свідчить про більшу ефективність роботи електромеханічного амортизатору в порівнянні з гідравлічним. Енергія, що рекуперовано, склала 3,3 Дж, а, що розсіяно – 11,5 Дж

Ключові слова: електромеханічний амортизатор, метровагон, поліноми Чебишева, метод скінчених елементів, рівняння Лагранжу

1. Вступ

Основним елементом ходової частини вагонів метро є система ресорного підвішування. Для ефективної роботи ходової частини необхідно наявність у її складі гасників коливань – амортизаторі, які обумовлюють плавність руху вагону. Амортизатори зменшують зовнішніх впливів на екіпажну частину електрорухомого складу нерівностей шляху і зменшення коливань з боку ходової частини, які впливають на елементи електрорухомого складу та рейкову колію.

Динамічні показники амортизаторів обумовлюють безпеку руху та швидкість електрорухомого складу на міському та магістральному рейковому транс-

порті. На плавність руху та динамічні показники рухомого складу впливає в першу чергу тип та конструкція гасники коливань – амортизатору. Найкращі показники з плавністю руху мають пневматичні амортизатори [1], однак їх використання потребує додаткової системи пневматичного живлення – компресорів, що знижують загальну енергоефективність електрорухомого складу.

Альтернативним підходом для підвищення динамічних показників ходових частин електрорухомого складу є застосування електромеханічних амортизаторів [2]. Такі амортизатори мають можливість рекуперувати частину енергії коливань в електричну енергію з подальшою можливістю її використання на рухомому складі.

Світовий досвід створення та використання електромеханічних амортизаторів дає нагоду сподіватися на перспективність їх застосування в ходових частинах метровагонів. Використання електромеханічних перетворювачів в якості амортизаторів сприяє підвищенню ефективності роботи електрорухомого складу в цілому, за рахунок можливості регулювання сили демпфування. При цьому з'являється можливість рекуперації електричної енергії в мережу, що не існує при використанні інших видів амортизаторів [2].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У теперішній час для найбільш поширених в Україні вагонів метро серій Еж, їх модифікацій і 81-717, 81-714 ресорне підвішування візків складається з буксового і центрального [3]. Останнє служить для передачі тягового зусилля від візка кузову вагона, навантаження від ваги кузова на раму візка, а також піддресорує кузов щодо візків, пом'якшуючи поштовхи і удари, що виникають від нерівностей колії і при вписування в криві ділянки під час руху рухомого складу. Для зниження сил тертя, що шкідливо позначаються на надресорних будові при передачі жорстких ударів, в центральному підвішуванні, як і в буксовими підвішування візків, застосовують дворядні циліндричні пружини. За конструкцією, а також за технологією виготовлення і ремонту, вони значно простіше листових еліптичних ресор. Підвішування, виконане з застосуванням циліндричних пружин, більше ніж в півтора рази легше еквівалентного по статичному прогину ресорного підвішування з еліптичними ресорами. Для гасіння коливань, що виникають при русі рухомого складу в центральному підвішуванні візків, застосовують гідравлічні амортизатори.

На підставі проведеного у роботі [4] аналізу систем гасіння коливань на міському рейковому транспорті зазначено, що найбільш поширеним технічним рішенням є фрикційні гасителі коливань, які встановлено у другий ступені ресорного підвішування. Для підтримання належного рівня плавності руху фрикційні гасителі доповнюються гідравлічними демпферами. Найсучасніші конструкції вагонів метро обладнані підвішуванням з використанням пневматичних ресор. Демпфери, які розглянуто вище, дають можливість гасити коливання, що створюються при русі міського електротранспорту, однак регулювання їх параметрів при різній загрузці вагонів неможливо. Застосування пневматичних ресор дає можливість регулювання параметрів демпфування, в залежності від за-

грузки вагону та величини зовнішніх впливів, однак пневматичне підвішування потребує додаткових втрат енергії та потужностей пневматичної системи [2].

В вагонах серії Е-КМ [5] які створені шляхом модернізації вагонів Еж на ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук, Україна) мають нові візки моделі 68-7054 з центральним пневматичним ресорним підвішування яке доповнено гідроамортизаторами.

В роботі [2] проведено аналіз різних типів електромеханічних амортизаторів, які застосовуються на транспортних засобах. Зазначається, що при виборі типу електромеханічного перетворювача амортизатора відзначимо, що з відомих на сьогодні типів – асинхронного, синхронного, електромагнітного та постійного струму, – найбільш гідним варіантом видається останній [6, 7]. У перших двох типах для забезпечення відносно невеликих переміщень необхідні складних напівпровідникові перетворювачі. Ці перетворювачі повинні змінювати напругу і частоту до одиниць герців на виході. Крім того, у цих типів двигунів невисока перевантажувальна здатність. Для третього характерна досить нерівномірна характеристика сили тяги від переміщення, яка близька до гіперболічної. Для електромеханічного амортизатора потрібна постійна тягова [8] (механічна) характеристика що змінюється лише від швидкості руху якоря.

У роботі [9] проведено оцінку ефективності використання електромеханічного амортизатору прямої дії спільно з пружиною на прикладі автомобільної підвіски типу McPherson. Електромеханічний амортизатор складається з багатополосного електрогенератора синхронного типу зі збудженням від постійних магнітів. Зазначається, що амортизатор подібної дії, крім гасіння коливань, може рекуперувати електричну енергію. Процесам рекуперації енергії та збереженні її у бортовому накопичувачі енергії присвячено роботу [10]. Електромеханічні амортизатори можуть стати додатковим джерелом енергії для таких систем, що дозволить підвищити енергоефективність рухомого складу в цілому.

В роботі [2] запропоновано конструкцію електромеханічного амортизатору для вагону метро що наведено на рис. 1.

Однак статичні характеристики амортизатору не дають можливості визначити його динамічні якості, що обумовлюють його спроможність працювати в системах ресорного підвішування. Для визначення динамічних показників амортизатору необхідно розробити його математичну модель як електромеханічної системи.

Моделювання на основі рівнянь узагальненого електромеханічного перетворювача енергії (машина Крона) [11].

При створенні таких моделей приймаються допущення про лінійність магнітної системи, рівномірності (гладкості) повітряного зазору. Ці припущення дозволяють створювати моделі систем з відносно слабкими нелінійностями. Облік локальних насичень, що має місце у лінійних електромеханічних системах, до яких належить електромеханічний амортизатор у станині, при такому підході неможливий. Тому широко використовувані в даний час моделі, які створені на цьому принципі, мають значні похибки. Однак головною перевагою їх є можливість реалізувати програмно-орієнтовані моделі, які дозволяють проводити розрахунки динамічних процесів досить швидко, а на сучасному рівні

техніки навіть близько з реальним часом. Це дозволяє використовувати їх в якості основи для алгоритмів управління мікропроцесорними системами автоматизованих приводів різних типів [12].

