



МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ТОКОСЪЕМНОЙ ВСТАВКИ ТОКОПРИЕМНИКА С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВ MATLAB – SIMULINK

Мирсайтов Мирзиёд Мирозадович,
начальник отдела развития транспортной инфраструктуры,
e-mail: m.mirsaitov@mininnovation.uz;
ORCID: 0000-0003-3381-2147

Абдурахманов Баходир Ботир угли,
специалист 1-й категории,
e-mail: b.abdurahmanov@mininnovation.uz;
ORCID: 0000-0002-7604-0426

Викулов Илья Павлович,
доцент кафедры «Электрическая тяга»
ФГБОУ ВО Петербургского государственного университета
путей сообщения Императора Александра I,
e-mail: vikulov@pgups.ru

Министерство инновационного развития Республики Узбекистан

***Аннотация.** В работе приведена математическая модель износа токосъемных вставок токоприемника с целью определения параметра для диагностирования токоприемников грузовых электровозов в условиях Республики Узбекистан. Существующие математические модели взаимодействия между токоприемником и контактной сетью рассматриваются в виде многомерных моделей с приведенными массами. Для решения математических моделей можно воспользоваться средствами программы Matlab – Simulink. Применение компьютерных программ для решения задач математических моделей позволяет с высокой точностью провести расчеты, не затрачивая большого количества времени и средств. В ходе моделирования система «токоприемник – контактная сеть» рассматривалась в виде двухмерной модели с двумя степенями свободы. По результатам моделирования был определен диагностический параметр «ускорения колебательного движения» токосъемной вставки. Определение такого параметра основано на вибрационных перемещениях полоза токоприемника при взаимодействии с контактной сетью.*

***Ключевые слова:** токоприемник, токосъемная вставка, математическое моделирование, надежность, износ.*

MATLAB – SIMULINK YORDAMIDA TOK QABUL QILGICHNING TOK O‘TKAZUVCHI ELEMENTI YEYILISHINI MODELLASHTIRISH

Mirsaitov Mirziyod Mirozadovich,
transport infratuzilmasini rivojlantirish bo‘limi boshlig‘i;

Abduraxmanov Baxodir Botir o‘g‘li,
1-toifali mutaxassis



Vikulov Ilya Pavlovich,
Imperator Aleksandr I Sankt-Peterburg davlat transport universiteti
“Elektr tortish kuchi” kafedrası dotsenti

Innovatsion rivojlanish vazirligi

Annotasiya. Maqolada O‘zbekiston Respublikasi sharoitida yuk elektrovozlarining tok qabul qilgichning diagnostik parametrlarini aniqlash uchun tok qabul qilgichning tok o‘tkazuvchi elementi yeyilishining matematik modeli keltirilgan. Hozirgi tok qabul qilgich va kontakt tarmog‘i o‘rtasidagi o‘zaro ta‘sirni aniqlaydigan mavjud matematik modellar massalari kamaytirilgan ko‘p o‘lchovli modellar shaklida ko‘rib chiqiladi. Matematik modellarni yechish uchun Matlab – Simulink dasturi vositalaridan foydalanish mumkin. Bu dastur matematik modellarni yechishda kompyuter dasturlaridan foydalangan holda hisob-kitoblarni ko‘p vaqt sarf qilmasdan yuqori aniqlikda amalga oshirish imkonini beradi. Simulyatsiya paytida “tok qabul qilgich – kontaktlanuvchi tarmoq” tizimi ikki erkinlik darajasiga ega bo‘lgan ikki o‘lchovli model sifatida olindi. Simulyatsiya natijalari asosida “tebranish harakatining tezlanishi” diagnostika parametri aniqlandi. Bunday parametrni topish tok qabul qilgich elementining kontakt tarmog‘i bilan o‘zaro aloqada tebranish siljishlariga asoslanadi.

Kalit so‘zlar: pantograf, tok o‘tkazuvchi elementi, matematik modellashtirish, ishonchlilik, yeyilish.

