

УДК 629.4-027.21

В. А. ТАТАРІНОВА – к.т.н, доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Valentina100vol@gmail.com, ORCID 0000-0001-6484-3777

Л. О. НЕДУЖА – к.т.н, доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ОДИНИЦІ РУХОМОГО СКЛАДУ

Вступ

Створення сучасного локомотива вимагає від конструкторів і вчених реалізації наукових ідей та технічних рішень, що забезпечують, зокрема, підвищення конструкційної швидкості з одночасним поліпшенням тягових, гальмівних і динамічних якостей тягового рухомого складу. Тому перед залізничним транспортом ставляться такі основні стратегічні завдання [7–11, 27]:

- збільшення маси вантажних поїздів і осевих навантажень вантажних локомотивів;
- оновлення парку рухомого складу нового покоління, який би відповідав чинним європейським екологічним нормам;
- підвищення рівня безпеки руху, зниження аварійності тощо.

В розвитку економіки держави роль транспорту залишається однією зі значних і основоположних [1, 3, 17]. Поліпшення техніко-економічних показників роботи залізниць залежить і від створення рухомого складу (рис. 1). Як видно, зростає роль такого виробника, як Siemens, який все активніше просуває на європейський ринок свої нові розробки (рис. 1, а, б). Тому наведемо деякі результати для локомотива цієї провідної компанії-виробника залізничної техніки [8, 9, 11, 22, 23].

Мета дослідження

Метою авторів є отримання результатів теоретичних досліджень руху локомотива по прямо- та криволінійних ділянках колії, визначення їх динамічних показників для забезпечення безпеки руху на залізниці.

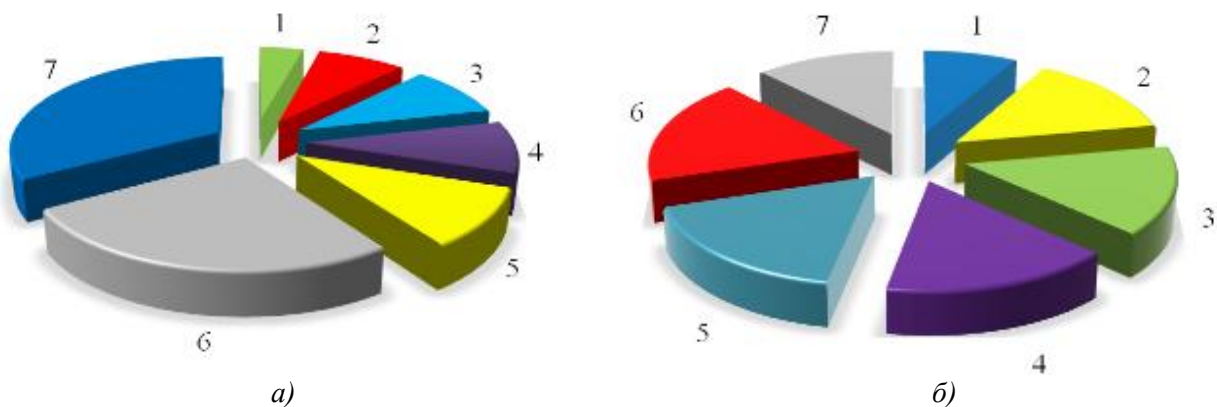


Рис. 1. Частки провідних компаній-виробників на світовому ринку:
а) нових локомотивів: 1 – Siemens, 4%; 2 – EMD, 8%; 3 – Bombardier, 9%; 4 – ЗАО «Трансмашхолдинг», 10%; 5 – GETS, 10%; 6 – CNR/CSR, 26%; 7 – інші, 33%; б) нових електровозів: 1 – Siemens, 8%; 2 – CSR, 14%; 3 – CLW, 15%; 4 – ЗАО «Трансмашхолдинг», 16%; 5 – CNR, 17%; 6 – Bombardier, 18%; 7 – інші, включно Alstom, 12%

Основна частина

В статті приведені теоретичні дослідження електровоза серії ДС, який був створений у співпраці з концерном Siemens на Дніпропетровському електровозобудівному заводі (ДЕВЗ) за участю цілого ряду наукових та виробничих організацій, в тому числі і Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ) [2, 4, 8, 9, 11, 18, 20–23, 29].

