

УДК 629.433.4.02

Тетяна Павленко, д.т.н.
(професор кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова);
Наталя Лукашова
(асистент кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО АМОРТИЗАТОРА ХОДОВОЇ ЧАСТИНИ ТРАМВАЯ

Показані технічні рішення, що сприяють підвищенню безпеки руху трамваїв, плавності їх ходу та економічної ефективності пасажирських перевезень. Розроблена математична модель розрахунку параметрів електромеханічного амортизатора ходової частини трамвая та визначені його характеристики.

Ключові слова: *електромеханічний амортизатор, електромеханічний перетворювач, ресорне підвищення, ходова частина, пневматичні ресори.*

Вступ. Розвиток електротранспорту міст є загальносвітовим трендом. Практично всі великі транспортні виробники ведуть розробки в цій галузі, а передові країни світу, такі як: США, Китай, Японія, Німеччина, Великобританія мають довгострокові програми підтримки розвитку електротранспорту та стимулювання споживачів.

У містах України розвивається транспортна інфраструктура, яка базується на комплексному підході вирішення необхідних питань, таких як експлуатація та ремонт електротранспорту і модернізація його систем, збільшення пасажирських перевезень.

Роль пасажирського міського електротранспорту в роботі транспортної системи міст має різноманітне напруження.

Наприклад, в деяких містах України прагнуть до розвитку та удосконалення рейкового електротранспорту (трамвая, метро), який сприяє поліпшенню екологічного стану міст. Безпеку руху, плавність ходу і економічну ефективність пасажирських перевезень забезпечують ходові частини міського рейкового електрорухомого складу (МРЕРС). Вони призначені для здійснення напрямку руху екіпажу електрорухомого складу (ЕРС) шляхом передачі навантажень, що виникають під час експлуатації. Одним з розповсюджених видів міського електротранспорту є трамвай. Від удосконаленої конструкції трамвая, розташування його візків ходової частини та роботи елементів, під час експлуатації, залежить безпека пасажирів.

© Павленко Т.П., Лукашова Н.П., 2018

Ходова частина трамваю знаходиться під вагоном і залежно від передачі навантажень від кузова на шлях та систему гасіння коливань, виникають проблеми під час руху ЕРС. На цей час існують деякі технічні рішення, які сприяють зменшенню впливу навантаження і підвищують ефективність роботи візків ходової частини трамвая. Це підкреслює актуальність проблем і шляхи їх вирішення.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку електротранспорту диктують нові стандарти якості перевезень пасажирів, та безпечні умови.

Трамвайний парк постійно розвивається і удосконалюється. Відомими фірмами по виробництву трамваїв є: Siemens Transportation Systems (Німеччина), Bombardier (Канада), Alstom Транспорт (Франція).

Тенденція розвитку виробництва трамваїв сприяє створенню конструкцій, які мають низький рівень підлоги. Таке рішення приводить до підвищення комфортності перевезень пасажирів, скорочення часу стоянки на зупинках, поліпшення динаміки руху [1 – 5]. Але для трамваїв з пониженим рівнем підлоги необхідне зменшення висоти ходових частин, що потребує зміни конструкції візка, а також тягового приводу та ресорного підвішування. При цьому візок трамвайного вагона не має традиційних колісних пар, а обертання коліс відбувається незалежно один від одного на окремих піввісях. Ресорна підвіска забезпечує комфорт перевезення пасажирів і сприяє поліпшенню розташування трамвая на кривих ділянках колії.

Для зменшення вартості трамвайного перевезення використовують найпростіші технічні рішення. Наприклад, здійснюють перехід між секціями зчленованих вагонів по східцях, щоб досягнути навісного низькопідлогового ефекту. Здійснення такого рішення є більш ефективним, якщо вагони розробляють з нуля. Але частіше їх виготовляють шляхом переобладнання з старого рухомого складу, наприклад, вагонів «Татри» різноманітної модифікації. Недоліком такого рішення є незначний ефект низької підлоги і використання дорогих та складних технічних рішень, тому що великий обсяг займають колеса, розташування тягового електродвигуна та інших елементів візка.