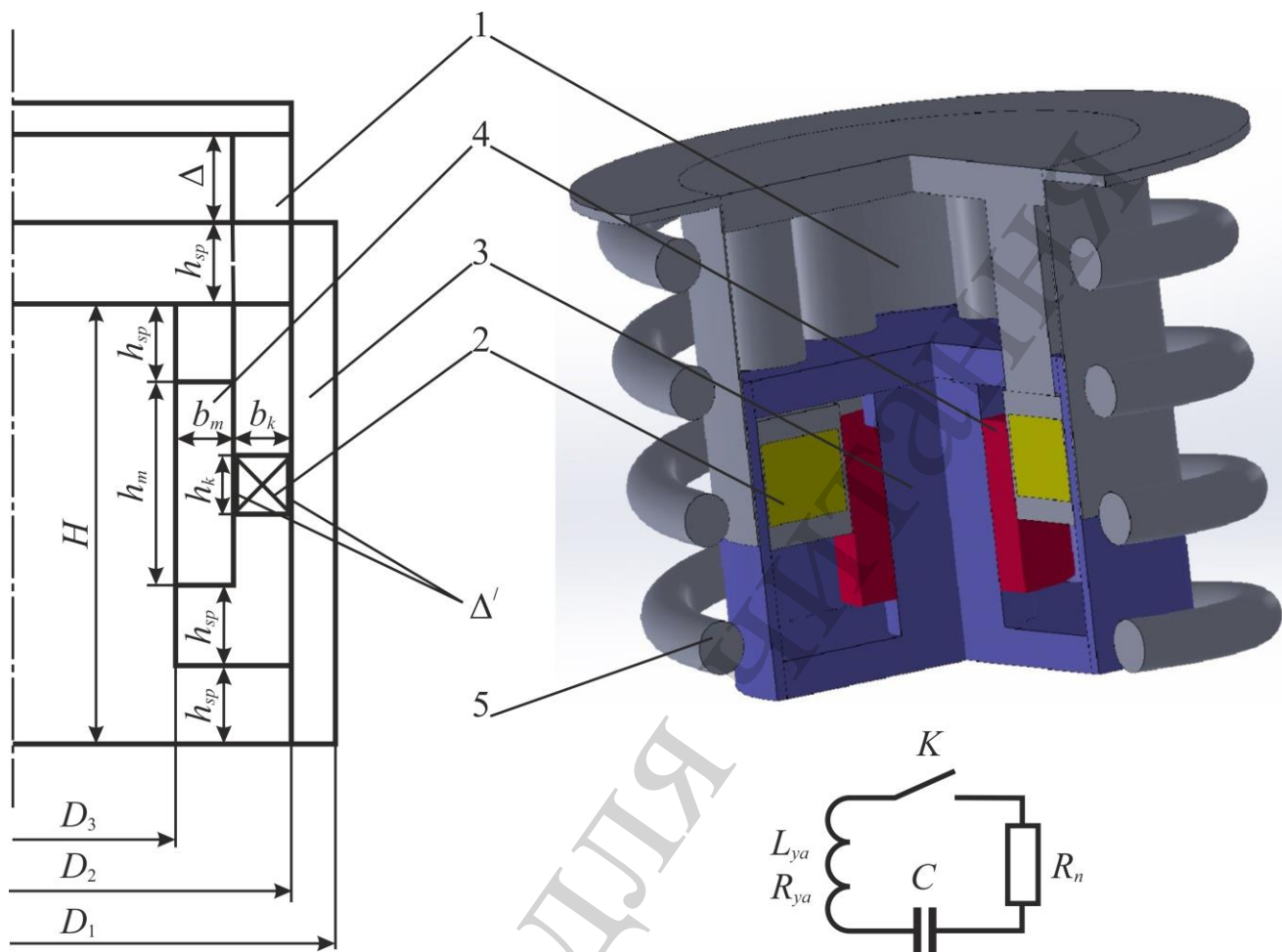


Рис. 1. Електромеханічний амортизатор постійного струму: 1 – якор; 2 – обмотка якорю; 3 – станина; 4 – постійний магніт; 5 – пружина

Визначено, що основні геометричні та електромагнітні показники амортизатору відповідають наведеним у табл. 1.

Другим підходом є складання «коло-польової» моделі електромеханічного перетворювача [13]. При такому підході визначання параметрів електромеханічного амортизатору проводиться за результатами розрахунку магнітного поля [14]. Зазвичай для цього пропонується використання чисельних методів, таких як метод скінченних елементів [15]. Отримані таким чином параметри магнітного поля (потокозчеплення та його похідні – диференційна індуктивність та коефіцієнт при протидіючій електрорушійній сили (ПЕРС) [12, 15]) ідентифікують математичну модель. Ці моделі значно точніше описують процеси в електромеханічному перетворювачі, проте машинний час для розрахунків значно збільшується. Порядок таких моделей можна оцінити вигляді системи, в якій використовується десятки, сотні тисяч нелінійних алгебраїчних рівнянь, які в

свою чергу ідентифікують диференційні рівняння, що складають математичну модель перетворювача.

Таблиця 1

Основні характеристики електромеханічного амортизатору згідно рис. 1 [2]

Параметр	Величина	Примітки
F_{dem}	2000 Н	Номінальна електромагнітна сила на якорі амортизатора
V_{dem}	0,08 м/с	Номінальна швидкість якоря амортизатора
Δ	0,08 м	Максимальний хід амортизатора,
H_c	$9,5 \cdot 10^5$ А/м	Коерцитивна сила постійного магніту
B_{ost}	1,05 Тл	Остаточна індукція постійного магніту
H_{max}	0,3 м	Максимальна висота ярма амортизатора
h_{sp}	0,035 м	Висота спинки ярма
b_k	0,093 м	Ширина котушки
h_k	0,081 м	Висота котушки
D_1	0,429 м	Зовнішній діаметр амортизатору
D_2	0,407 м	Внутрішній діаметр ярма
D_3	0,138 м	Внутрішній діаметр магніту
h_m	0,161 м	Ширина магніту
b_m	0,04 м	Висота магніту
W	3348	Кількість витків
H	0,299 м	Висота ярма амортизатора
I	2,227 А	Номінальний струм обмотки амортизатору
E	89,8 В	Номінальна ЕРС амортизатора

Тому слід вважати за доцільне розробку підходу, що дозволить створити математичну модель електромеханічного амортизатору, порядок якої буде значно нижче порядку моделі, запропонованої в [14]. Особливістю такої моделі може бути врахування локальних насичень та нелінійності електромеханічного перетворювача. Як впливає з проведеного аналізу сучасного стану проблематики, це дозволить вирішити частину проблеми, що пов'язана з отриманням динамічних показників таких як: час та ефективність гасіння коливань, а також можливість створення узагальненої математичної моделі ресорного підвішування вагону метро.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є створення методики моделювання динамічних процесів електромеханічного амортизатору для вагону метрополітену. Це дозволить визначити динамічні показники електромеханічного амортизатору.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– визначити основні положення математичної моделі електромеханічного амортизатору;

- виконати ідентифікацію параметрів математичної моделі електромеханічного амортизатору для метровагону;
- провести моделювання та аналіз роботи амортизатора при вільних коливаннях для підтвердження адекватності та роботоспроможності моделі.