MODELING THE WEAR OF CONTACT STRIPS OF PANTOGRAPH USING THE MATLAB - SIMULINK TOOLS

Mirsaitov Mirziyod,
Head Of Transport Infrastructure Development Dpt

Abdurakhmanov Bakhodir,
1st Category Specialist

Ilya Vikulov,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Associate Professor of Electric Traction Department

Ministry of Innovative Development

Abstract. The article presents a mathematical model of the wear of contact strips of pantograph which is destined to define a diagnostic parameter for determining pantograph of the freight electric locomotives in the Republic of Uzbekistan. Existing mathematical models of pantograph - contact network interactions are considered in the form of multidimensional models with reduced masses. The Matlab - Simulink tools can be used for solving the mathematical models. Computer programs for solving mathematical models enable efficient calculations at high accuracy. During the simulation, the current pantograph-contact network system was considered as a two-dimensional model with two degrees of freedom. The simulation results helped determine the diagnostic parameter of the “vibration acceleration” of the contact strips. Finding a diagnostic parameter is based on vibrational movements of the pantograph skid interacting with the contact network.

Keywords: current collector, current collector insert, mathematical modeling, reliability, wear.

Введение

Контакт между токоприемником и контактным проводом является наиболее важным элементом в передаче электрической энергии в современных поездах, движущихся с высокой скоростью. При таком движении в результате колебаний контактного провода происходит изменение силы взаимодействия между токоприемником и контактным проводом, что нередко приводит к потере контакта между ними. Для исключения таких ситуаций требуется постоянно совершенствовать взаимодействие компонентов этой системы с целью обеспечения постоянного контакта токоприемника с проводами сети на высокой скорости движения поезда с учетом износа элементов этой системы и подавления сигналов помех.

Ввиду сложности динамических процессов, происходящих в этой системе, при эксплуатации в реальных условиях движения поезда, а также с учетом высокой стоимости основных элементов этой системы все изменения в системе токоприемник – контактная сеть обосновываются на этапе динамического моделирования. Программное обеспечение современных компьютеров позволяет применять более совершенные методы моделирования режимов функционирования основных блоков системы токоприемника, активные методы управления этой системой с учетом изменения ее параметров и внешних воздействий.

В настоящей статье рассматривается износ токосъемной вставки, проявляющейся при взаимодействии токоприемника с контактным проводом в процессе эксплуатации электрического подвижного состава.

Материалы и методы

При моделировании взаимодействия токоприемника и контактной подвески токоприемник обычно представляют в виде приведенной массы, т.е. массы, движущейся в вертикальном направлении со скоростью точки приведения и обладающей такой же кинетической энергией, что и та часть токоприемника, которая заменяется приведенной массой. На рисунке 1 приведена одномассовая модель токоприемника. В этой

модели вся масса токоприемника приведена к точке контакта токоприемника и контактной подвески. В случае одномассовой модели не учитываются рессорные элементы токоприемника. Более качественные модели получаются, если токоприемник разделить на несколько приведенных масс [1].

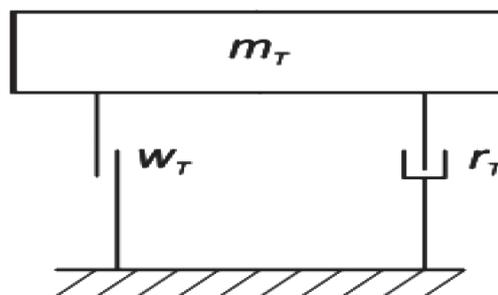


Рис. 1. Модель токоприемника с одной степенью свободы

Математическое описание контакта между токоприемником и контактным проводом является наиболее важной проблемой всей модели взаимодействия токоприемника и контактного провода. Вероятно, это также является причиной того, что до сих пор нет общего согласия по этой теме, и в доступной литературе трактуется по-разному. Часто используются два основных подхода: первый из них рассматривает контакт как жесткое ограничение, используя уравнения локального равновесия или множители Лагранжа. Второй подход основан на использовании методов штрафа [4].