Розглянемо електровоз як одномасову систему і будемо враховувати тільки масу кузова, який спирається на одну пружину з еквівалентною жорсткістю c і має один демпфер в'язкого опору з еквівалентним коефіцієнтом β . Для обчислення еквівалентної жорсткості підвищення візьмемо до уваги, що між кузовом та візком знаходиться 8 пружин, які розташовані паралельно (рис. 2, позиція 2). В першій ступені ресорного підвищення на кожному візку ще по вісім, які теж розташовані паралельно (рис. 2, позиція 1).

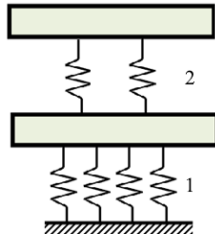


Рис. 2. Спрощена схема підвищення

Але дві пружини, одна з яких замінює 8 пружин другого ступеня, а друга – 16 пружин першого ступеня, вже будуть розташовані послідовно. Наведемо результати обчислення c та β [6, 23, 29].

Параметри системи:

маса кузова локомотива $m = 50$ т; жорсткість однієї пружини другої ступені підвищення локомотива $c_2 = 420$ кН/м; жорсткість однієї пружини першої ступені підвищення $c_1 = 1610$ кН/м; коефіцієнт в'язкого опору одного демпфера другої ступені локомотива $\beta_2 = 45$ кН·с/м; коефі-

цієнт в'язкого опору одного демпфера першої ступені $\beta_1 = 5$ кН·с/м.

Оскільки на схемі (рис. 3) паралельно кожній пружині розташований демпфер в'язкого опору, то розрахунки для визначення еквівалентного коефіцієнта в'язкого опору проведені аналогічно.

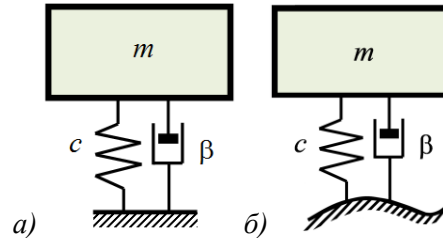


Рис. 3. Розрахункова схема

а) об'єкт дослідження без урахування нерівності колії; б) об'єкт дослідження з урахуванням нерівності колії

Як відомо з теоретичної механіки, еквівалентна жорсткість паралельного з'єднання пружин дорівнює сумі жорсткості кожної пружини, а еквівалентна жорсткість послідовного з'єднання обчислюється наступним чином:

$$c = \frac{8 \cdot 420 \cdot 16 \cdot 1610}{8 \cdot 420 + 16 \cdot 1610} = 2972,3 \text{ кН/м},$$

$$\beta = \frac{8 \cdot 45 \cdot 16 \cdot 5}{8 \cdot 45 + 16 \cdot 5} = 65,5 \text{ кН} \cdot \text{с/м}.$$

Для подальших розрахунків візьмемо $c = 3000$ кН/м, $\beta = 66$ кН·с/м.

Оскільки аналізується тільки поведінка кузова, то механічна система має ступінь вільності одиниця. Складемо рівняння Лагранжа другого роду, які описують коливання цієї системи. Тіло маси m за допомогою пружного елемента з еквівалентною жорсткістю c та демпфера в'язкого опору з еквівалентним коефіцієнтом β прикріплено до колісної пари, масою якої нехтуємо, і рухається по ділянці колії, яка в вертикальній площині немає геометричних дефектів (без урахування нерівності колії) (рис. 3, а) та має нерівності, які змінюються за гармонічним законом (рис. 3, б). Координатну вісь y , вздовж якої рухається тіло, спрямуємо донизу.

Оскільки система має один ступінь вільності, то $n = 1$; за узагальнену координату обираємо переміщення тіла вздовж вертикальної осі $q_1 = y$; узагальнена швидкість $\dot{q}_1 = \dot{y}$.

Кінетичну енергію тіла, потенціальну енергію, яка накопичується у пружному елементі, функцію розсіювання енергії в демпфері в'язкого опору визначаємо за відомими формулами [6, 29].

