

16. Podverbnyi V.A. Vybora varianta zheleznoi dorogi na osnove kriteriya nechetkoi poleznosti [The choice of the railway option on the basis of the criterion of fuzzy utility]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction], 2000. No. 7. Pp. 10–13.
17. Tolmachev S.G., Prinyatie proektnykh reshenii na osnove nechetkogo otnosheniya predpocheniya [Adoption of design decisions based on a fuzzy preference relation] *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2014. No. 5. Pp. 34–39.
18. Pavlov A.N., Sokolov B.V. Prinyatiya reshenii v usloviakh nechetkoi informatsii [Decision-making in the conditions of the fuzzy information]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2006. 72 p.
19. Piegat A. Fuzzy modeling and control. Physica Verlag, Heidelberg, 2001. 798 p.
20. Zade L.A. Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh reshenii [The concept of a linguistic variable and its application to the approximate solution-making]. Moscow, Mir Publ., 1976. 168 p.
21. Tolmachev S.G. Zadacha organizatsii edinogo informatsionnogo prostranstva dlya podderzhki prinyatiya proektnykh reshenii v usloviyakh nechetkoi iskhodnoi informatsii [The task of organizing a single information space to support the adoption of design decisions in conditions of fuzzy initial information]. *Izvestiya GUAP. Aerokosmicheskoe priborostroeniye* [News of SU-AI. Aerocosmic instrument engineering], 2013. No. 4. Pp. 29–33.
22. Wang Y.J., Kao C.S., Liu L.J. The selection of sales managers in enterprise by fuzzy multi-criteria decision-making. *Proc. of the Intern. Conf. on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI 2010), Sanya, China, Oct. 23–24, 2010. Part II. P. 142–151.*
23. Vedernikov Yu. V. Metod mnogokriterial'nogo predpocheniya slozhnykh sistem [A method of multi-criterion prioritization of complex systems]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2009. No. 1. Pp. 52–59.
24. Chernov V.G. Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv. Reshenie zadach mnogokriterial'nogo vybora al'ternativ : ucheb. posobie [The basics of fuzzy sets theory. Solving problems of multicriterial choice on the basis of geometrical projection of fuzzy sets]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2007. No. 1. Pp. 46–51.
25. Podverbnyi V.A. Vybora proektnogo resheniya v nechetkoi srede na osnove indeksov ranzhirovaniya [The choice of a design solution in a fuzzy environment based on ranking indices]. *Zheleznodorozhnyi transport. Seriya «Stroitel'stvo. Proektirovaniye»* [Railway Transport. Series "Construction. Design"] EI / TSNIITEI IPU Publ., 2000. Iss. 2-3. Pp. 34–47.

**Информация об авторах**

**Перельгина Анастасия Анатольевна** – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: perelygina\_aa@irgups.ru

**Подвербный Вячеслав Анатольевич** – д-р техн. наук, доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: vpodverbnyi@mail.ru

**Information about the authors**

**Anastasiya A. Perelygina** – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: perelygina\_aa@irgups.ru

**Vyacheslav A. Podverbnyi** – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: vpodverbnyi@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).208-215

УДК 519. 542.7

## Экспериментальная проверка качества адаптации математической модели контактной сети для расчета частоты колебаний

**А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко, А. В. Тарасенко** ✉

*Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация*

✉ alessandro-tar@yandex.ru

**Резюме**

На сегодняшний день одним из главных параметров работы контактной сети является натяжение проводов. Изменение натяжения контактных проводов обеспечивает наибольшее влияние не только на показатели контактной подвески, но и на режим работы системы токосъема. В качестве математической модели предлагается использовать растянутый стержень, позволяющий измерять частоту колебаний контактных проводов в горизонтальной плоскости. Запись колебаний проводов осуществляется с помощью датчика ускорений (акселерометра), который устанавливается между струнами на контактном проводе. Сигнал преобразуется посредством быстрого преобразования Фурье в частотный спектр колебаний. На основании полученных частот определяется натяжение контактных проводов. В статье представлена программа экспериментальных исследований по измерению частот поперечных колебаний контактного провода. Экспериментальные испытания проводились на специальном стенде в лабораторных условиях. Данная программа учитывает факторы, влияющие на частоту колебаний проводов. Для оценки влияния факторов разработана программа полного факторного эксперимента. Полученные расчетные и экспериментальные значения частоты колебаний проводов позволяют оценить адекватность математической модели контактной сети с помощью критерия Фишера и определить среднюю абсолютную ошибку достоверности. Благодаря своевременному контролю натяжения проводов в реальном масштабе времени появляется возможность повысить работоспособность всей системы токосъема, безопасность движения поездов, а также на основе поступающих сведений о нарушениях в работе уточнить прогнозные модели и избежать нерациональных расходов.

