



14. Shidlovskii A.K., Novskii V.A., Kaplychnyi N.N. Stabilizatsiya parametrov elektricheskoi energii v raspredelitel'nykh setyakh [Stabilization of electrical energy parameters in distribution networks]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1989, 312 p.
15. Dolgov A.P., Kandakov S.A., Zakaryukin V.P. Uluchshenie kachestva elektroenergii v sistemakh vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog Vostochnoi Sibiri [Improving the quality of electricity in the systems of external power supply of the railways of Eastern Siberia]. Elektrifikatsiya i razvitie infrastruktury energoobespecheniya tyagi poezdov na zheleznodorozhnom transporte [Electrification and development of the infrastructure for power supply of train traction in rail transport]. St. Petersburg, 2011, pp. 37–38.
16. Sudnova V.V. Kachestvo elektroenergii [Power quality]. Moscow: Energoservis Publ., 2000, 80 p.
17. Burkov A.T., Mirsaitov M.M. Rezhimy elektroyagovoi seti pri ekspluatatsii elektrovozov VL-80R i UTY-1 [Modes of electric traction network in the operation of electric locomotives VL-80R and UTY-1]. Sovremennye tekhnologii – transportu [Modern technologies for transport], No. 2. 2016, pp. 146–160.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intellektual'nye tekhnologii upravleniya kachestvom elektroenergii [Intelligent power quality control technology]. Irkutsk: INRTU Publ., 2015, 218 p.
19. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka [Methods for joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways]. Irkutsk: Irkutsk State Transport Un-ty Publ., 2011, 160 p.
20. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonessimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex non-symmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkutsk Un-ty Publ., 2005, 273 p.

### Информация об авторах

*Крюков Андрей Васильевич* - д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

*Черепанов Александр Валерьевич* - к. т. н., доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: smart\_grid@mail.ru

*Шафиков Алексей Рафаилович* - аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: alshaficov1@mail.ru

### Authors

*Kryukov Andrei Vasil'evich* - Doctor of Engineering Science, Full Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

*Cherepanov Aleksandr Valer'evich* - Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: smart\_grid@mail.ru

*Shafikov Aleksei Rafailovich* - Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: alshaficov1@mail.ru

### Для цитирования

Крюков А. В. Моделирование несинусоидальных режимов в системах электроснабжения железных дорог при движении локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями / А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Р. Шафиков // Современные технологии. Системный анализ. - 2018. - Т. 60, № 4. - С. 99–108. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).99-108

### For citation

Kryukov A. V., Cherepanov A. V., Shafikov A. R. Modelirovanie nesinusoidal'nykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog pri dvizhenii lokomotivov s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami [The modelling of nonsinusoidal modes in the railroad power supply systems when driving locomotives with induction traction motors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2018, Vol. 60, No. 4, pp. 99–108. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).99-108

УДК 624.21 + 625.032.6 + 625.171

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).108-117

**Д. С. Алтынников, Д. А. Ковенькин**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

*Дата поступления: 16 ноября 2018 г.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ШЕЙКЕ РЕЛЬСОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ПОДХОДАХ К МОСТАМ

**Аннотация.** В связи с тем, что пространственное развитие страны не стоит на месте, вместе с тем растет и потребность в увеличении пропускной способности и безопасной эксплуатации сети железных дорог, которая повышает конкурентоспособность российской экономики. Увеличение грузонапряженности и скоростного режима на путях железных дорог ведет к ускоренному расстройству железнодорожного полотна, что, в свою очередь, влияет на безопасность движения и дополнительные затраты. Поэтому решение данной проблемы способствует снижению экономических вложений и повысит надежность железнодорожных сообщений.

Расчет железнодорожного пути на прочность является одним из важных и сложных разделов общей проблемы исследования взаимодействия пути и подвижного состава. Для проведения такого расчета важным является нахождение правильных функциональных зависимостей между действующими на рельсовую нить внешними силами и модулем упругости. Величина данных показателей зависит от множества факторов, таких как скорость движения, радиус кривой, строение пути.

В статье описаны теоретические и экспериментальные исследования горизонтальной поперечной жесткости рельсовых нитей на подходах к мостам с безбалластным мостовым полотном. Установлено, что в рельсовом пути, расположенном



на переходном участке, возникают повышенные деформационные напряжения. Эти напряжения влияют на состояние верхнего и нижнего строения пути, что приводит к отклонению от нормативных значений.

Представлена практическая работа измерительного комплекса «Тензор МС» и его конструктивный состав. Работа оборудования основана на использовании тензорезисторов и пьезоэлектрических преобразователей. В ходе исследования измеренных данных установлены характерные места проявления повышенных напряжений в рельсовом пути на подходах к мостам. Для практических измерений в качестве примера в статье были выбраны мосты через реки Шанхайка и Иркут.