4. Моделювання динамічних процесів електромеханічного амортизатору метровагону

В дослідження прийнято наступні припущення. Запасена електромагнітна енергія, яка використовується для опису машини, розглядається лише як енергія поля нульового порядку, тобто енергія статичного магнітного поля.

Енергія електростатичного поля сконцентрована лише в конденсаторі.

4.1. Основні положення методики

Оберемо наступні узагальнені енергетичні параметри амортизатору: узагальнена координата q_k , узагальнена швидкість q'_k , узагальнений імпульс сили p_k , узагальнена сила f_k . Для механічної системи взагалі не виникає сумнівів, що розуміти під координатою, швидкістю, силою або імпульсом. Інша ж ситуація виникає при виборі електричних координат. [16].

Збережена електрична енергія електромеханічної системи складається з потенційної енергії і кінетичної коенергії. Це означає, що якщо визначити заряд q як узагальнену координату q_k , то електрична збережена енергія буде визначена як потенційна.

Представимо амортизатор у вигляді системи, що має одну електричну $q_1=q$ та одну механічну координату $q_2=x$ (рис. 2). Для підвищення швидкодії амортизатору у електричне коло включено конденсатор С. Створене таким чином електричне коло L-R-C являє собою резонансний контур, який настроєно на частоту власних коливань кузова метровагону.

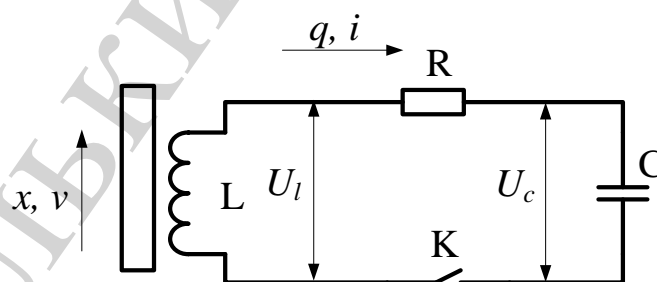


Рис. 2. Електромеханічна схема амортизатору

Якщо розглядається дія неконсервативної сили Q_k по k -й координаті q_k спільно з консервативними силами системи, то згідно з принципом Д'Аламбера при динамічній рівновазі сума всіх сил, включаючи неконсервативне, повинна дорівнювати нулю. Тому рівняння Лагранжа має такий вигляд [16]

$$\frac{\partial L}{\partial q_k} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{q}_k} \right) + Q_k = 0, \quad (1)$$

де L – силова функція Лагранжа, F – релеєва функція, яка описувала втрати в системі.

Після визначення узагальнених координат обираємо силову функцію Лагранжа або лагранжіан, $L(q, \dot{q}, t)$, який будемо використовувати для отримання рівнянь руху. Лагранжіан визначається як різниця між кінетичною коенергією T і потенційною енергією V , тобто

$$L = T - V. \quad (2)$$

Через узагальнені змінні запишемо вирази для кінетичної коенергії і потенційної енергії для консервативної частини системи за наступними рівняннями.

Запишемо вирази для кінетичної коенергії і потенційної енергії для консервативної частини системи по рівняннях (3) і (4) для електромеханічного амортизатору:

$$T = \frac{1}{2} \cdot Mv^2 + \int_0^i \Psi(i, x) di, \quad (3)$$

$$V = -\frac{1}{2} k(x + x_n)^2 - \frac{1}{2} Cq^2. \quad (4)$$

де M , v – маса, що коливається, та швидкість якорю, яка дорівнює \dot{x} , Ψ – поточкеплення обмотки, C , q – ємність та заряд конденсатора, $k(x + x_n)$ – сила опору пружини, яка паралельно включена з амортизатором с жорсткістю k , що з початку зжато на x_n метрів.

Консервативний лагранжіан по (2) дорівнює

$$L = \frac{1}{2} \cdot Mv^2 + \int_0^i \Psi(i, x) di, -\frac{1}{2} k(x + x_n)^2 - \frac{1}{2} Cq^2. \quad (5)$$

Запишемо Релеєву функцію втрат

$$F = \frac{1}{2} (Ri^2 + \alpha v^2), \quad (6)$$

де α – коефіцієнт механічного демпфування, R – сумарний електричний опір обмотки амортизатору та навантаження.

Підставляючи вирази (5) та (6) в (1) і взявши відповідні похідні отримаємо: – для електричних координат рівняння виду:

$$-Cq - \frac{d}{dt}(\Psi(i, x)) - Ri = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\int_0^i \Psi(i, x) di}{\partial x} - k(x + x_n) - \frac{d}{dt}(Mv) - \alpha v + F_g = 0. \quad (8)$$

Вираз $\frac{\int_0^i \Psi(i, x) di}{\partial x} = F_e$ визначає електромагнітну силу, яку створює амортизатор.

Оскільки в потокозчеплення Ψ – це складна функція, яка залежить від всіх координат, то загальну похідну $\frac{d\Psi}{dt}$, можна уявити в такому вигляді

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{\partial\Psi}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial\Psi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt}. \quad (9)$$

Враховуючи, що $U_c = -Cq$, запишемо рівняння (7) у вигляді

$$U_c - \frac{\partial\Psi}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} - \frac{\partial\Psi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} - Ri = 0. \quad (10)$$

Вирази $L_d = \frac{\partial\Psi}{\partial i}$ та $K_d = \frac{\partial\Psi}{\partial x}$ визначають диференціальну індуктивність та коефіцієнт при ПЕДС [17], які можливо ідентифікувати за результатами розрахунків магнітного поля.

Загалом вираз (7) можливо представити у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{U_c - i \cdot R - K_d \cdot v}{L_d}, \\ \frac{dU_c}{dt} = -\frac{i}{C}. \end{cases} \quad (11)$$

Враховуючи, що $F_g = Mg$, де g – прискорення вільного падіння, а M – приведенні маса кузова, вираз (8) можливо перетворити до вигляду

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_e - mg - k(x + x_n) - \alpha v}{M}. \quad (12)$$

Додавши до (11) та (12) рівняння зв'язку $\frac{dx}{dt} = v$ отримаємо узагальнену математичну модель електромеханічного амортизатору у вигляді задачі Коші

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{U_c - i \cdot R - K_d \cdot v}{L_d}, \\ \frac{dU_c}{dt} = -\frac{i}{C}, \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_e - mg - k(x + x_n) - \alpha v}{M}, \\ \frac{dx}{dt} = v. \end{cases} \quad (13)$$

Математична модель (13) має вигляд, який спритний до вживання при моделювання процесів роботи амортизатору, але для її вжитку необхідно ідентифікувати параметри моделі – диференціальну індуктивність та коефіцієнт при ПЕДС.