**Ключевые слова**

частота колебаний, натяжение контактного провода, испытательный стенд, полный факторный эксперимент

**Для цитирования**

Смердин А. Н. Экспериментальная проверка качества адаптации математической модели контактной сети для расчета частоты колебания / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко, А. В. Тарасенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 208–215. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).208-215

**Информация о статье**

поступила в редакцию: 10.11.2020, поступила после рецензирования: 21.11.2020, принята к публикации: 11.01.2021

## Experimental verification of the quality adaptation mathematical model of the contact network for calculation the vibration frequency

A. N. Smerdin, E. A. Butenko, A. V. Tarasenko ✉

Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

✉ alessandro-tar@yandex.ru

**Abstract**

To this date, one of the main parameters of the overhead contact network is the wires tension. Changing the tension of the contact wires provides the greatest impact not only on the indicators of the catenary, but also on the operating mode of the current collection system. As a mathematical model, it is proposed to use a stretched rod, which makes it possible to measure the vibration frequency of the contact wires in the horizontal plane. Recording of wire vibrations is carried out using an acceleration sensor (accelerometer), which is installed between the strings on the contact wire. The signal is converted using Fast Fourier Transform to the frequency spectrum of the oscillations. Based on the obtained frequencies, the tension of the contact wires is determined. The article presents a program of experimental research to measure the frequency of transverse vibrations of the contact wire. Experimental tests were carried out on a special stand in laboratory conditions. This program takes into account the factors affecting the frequency of vibrations of wires. To assess the influence of factors, a program has been developed for complete rotational planning of the experiment. The obtained calculated and experimental values of the frequency of vibrations of wires allow us to assess the adequacy of the mathematical model of the overhead contact network using the Fisher criterion and determine the average absolute error of reliability. Thanks to the timely control of the wires tension in real time, it becomes possible to increase the operability of the entire current collection system, train traffic safety, and also, based on the incoming information about violations in the work, to clarify the forecast models and avoid irrational costs.

**Keywords**

vibration frequency, overhead wire tension, test bench, full factorial experiment

**For citation**

Smerdin A. N., Butenko E. A., Tarasenko A. V. Eksperimental'naya proverka kachestva adaptatsii matematicheskoy modeli kontaktnoy seti dlya rascheta chastoty kolebaniya [Experimental verification of the quality adaptation mathematical model of the contact network for calculation the vibration frequency]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 208–215. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).208-215

**Article Info**

Received: 10.11.2020, Revised: 21.11.2020, Accepted: 11.01.2021

**Введение**

На сегодняшний день согласно положениям «Программы организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации» [1-3] предусмотрено увеличение полигона скоростного и высокоскоростного движения. При увеличении скорости движения предъявляются повышенные требования не только к параметрам, но и к показателям контактной сети. Контактная сеть должна обеспечивать безопасность движения поездов и надежность работы системы токосъема.

Одним из важнейших показателей контактной подвески является изменение натяжения контактного провода и несущего троса. Натяжение контактного провода изменяется достаточно быстро, что ока-

зывает существенное влияние на режим работы системы токосъема [4-7].

Анализ работы по обслуживанию контактной сети дирекции по энергообеспечению показывает, что число отказов проводов и устройств контактной сети остается достаточно высоким, не смотря на увеличение затрат на их техническое обслуживание [8, 9].

Имеющиеся средства и методы измерения не обеспечивают снижения числа нарушений работы контактной сети [10-12]. Таким образом, нужно отметить актуальность развития диагностической подсистемы.

Для определения натяжения контактных проводов предлагается использовать метод, основанный на измерении частоты затухающих колебаний контактных проводов в горизонтальной плоскости [13-

15]. Данный метод позволяет в автономном режиме измерять натяжение контактного провода в произвольном месте анкерного участка, а также дает возможность дистанционно и оперативно контролировать состояние контактной подвески.

