

УДК 629.113:693.54

В.П.ШПАЧУК, д-р техн. наук, А.В.ШУПИЛЮК, Г.О.НІКІТІНА,  
А.В.КОВАЛЕНКО, канд. техн. наук

*Харківська національна академія міського господарства*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАВНОСТІ ХОДУ ТРАМВАЯ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ ХВИЛЕПОДІБНО ЗНОШЕНИХ РЕЙОК**

Розглянуто характеристики динамічної взаємодії трамвая з колією на ділянках хвилеподібного зносу рейок. Встановлені залежності резонансних частот амплітудно-фазо-частотних характеристик та амплітуд коливань вагону на резонансних частотах в місцях розташування пантографа, сидіння водія і п'ятника кузова, а також параметрів їх девіації від завантаження вагону.

Рассмотрены характеристики динамического взаимодействия трамвая с рельсом на участках волнообразного износа рельсов. Установлены зависимости резонансных частот амплитудно-фазо-частотных характеристик и амплитуд колебаний вагона на резонансных частотах в местах расположения пантографа, сидения водителя и пятника кузова, а также параметров их девиации от загрузки вагона.

Dynamic characteristics of interaction of the tram to with the rail in the areas of undulating wear rails are considered. Dependences of resonant frequency of amplitude-phase-frequency characteristics and oscillation amplitudes of the wagon at the resonant frequencies at pantograph, driver's seat, truck center plate location and parameters of their deviation from wagon loading are established.

*Ключові слова:* трамвай, хвилеподібний знос, рейка, амплітудно-фазо-частотна характеристика.

Показники ходових якостей вагонів є найважливішими характеристиками, які визначають функціональні властивості рухомого складу і залежать головним чином від їх динамічних характеристик. Динамічна взаємодія вагону і рейкового шляху, що спричиняється безперервними хвилями або ізольованими стиковими нерівностями, обумовлює паразитні вібрації кузова, а також розлади вузлів і агрегатів вагону, що визначають в сукупності їх ергономічні характеристики, загальний технічний стан і експлуатаційний ресурс. Плавність ходу рухомого складу рейкового електричного транспорту є найважливішою характеристикою ходових якостей вагону і характеризує собою не лише довговічність рухомого складу, його шляхових пристроїв, але значною мірою його комфортабельність [1-5]. Коливання, що виникають при русі екіпажу, шкідливо відбиваються на самопочутті водія і пасажирів.

Із зростанням швидкостей руху транспортного засобу завдання оцінки параметрів його плавності ходу набуває актуального значення для комплексної оцінки його базових ергономічних, динамічних і ресурсних характеристик.

Згідно з роботами [1-5] динамічні якості рейкових екіпажів і колісних транспортних засобів оцінюють за значеннями коефіцієнтів дина-

мічних добавок вертикальних і горизонтальних збурюючих сил, прискоренням різних вузлів екіпажа і за показниками плавності ходу. Показник плавності ходу залежить від амплітуд і спектрального складу коливань вагону і тривалості їх дії. Розглянуті оцінки показника плавності ходу, засновані на даних про дію коливань на організми пасажирів, а також водія.

У роботах [6,7] виконані теоретичні і експериментальні дослідження величини власних частот, коефіцієнтів згасання і плавності ходу, визначений характер коливань приєднаних мас автомобіля з урахуванням дорожнього покриття.

У роботі [8] розглянуто особливості динаміки вантажних вагонів залежно від міри завантаженості, плану і профілю шляху.

У роботі [9] розглянута математична модель роботи рейкового рухомого складу з урахуванням порушення контакту колеса з рейкою.

Таким чином, у відомих роботах для кількісної оцінки плавності ходу на рейковому електричному транспорті застосовують показники

$$W_1 = W_1(A, f)$$

або  $W_2 = W_2(a, f),$

де  $A, a, f$  – амплітуди переміщення, прискорення і частоти вібрації кузова в контрольних точках. Проте при цьому питання впливу конструктивних і механічних характеристик об'єкта дослідження, а також зовнішніх силових чинників, на кількісні характеристики параметра "плавність ходу" транспортного засобу не розглядаються.