4. 2. Ідентифікація параметрів математичної моделі електромеханічного амортизатору метровагону

Основні енергетичні параметри електромеханічного амортизатору представлені в табл. 1, а його схема на рис. 1.

Особливостями амортизатору є, по-перше, те, що магнітне поле в робочій зоні носить аксіально-симетричний характер; по-друге, залежність потокозчеплення в робочому циклі змінюється і носить неперіодичний характер.

Як і в [16], ідентифікацію параметрів математичної моделі (13) пропонується проводити з використанням комплексу цифрових експериментів, що являють собою розрахунок магнітного поля чисельними методами, з подальшою апроксимацією результатів [17]. На рис. 3 представлена розрахункова область магнітного поля.

Прийняті наступні припущення:

- магнітне поле в області лінійного електромеханічного перетворювача приймається аксіально-симетричним щодо осі амортизатору;
- магнітне поле обмежено кулястою областю, яка при розрахунку магнітного поля представлена півколом (рис. 3).

Для розрахунку магнітного поля пропонується використовувати програмний комплекс FEMM [15]. Матеріал станини – сталь Ст 3, обмотки – електротехнічна мідь; вихрові струми і гістерезис не враховуються.

Для отримання сімейства тягових характеристик двигуна, на мові lua була написана програма-скрипт, що автоматично змінює координату x і магніторушійну силу (MPC) обмотки – iW .

При проведенні цифрового експерименту переміщення якоря x варіюється від 0,1 до 80,1 мм з кроком 5 мм, а величина MPC в межах від –22368 А до

22368 А з кроком 2485,3 А. Межі варіювання вибираються виходячи з граничних значень цих величин в досліджуваній системі.

На кожному кроці розрахунку проводився автоматичний розрахунок електромагнітного поля амортизатору (рис. 4), визначається величина тягової сили і потокозчеплення для поточних значень струму і зазору. Величина сили вимірювалася шляхом інтегрування по контуру якоря амортизатора, а значення потокозчеплення – по поперечному перерізі його обмотки. Використані підходи викладені в [15].

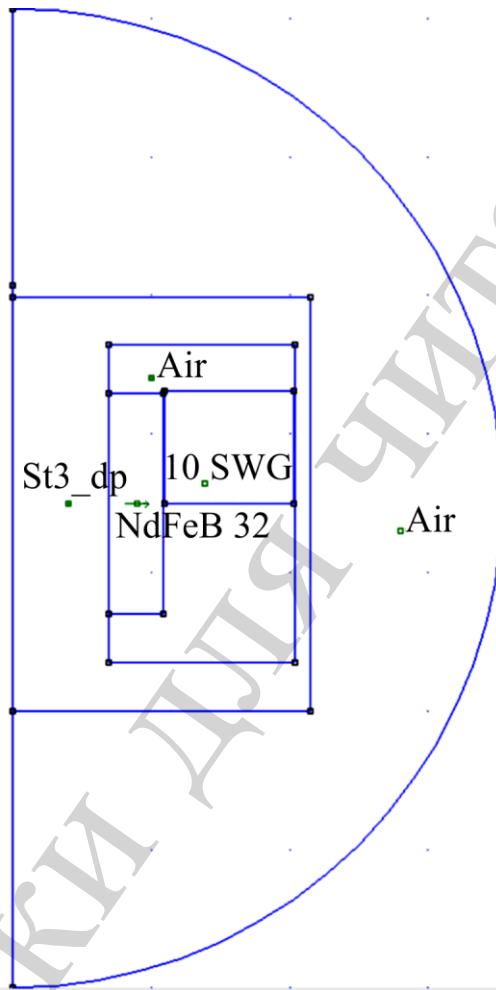


Рис. 3. Розрахункова область магнітного поля

Проведені розрахунки дозволили отримати цифрову модель магнітного поля електромеханічного амортизатору, що наведена. Однак ця модель дискретна. Для отримання безперервної моделі необхідно проведення регресійного аналізу дискретні моделі.

Про виборі структури апроксимуючої моделі необхідно, щоб вона мала можливість аналітичного диференціювання часткових похідних по всіх координатах. Спираючись на рекомендації [14], апроксимація потокозчеплення фази має вигляд

$$\Psi(i, x) = \sum_{j=0}^J \sum_{k=0}^K \left(AL_{jk} (MJ \cdot i + ZJ)^j (MK \cdot x + ZK)^k \right), \quad (14)$$

де AL_{jk} – коефіцієнт регресії полінома, що апроксимує потокозчеплення; MJ , MK – масштабні коефіцієнти по току і зазору відповідно; ZJ , ZK – зміщення по току і зазору відповідно; J , K – ступеня полінома по току і зазору, що апроксимує відповідно.

Для визначення коефіцієнтів полінома, що апроксимує, пропонується використовувати метод на основі поліномів Чебишева на безлічі рівновіддалених точок [14, 17].

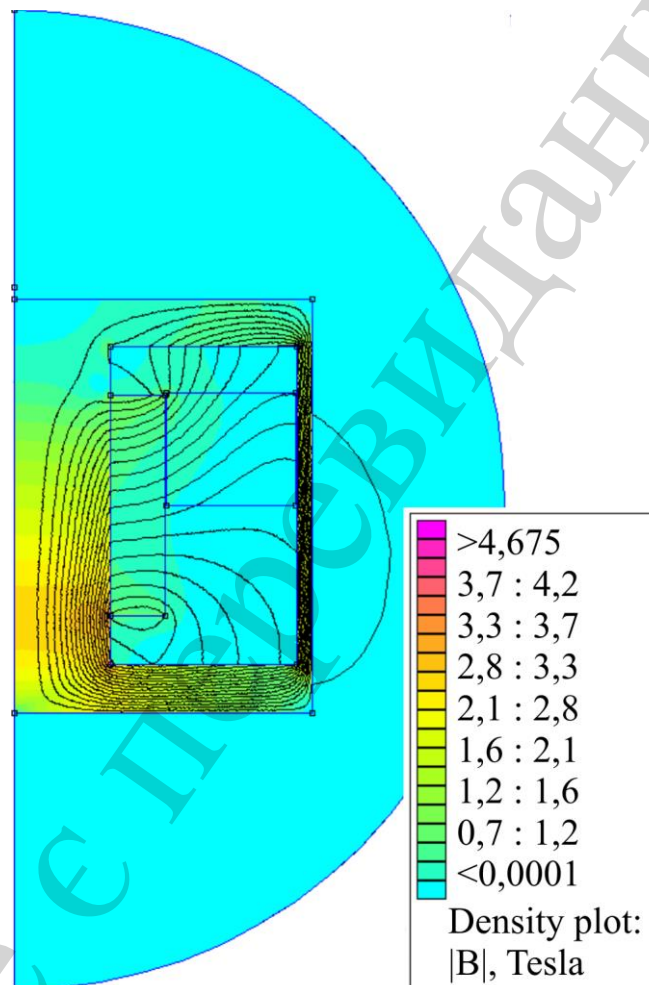


Рис. 4. Результати розрахунку магнітного поля

Провівши аналітичне диференціювання по току (14), отримаємо диференціальну індуктивність