За останні роки розроблені й інші технічні рішення, які використовуються в деяких конструкціях трамвайних вагонів. Наприклад, використання мотор-колесного приводу дозволило знизити підлогову частину вагона, але тяговий двигун, який знаходиться на осі колеса збільшує невідресорну масу, що викликає вібрацію рейкового полотна, призводить до зносу рейкового шляху [1, 2].

Виробники трамвайних вагонів продовжують удосконалення ходової частини візка шляхом відмови від силового приводу ходової частини. Це технічне рішення дозволило також знизити підлогу та привело до відсутності поворотних ходових візків. Але відсутність таких візків призводить до підвищення вимог щодо компоновки та кінематики зчленованих вагонів. В результаті такого рішення використання ходової частини візків можливе тільки в коротких поворотних секціях.

Сукупність показаних проблем можливо також вирішуватись за рахунок модернізації або удосконалення деяких елементів ходової частини візків трамваїв.

Основними елементами візків ходових частин трамваїв є: рама, ресори підвішування, гальмівні пристрої, колісні пари (або колісні блоки) та тягові електродвигуни.

Розповсюджене ресорне підвішування візків ходової частини МЕТ використовується для компенсації та гасіння коливань від зовнішніх впливів на частини ЕРС з боку ходової частини транспортного засобу. Це створює комфортні умови пасажиром, та зменшує динамічний вплив на елементи ЕРС та рейкові колії.

Ходова частина з ресорним підвищенням візків складається з пневматичних ресорів, циліндричних пружини, гумових амортизаторів, гідравлічних гасителів коливань, гумометалевих амортизаторів.

На цей час у сучасному рейковому транспортному засобі, в основному, використовується пневмопідвіска, у якій реалізовано широкі можливості регулювання пневматичного ресорного підвішування шляхом застосування електронних пристроїв [6-10]. Наприклад, на рис. 1 представлена сучасна пневматична ресора з датчиком висоти. Ця система пневматичного ресорного підвішування дозволяє реалізувати крім відомих, такі функції: нахил кузова вагона під час руху по кривих рейках та зчитування характеристик і діагностику пневмопідвіски.



Рис. 1. Пневматична ресора з датчиком висоти:

- 1** – верхнє днище пневматичної ресори; **2** – кільце ущільнювача;
3 – оболонка; **4** – внутрішній конус з пружним буфером; **5** – датчик для виміру величини повітряного зазору і формування електричного сигналу до системи управління;
6 – опорна плита

Застосування пневматичних ресор дає можливість регулювання параметрів демпфування, залежно від завантаження вагона та величини зовнішніх впливів. Однак пневматичне підвішування потребує додаткових втрат енергії та потужностей пневматичної системи МРЕРС.

Використання енергії коливань кузова рейкового транспортного засобу призвело, в останні часи, до створення електромеханічних систем гасіння коливань де як поглинаючий елемент виступає генеруюча електромеханічна система. Найбільше поширення такі системи використовуються в автомобільному транспорті, де амортизатори замінені лінійними електродвигунами.

При гасінні енергії механічних коливань електромеханічний амортизатор забезпечує вироблення електричної енергії. Середню потужність його визначається відношенням роботи електричного струму в кожній фазі до часу з урахуванням втрат в електричному колі.

Таким чином, електромеханічні амортизатори мають можливість регулювати силу демпфування залежно від режимів руху транспортного засобу, що дає можливість не тільки утилізувати енергію коливань рухомого складу, а і повернути її до електричного кола транспортного засобу з можливістю повторного використання.

Мета і завдання дослідження – визначення можливості використання електромеханічного амортизатора в конструкції ходової частини візка трамвая.

Відповідно поставленої мети, під час досліджень планується визначення універсальних параметрів електромеханічного амортизатора з використанням способів і методів досліджень та розрахунку магнітного кола і його розподіл з урахуванням робочого ходу амортизатора.

Матеріали та методи дослідження. Для вирішення поставлених задач обрано лінійний електромеханічний перетворювач енергії для електромеханічного амортизатора. Критерієм вибору типу електромеханічного перетворювача енергії було врахування вигляду його тягової (механічної) характеристики.