Скориставшись рівняннями Лагранжа другого роду

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = 0,$$

отримаємо рівняння руху тіла $m\ddot{q}_1 + \beta\dot{q}_1 + cq_1 = 0$, в канонічному вигляді воно буде таким

$$\ddot{q} + 2b\dot{q} + k^2 q = 0.$$

$$\text{Позначимо } b = \frac{\beta}{2m}, k^2 = \frac{c}{m}.$$

Його розв'язок має вигляд [6, 29]

$$q = e^{-bt} (A \cos k_1 t + B \sin k_1 t),$$

де $k_1 = \sqrt{k^2 - b^2}$, A, B – сталі інтегрування, що знаходяться з початкових умов. Фізичний зміст: k_1 – частота коливань з урахуванням тертя, k – частота вільних коливань (без урахування тертя).

Розглянемо також випадок, коли механічна система (розрахункова схема приведена на рис. 3, б) рухається по колії, що у вертикальній площині має нерівність, яка задана рівнянням $\eta = \eta_0 \sin \omega t$.

Результати досліджень

Приведемо чисельні розрахунки руху механічної системи, що рухається по ділянці колії, яка в вертикальній площині немає геометричних дефектів (рис. 3, а):

$$k^2 = \frac{c}{m} = \frac{3000}{50} = 60; k = 7,75 \text{ с}^{-1};$$

$$b = \frac{\beta}{2m} = \frac{66}{100} = 0,66 \text{ с}^{-1},$$

$$k_1 = \sqrt{60 - 0,4356} = 7,72 \text{ с}^{-1}.$$

Візьмемо наступні початкові умови

$$q_0 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad \dot{q}_0 = 0,5 \text{ м/с}.$$

Тоді для знаходження A та B складемо систему двох рівнянь

$$\begin{cases} q = e^{-0,66t} (A \cdot \cos 7,72t + B \cdot \sin 7,72t), \\ \dot{q} = -0,66 \cdot e^{-0,66t} (A \cdot \cos 7,72t + B \cdot \sin 7,72t) + e^{-0,66t} \times \\ \times (-7,72A \cdot \sin 7,72t + 7,72B \cdot \cos 7,72t). \end{cases}$$

Підставляючи початкові умови, знаходимо $A = 0,05$ м, $B = 0,069$ м. Тоді рівняння руху записується таким чином

$$q = e^{-0,66t} (0,05 \cdot \cos 7,72t + 0,069 \cdot \sin 7,72t), (\text{м}).$$

Для знаходження сил, що виникають в пружних елементах, треба знати прискорення тіла. Для поставленої задачі

$$\ddot{q} = -0,4356 \cdot e^{-0,66t} (0,05 \cdot \cos 7,72t +$$

$$+ 0,069 \cdot \sin 7,72t) - 1,32 \cdot e^{-0,66t} \times$$

$$\times (-0,386 \cdot \sin 7,72t +$$

$$+ 0,533 \cdot \cos 7,72t) + e^{-0,66t} (-2,98 \cdot \cos 7,72t -$$

$$- 4,11 \cdot \sin 7,72t), (\text{м/с}^2).$$

Результати руху того ж екіпажу (при тих же умовах і значеннях параметрів) по колії, яка у вертикальній площині має нерівність (рис. 3, б) отримані для такого диференціального рівняння

$$m\ddot{q}_1 + \beta(\dot{q}_1 - \dot{\eta}) + c(q_1 - \eta) = 0$$

або

$$m\ddot{q}_1 + \beta\dot{q}_1 + cq_1 = \beta\dot{\eta} + c\eta.$$

Це рівняння можна переписати по-іншому:

$$m\ddot{q}_1 + \beta\dot{q}_1 + cq_1 = c\eta_0 \sin \omega t + \beta\omega\eta_0 \cos \omega t.$$

Тут η_0 – амплітудне значення деформації рейки, ω – частота синусоїдального збурення (яка імітує збурення, зумовлене проходження по стикам колії).

$$\text{Візьмемо } \eta_0 = 0,02 \text{ м}; \omega = 10 \text{ с}^{-1}.$$

Згідно з теорією розв'язку неоднорідних диференціальних рівнянь другого порядку і враховуючи ті ж початкові умови, отримаємо, що рівняння руху тіла має вигляд

$$q = e^{-0,66t} (0,392 \cdot \cos 7,72t + 0,146 \cdot \sin 7,72t) - 0,342 \cdot \cos 10t - 0,037 \cdot \sin 10t \text{ (м)}.$$