При взаимодействии токоприемника и контактной подвески общая колебательная система обладает числом степеней свободы, близким к бесконечности. Рассмотрим это взаимодействие отдельных элементов системы, исходя из приведенных к соответствующим точкам масс (что для пути и контактной подвески совершенно условно) и учета связи между этими массами в виде жесткости вязкого и сухого трения. Принимая во внимание только наиболее существенные перемещения в вертикальной плоскости и значительно упростив колебательные системы пути и локомотива, можно при наличии контакта полза токоприемника с контактным проводом



представить для каждого интервала пролета общую колебательную систему с двумя степенями свободы (рис. 2) [2].

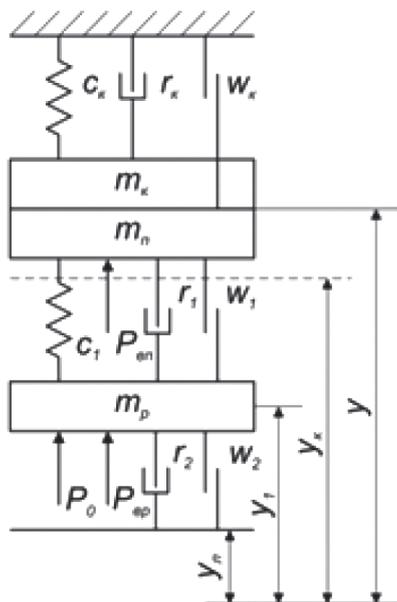


Рис. 2. Модель токоприемника с двумя степенями свободы

Колебания пути передаются на локомотив, масса которого значительно больше массы токоприемника. Поэтому, не принимая во внимание обратное взаимодействие токоприемника на локомотив, колебания последнего можно учесть, введя в схему вертикальные перемещения крыши. Эти колебания имеют определенный спектр частот и переменную амплитуду. Для упрощения расчеты производят при постоянной амплитуде A_n и основной грузовой частоте галопирования или подпрыгивания локомотива w_n , принятых по экспериментальным данным и усредненных для различных скоростей движения. В этом случае колебания крыши локомотива могут быть описаны функцией:

$$y_n = A_n \cos(w_n t + \varphi), \quad (1)$$

где $w_n = \frac{\pi V}{L}$ – частота возмущения;

V – скорость движения;

L – длина пролета.

Расчетные уравнения для одного интервала пролета получим в удобной для практических целей подвижной системе коор-

динат, начало которой перемещается вдоль пути вместе с токоприемником, а горизонтальная ось абсцисс расположена на произвольной высоте.

На основании принципа Даламбера справедливы следующие уравнения, если принять за положительное направление сил вверх:

$$\begin{aligned} -P_{ак} - P_k - P_1 + P_n' &= 0; \\ -P_{ап} - P_2 + P_1 + P_o + P_a' + P_p' &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где значения $P_{ап}$, P_1 и P_2 :

$$\begin{aligned} P_1 &= r_1 (\dot{y}_k - \dot{y}_p) + ж_1 (y_k - y_p - h) + w_1; \\ P_{ап} &= m_p \ddot{y}_p; \\ P_2 &= r_2 (\dot{y}_p - \dot{y}_л) + w_2, \end{aligned} \quad (3)$$

а силы $P_{ак}$ и P_k :

$$\begin{aligned} P_{ак} &= (m_k + m_n) \ddot{y}_k; \\ P_k &= r_k \dot{y}_k + ж_k (y_k - z_k) + w_k. \end{aligned} \quad (4)$$