У даній роботі дослідження плавності ходу трамвая побудовані на аналізі вібраційних характеристик вагону в зоні розташування пантографа, сидіння водія та в зоні розташування п'ятника кузова. При цьому розглядається варіант проходження трамваєм хвилеподібно зношених ділянок рейок. Проаналізовано три варіанти завантаження трамвая: вагон порожній; середня завантаженість вагону – 5 ч/м<sup>2</sup> при 115 пасажирів; максимальне завантаження трамвая – 10 ч/м<sup>2</sup> при 193 пасажирів.

В основу досліджень покладено фундаментальні рівняння коливань об'єкту просторової структури в частотній області, отримані методом комплексних амплітуд [10-12].

Прийнята в роботі схема об'єкта досліджень приведена на рис.1, де 1 – базовий інерційний елемент; 2 – ізотропний інерційний елемент, що адитивно і рівномірно вкладається в базовий; 3 – абсолютно жорстка основа з нерівностями, що моделюють, хвилеподібно зношений рейковий шлях;  $C_{\text{пас}}$  – центр мас адитивного елемента (пасажирів трамвая);  $C_{\text{в}}$  – центр мас базового інерційного елемента (порожнього вагону); координати контрольних точок (адитивний елемент – відсутній):  $K1$  (-3,2м;

2,0м) – точка закріплення пантографа; К2 (-6,0м; 0,5м) – точка розташування сидіння водія; К3 (-3,2м; -0,827 м) – точка розташування п'ятника кузова .

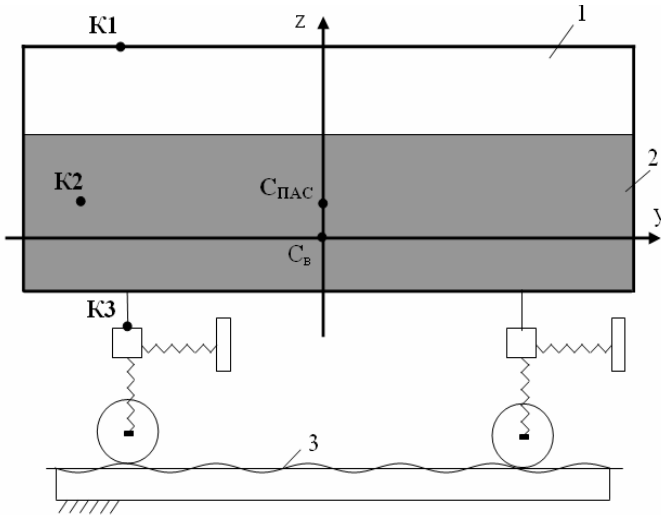


Рис. 1 – Схема об'єкта досліджень

Закон руху об'єкта в матричній формі, враховуючи [10, 11], має вигляд:

$$W \cdot r = q,$$

де  $r(t) = (y(t), z(t), \theta(t))$  – вектор узагальнених координат;

$$W = \begin{pmatrix} W_y & 0 & -W_{y\theta} \\ 0 & W_z & W_{z\theta} \\ -W_{y\theta} & W_{z\theta} & W_\theta \end{pmatrix} \text{ – матриця передавальних функцій}$$

об'єкта досліджень;

$$W_y = M \cdot P^2 + b_y \cdot P + c_y; \quad W_z = M \cdot P^2 + b_z \cdot P + c_{1z} + c_{2z};$$

$$W_\theta = I_c \cdot P^2 + (b_y \cdot P + c_y) \cdot z_{13}^2 + \frac{1}{2} b_z \cdot P \cdot (y_{11}^2 + y_{12}^2) + c_{1z} y_{11}^2 + c_{2z} y_{12}^2;$$

$$W_{y\theta} = (b_y \cdot P + c_y) \cdot z_{13};$$

$$W_{z\theta} = \frac{1}{2} b_z \cdot P \cdot (y_{11} + y_{12}) + c_{1z} y_{11} + c_{2z} y_{12};$$