Для определения расчетной частоты колебаний контактного провода используется следующая формула:

$$f = \sqrt{\frac{\pi^4 \cdot r^4 \cdot E_{кп} \cdot J_{кп}}{m_{кп} \cdot l^4} \cdot \left(1 + \frac{K \cdot l^2}{\pi^2 \cdot r^2 \cdot E_{кп} \cdot J_{кп}}\right)} \cdot 2\pi, \quad (1)$$

где  $E_{кп}$  – модуль упругости материала контактного провода сплошного сечения, Н·м<sup>2</sup>;  $J_{кп}$  – момент инерции поперечного сечения контактного провода относительно главной центральной оси, м<sup>4</sup>;  $K$  – натяжение контактного провода, Н;  $m_{кп}$  – погонная масса контактного провода, кг/м;  $r$  – номер гармоники;  $l$  – длина пролета, м.

Чтобы оценить адекватность математической модели необходимо провести экспериментальные исследования по измерению частоты колебаний проводов в поперечной плоскости. Вместо контактного провода и несущего троса предлагается для снижения требуемого значения натяжения при сохранении адекватности использовать стальные провода марки Ст3 различного диаметра.

#### Исследование закономерностей расчетной частоты колебаний контактного провода в лабораторных условиях

Для проведения лабораторных испытаний используется специальный стенд для исследования колебаний контактного провода в горизонтальной плоскости, позволяющий оценить частоту колебаний при варьировании следующих параметров:

- погонная масса контактного провода;
- длина пролета;
- натяжение провода.

Испытательный стенд (рис. 1) состоит из провода, грузовых компенсирующих устройств и акселерометра, установленного в середине пролета.



**Рис. 1.** Вертикальная проекция колебаний пролета контактной сети под действием внешнего воздействия импульса, приложенного однократно в центре провода

**Fig. 1.** Vertical projection of oscillations of the span the contact network under the influence of external action a pulse applied in the center of the wire

Испытания включают следующие этапы проведения на каждом цикле варьирования параметров, в соответствии с программой полного факторного эксперимента:

1. Подготовка проводов с погонной массой от 0,008 до 0,024 кг/м с интервалом 0,004 кг/м.
2. Установка кронштейнов для крепления проводов от 3,4 до 17 м.
3. Обеспечение натяжения проводов от 114 до 346 Н с заданным интервалом 58 Н.
4. Измерение температуры провода производится пирометром.
5. Осуществляется запись колебаний с помощью датчика ускорения (акселерометра).
6. Преобразование сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье.
7. Определение натяжения с помощью расчетной зависимости.
8. По окончании испытаний формируется протокол с зависимостью частоты колебаний провода от натяжения.

#### Оценка адекватности математической модели, основанной на измерении частоты поперечных колебаний контактного провода

Для оценки влияния погонной массы, длины пролета и натяжения на частоту колебаний проводов в горизонтальной плоскости разработана программа полного факторного эксперимента типа 2<sup>3</sup>

В рамках эксперимента зафиксированные факторы учтены постоянными и представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Исходные данные для проведения эксперимента

**Table 1.** Initial data for the experiment

Материал провода	Ст3	
Модуль упругости, Н·м <sup>2</sup>	2·10 <sup>11</sup>	
Момент инерции, м <sup>4</sup>	D=1,1мм	2,29·10 <sup>-14</sup>
	D=2 мм	2,5·10 <sup>-13</sup>
Температура окружающего воздуха, °С	23	

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях при изменении трех основных факторов: погонная масса, длина пролета и натяжение контактного провода (табл. 2).

Провода с погонными массами использовались со следующими диаметрами для контактного провода и несущего троса: 2·0,008 кг/м – 1,1 мм; 2·0,016 кг/м – 1,7 мм и 2·0,024 кг/м – 2 мм.

Матрица условий проведения последовательно-опытов эксперимента (табл. 3) была составлена на основании уровней и интервалов варьирования факторов.