В цьому випадку прискорення дорівнює

$$\ddot{q} = -0,4356 \cdot e^{-0,66t} (0,392 \cdot \cos 7,72t + 0,146 \cdot \sin 7,72t) - 1,32 \cdot e^{-0,66t} \times (-3,026 \cdot \sin 7,72t + 1,127 \cdot \cos 7,72t) + e^{-0,66t} \times (-23,36 \cdot \cos 7,72t - 8,7 \cdot \sin 7,72t) + 3,7 \cdot \sin 10t + 34,2 \cdot \cos 10t \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

З подальших досліджень [1, 12–14, 16, 17, 19, 25, 26] для прикладу наведені графіки зміни коефіцієнта вертикальної динаміки K_{VC} в кузовній ступені ресорного підвішування (рис. 4) механічної частини локомотива ДСЗ [18, 20, 28, 29].

Результати теоретичних досліджень можуть бути враховані при проведенні по-

передніх досліджень для створення надійних конструкцій нового транспортного засобу, подальшого покращення механічної частини, модернізації всіх одиниць рухомого складу [5, 15, 24, 27].

Висновки

Отримані результати мають практичну цінність, оскільки можуть бути використані в подальших теоретичних дослідженнях та при проведенні натурних випробувань. Вони дозволяють обрати такі параметри одиниць рухомого складу, які забезпечать необхідні динамічні показники локомотива, та зменшать його вплив на колію, щоб покращити рівень безпеки руху на залізниці.

Таким чином, теоретичні дослідження є передумовою при створенні надійних конструкцій рухомого складу, подальшого поліпшення та модернізації їх механічної частини.