$q(t) = (q_1(t), q_2(t), q_3(t))$  – вектор збудження;

$$q_1(t) = \frac{1}{2}(b_y \cdot P + c_y) \cdot V_{y_1}(t) + \frac{1}{2}(b_y \cdot P + c_y) \cdot V_{y_2}(t) = |V_{y_1}(t) = V_{y_2}(t)| = \\ = (b_y \cdot P + c_y) \cdot V_{y_2}(t);$$

$$q_2(t) = \frac{1}{2}b_z \cdot P \cdot (V_{z_1}(t) + V_{z_2}(t)) + c_{1z} V_{z_1}(t) + c_{2z} V_{z_2}(t);$$

$$q_3(t) = \frac{1}{2}b_z \cdot P \cdot (y_{11} \cdot V_{z_1}(t) + y_{12} \cdot V_{z_2}(t)) + c_{1z} y_{11} \cdot V_{z_1}(t) + c_{2z} y_{12} \cdot V_{z_2}(t) - \\ - (b_y \cdot P + c_y) \cdot z_{13} \cdot V_{y_2}(t).$$

Тут:  $P = \frac{d}{dt}$  – оператор диференціювання,  $V_{y_{1,2}}, V_{z_{1,2}}$  – сигнали кі-

нематичного збудження з боку рейкового шляху;  $b_y$  – сумарний коефіцієнт опору пружин, паралельних осі Оу;  $b_z$  – сумарний коефіцієнт опору пружин, паралельних осі Oz;  $c_y$  – сумарний коефіцієнт жорсткості пружин, паралельних осі Оу;  $c_{1z}, c_{2z}$  – коефіцієнти жорсткості відповідно пружин 7, 8, паралельних осі Oz;  $I_c$  – момент інерції відносно осі, що проходить через центр мас;  $z_{13}, y_{11}, y_{12}$  – координати точок закріплення пружинних елементів в системі координат Оуz.

Механічна схема аналізованого тривимірного об'єкту досліджень зображена на рис. 2. Тут прийняті наступні позначення: 1-4 конструктивні елементи, що моделюють несучу конструкцію; 5, 6 – деталі зчленування об'єкту з корпусом виробу; 7-10 – пружно-дисипативні елементи, що моделюють узагальнені деформаційні характеристики підвіски об'єкту в ортогональних напрямках; 11 – базовий конструктивний елемент масою  $m_6$ , що моделює інерційні властивості об'єкту; 12 – інерційний аддитивний елемент масою  $m_a$ ;  $V_{z1ст}, V_{z2ст}$  – вертикальні монтажні переміщення конструктивних елементів 1, 2, що забезпечують статичну рівновагу об'єкту; Оуz, О<sub>1</sub>у<sub>1</sub>z<sub>1</sub> – відповідно нерухома і рухома системи координат, полюси яких в положенні статичної рівноваги об'єкту співпадають.

В результаті дії зовнішніх кінематичних вібраційних чинників з боку рейкового шляху (табл. 1) об'єкт досліджень здійснює тривимірні коливання в площині уOz. Він має три ступені вільності: можливість рухатись уздовж осей Оу і Oz, а також можливість обертання навколо точки О (центр мас).