**Таблица 2.** Уровни и интервалы варьирования факторов  
**Table 2.** Levels and intervals of variation factors

Наименование фактора	Кодовое обозначение	Уровни варьирования факторов, соответствующие кодированным			Интервал варьирования
		+1	0	-1	
$m_{КП}$ , кг/м	$x_1$	2·0,012	2·0,016	2·0,008	2·0,004
$l$ , м	$x_2$	10,2	6,8	3,4	3,4
$K$ , Н	$x_3$	2·315	2·215	2·115	2·100

**Таблица 3.** Матрица планирования эксперимента и результатов расчета частоты колебаний проводов и тросов контактной подвески

**Table 3.** Matrix planning the experiment and the results of calculating the vibration frequency wires and cable suspension

№ опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	Параллельные опыты $f_u^o$	Среднее значение параллельных	$f^p$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	16,68	16,74	16,64
									16,76		
									16,79		
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	10,14	10,18	9,49
									10,24		
									10,16		
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	6,53	6,58	6,53
									6,59		
									6,62		
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	4,27	4,29	4,18
									4,31		
									4,30		
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	27,35	20	20,07
									27,26		
									27,33		
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	15,37	10,42	10,27
									15,44		
									15,45		
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	10,73	10,75	10,65
									10,77		
									10,75		
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	5,50	5,48	5,52
									5,45		
									5,49		

Уравнение модели эксперимента частоты колебаний имеет вид:

$$f_u^p = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения регрессии были рассчитаны на основании полученных результатов опытов, выполненных в соответствии с планом эксперимента:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \overline{f_u^o}, \quad (3)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{iu} \overline{f_u^o}, \quad (4)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{iu} x_{ju} \overline{f_u^o} \quad i \neq j, \quad (5)$$

$$b_{ik} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{iu} x_{ij} x_{ku} \overline{f_u^3} \quad i \neq j \neq k \quad (6)$$

где  $N$  – число опытов;  $n$  – количество факторов;  
 $\overline{f_u^3}$  – среднее значение параметра оптимизации из  
 трех параллельных опытов.

Коэффициенты уравнений регрессии для трех факторов определены в соответствии с принятой моделью и приведены в табл. 4.

**Таблица 4.** Коэффициенты уравнений регрессии  
**Table 4.** Coefficients of regression equations

Обозначение коэф- фициентов регрессии	Значение коэффициентов регрессии
$b_0$	10,46
$b_1$	-3,06
$b_2$	-3,69
$b_3$	1,2
$b_{12}$	1,17
$b_{13}$	-0,66
$b_{23}$	0,14
$b_{123}$	-0,0888

Некоторые из коэффициентов регрессии могут быть малыми, и их можно исключить из уравнения. Принято считать, что коэффициент регрессии про-  
 веряют по критерию Стьюдента:

$$t_{a.n.} \geq \frac{|b_j| \cdot \sqrt{N}}{\sqrt{S_j^2}}, \quad (7)$$

где  $t_{a.n.}$  – табличное значение критерия Стьюдента;  
 $S_j^2$  – среднее квадратичное отклонение, определяет-

ся по выражению:  $S_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (f_u^3 - \overline{f_u^3})^2}{n-1}$ ;

Значения среднеквадратического отклонения для каждого опыта эксперимента приведены в табл. 5.

**Таблица 5.** Среднеквадратическое отклонения  
 для каждого опыта эксперимента  
**Table 5.** Standard deviation for each experiment

№ опыта	$S_j^2$
1	0,0056
2	0,0026
3	0,0042
4	0,0009
5	0,095
6	0,0038
7	0,0008
8	0,0014

Сравнивая значения коэффициентов регрессии с табличными значениями критерия Стьюдента результат показал, что коэффициент регрессии что  $b_{123}$

незначительно влияет на уравнение и поэтому его исключаем.

Уравнение регрессии в кодированном виде, имеет вид:

$$f_u^p = 10,46 - 3,06 \cdot x_1 - 3,68 \cdot x_2 + 1,2 \cdot x_3 + 1,17 \cdot x_1 \times x_2 - 0,66 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,14 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (8)$$

Кодированные значения факторов связаны с натуральными следующими зависимостями:

$$x_1 = \frac{m_{KП} - m_{KП(0)}}{\Delta_1} = \frac{m - 0,032}{0,016}, \quad (9)$$

$$x_2 = \frac{l - l_0}{\Delta_2} = \frac{l - 6,8}{3,4}, \quad (10)$$

$$x_3 = \frac{K - K_0}{\Delta_3} = \frac{K - 430}{200}, \quad (11)$$

где  $m_{KП}$ ,  $K$ ,  $l$  – основные уровни факторов в натуральных выражениях;  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$  – интервалы варьирования факторов.