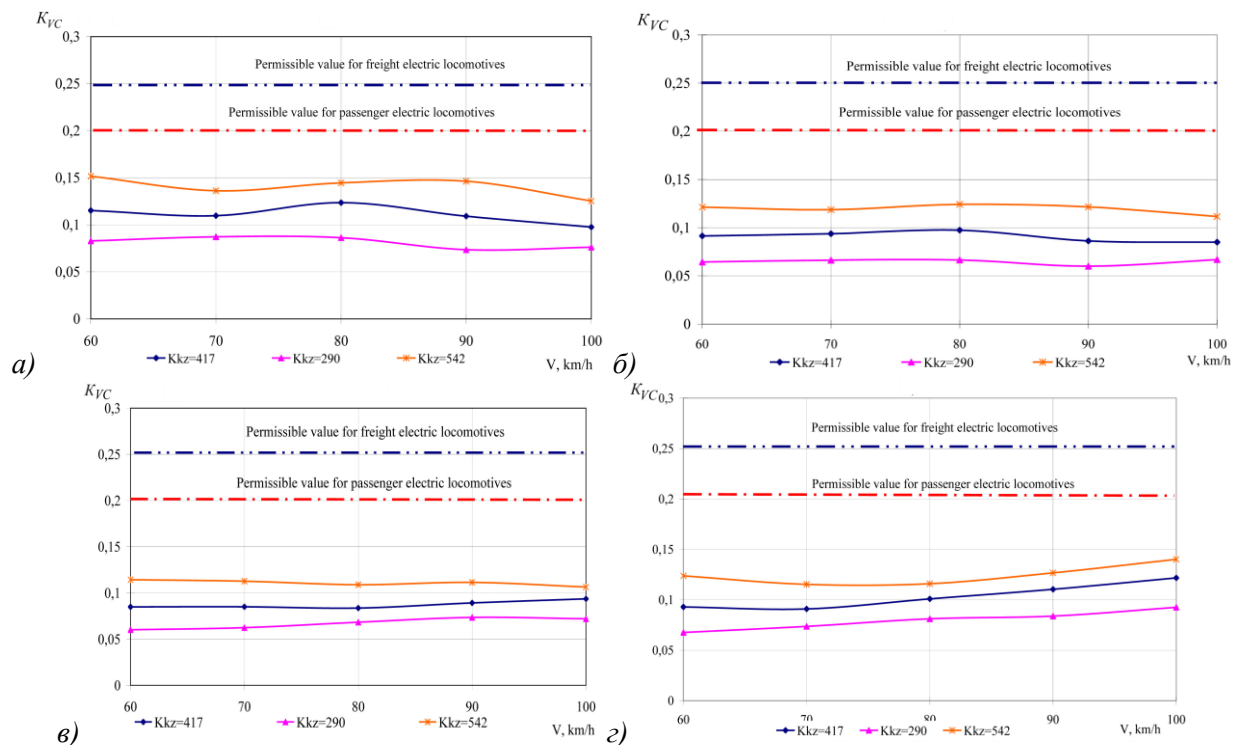


Рис. 4. Графіки залежності коефіцієнта вертикальної динаміки в кузовній ступені ресорного підвішування K_{VC} від швидкості руху (крива $R = 600 \text{ м}$): а) максимальні значення, випадкові нерівності колії; б) максимально ймовірні значення, випадкові нерівності колії; в) максимальні значення, детерміновані нерівності колії; з) максимально ймовірні значення, детерміновані нерівності колії

Бібліографічний список

1. Гаврилук, В. І. Електроживлення систем залізничної автоматики, телемеханіки та зв'язку: монографія / В. І. Гаврилук, В. Г. Сиченко, Т. М. Сердюк ; за заг. ред. В. І. Гаврилюка. – Д.: ДНУЗТ, 2016. – 193 с.
2. Зеленько, Ю. В. Вплив віброакустичних параметрів рухомого складу на вибір раціональних значень ходової частини локомотива / Ю. В. Зеленько, Л. О. Недужа, А. О. Швець // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 3 (63). – С. 60–75. doi: 10.15802/stp2016/74717.
3. Калівода, Я. Досвід експериментальних досліджень рухомого складу з використанням стендового обладнання / Я. Калівода, Л. Недужа // Вагонний парк. – 2017. – № 3/4. – С. 28–30.
4. Клименко, И. В. Определение значений жесткости связи наклонной тяги с кузовом грузового локомотива / И. В. Клименко, Л. А. Недужая // Вісник сертифікації залізничного транспорту. – 2018. – № 04 (50). – С. 60–68.
5. Комп'ютерне моделювання залізничних транспортних засобів: метод. вказівки до виконання практичних робіт, курсового та дипломного проектування / М. І. Капіца, Я. Калівода, Л. О. Недужа, О. Б. Очкасов, Д. В. Черняєв. – Д.: ДНУЗТ, 2018. – 59 с.
6. Лазарян, В. А. Устойчивость рейсовых экипажей / В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, М. Л. Коротенко. – К.: Наук. думка, 1972. – 193 с.
7. Мямлін, С. В. Дослідження динаміки та міцності вантажних вагонів: навч. посіб. / С. В. Мямлін, Л. О. Недужа, А. О. Швець. – Д.: «Свідлер А.Л.». – 2018. – 257 с.
8. Мямлин, С. В. Особенности конструкции ходовых частей тягового подвижного состава / С. В. Мямлин, О. Лунис, Л. А. Недужая // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 3 (69). – С. 130–146. doi: 10.15802/stp2017/104824.
9. Мямлин, С. В. Перспективы развития рынка локомотивов и их ходовых частей / С. В. Мямлин, Л. А. Недужая // Локомотив-інформ. – 2014. – № 8. – С. 4–8.
10. Мямлін, С. В. Роль студентської науки у формуванні світогляду інженера-механіка / С. В. Мямлін, Л. О. Недужа // Локомотив-інформ. – 2015. – № 1-2. – С. 55–57.
11. Мямлин, С. В. Совершенствование конструкции ходовых частей локомотивов / С. В. Мямлин, Л. А. Недужая // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 5 (47). – С. 124–136. doi: 10.15802/stp2013/17977.
12. Недужа, Л. О. Використання сучасного пакету програм при розв'язанні інженерних задач на залізничному транспорті / Л. О. Недужа, А. О. Швець // Локомотив-інформ. – 2016. – № 5-6. – С. 42–44.
13. Theoretical foundations for conceptually new rolling stock modules. Part 1: monograph / M. I. Gorbunov, O. V. Fomin, V. V. Kovalenko, R. Yu. Domin // V. Dahl East Ukrainian National University. – D.: Aksept PP, 2017. – 100 p.
14. Недужа, Л. О. Теоретичні та експериментальні дослідження міцнісних якостей хребтової балки вантажного вагона / Л. О. Недужа, А. О. Швець // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 1 (73). – С. 131–147. doi: 10.15802/stp2018/123457.
15. Татарінова, В. А. Застосування програмних комплексів при дослідженні стану транспортних засобів / В. А. Татарінова, Я. Калівода, Л. О. Недужа // Вісник сертифікації залізничного транспорту. – 2018. – № 04 (50). – С. 82–91.
16. Bondarenko, I. O. Modeling for establishment of evaluation conditions of functional safety of the railway track / I. O. Bondarenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 1, Issue 7 (79). – P. 4–10. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59874.
17. Kalivoda, J. Enhancing the Scientific Level of Engineering Training of Railway Transport Professionals / J. Kalivoda, L. O. Neduzha // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 6 (72). – С. 128–137. doi: 10.15802/stp2017/119050.
18. Klimenko, I. Parameter Optimization of the Locomotive Running Gear / I. Klimenko, J. Kalivoda, L. Neduzha // Proc. of 22nd Intern. Scientific Conf. «Transport Means. 2018». – 2018. – P. 1095–1098.
19. Kyryl'chuk, O. High Speed Stability of a Railway Vehicle Equipped with Independently Rotating Wheels / O. Kyryl'chuk, J. Kalivoda, L. Neduzha // Proc. of 24th Intern. Conf.