Обраний перетворювач не підпадає ні під один з видів існуючої їх класифікації: силовий, енергетичний і потужний.

Для силових конструкцій амортизаторів визначальним є сила в короткочасному робочому циклі, при відсутності або при дуже малих переміщеннях штоку.

Електромеханічний перетворювач для амортизатора знаходиться в рамках такої класифікації в області усіх типів перетворювачів одночасно [9,10].

Найбільш вигідним є амортизатор з електромеханічним перетворювачем постійного струму (рис. 2).

Основні параметри характеристики обраної конструкції амортизатора наведені у табл. 1. Для подальшого розрахунку їх значення обрані евристично та приблизно відповідають вимогам щодо амортизатора вагона метрополітену.

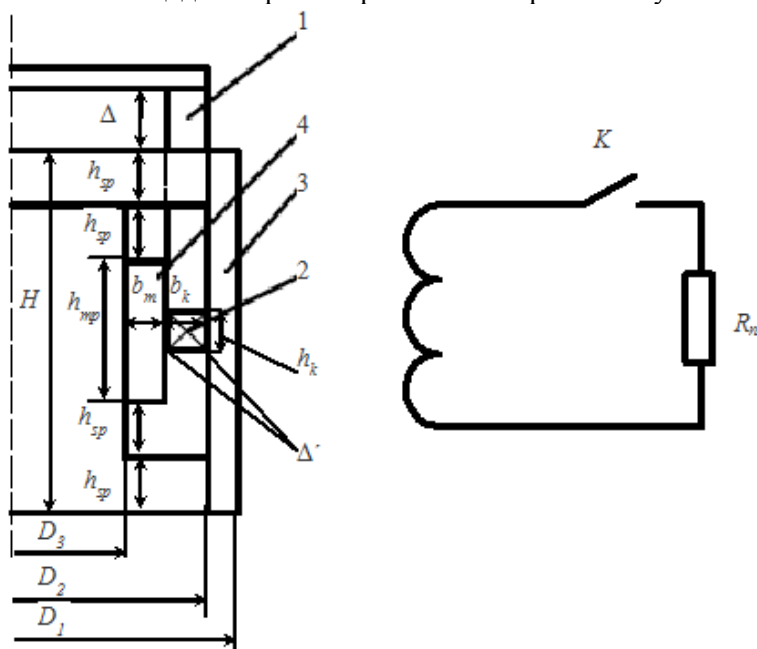


Рис. 2. Електромеханічний амортизатор постійного струму:
1 – ярмі; 2 – обмотка ярмі; 3 – статор; 4 – постійний магніт

Таблиця 1

Основні характеристики електромеханічного дослідного амортизатора

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, згідно з рис. 2
H_c	$9,5 \cdot 10^5$ А/м	Коерцитивна сила постійного магніту
B_{ost}	1,05 Тл	Остаточна індукція постійного магніту
I_W	5120 А	МРС обмотки якоря у номінальному режимі
H	0,293 м	Висота ярма амортизатора, згідно з рис. 2
D_1	0,360 м	Зовнішній діаметр амортизатора, згідно з рис. 2
D_2	0,312 м	Згідно з рис. 2
D_3	0,18 м	Згідно з рис. 2
h_m	0,114 м	Висота постійного магніту, згідно з рис. 2
b_m	0,032 м	Товщина постійного магніту, згідно з рис. 2
h_k	0,034 м	Висота обмотки якоря, згідно з рис. 2
b_k	0,0325 м	Товщина обмотки якоря, згідно з рис. 2
h_{sp}	0,045 м	Товщина спинки якоря, згідно з рис. 2
Δ'	0,001 м	Технологічні повітряні зазори, згідно з рис. 2

Електромагнітну силу що діє на обмотку якоря з МРС I_W та ЕРС можливо обчислити за виразом [9, 10]:

$$\begin{aligned} F_{dem} &= B_{\delta} (I_W) l_{sr}, \\ E_{dem} &= B_{\delta} V_{dem} l_{sr}, \end{aligned} \quad (1)$$

де B_{δ} – індукція магнітного поля у повітряному зазорі;

l_{sr} – середня довжина вітка яку можливо обчислити з геометричних параметрів амортизатору за виразом:

$$l_{sr} = \pi(D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k). \quad (2)$$

Для визначення індукція магнітного поля у повітряному зазорі розглянемо режим роботи постійного магніта в амортизаторі.