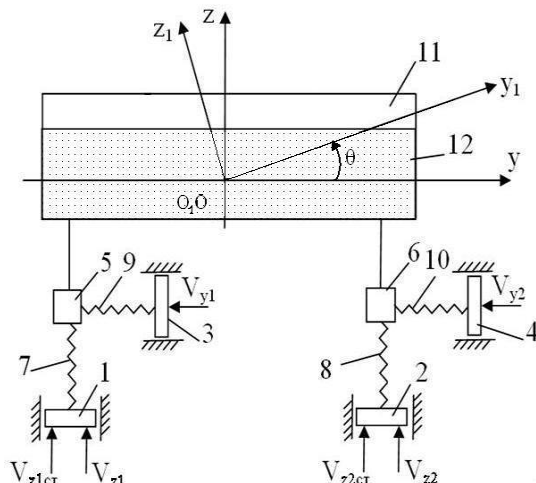


Рис. 2 – Механічна схема об'єкту

Таблиця 1 – Характеристика збуджуючих дій на об'єкт

Різновид збуджуючих дій	Збудження в напрямку осі y	Збудження в напрямку осі z
Кінематичні збудження з боку нерівностей рейкового шляху (хвилеподібно зношені ділянки рейок)	$V_{y_1}(t) = V_{y_2}(t) = 0;$	$V_{z_1}(t) = A \sin \omega t ;$ $V_{z_2}(t) = A \sin(\omega t + \alpha);$ $A = 0,004 \text{ м,}$ $\alpha = [0, 2\pi] \text{ рад,}$ $\omega = [0, 20] \text{ рад/с}$

Основні конструктивні, механічні і експлуатаційні характеристики об'єкта досліджень наведені в табл. 2.

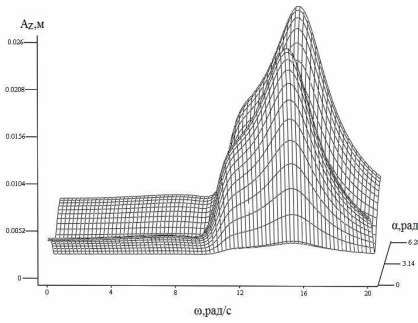
Таблиця 2 – Основні характеристики об'єкта досліджень для різних типів завантаження вагону Т-3

№ п/п	Характеристики вагону	Порожній вагон	Середнє завантаження (5 ч/м <sup>2</sup> , 115 чол)	Максимальне завантаження (10 ч/м <sup>2</sup> , 193 чол)
1	2	3	4	5
1	Маса вагону М, кг	17000	25050	30510
2	Координати центру мас вагону С <sub>в</sub> , м	Y <sub>п</sub> =0; Z <sub>п</sub> =0,57	Y <sub>п</sub> =0; Z <sub>п</sub> =0,64	Y <sub>п</sub> =0; Z <sub>п</sub> =0,67
3	Момент інерції вагону I <sub>с</sub> , кг·м <sup>2</sup>	252692,67	351295,32	418092,419

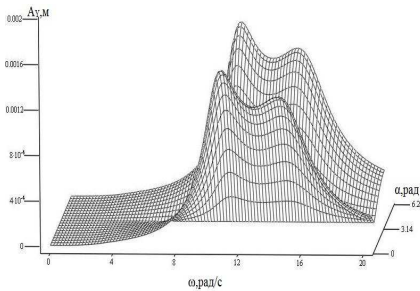
Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5
4	Коефіцієнти опору пружин, паралельних осям $Oy$ , $Oz$ – $b_y$ , $b_z$ , Н·с/м	$24 \cdot 10^3$		
5	Коефіцієнти жорсткості пружин, паралельних осям $Oy$ , $Oz$ – $c_y$ , $c_z$ , Н/м	$0,95 \cdot 10^5$ ; $16,9 \cdot 10^5$		
6	Координати точок кріплення пружинних елементів, м	(-3,2; -1,12); (3,2;-1,12)	(-3,2; -1,19); (3,2; -1,19)	(-3,2; -1,22); (3,2;-1,22)
7	Координати контрольних точок Відповідно $K_1$ , $K_2$ , $K_3$ , м	(-3,2; 2,0) ; (-6,0; 0,5); (-3,2; -0,827)	(-3,2; 1,93) (-6,0; 0,43); (-3,2; -0,897)	(-3,2; 1,9) (-6,0; 0,4); (-3,2; -0,927)

Результати дослідження амплітудно-фазо-частотних характеристик (АФЧХ) об'єкта, наприклад, для максимально завантаженого вагону, представлені на рис.3. Дані аналізу АФЧХ для різних варіантів завантаження вагону наведені в табл. 3,4.