$$L_d = \frac{\partial \Psi(i, x)}{\partial i} = \sum_{j=0}^J \sum_{k=0}^K \left(AL_{jk} j MJ (MJ \cdot i + ZJ)^{j-1} (MK \cdot x + ZK)^k \right). \quad (15)$$

Провівши аналітичне диференціювання по ходу якоря (14), отримаємо коефіцієнт при ПЕДС

$$K_d = \frac{\partial \Psi(i, x)}{\partial x} = \sum_{j=0}^J \sum_{k=0}^K \left(AL_{jk} k MK (MJ \cdot i + ZJ)^j (MK \cdot x + ZK)^{k-1} \right). \quad (16).$$

Електромагнітна сила апроксимована поліномом, які мають аналогічний з (14) вид

$$F_e = \sum_{j=0}^{JF} \sum_{k=0}^{KF} \left(AF_{jk} (MJF \cdot i + ZJF)^j (MKF \cdot N + ZKF)^k \right), \quad (17)$$

де AF_{jk} – коефіцієнт регресії полінома, що апроксимує силу; MJF, MKF – масштабні коефіцієнти по току і зазору відповідно; ZJF, ZKF – зміщення по току і зазору відповідно; JF, KF – ступеня полінома по току і зазору, що апроксимує, відповідно.

Допустиме максимальне відхилення (3,4 %) апроксимування потокозчеплення досягається при мінімальних значеннях ступенів полінома $J=4$ и $K=9$, а функції сили (2,8 %) – $JF=7$ і $KF=9$.

Графіки залежностей F_e , Ψ , L_d та K_d приведені на рис. 5–8 відповідно.

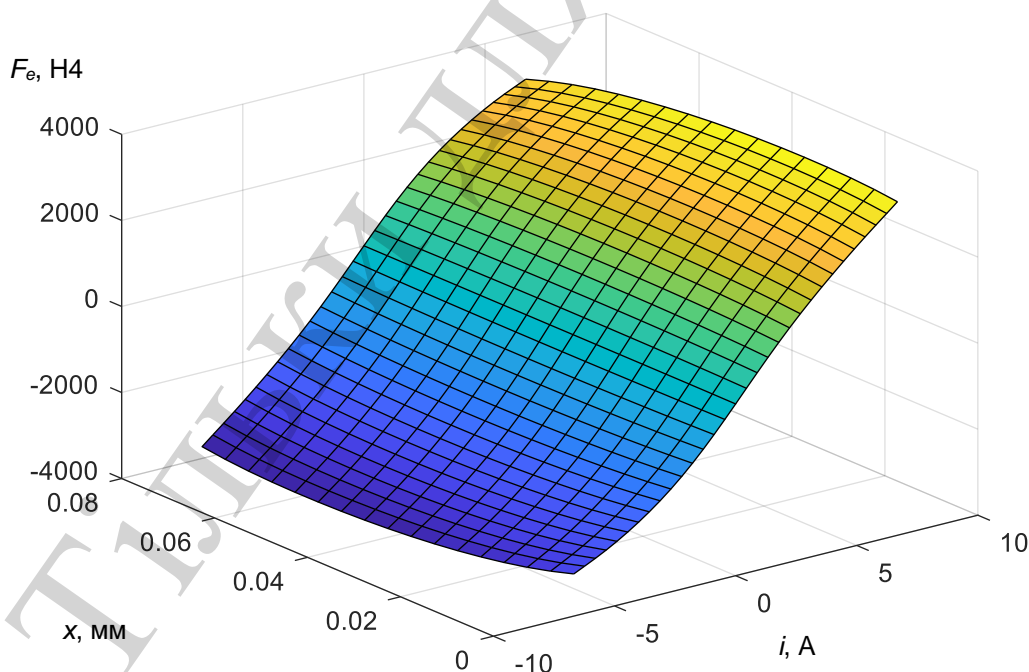


Рис. 5. Залежність електромагнітної сили від переміщення та струму обмотки

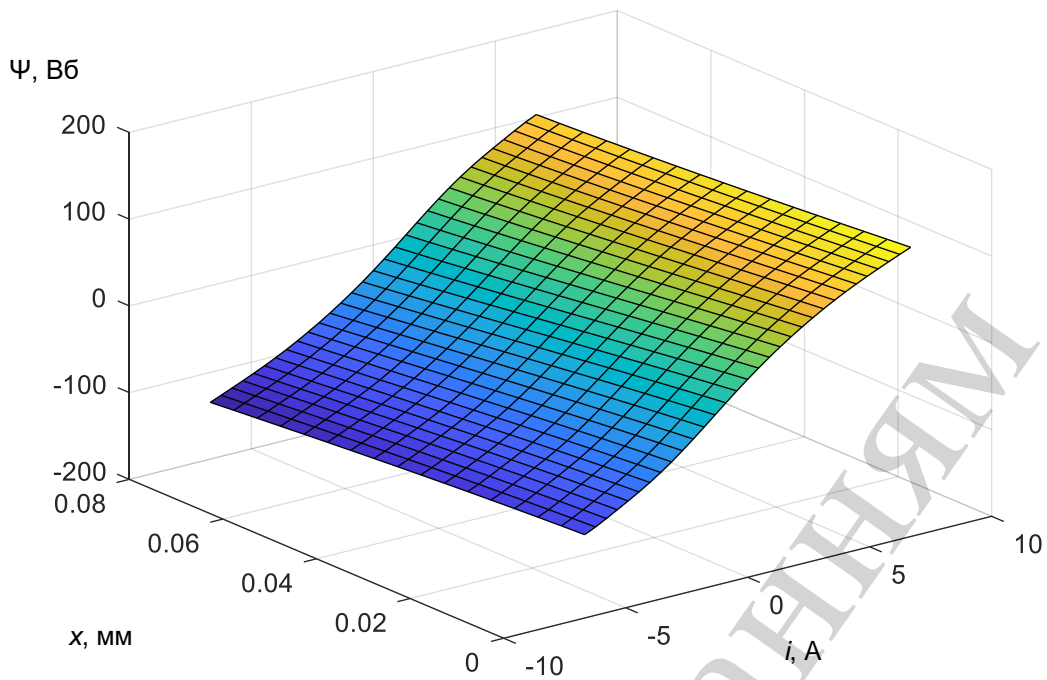


Рис. 6. Залежність потокозчеплення котушки якоря від переміщення та струму обмотки