У останній час як матеріали для постійних магнітів найбільш поширені сплави NdFeB [7, 8]. Вони мають приблизно лінійну криву розмагнічення. Основний опір магнітному потоку є повітряний зазор між постійним магнітом та станиною, який складається з товщини обмотки та двох технологічних зазорів ($b_k + 2\Delta'$).

Для визначення параметрів характеристик амортизатора приймаються припущення:

– опір магнітному потоку складається з опору повітряного зазору,

- незначний вплив струму якоря на режим роботи постійного магніту,
- визначення індукцій у постійному магніті, яка дорівнює індукції у повітряному зазорі, за геометричними відношеннями з рис. 3.

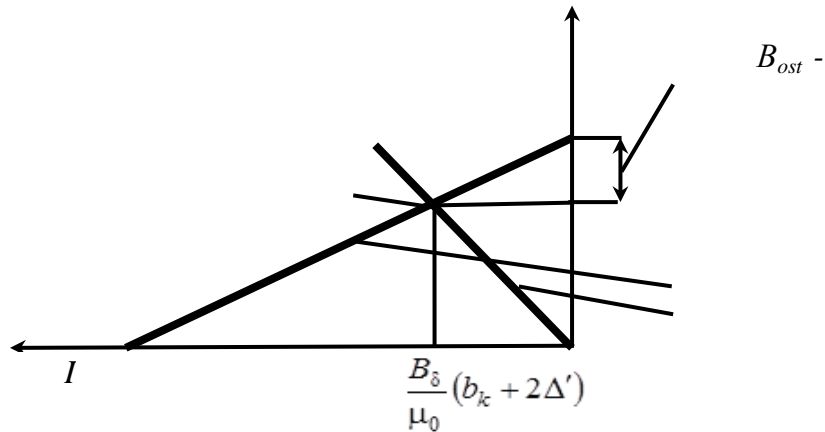


Рис. 3. До визначення індукція магнітного поля у повітряному зазорі:
1- магнітна характеристики постійного магніту; 2- магнітна характеристика повітряного зазору

Магнітнорушійна сила (МРС) у робочий точці А визначається виразом:

$$I_m = H_{\delta} (b_k + 2\Delta') = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} (b_k + 2\Delta'), \quad (3)$$

де H_{δ} – напруженість магнітного поля у повітряному зазорі,
 μ_0 – магнітна проникність повітря.

Відповідно до подібностей трикутників з рис. 2:

$$\frac{B_{ost} - B_{\delta}}{B_{ost}} = \frac{\frac{B_{\delta}}{\mu_0} (b_k + 2\Delta')}{H_c b_m} \quad (4)$$

З виразу (4) отримується:

$$B_{\delta} = \frac{1}{\frac{1}{B_{ost}} + \frac{(b_k + 2\Delta')}{\mu_0 H_c b_m}} \quad (5)$$

Підставивши вирази (2) та (5) у (1) отримуємо:

$$F_{dem} = \pi \frac{D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k}{\frac{1}{B_{ost}} + \frac{(b_k + 2\Delta')}{\mu_0 H_c b_m}} IW, \quad (6)$$

$$E_{dem} = \pi \frac{D_3 + 2b_m + 2\Delta' + b_k}{\frac{1}{B_{ost}} + \frac{(b_k + 2\Delta')}{\mu_0 H_c b_m}} V_{dem}.$$

Вираз (6) є спрощена математична модель щодо визначення електромагнітної сили та електрорушійної сили (ЕРС) амортизатора.

Для перевірки положень та адекватності математичної моделі (6) проведено комплекс цифрових експериментів по розрахунку механічної характеристики амортизатора для метровагона методом кінцевих елементів у середовищі FEMM [9,10].

З урахуванням конструкції амортизатора, який має вісь симетрії, що співпадає з віссю якоря, визначена задача розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів в аксіально-симетричній формі, що подано на рис. 4.