Переходя от кодированных значений факторов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , получим зависимость частоты колебаний контактного провода в горизонтальной плоскости от варьируемых параметров:

$$f_u^p = 23,802 - 497,62 \cdot m_{KП} - 1,86 \cdot l + 2,24 \cdot 10^{-2} \cdot K + 43 \times \times l \cdot m_{KП} - 0,83 \cdot K \cdot m_{KП} - 41,18 \cdot 10^{-5} \cdot K \cdot l. \quad (12)$$

Проверка оценки адекватности модели выполняется по критерию Фишера [16-18] по результатам проведенных экспериментальных и теоретических исследований:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{воспр}^2} \leq F_{табл}, \quad (13)$$

где  $S_{ад}$  – дисперсия адекватности, определяется как

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (\overline{f_u^3} - f_u^p)^2}{N - (n + 1)}; \quad S_{воспр}^2 - \text{дисперсия воспроизво-}$$

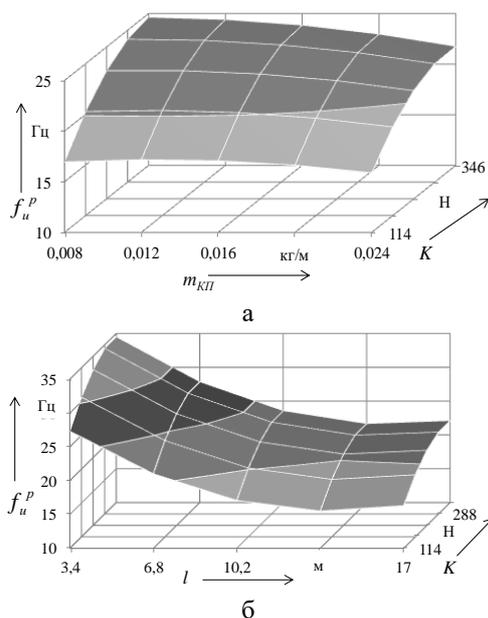
димости,  $S_{воспр}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{N}$ ;  $f_j^p$  – расчетное значение

функции математической модели;  $F_{табл}$  – табличное значение критерия Фишера.

По расчетам значение критерия Фишера получилось меньше табличного, что свидетельствует об адекватности математической модели. Полученное уравнение регрессии отличается от экспериментальных значений на величины, не превышающие ошибку опыта (< 5%).

Для повышения достоверности результатов эксперимента определяется средняя абсолютная ошибка  $MAPE$ :

$$MAPE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{|f_j^3 - f_j^p|}{f_j^3} \cdot 100\% \quad (14)$$



**Рис. 2.** Результаты расчетов изменения частоты колебаний проводов в горизонтальной плоскости: от погонной массы и натяжения при длине пролета  $l = 10,2$  м (а); от длины пролета и натяжения провода при погонной массе  $m_{КП} = 0,016$  кг/м

**Fig. 2.** The results of calculations change in the frequency of vibrations of wires in the horizontal plane: from the linear mass and tension with a span length  $l =$

10.2 m (a); on the span length and wire tension at a linear mass of  $m_{CW} = 0,016$  kg / m

Средняя ошибка достоверности составляет 0,014%.

По результатам экспериментального исследования построены поверхности изменений частоты колебаний от погонной массы  $m_{КП}$  и натяжения  $K$  (рис. 2, а) провода при длине пролета  $l = 6,8$  м, а также поверхности изменения частоты колебаний от длины пролета  $l$  и натяжения  $K$  провода (рис. 2, б) при погонной массе  $m_{КП} = 0,016$  кг/м.

На графиках видно, что частота колебаний провода зависит не только от массы контактного провода, но от длины пролета и натяжения.

В лаборатории «Конструкции контактных сетей, линий электропередачи и токосъема» им. профессора Михеева» ОмГУПС в инициативном порядке ведутся работы по созданию программного обеспечения для использования измерительных устройств натяжения в автоматических системах диагностики контактной сети.