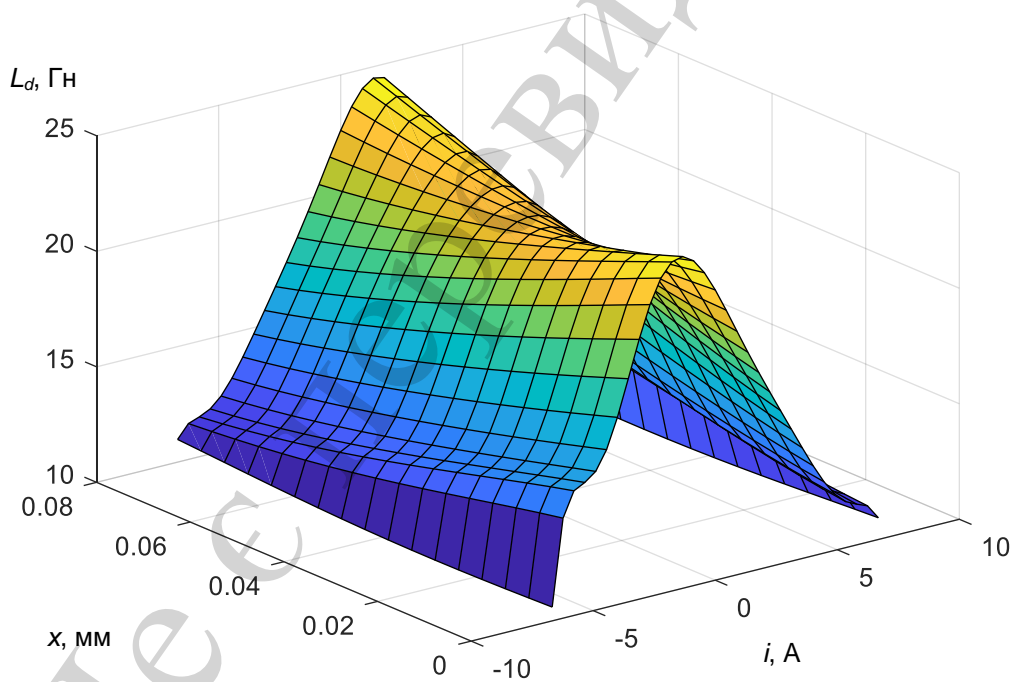


Рис. 7. Залежність диференційної індуктивності від переміщення та струму обмотки

Таким чином, за результатами розрахунку магнітного поля і подальшого регресійного аналізу отримано поліноміальні залежності похідних потокозчеплення по току і лінійному переміщенню якоря, які дають можливість ідентифікувати узагальнену математичну модель електромеханічного амортизатору.

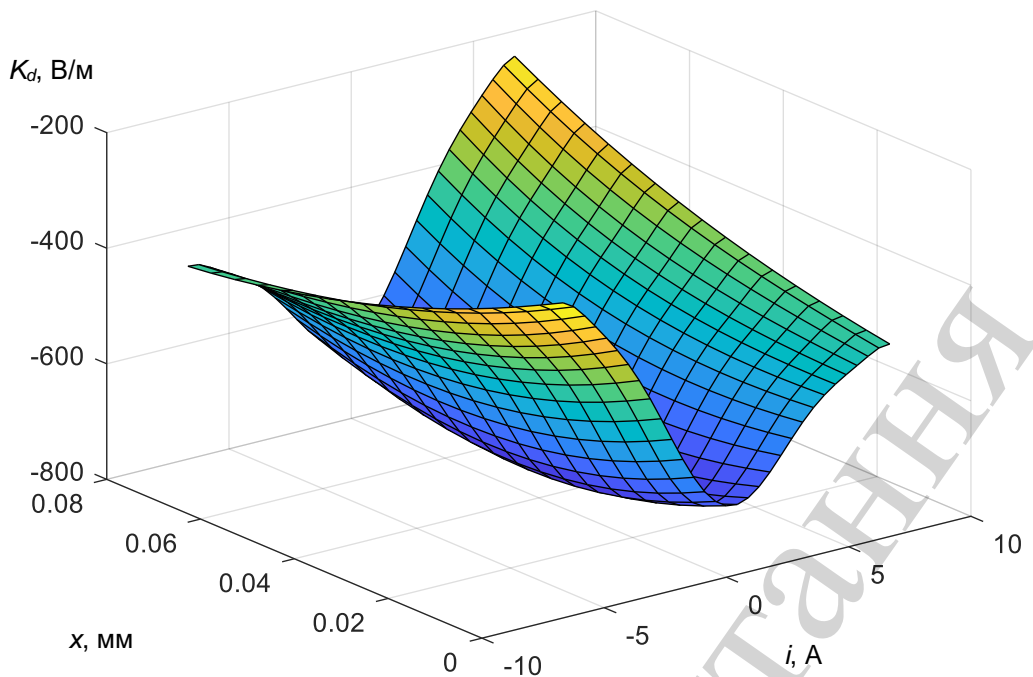


Рис. 8. Залежність коефіцієнту при ПЕРС від переміщення та струму обмотки

5. Обговорення результатів моделювання роботи амортизатора на прикладі вільних коливань

Для електромеханічної системи – електроамортизатор – розроблено математичну модель, яка складається з чотирьох диференційних рівнянь та враховує параметри, як електромеханічного перетворювача диференціальну індуктивність та коефіцієнт при ПЕРС, так і параметри механічної частини – жорсткість пружини та масу, що коливається, а також параметри електричної частини системи ємності та сумарний опір навантаження. Модель викладено у класичному вигляді задачі Коши, що дозволяє вирішити її стандартними чисельними методами рішення систем диференційних рівнянь (в роботі для моделювання вільних коливань використано метод Рунге-Кутти 3–4 порядку).