Выполнив соответствующие преобразования, получим искомую систему дифференциальных уравнений в виде:

$$\begin{aligned} (m_k + m_n) \ddot{y}_k + r_k \dot{y}_k + ж_k (y_k - z_k) + w_k + r_1 (\dot{y}_k - \dot{y}_p) + ж_1 (y_k - y_p - h) + w_1 &= P_n'; \\ m_p \ddot{y}_p + r_2 (\dot{y}_p - \dot{y}_л) + w_2 - r_1 (\dot{y}_k - \dot{y}_p) - ж_1 (y_k - y_p - h) - w_1 &= P_o + P_a' + P_p'. \end{aligned} \quad (5)$$

Расчетные дифференциальные уравнения (5) для системы с двумя степенями свободы приводят к виду:

$$\begin{aligned} \ddot{y}_k + A_1 \dot{y}_k + A_2 \dot{y}_p + A_3 y_k + A_4 y_p &= A_5; \\ \ddot{y}_p + B_1 \dot{y}_p + B_2 \dot{y}_k + B_3 y_p + B_4 y_k &= B_5; \end{aligned} \quad (6)$$

Значения коэффициентов в уравнениях (6) в каждом интервале пролета определяются следующими выражениями:

$$A_1 = \frac{r_k + r_1}{m_k + m_n}; \quad A_2 = \frac{r_1}{m_k + m_n};$$

$$A_3 = \frac{ж_k + ж_1}{m_k + m_n};$$

$$A_4 = \frac{ж_1}{m_k + m_n}; \quad A_5 = \frac{1}{m_k + m_n};$$

$$\frac{1}{m_k + m_n} (P_n' - w_k - w_1 + ж_k z_k + ж_1 h);$$



$$B_1 = \frac{r_1 + r_2}{m_p}; \quad B_1 = -\frac{r_1}{m_p}; \quad B_3 = \frac{ж_1}{m_p};$$

$$B_4 = -\frac{ж_1}{m_p}; \quad B_5 = \frac{1}{m_p} (P_0 + P_a' + P_p' + w_1 - w_2 - ж_1 h + r_2 \dot{y}_d).$$

Основная часть

Процесс построения модели в системе Simulink представляет собой последовательность выбора необходимых блоков из соответствующих библиотек и соединение их связями [6].

Для моделирования системы токоприемник – контактная сеть используем следующие блоки:

- линейный преобразователь (множитель $1/mI$);
- интегратор;
- функциональный блок Fcn ;
- осциллограф – блок $Scope$;
- блок Mux ;
- сумматор $Sum 1$.

Для моделирования использованы следующие исходные данные (табл.).

Таблица 1

Исходные данные

Амплитуда колебаний крыши локомотива	$A_l = 0.02$	м
Скорость локомотива	$V = 50$	км/ч
Длина пролета	$L = 50$	м
Приведенная масса рам токоприемника	$m_p = 15$	кг
Жесткость каретки	$ж_1 = 6000$	Н/м
Сила сопротивления сухого трения каретки токоприемника	$w_1 = 2,5$	Н с/м
Приведенная масса полоза токоприемника	$m_n = 10$	кг
Жесткость контактной подвески	$ж_к = 2100$	н/м
Коэффициент вязкого трения	$r_k = 15$	н с/м
Приведенная масса контактного провода	$m_k = 40$	кг
Жесткость рам токоприемника	$r_2 = 2100$	Н/м
Сила сопротивления сухого трения рам токоприемника	$w_2 = 5$	Н с/м

Модель Matlab – Simulink токоприемник – контактная подвеска представлена на рисунке 3.