### Заключение

Экспериментальные исследования показали, что данная математическая модель адекватна и может быть использована для определения натяжения контактных проводов в системе мониторинга и диагностики контактной сети, что особенно актуально для скоростных и высокоскоростных участков железной дороги.

### Список литературы

1. Программа организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=5098](http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5098).
2. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 г. («Белая книга») ОАО «РЖД» / ОАО «РЖД». – М., 2011. 340 с.
3. Павлов, В. М. Адаптация методик диагностирования состояния инфраструктуры системы токосъема при повышенных скоростях движения электроподвижного состава / В. М. Павлов, А. Н. Смердин, И.Е. Чертков, и др. // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации контактных подвесок и токоприемников электрического транспорта : сборник научных статей с международным участием / Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2011. – С. 56-65.
4. Capitaine, A. Tension variability in contact wire and messenger wire of auto tensioned catenaries/ A. Capitaine , J.-P. Bianchi, P. Constant , F. Genest // World Congress on Railway Research (WCRR) 2019, Tokyo, Japan, pp. 1–8, 2019.
5. Ковалев, А. А. Исследование работы устройств компенсации натяжения в контактной подвеске / А. А. Ковалев, Н. В. Крапивин // Транспорт Урала. 2018. №4 (59). С. 86–90.
6. Галкин, А. Г. Математическое моделирование и информационные технологии в задачах диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог: монография / А. Г. Галкин, А. Н. Митрофанов, С. А. Митрофанов // Екатеринбург: Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2012. — 226 с.
7. Емельянова, М. Н. Повышение качества токосъема за счет выбора рационального натяжения проводов контактной подвески : специальность 05.22.07 «Подвижной состав, тяга поездов и электрификация железных дорог» : диссертация на соискание кандидата технических наук / Емельянова Марина Николаевна; Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. – Москва, 2015. – 102 с.
8. Лисневский, П. Ю. Некоторые аспекты в проблеме изучения колебаний проводов ЛЭП в воздушном потоке / П. Ю. Лисневский, В. Н. Ли // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2019. №2(62). С. 66–71.
9. Лукьянова, О. А. Совершенствование методов испытаний консолей контактной сети / О. А. Лукьянова, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков // Транспорт Урала. 2020. №2 (65). С. 93–97.
10. Сафарбаков, А. М. Основы технической диагностики: учебное пособие / А.М. Сафарбаков, А.В. Лукьянов, С.В. Пахомов; – Иркутск: Иркутский гос. ун-т путей сообщения, 2006. – 216 с.
11. Мозгалеvский, А. В. Техническая диагностика: учебное пособие для вузов / А. В. Мозгалеvский, Д. В. Гаскаров. – М.: Высшая школа, 1975. – 207 с.

12. Гаранин, М. А. Совершенствование диагностики контактной сети / М. А. Гаранин, С. А. Фроленков. – Текст : непосредственный // Наука и образование транспорту. – 2016. – № 1. С. 243-245.
13. Смердин, А. Н. Применение моделей поперечных колебаний растянутого стержня для расчета натяжений проводов контактной сети / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко // Известия Транссиба. 2019. №4 (40). С. 25 – 32.
14. Непрерывный мониторинг натяжения контактной подвески / Г. Ф. Насонов, Ю. А. Черногоров, М. Е. Медведев [и др.] // Автоматика на транспорте. – 2016. №2 (2). – С. 228–258.
15. Ли, В. Н. Способ диагностирования контактного провода электрифицированных железных дорог / В. Н. Ли, С. В. Клименко // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2015. №1 (2-3). С. 26-28.
16. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
17. Карпушкин, С. В. Теория инженерного эксперимента: учебное пособие / С. В. Карпушкин, А. О. Глебов. Тамбовский гос. технич. ун-т. – Тамбов, 2017. – 81 с.
18. Бояршинова, А. К. Теория инженерного эксперимента: текст лекций / А. К. Бояршинова, А. С. Фишер. – Челябинск: ЮУРГУ, 2006. – 85 с.