При ідентифікації параметрів електромеханічного амортизатору визначено ступенів поліномів потокозчеплення та функції сили ($J=4$, $K=9$, $JF=7$ та $KF=9$), які дозволяють досить адекватно з максимальним відхиленням 3,4 % та 2,8 % відтворити їх безперервний вид. Як видно з рис 5, електромагнітна сила, яку створює амортизатор, близька до сталої в залежності від переміщення (максимальне відхилення складає не більш 9,2 % від середнього значення сили при незмінності струму обмотки). Ці зміни обумовлено зростанням потоків розсіяння. Електромагнітна сила пропорційно зростає від струму обмотки. Коефіцієнт пропорційності зменшується в зв'язку зі збільшенням насичення магнітної системи електроамортизатору при більших значеннях струму обмотки. Характер змін потокозчеплення близький по характеру до електромагнітної сили (рис. 6). Завдяки цьому диференціальна індуктивність (рис. 7) та коефіцієнт при ПЕРС (рис. 8) мають виключно нелінійний вигляд. Диференціальна індуктивність максимальна при нульовому значенні струму обмотки, що обумовлено мінімумом

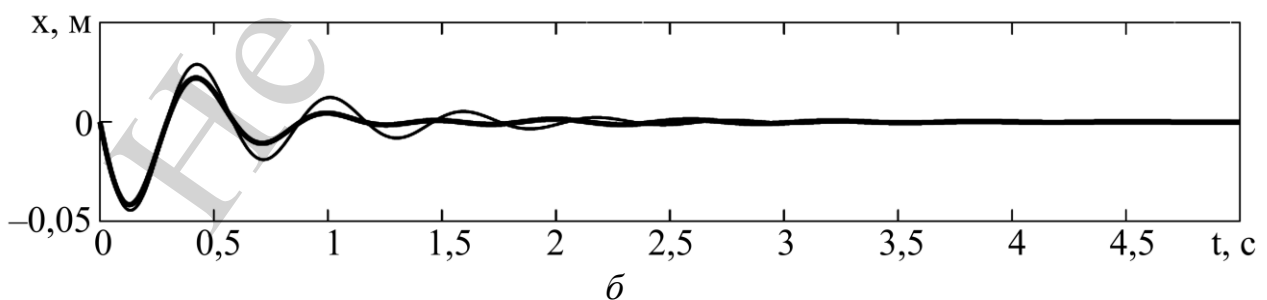
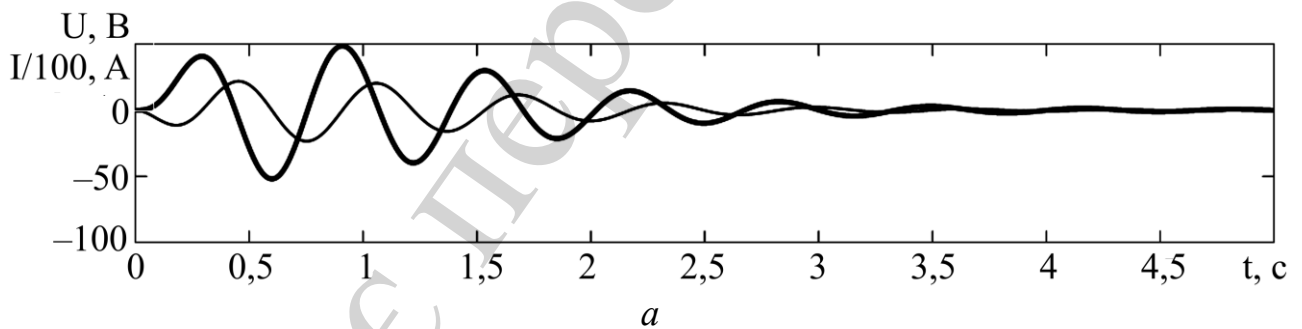
насичення магнітної системи. Коефіцієнт при ПЕРС (рис. 8) в усій робочій області має від'ємне значення, що обумовлює створення ПЕРС, яка в свою чергу створить струм та електромагнітну силу, яка протидіє напрямку руху якоря (створює амортизацію).

Відтворені залежності електромагнітної сили, диференціальної індуктивності та коефіцієнта при ПЕРС, які ідентифікують параметри математичної моделі, мають виключно нелінійний вигляд. Тому відтворення їх за допомогою комплексу цифрових експериментів з використанням методу скінчених елементів з подальшим регресійним аналізом є виправданим.

Для проведення аналізу результатів роботи електромеханічного амортизатору найбільш раціонально використовувати аналіз вільних коливань системи. Це обумовлено дуже складним характером вимушених коливань які обумовлені ходовою частиною усього метровагону.

$$\begin{cases} i(0) = 0, \\ u(0) = 0, \\ v(0) = 0, \\ x(0) = 4,5 \cdot 10^2. \end{cases} \quad (18)$$

Для порівняльного аналізу результатів роботи з базовою конструкцією (гідралічний амортизатор) було проведено порівняльне моделювання режимів роботи. Результати моделювання наведено на рис. 9



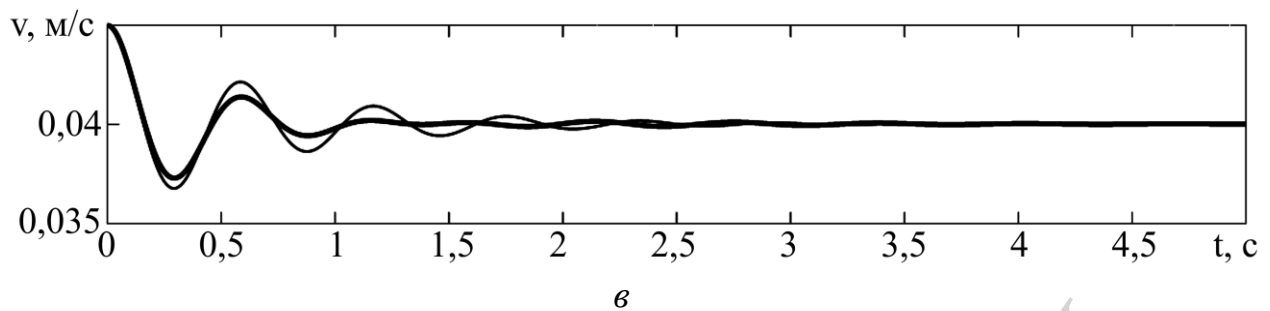


Рис. 9. Результати моделювання режимів роботи амортизатору: *a* – напруга та струм амортизатора (тонка та жирна лінія відповідно); *б* – переміщення якоря амортизатора базової та розробленої конструкції (тонка та жирна лінія відповідно); *в* – швидкість якоря амортизатора базової та розробленої конструкції (тонка та жирна лінія відповідно)

Аналіз моделювання вільних коливань показує, що максимальною за амплітудою є друга амплітуда – друге від’ємне значення, що створюється близько 0,45 до 0,55 с з початку процесу (рис. 9). Це обумовлено індуктивністю обмотки амортизатора. Вже починаючи з першого коливання виникає можливість гасіння коливань, виникає струм та напруга в обмотці амортизатора.