- «Engineering Mechanics 2018». – P. 473–476. doi: 10.21495/91-8-473.
20. Mathematical Simulation of Spatial Oscillations of the "Underframe-Track" System Interaction / I. Klimenko, L. Černiauskaite, L. Neduzha, O. Ochkasov // Proc. of 12th Intern. Conf. «Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems – ITELMS'2018». – P. 105–114.
21. Myamlin, S. Construction Analysis of Mechanical Parts of Locomotives / S. Myamlin, M. Luchanin, L. Neduzha // TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. – 2013. – Vol. 13, No 3. – P. 162–169.
22. Myamlin, S. Mathematical Modeling of a Cargo Locomotive / S. Myamlin, S. Dailidka, L. Neduzha // Proc. of 16th Intern. Conf. «Transport Means. 2012». – 2012. – P. 310–312.
23. Myamlin, S. Research of Innovations of Diesel Locomotives and Bogies / S. Myamlin, L. Neduzha, Ž. Urbutis // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 134. – P. 469–474. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.069.
24. Neduzha, L. O. Application of APM WinMachine Software for Design and Calculations in Mechanical Engineering / L. O. Neduzha, A. O. Shvets // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 2 (62). – С. 129–147. doi: 10.15802/stp2016/67328.
25. Pshin'ko, O. Influence of frequency characteristics of the locomotive on rational values of parameters of its vehicular part / O. Pshin'ko, S. Myamlin, L. Neduzha // Proc. Intern. Scientific Conf. «Mechanics 2016». – 2016. – P. 203–209.
26. Serdiuk, T. M. Modeling of influence of traction power supply system on railway automatics devices / Proc. of the 2017 Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe 2017. – Ind. 123. – 6 p.
27. Shykunov, O. A. Three-element bogie side frame strength / O. A. Shykunov // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 183–193. doi: 10.15802/stp2017/92535.
28. Spatial Vibration of Cargo Cars in Computer Modelling with the Account of Their Inertia Properties / S. Myamlin, L. Neduzha, O. Ten, A. Shvets // Proc. of 15th Intern. Conf. «Mechanika 2010». – 2010. – P. 325–328.
29. Tatarinova, V. A. Research of Locomotive Mechanics Behavior / V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 5 (77). – С. 104–114.

Ключові слова: рухомий склад, локомотив, теоретичні дослідження, коефіцієнти динаміки.

Ключевые слова: подвижной состав, локомотив, теоретические исследования, коэффициенты динамики.

Keywords: rolling stock, locomotive, theoretical research, dynamic coefficients.

Рецензенти:

д.т.н., проф. І. В. Клименко,
д.т.н., проф. В. І. Гаврилюк.

Надійшла до редколегії 29.10.2018.
Прийнята до друку 31.10.2018.