Для обмеження розрахункової зони введена додаткова сферична поверхня, яка при постановці задачі виражена півколом А

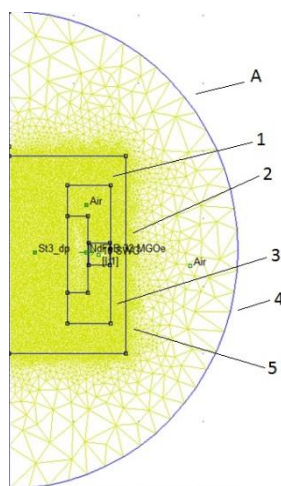


Рис. 4. Розрахункова область для розрахунку магнітного поля амортизатора при робочому ході 40 мм

Розрахункова область складається з таких частин:

- підобласті станини 1 амортизатора: матеріал – електротехнічна сталь;
- підобласті обмотки якоря 2 електродвигуна: матеріал – мідь;
- підобласті постійного магніту 3: матеріал – постійний магніт з коерцитивною

силою $H_c = 9,5 \cdot 10^5$ А/м та остаточною індукцією $B_{ost} = 1,05$ Тл ;

- підобласті повітря 4: матеріал – повітряне середовище;

– додаткової підобласті робочого зазору 5 амортизатору: матеріал – повітряне середовище, що необхідно для коректного розрахунку магнітного поля у повітряному зазорі.

З метою зменшення витрат розрахункового часу зі збереженням точності, встановлені такі параметри генерації сітки: для підобласті робочого зазору початковий радіус генерації сітки складає 0,3 мм, а для інших підобластей його встановлено адаптивним [10].

З використанням тензора напружень Максвелла [9, 10], розраховано електромагнітні сили залежно від ходу якоря.

Розподіл картини магнітного поля (рис. 5) та його розрахунки для робочих ходів штоку амортизатора проведені в інтервалі від 00 до 80 мм.

Тензор напружень Максвелла визначає силу на одиничній області, зумовлену магнітним полем на поверхні. Диференційна сила обчислюється за виразом:

$$dF = \frac{1}{2} [H \cdot (B \cdot n) + B \cdot (H \cdot n) - (H \cdot B) \cdot n],$$

де n – нормальний стан напрямку до поверхні в обчислюваній точці;

B , H – індукція та напруження магнітного поля у розрахунковій точці.

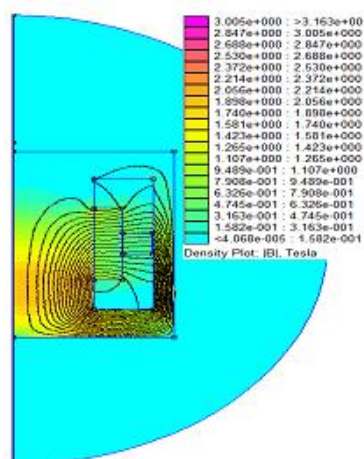


Рис. 5. Картина магнітного поля для розрахунку магнітного поля амортизатора при робочому ході 40 мм

Сили, що впливають на поверхню обчислювального об'єкта, отримують шляхом створення повної розрахункової поверхні та інтегрування дії магнітних напружень.

Для порівняльного аналізу на рис. 6 приведено механічні характеристики амортизатора, які визначені за допомогою спрощеної математичної моделі та методу кінцевих елементів з урахуванням магніторушійної сили (МРС) обмотки.

З рис. 6 очевидно, що результати розрахунків, за спрощеною математичною моделлю та шляхом моделювання магнітного поля лінійного двигуна за методом кінцевих елементів, співпадають. Максимальне відхилення спрощеної при ходах штоку амортизатора від 10 мм до 70 мм моделі становить 11,8 %, а при ходах штоку від 20 мм до 60 мм – 5,6 %, що допустимо для розглянутого класу розрахунків. Показані відхилення обумовлено значними насиченнями елементів магнітопроводу та підвищенням потоків розсіяння.