За результатами моделювання встановлено, що максимальне по модулю значення струму складає 0,234 А, а напруги – 52,9 В. За близько 3 с. проходить процес повного погашення коливань за 4 періоду. Порівняльно з базовою конструкцією амплітуда коливань ходу якоря та його швидкості знизилась від 13 до 85 % за перші три періоди, що свідчить про більшу ефективність роботи електромеханічного амортизатору в порівнянні з гідравлічним. Енергія, що рекуперовано, склала 3,3 Дж, а, що розсіяно – 11,5 Дж.

Оригінальність отриманої математичної моделі, в першу чергу, обумовлюється поєднанням досить точних та враховуючих геометрію магнітної системи розрахунків магнітного поля методом скінчених елементів, з класичним методом вирішення диференціального рівняння Лагранжу для електромеханічної системи, яку покладено в основу методики. По друге, особливу увагу стоїть приділити оригінальності конструкції самого амортизатору, який на відміну від тих, що розглядалися у огляді, має дуже просту конструкцію (один постійний магніт), що значно спрощує збірку амортизатора.

Подальшим розвитком математичної моделі може бути врахування витрат у сталі магнітопроводу електроамортизатору за рахунок введення додаткових еквівалентних електричних кіл.

Вигляд математичної моделі у виді задачі Коши дозволяє використовувати її в якості складової моделей більшого порядку, наприклад моделі візка вагону метро, в цілому. Такі моделі дозволяють отримати коефіцієнти плавності ходу та динаміки вагону метро.

6. Висновки

1. На підставі вирішення рівняння Лагранжу для електромеханічної системи створено методику моделювання електромеханічного амортизатору на підставі математичної моделі. Особливості моделі є наступні. Модель має вигляд задачі Коши, який сприятливий до вживання при моделюванні процесів роботи амортизатору. Обрані дві узагальнені координати (заряд та переміщення якорю). Ідентифіковані складові частини рівняння Лагранжу.

2. За результатами розрахунку магнітного поля і подальшого регресійного аналізу отримано поліноміальні залежності похідних потокозчеплення по току і лінійному переміщенню якоря, які дають можливість ідентифікувати узагальнену математичну модель електромеханічного амортизатору.

3. За результатами моделювання вільних коливань встановлено, що максимальне по модулю значення струму складає 0,234 А, а напруги – 52,9 В. За близько 3 с. проходить процес повного погашення коливань за 4 періоду. Порівняльно з базовою конструкцією амплітуда коливань ходу якоря та його швидкості знизилась від 13 до 85 % за перші три періоди, що свідчить про більшу ефективність роботи електромеханічного амортизатору в порівнянні з гідравлічним. Енергія, що рекуперировано, склала 3,3 Дж, а, що розсіяно – 11,5 Дж.

Література

1. Сердобинцев, Е. В., Ёе Вин Хан (2013). Вертикальные колебания метровагона с пневмоподвешиванием. Мир транспорта, 2, 78–84.
2. Liubarskyi, B., Lukashova, N., Petrenko, O., Pavlenko, T., Iakunin, D., Yatsko, S., Vashchenko, Y. (2019). Devising a procedure to choose optimal parameters for the electromechanical shock absorber for a subway car. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (5 (100)), 16–25. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176304>
3. Сердобинцев, Е., Званцев, П., Ёе Вин Хан (2014). Выбор параметров метровагона с пневморессорами. Мир транспорта, 1, 34–41.
4. Лукашова, Н. П., Павленко, Т. П., Любарський, Б. Г., Петренко, О. М. (2018). Аналіз конструкцій ресорних підвішувань рейкового міського електро рухомого складу. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 5 (51), 65–68. doi: <https://doi.org/10.26906/sunz.2018.5.065>
5. Пассажирское вагоностроение. Каталог. Крюковский вагоностроительный завод. URL: <http://www.kvsz.com/images/catalogs/tsn.pdf>
6. Kolpakhch'yan, P. G., Shcherbakov, V. G., Kochin, A. E., Shaikhiev, A. R. (2017). Sensorless control of a linear reciprocating switched-reluctance electric machine. Russian Electrical Engineering, 88 (6), 366–371. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068371217060086>
7. Forster, N., Gerlach, A., Leidhold, R., Buryakovskiy, S., Masliy, A., Lyubarskiy, B. G. (2018). Design of a Linear Actuator for Railway Turnouts. IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. doi: <https://doi.org/10.1109/iecon.2018.8591471>
8. Сергиенко, А. Н. (2013). Математическая модель колебаний в ходовой системе автомобиля с электромагнитным демпфированием. Вісник Національ-

ного технічного університету "ХПІ". Сер.: Транспортне машинобудування, 31, 86–93.

9. Gysen, B. L. J., van der Sande, T. P. J., Paulides, J. J. H., Lomonova, E. A. (2011). Efficiency of a Regenerative Direct-Drive Electromagnetic Active Suspension. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60 (4), 1384–1393. doi: <https://doi.org/10.1109/tvt.2011.2131160>

10. Sulym, A. O., Fomin, O. V., Khozia, P. O., Mastepan, A. G. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 79–87. doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>

11. Kolpakhchyan, P. G., Shcherbakov, V. G., Kochin, A. E., Shaikhiev, A. R. (2017). Mathematical simulation and parameter determination of regulation of a linear electrical reciprocating machine. *Russian Electrical Engineering*, 88 (5), 259–264. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068371217050054>

12. Kolpakhchyan, P., Zarifian, A., Andruschenko, A. (2017). Systems Approach to the Analysis of Electromechanical Processes in the Asynchronous Traction Drive of an Electric Locomotive. *Studies in Systems, Decision and Control*, 67–134. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-51502-1_3

13. Рымша, В. В., Радимов, И. Н., Гулый, М. В., Кравченко, П. А. (2010). Усовершенствованная цепно-полевая модель вентиляльно-реактивного двигателя. *Електротехніка і Електромеханіка*, 5, 24–26.

14. Buriakovskiy, S., Liubarskiy, B., Maslii, A., Pomazan, D., Panchenko, V., Maslii, A. (2019). Mathematical Modelling of Prospective Transport Systems Electromechanical Energy Transducers on Basis of the Generalized Model. 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). doi: <https://doi.org/10.1109/acitt.2019.8779998>

15. Meeker, D. (2013). Finite Element Method Magnetics: Magnetics Tutorial. URL: <http://www.femm.info/wiki/MagneticsTutorial>

16. Kolpakhch'yan, P. G., Shcherbakov, V. G., Kochin, A. E., Shaikhiev, A. R. (2017). Sensorless control of a linear reciprocating switched-reluctance electric machine. *Russian Electrical Engineering*, 88 (6), 366–371. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068371217060086>

17. Riabov, I., Liubarskiy, B. (2018). Determination of Phase Flux-Linkage of Flux Switching Motor with Spatial Magnetic System. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). doi: <https://doi.org/10.1109/icieam.2018.8728773>