### References

1. Program for organizing fast and high-speed railway communication in the Russian Federation [Electronic resource]. Access mode: [http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=5098](http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5098).
2. Strategiya razvitiya kholdinga «RZHD» na period do 2030 g. [The development strategy of the holding «RZD» for the period up to 2030] («White Book» of JSC «RZD») / Moscow: OAO «RZhD», 2011. – 340 p.
3. Pavlov, V. M. Adaptatsiya metodik diagnostirovaniya sostoyaniya infrastruktury sistemy tokos'yema pri povyshennykh skorostyakh dvizheniya elektropodvizhnogo sostava [Adaptation of methods for diagnosing the state of the infrastructure of the current collection system at high speeds of movement of electric rolling stock] / V. M. Pavlov, A. N. Smerdin, I. E. Chertkov, et al. // *Aktual'nyye problemy proyektirovaniya i ekspluatatsii kontaknykh podvesok i tokopriyemnikov elektricheskogo transporta [Actual problems of design and operation of overhead catenaries and electric transport pantographs]*: collection of scientific articles with international participation / Omsk: Omsk State Transport University, 2011, pp. 56-65.
4. Capitaine, A. Tension variability in contact wire and messenger wire of auto tensioned catenaries/ A. Capitaine, J.-P. Bianchi, P. Constant, F. Genest // World Congress on Railway Research (WCRR) 2019, Tokyo, Japan, pp. 1–8, 2019.
5. Kovalev, A. A. Issledovaniye raboty ustroystv kompensatsii natyazheniya v kontaktnoy podveske [Research of the operation of tension compensation devices in a catenary] / A. A. Kovalev, N. V. Krapivin // *Transport of the Urals*. 2018. No. 4 (59). pp. 86–90.
6. Galkin, A.G. Matematicheskoye modelirovaniye i informatsionnyye tekhnologii v zadachakh diagnostiki kontaktnoy seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Mathematical modeling and information technologies in the problems of diagnostics of the contact network of electrified railways]: monograph / A. G. Galkin, A. N. Mitrofanov, S. A. Mitrofanov // Yekaterinburg: Ural State Transport University, 2012. – 226 p.
7. Emelyanova, M. N. Povysheniye kachestva tokos'yema za schet vybora ratsional'nogo natyazheniya provodov kontaktnoy podveski [Improving the quality of current collection by choosing a rational tension of catenary wires]: specialty 05. 22. 07 «Rolling stock, traction of trains and electrification of railways»: dissertation for a candidate of technical sciences / Emelyanova Marina Nikolaevna; Scientific Research Institute of Railway Transport. - Moscow, 2015. – 102 p.
8. Lisnevsky, P. Yu. Nekotoryye aspekty v probleme izucheniya kolebaniy provodov LEP v vozdushnom potoke [Some aspects in the problem of studying oscillations of power transmission lines in an air stream] / P. Yu. Lisnevsky, V. N. Li // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika [Izvestiya vysshikh educational institutions. Electromechanics]*. 2019. No. 2 (62). S. 66–71.
9. Lukyanova, O. A. Sovershenstvovaniye metodov ispytaniy konsoley kontaktnoy seti [Development of methods for testing catenary cantilevers] / O. A. Lukyanova, A. V. Tarasenko, I. E. Chertkov // *Transport of the Urals*. 2020. No. 2 (65). pp. 93–97.
10. Safarbakov A. M. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki [Fundamentals of technical diagnostics]: a tutorial / A. M. Safarbakov, A. V. Lukyanov, S. V. Pakhomov; - Irkutsk: Irkutsk state. University of Railways, 2006.- 216 p.
11. Mozgalevsky, A. V. Technical diagnostics: a textbook for universities / A. V. Mozgalevsky, D. V. Gaskarov. - M.: Higher school, 1975. – 207 p.
12. Garanin, M. A. Sovershenstvovaniye diagnostiki kontaktnoy seti [Improving the diagnostics of the contact network] / M. A. Garanin, S. A. Frolenkov. - Text: direct // Science and education for transport. - 2016. - No. 1. S. 243-245.
13. Smerdin, A.N., Primeneniye modeley poperechnykh kolebaniy rastyanutogo stержnya dlya rascheta natyazheniy provodov kontaktnoy seti [Application of models of transverse vibrations of a stretched rod for calculating the tension of wires of a contact network] / A.N. Smerdin, E.A. Butenko // *Izvestiya Transsib*. 2019. No. 4 (40). pp. 25 – 32.
14. Nепrерывный мониторинг натяжения контактной подвески [Continuous monitoring of the tension of the contact suspension] / G. F. Nasonov, Yu. A. Chernogorov, M.E. Medvedev [et al.] // *Avtomatika na transport*. - 2016. No. 2 (2). - S. 228–258.
15. Li, V.N. Sposob diagnostirovaniya kontaktnogo provoda elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [A method for diagnosing a contact wire of electrified railways] / V. N. Li, S. V. Klimenko // *Transport of the Asia-Pacific region*. 2015. No. 1 (2-3). S. 26-28.
16. Spiridonov A.A. Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov [Planning an experiment in the study of technological processes]. – М.: *Mashinostroyeniye [Mechanical engineering]*, 1981. - 184 p.
17. Karpushkin, S. V. Teoriya inzhenernogo eksperimenta [Theory of engineering experiment: a tutorial]. V. Karpushkin, A. O. Glebov. *Tambovskiy gos. tekhnich. un-t [Tambov state technical un-t]*. - Tambov, 2017. - 81 p.