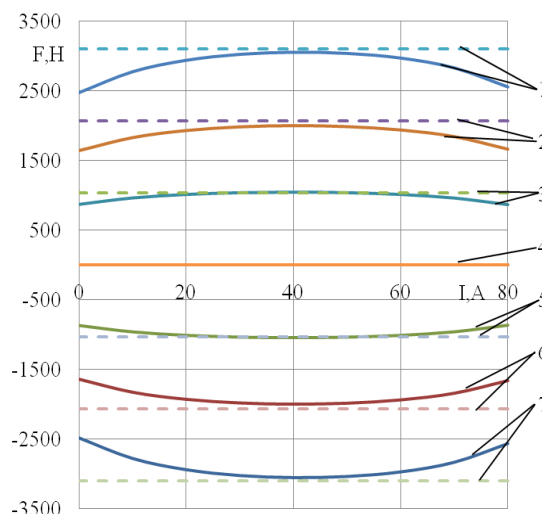


Рис. 6. Механічні характеристик амортизатора при МРС обмотки:
1 – 7780А, 2 – 5120А, 3 – 2590А, 4 – 0; 5 – 2580А; 6 – -5120А; 7 – 7780А, пунктиром
зазначені отримані значення

Висновки. 1. З урахуванням проблем та визначенням мети роботи обрано конструкцію електромеханічного перетворювача для електромеханічного амортизатора ходової частини візка вагона трамвая. Завдяки такому рішення є можливість регулювання сили демпфування залежно від режимів руху транспортного засобу, та рекуперація енергії для повторного використання її в транспортному засобі.

2. Розроблена спрощена математична модель визначення параметрів магнітного поля та його розподіл під час використання електромеханічного амортизатора. Результати математичної моделі підтверджуються результатами розрахунку, що демонструє її адекватність і може використовуватись у подальшому дослідженні.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Ходовая часть для трамвайного вагона 71-623*. Проспект о ходовых частях трамвайного вагона модели 71-623/ . – Усть-Катав 2011. – 38 с.
2. *Бачурин Н. С.* Ходовые части трамвайных вагонов : справочник / Н. С. Бачурин, А. А. Красниченко, Д. Ю. Шавырин. – Екатеринбург : УрГУПС, 2011. – 40 с.
3. *Ph. Hérissé*. Трамвайные вагоны Combino // *Vie Rail*. – № 2761. – 2000.
4. Bombardier Wins Contract for 24 Low-floor Flexity Classic Trams in Krakov [Electronic resource] // *Transportation*: [site]. URL: [http:// www.bombardier.com](http://www.bombardier.com).
5. Tram and light rail transits [Electronic resource] // *Rail solution* : [site]. URL: [http:// www.siemens.com](http://www.siemens.com).
6. *Манашкін Л. А.* Гасителі коливань і амортизатори ударів рейкових екіпажів (математичні моделі) [Монографія] / Л. А. Манашкін, С. В. Мямлін, В. І. Приходько. – Д.: 2007. – 196 с.
7. Pat. WO 2012/015488 США, F16F15/03, F16F6/00. Electricity generating shock absorbers / Zuo Lei; Tang Xiudong; Zhang Pei Sheng. – № US2011/024699; st. 02.12.11; pub. 02.02.12. – 28 p.
8. Lei Zuo, Brian Scully, Jurgen Shestani and Yu Zhou. Design and c harac erization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions // *Smart Materials and Structures*. – 2010. – №19. – P. 1–11.
9. Пат. 93154 Україна, МПК F03G7/08, B60K 25/00. Пристрій для рекуперації енергії коливань транспортного засобу / Сергієнко М. Є., Худолій О. І., Сергієнко А. М.; заявник та патентовласник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № а200912230; заявл. 27.11.09; опубл. 10.01.11, Бюл. №1.

10. Сергиенко А. Н. Анализ конструкций электромеханических преобразователей и выбор схемы электроамортизатора неподрессоренных масс транспортного средства / А. Н. Сергиенко, Б. Г. Любарский, В. Б. Самородов и др. // Сб. науч. тр. ХНАДУ «Автомобильный транспорт». – Вып. 31. – Х., 2012. – С. 18–25.