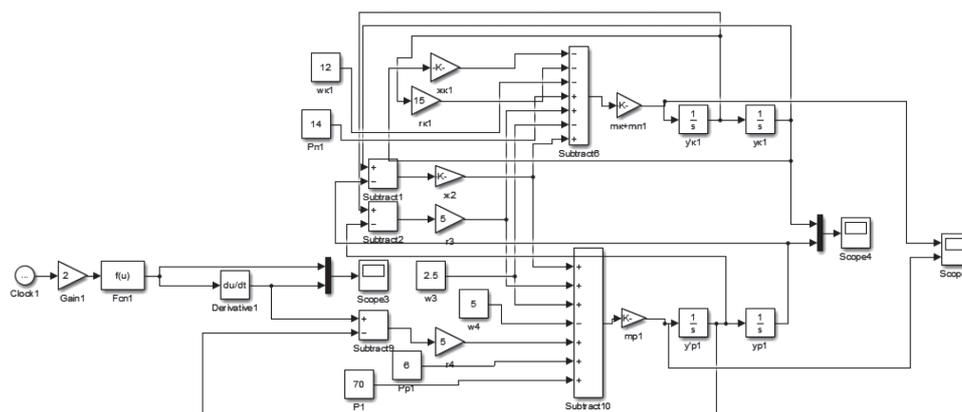


Рис. 3. Блок схема модели токоприемник – контактная подвеска

Выходные сигналы колебательного ускорения полоза токоприемника и контактной подвески при различных массах в

процессе взаимодействия токоприемника и контактного провода отображены на рисунке 4.

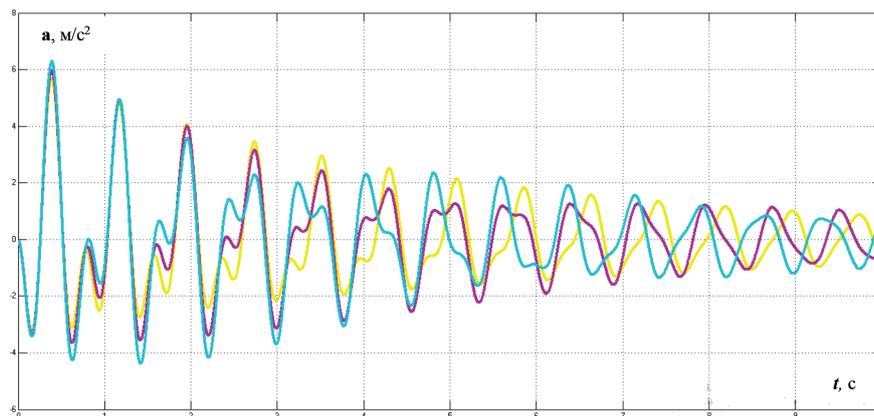


Рис. 4. Выходные сигналы колебательного ускорения полоза и контактного провода модели токоприемник – контактная подвеска при различных массах полоза и контактного провода: •1 – приведенная масса полоза токоприемника и контактной подвески; •2 – приведенная масса полоза токоприемника и контактной подвески 49 кг; •3 – приведенная масса полоза токоприемника и контактной подвески 48 кг

При взаимодействии токоприемника и контактного провода происходит процесс трения. В процессе трения появляется износ, как контактных вставок токоприемника, так и контактного провода. Износ контактных вставок сопровождается умень-

шением массы полоза токоприемника.

На рисунке 5 представлены графики колебательного ускорения модели токоприемник – контактная сеть при различных массах полоза и контактного провода при установившемся режиме.