18. Boyarshinova, A.K. Teoriya inzhenerenogo eksperimenta [Theory of engineering experiment]: text of lectures / A.K. Boyarshinova, A.S. Fisher. - Chelyabinsk: YURGU, 2006. - 85 p.

#### Информация об авторах

**Смердин Александр Николаевич** – д. т. н., доцент, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

**Бутенко Елена Александровна** – аспирантка кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск e-mail: butenkoelena1994@gmail.com

**Тарасенко Александр Владимирович** – к. т. н., доцент, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: alessandro-tar@yandex.ru

#### Information about the authors

**Alexandr N. Smerdin** – Doctor of Technical Science, Professor of the department «Electricity supply of railway transport», Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: alexandr.smerdin@omgups.com

**Elena A. Butenko** – Post-graduate student «Electricity supply of railway transport», Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: butenkoelena1994@gmail.com

**Alexandr V. Tarasenko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Electricity supply of railway transport», Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: alessandro-tar@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).215-222

УДК 629.423

## Система непрерывного контроля уровня смазки в запасной камере буксы моторно-осевого подшипника электровоза

Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков, С. Г. Шрамко✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская федерация

✉ novorossereg@mail.ru

#### Резюме

В статье описывается принцип работы буксы моторно-осевого подшипника электровоза, недостатки текущих способов обслуживания, влияющие на ее ресурс. В настоящее время при определении уровня смазки в буксе моторно-осевого подшипника, учитывают уровень смазки только в рабочей камере буксы, объем оставшейся смазки в запасной камере буксы не берется в расчет, что приводит к недостоверным данным о ее количестве, и не позволяет прогнозировать остаточный ресурс буксы моторно-осевого подшипника. Предлагается система непрерывного контроля смазки в запасной камере буксы, реализуемая путем установки в нее датчика, а также блока управления в кабину машиниста. Такая система позволяет обеспечить постоянный контроль уровня масла в запасной камере и своевременно информировать машиниста путем световой индикации и специалистов сервисных локомотивных депо путем беспроводной передачи данных о критическом уровне смазки на сервер. Таким образом, обслуживающий персонал получает всю необходимую информацию о состоянии буксы моторно-осевого подшипника еще до захода электровоза в депо, что дает возможность принять соответствующие меры, запланировать обслуживание электровоза и предупредить риски, связанные с unplanned отказами. Данное решение позволит не только сократить количество отказов в работе моторно-осевого подшипника, но и отследить расход смазки на протяжении всего времени эксплуатации электровоза.

#### Ключевые слова

электровоз переменного тока, букса моторно-осевого подшипника, осевая смазка, алгоритм работы, датчик уровня

#### Для цитирования

Яговкин Д. А. Система непрерывного контроля уровня смазки в запасной камере буксы моторно-осевого подшипника электровоза / Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков, С. Г. Шрамко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 215–222. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).215-222

#### Информация о статье

поступила в редакцию: 11.12.2020, поступила после рецензирования: 16.12.2020, принята к публикации: 08.01.2021

## The continuous grease level control system in the backup chamber of the motor-axle bearing box of electric locomotives

D. A. Yagovkin, O. V. Melnichenko, A. O. Linkov, S. G. Shramko✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

✉ novorossereg@mail.ru

#### Abstract

The article describes the operation principle of the electric locomotive motor-axle bearing box, and the shortcomings of the cur-