REFERENCES

1. Running gear for tramcar 71-623. The prospectus on the running parts of the tram car model 71-623. (2011). Ust-Katav (In Russian).
2. Bachurin, N. S. (2011). Running gears of trams. Directory. Ekaterinburg: UrGUPS, (In Russian).
3. Ph. Hérissé. Tramino Combino // Vie Rail. - No. 2761. 2000.
4. Bombardier Wins Contract for 24 Low-floor Flexity Classic Trams in Krakov [Electronic resource] // Transportation: [site]. URL: [http:// www.bombardier.com](http://www.bombardier.com).
5. Tram and light rail transits [Electronic resource] // Rail solution : [site]. URL: [http:// www.siemens.com](http://www.siemens.com).
6. Manashkin, L. (2007). Oscillation Dampers and Shock Absorbers in Railway Vehicles (Mathematical Models) [Valuable educational discourse]. Dnipropetrovsk.
7. Pat. WO 2012/015488 США, F16F15/03, F16F6/00. Electricity generating shock absorbers / Zuo Lei; Tang Xiudong; Zhang Pei Sheng. – № US2011/024699; st. 02.12.11; pub. 02.02.12. – 28 p.
8. Lei Zuo, Brian Scully, Jurgen Shestani and Yu Zhou. Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions // Smart Materials and Structures. – 2010. – №19. – P. 1–11.
9. Stalemate. 93154 Ukraine, IPC F03G7 / 08, B60K 25/00. Device for the recuperation of vehicle energy vibration / Sergienko M. E., Khudolii O. I., Sergienko A. M. ; Applicant and patent holder National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". - № a200912230; stated. 27.11.09; has published 10.01.11, Bull. №1
10. Sergienko, A.N. (2012). Analysis of the structures of electromechanical converters and the choice of an electric shock absorber circuit of the unsprung vehicle mass. Sci. scientific tr. HNADU "Automobile Transport", 18–25.

Татьяна Павленко, д.т.н.

(профессор кафедры электрического транспорта, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова);

Наталья Лукашова,

(ассистент кафедры электрического транспорта, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО АМОРТИЗАТОРА ХОДОВОЙ ЧАСТИ ТРАМВАЯ

Показаны технические решения которые способствуют повышению безопасности движения трамваев, плавности их хода и экономической эффективности пассажирских перевозок. Разработана математическая модель расчета параметров электромеханического амортизатора ходовой части трамвая и определены его характеристики.

Ключевые слова: электромеханический амортизатор, электромеханический преобразователь, рессорное повышение, ходовая часть, пневматические рессоры.

Pavlenko Tetyana

(doctor of Technical Sciences, Associate Professor Department of Electric transport National University of Urban Economy in Kharkiv);

Lukashova Natalia

(assistant Department of Electric transport National University of Urban Economy in Kharkiv)

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF ELECTROMECHANICAL SHOCK-ABSORBER OF THE TRAM RUNNING GEAR

The development of urban electric transport is of great importance to any country in the world. Modern designs of city electric transport emphasize the city's infrastructure, increase ecology and traffic safety, smooth running and economic efficiency of passenger transportation. The tram having a low floor level corresponds to the specified criteria for the operation of electric transport.

In the work the analysis of researches on the elements of tram running gear and certain problems which are solved by some technical solutions is carried out.

The purpose of the work is to determine the possibility of using an electromechanical shock-absorber in the design of tram's bogie running gear.

The scientific novelty of the work is in the possibility of using an electromechanical shock-absorber for all types of converters and this does not come within the existing classification of other designs. For the first time, a simplified mathematical model for calculating the parameters of an electromechanical shock-absorber has been developed and its characteristics have been determined. To prove the provisions and adequacy of the mathematical model, a set of digital experiments was conducted in the FEMM environment. For the first time, the distribution of the magnetic field pattern has been obtained, depending on the working stroke of the shock-absorber rod at the required intervals.

The practical value of a technical solution is the ability to control the damping force depending on the modes of motion of the vehicle, and to recover the energy of the electromechanical shock-absorber for its re-use in the vehicle.

Keywords: *electromechanical shock-absorber, electromechanical converter, spring increase, running gear, pneumatic springs.*