а)



б)

Рис. 3 – АФЧХ контрольної точки об'єкта: а) сидіння водія, координата Z; б) п'ятник кузова, координата Y

Таблиця 3 – Результати дослідження АФЧХ для координати Z

Параметр АФЧХ	Контрольна точка К1 (пантограф)	Контрольна точка К2 (сидіння водія)	Контрольна точка К3 (п'ятник кузова)
Порожній вагон			
$\omega_{\max}$ , рад/с	19,789	19,713	19,789
$A_{Z \max}$ , м	0,016	0,019	0,016
$\alpha_{\max}$ , рад	0; 6,28	0; 6,28	0; 6,28
Середнє завантаження вагону			
$\omega_{\max}$ , рад/с	16,441	16,389	16,441
$A_{Z \max}$ , м	0,02	0,023	0,02
$\alpha_{\max}$ , рад	0; 6,28	0; 6,28	0; 6,28
Максимальне завантаження вагону			
$\omega_{\max}$ , рад/с	14,949	14,908	14,949
$A_{Z \max}$ , м	0,022	0,025	0,022
$\alpha_{\max}$ , рад	0; 6,28	0; 6,28	0; 6,28

Таблиця 4 – Результати дослідження АФЧХ для координати Y

Параметр АФЧХ	Контрольна точка К1 (пантограф)	Контрольна точка К2 (сидіння водія)	Контрольна точка К3 (п'ятник кузова)
Порожній вагон			
$\omega_{\max}$ , рад/с	14,207	14,083	14,207
$A_{Y \max}$ , м	$2,219 \cdot 10^{-3}$	$7,737 \cdot 10^{-4}$	$9,308 \cdot 10^{-4}$
$\alpha_{\max}$ , рад	0; 6,28	0; 6,28	0; 6,28
Середнє завантаження вагону			
$\omega_{\max}$ , рад/с	11,986	11,898	11,971
$A_{Y \max}$ , м	$2,66 \cdot 10^{-3}$	$8,183 \cdot 10^{-4}$	$1,315 \cdot 10^{-3}$
$\alpha_{\max}$ , рад	0; 6,28	0; 6,28	0; 6,28
Максимальне завантаження вагону			
$\omega_{\max}$ , рад/с	10,955	10,885	10,938
$A_{Y \max}$ , м	$2,819 \cdot 10^{-3}$	$8,362 \cdot 10^{-4}$	$1,543 \cdot 10^{-3}$
$\alpha_{\max}$ , рад	0; 6,28	0; 6,28	0; 6,28

Аналіз поведінки АФЧХ об'єкту досліджень в контрольних точках, показує наступне.

1. У вертикальному напрямку на власних частотах  $\omega_{рез} = \omega_{max}$  резонансів амплітуди коливань вагону в місцях розташування пантографу, сидіння водія і п'ятника кузова зростають відносно амплітуд кінематичного збудження рейкового шляху відповідно:

- для незавантаженого вагону у 4,0; 4,75; 4 разів;
- при середньому завантаженні – у 5,0; 5,75; 5,0 разів;
- для максимального завантаженого вагона – у 5,5; 6,5; 5,5 разів.

2. Мають місце значення зсувів фаз, при яких амплітуди коливань вагону у точках, що аналізуються, стають відповідно максимальними на резонансних частотах  $\omega_{рез} = \omega_{max}$  при  $\alpha = 0$ ; 6,28 рад і мінімальними при  $\alpha = 3,14$  рад.

3. Значення резонансних частот  $\omega_{рез}$  (табл. 3, 4) для обох координат у і z змінюються у бік зменшення при збільшенні завантаження вагону. При цьому для координати z девіація вказаної частоти складає відповідно 24,5 %; 24,4%; 24,5%, а величина її залишиться практично сталою незалежно від завантаження вагону.