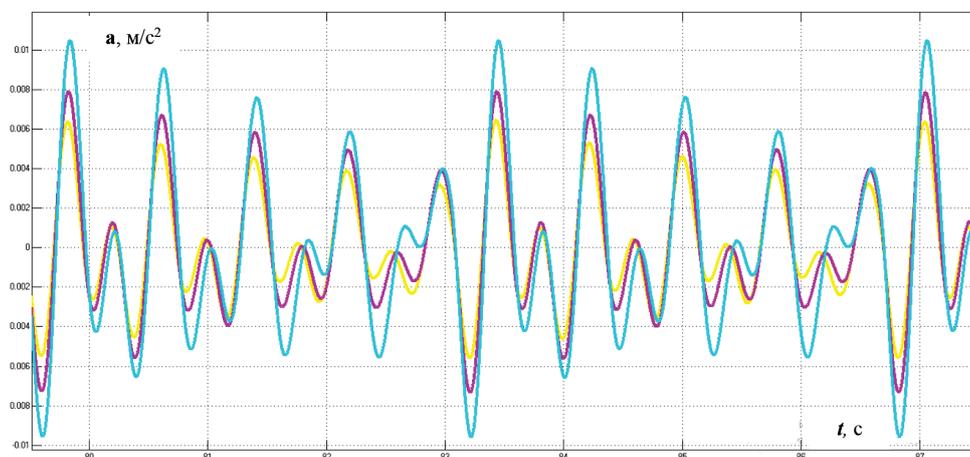


Рис. 5. Выходные сигналы полоза и контактного провода модели токоприемник – контактная сеть при различных массах полоза и контактного провода при установившемся режиме: •1– приведенная масса полоза токоприемника и контактной подвески 50 кг; •2 – приведенная масса полоза токоприемника и контактной подвески 49 кг; •3 – приведенная масса полоза токоприемника и контактной подвески 48 кг

Как видно из рисунка 5 при установившемся режиме взаимодействия токоприемника и контактной подвески при различных массах полоза изменя-

ется амплитуда колебательного ускорения.

Как показывает анализ математической модели колебательного движения системы



токоприемник – контактная сеть, при трении токосъемной вставки о контактный провод, сопровождающемся изменением массы полоза токоприемника и контактного провода, изменяется колебательное ускорение полоза токоприемника. Это позволяет нам определить колебательное ускорение полоза токоприемника как основной диагностический параметр, с помощью которого можно судить о состоянии токосъемной вставки на всем времени эксплуатации в пути.

Выводы

1. Ввиду сложности процессов при взаимодействии токоприемника и контактной подвески применяется математическое мо-

делирование, которое может решить задачи процесса взаимодействия токоприемника и контактной подвески.

2. С помощью средств Matlab – Simulink можно не только решить многомерные модели системы токоприемник – контактная подвеска, но и оценить состояние контактных вставок токоприемника.

3. Изменение массы полоза токоприемника прямо пропорционально амплитуде колебательного ускорения полоза токоприемника.

4. Ввиду сложности процессов, а также наличия многих факторов, влияющих на износ контактных вставок, математические модели не могут дать в полной мере ответ о состоянии токосъемных вставок.

REFERENCES

1. Abdurakhmanov B.B. Kontrol' sostoyaniya tokoprovodyashih vstavok elektrovozov VL80S. B.B. Abdurakhmanov, A.P. Zelenchenko. Transport: problemi, idei, perspektivi: sbornik trudov LXXVI Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferensii studentov, aspirantov i molodih uchenyh. [Transport: problems, ideas, prospects: collection of works of the LKSVY All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists]. SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2016, pp. 9-12.

2. Abdurakhmanov B.B. Metod diagnostiki tokoprovodyashih vstavok tokopriemnikov elektrovozov / B.B. Abduraxmanov, A.P. Zelenchenko // Transport: problemi, idei, perspektivi: sbornik trudov LXXVII Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferensii studentov, aspirantov i molodih uchenyh. [Method for diagnostics of current-carrying inserts of electric locomotive current collectors. Transport: problems, ideas, prospects: collection of works of the LXXVII All-Russian scientific and technical school and graduate school of students]. SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2017, pp. 13-18.

3. Berent V.Ya. Svoystva tokos'emnih elementov polozov tokopriemnikov elektropodvijnogo sostava i oblasti ih racional'nogo ispol'zovaniya. [The properties of the current collector elements of the skids of the pantographs of the electric rolling stock and the area of their rational use]. Tehnologiya. 1998, no 3-4, pp. 32-41.

4. Efimov D.A. Sovershenstvovanie tokopriemnikov na osnove modelirovaniya ix vzaimodeystviya s kontaktnimi podveskami [Improvement of pantographs based on modeling their interaction with overhead catenaries]: dis. kand. tex. nauk: 05.22.07 / D.A. Yefimov. – Yekaterinburg: UrGUPS, 2015, 162 p.