4. Значення амплітуд коливань на резонансних частотах  $\omega_{рез}$  збільшуються в напрямку вертикальної координати і зменшуються в напрямку горизонтальної. Наприклад, при збільшенні завантаження, девіація амплітуд вертикальних коливань z вагону на резонансних частотах  $\omega_{рез}$  в заданих в табл. 2 контрольних точках є залежною від координат і складає відповідно 37,5%; 31,6 %; 37,5 %.

Таким чином, практичне значення отриманих в роботі результатів проявляється в тому, що вони є базовою характеристикою при створенні нових і вдосконаленні існуючих рейкових транспортних засобів з точки зору їх геометричних, вагових і жорсткісно-демпфуючих характеристик.

1. Шпачук В.П., Далека В.Х., Коваленко А.В. Стикова динаміка трамвая. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 150 с.

2. Ефремов И.С., Гущо-Малков Б.П. Теория и расчет механического оборудования подвижного состава городского электрического транспорта. – М.: Транспорт, 1970. – 480с.

3. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / Под ред. М.Ф. Вериго. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.

4. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагонов. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.

5. Дьомін Ю.В., Черняк Г.Ю. Основи динаміки вагонів: Навчальний посібник. – К.: КУЕТТ, 2003. – 270 с.



6. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода. Изд 3-е. – М.: «Машиностроение», 1972. – 392 с.

7. Герасименко В.Г., Москаленко Т.В., Доля А.Г., Грицук И.В. Исследование влияния состояния дорожного покрытия на плавность хода и колебания автомобиля // Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту, 2009. № 2. – С.10-13.

8. Miamlin S.V., Reidemeister A.G., Sorokolet A.V., Jastremskas V. Correlation dynamics of freight wagons with cargo position. Proceedings of the 6th International Scientific Conference TRANSBALTICA 2009. – Vilnius. Vilnius Gediminas Technical University. Transport Engineering Faculty, 2009, pp. 167-172.

9. Dailydka S., Lingaitis L.P., Myamlin S., Prichodko V. Modelling the interaction between railway wheel and rail // Transport, 2008, №23(3), pp. 236-239.

10. Божко А.Е., Гноевой А.В., Шпачук В.П. Пространственное вибронагружение. – Киев: Наукова думка, 1987. – 192 с.

11. Шпачук В.П. К проблеме испытаний объектов пространственной структуры на виброненадежность, реализующих эффект синергизма // Прикл. механика. – 2005. – №7. – С.116-121.

12. Шпачук В.П., Никитина А.А., Коваленко А.В., Дудко В.В. К исследованию эргономических характеристик движения рельсового транспортного средства с учетом эффекта синергизма многокомпонентного кинематического возбуждения // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2010. – №2/5(44). – С.26-31.

*Отримано 12.11.2012*

УДК 656.13

Ю.О.ДАВІДІЧ, С.С.ОВЧИННИКОВ, доктора техн. наук,  
Д.П.ПОНКРАТОВ, Є.І.КУШ, кандидати техн. наук  
*Харківська національна академія міського господарства*

## **ЕРГОНОМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕГОНУ МАРШРУТУ МІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ НА СТАН ВОДІЯ**

Розглянуто питання, пов'язані з ергономічними особливостями розробки технологічного процесу перевезення пасажирів. Отримані і описані в статті закономірності зміни стану водія при русі по перегону маршруту спрямовані на удосконалення організації перевезення пасажирів.

Рассмотрены вопросы, связанные с эргономическими особенностями разработки технологического процесса перевозки пассажиров. Полученные и описанные в статье закономерности изменения состояния водителя при движении по перегону маршрута направлены на усовершенствование организации перевозки пассажиров.

Questions are considered, related to the ergonomics features of development of technological process of transportation of passengers. Got and described in the article of conformity to the law of change of state of driver at motion for distillation of route are directed on the improvement of organization of transportation of passengers.

*Ключові слова:* маршрут, перегін, транспортний засіб, коефіцієнт кореляції, функціональний стан.

Параметри системи маршрутів міського пасажирського транспорту істотним чином впливають на умови і зручність перевезення пасажирів,