5. Zelenchenko A.P. Opredelenie sostoyaniya tokoprovodyashix vstavok tokopriemnikov elektrovozov [Determination of the state of contact strips of electric locomotive pantograph] / A.P. Zelenchenko, B.B. Abduraxmanov // Prorivnie tekhnologii elektricheskogo transporta / Materiali devyatogo mejdunarodnogo simpoziuma «Eltrans-2017» («Eltrans-2017»), posvyashennogo 130-letiyu osnovaniya G.K. Merchingom elektrotexnicheskoy shkoli v Rossii 18-20 oktyabrya 2017 goda. – SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2019, pp. 171-176.



6. Li V. N. O mexanizmax razrusheniya ugol'nix vstavok tokopriemnikov [About the mechanisms of destruction of carbon strips of pantographs] / V. N. Li, S. N. Ximuxin // Mir Transporta, 2005, no 3, pp. 80-82.
7. Markvardt K.G. Kontaktnaya set'. [Contact network] Uchebnik dlya vuzov j.-d. trans. / K.G. Markvardt, Moscow, Transport, 1994, 335 p.
8. Plaks A.V. Issledovanie vzaimodeystviya tokopriemnika i kontaktnoy seti pri vysokix skorostyax dvizheniya / A.V. Plaks // Sb. nauch. tr. LIJTa, 1959, no 167, pp. 68-76.
9. Smirnov V. A. Povishenie kachestva kontrolya texnicheskogo sostoyaniya tokopriemnikov elektricheskogo podvijnogo sostava magistral'nix jeleznix dorog [Improving the quality of control of the technical condition of pantograph of electric rolling stock of main railways]: dis. kand. tex. nauk: 05.22.07 / V. A. Smirnov. – Omsk: OmGUPS, 2007, 128 p.
10. Frayfel'd A.V. Proektirovanie kontaktnoy seti. [Contact network design]. Moscow, Transport, 1991, 335 p.
11. Aydin I., Karakose M. and Akin E., Monitoring of pantograph-catenary interaction by using particle swarm based contact wire tracking, Systems Signals and Image Processing (IWSSIP) 2014. International Conference on. pp. 23-26, 2014, May.
12. Bociolone M., Bucca G., A. Collina and L. Comolli, «Pantograph-catenary monitoring by means of fibre Bragg grating sensors: Results from tests», Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 41, no. 1-2, pp. 226-238, 2013.
13. Bucca G. A Procedure for the Wear Prediction of Collector Strip and Contact Wire in Pantograph–Catenary System / G. Bucca, A. Collina. Wear, 266(1–2), 2009. pp 46-59.
14. Collina A. Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction / A. Collina, S. Bruni, Vehicle System Dynamics 38 (4), 2002, pp. 261-291.
15. Klapas D. Simulation of wear in overhead current collection systems / D. Klapas, F.A. Benson, R. Hackam, Review of Scientific Instruments 56, 1985, pp. 1820-1828.
16. Matvejevs A. Pantograph-Catenary System Modeling Using MATLAB-Simulink Algorithms/ A. Matvejevs, A. Matvejevs. Scientific Journal of Riga Technical University Computer Science. Information Technology and Management Science, 2010, pp. 38-44.
17. http://mathmod.narod.ru/models/Simul1/Simul1.htm#_Toc512158911
18. Usuda T. Method for detecting step-shaped wear on contact strips by measuring catenary vibration / T. Usuda, M. Ikeda, Y. Yamashita // Quarterly report of RTRI, 2011, vol. 52, no 4, pp. 237-243.
19. Yang H. J. Effect of the Vibration on Friction and Wear Behavior between the Carbon Strip and Copper Contact Wire Pair / H.J. Yang, G.X. Chen, S. D. Zhang, W.H. Zhang, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – Part J: Journal of Engineering Tribology, 226, 2012, pp. 722-728.
20. Yamashita, Y., et al.: A basic study on the method for detecting step-shaped wear on contact stripes. Condition monitoring and diagnostic engineering management, 2010, pp. 305-312.