**Ключевые слова:** напряжения, деформация, просадка, рельсовые нити, мосты с безбалластным мостовым полотном, участки переменной жесткости, подходы к мостам, тензометрические датчики.

**D. S. Altynnikov, D. A. Koven'kin**

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

**Received:** November 16, 2018

## DETERMINING TRANSVERSE TENSIONS IN THE RAIL WEB DEPENDING ON DYNAMIC LOADINGS AT APPROACHES TO BRIDGES

**Abstract.** Due to the fact that the spatial development of the country is not standing still, at the same time there is a growing need to increase the capacity and safe operation of the railway network, which increases the competitiveness of the Russian economy. The increase in load and speed on the railway tracks leads to an accelerated disruption of the railway track, which in turn affects traffic safety and additional costs. Therefore the solution of this problem will promote decrease in economic investments and will increase reliability of railway traffic.

Calculation of the railway track for strength is one of the important and complex sections of the general problem of studying the interaction of the track and rolling stock. To carry out such calculation, it is important to find the correct functional dependences between the elasticity module and the external forces acting on rail lengths. The value of these indicators depends on a set of factors, such as speed of the movement, curve radius, structure of the track.

The article describes the theoretical and experimental studies of the horizontal transverse rigidity of rails at the approaches to bridges with a ballastless bridge deck. It is established that there is increased deformation tension in the rail track located at the transitional section. This tension influences a condition of the top and lower structure of the track that leads to a deviation from standard values.

The authors present a practical work of the measuring complex "MS Tensor" and its design structure. Operation of the equipment is based on use of tensoresistors and piezoelectric converters. During the research of the measured data, characteristic places of manifestation of the increased tension in the track at approaches to bridges are established. For practical measurements, bridges across the Shankhayka and Irkut Rivers have been chosen as an example in article.

**Keywords:** tensions, deformation, sagging, rail lengths, bridges with ballastless deck of bridge, sections of variable rigidity, approaches to bridges, tensometric sensors.

### Введение

В связи с тем, что в настоящее время непрерывно растет потребность в увеличении пропускной способности существующей сети железных дорог Российской Федерации, актуальным вопросом является повышение безопасности эксплуатации грузовых поездов повышенной массы и длины, а также введение в эксплуатацию скоростных и высокоскоростных поездов. Поэтому комплексная задача, связанная с применением более мощных локомотивов, повышением осевых нагрузок, реконструкцией путевой инфраструктуры и электроснабжения, совершенствованием технологий перевозочного процесса, требует повышения прочности и устойчивости пути [1–3].

При выполнении расчетов железнодорожного пути на прочность одной из основных характеристик, описывающей особенности его взаимодействия с подвижным составом, является модуль упругости подрельсового основания. Данная характеристика является одной из важнейших ис-

ходных величин для установления условий движения поездов по путям различных конструкций.

Проанализированные методики инженерного расчета пути на прочность преимущественно позволяют получать только результаты с точностью, достаточной для практических целей. Вместе с тем влияние на работу рельса горизонтальных динамических сил и крутящего момента не учитывается, а учитывается только опосредованно через применение так называемых коэффициентов влияния, взятых из экспериментальных исследований.

Однако при полной постановке аналитического решения задачи по расчетам железнодорожного пути на прочность необходимо с достаточной точностью учитывать воздействие на рельсовую нить всех внешних сил и при этом совместно рассматривать возникающие в ней деформации, такие как вертикальный и горизонтальный изгиб рельсовой нити и ее кручение.

Деформации и напряжения рельсовых нитей при аналитических расчетах можно определить



только при условии знания характеристик пространственной упругости рельсовых нитей, в том числе расчетных характеристик на кручение.

Наиболее важным для проведения точных аналитических расчетов является нахождение правильных функциональных зависимостей между действующими на рельсовую нить внешними силами от колес подвижного состава и переменными значениями пространственной упругости. Также стоит учитывать и особенности конструктивного устройства рельсов и креплений.

Поэтому изучение указанных характеристик работы рельсовых нитей для современных конструкций пути при совместном действии на рельс вертикальных и горизонтальных сил является весьма актуальной задачей.

#### Анализ литературных источников

Расчеты одних из главных характеристик, таких как пространственная упругость и прочность рельсового пути, были описаны в работах [4–8].

В работе [4] О. П. Ершков предложил определять пространственные модули упругости при их соответствующей жесткости. При этом соответствующие жесткости он рекомендовал экспериментально определять из выражений (1):

$$\begin{aligned} \beta_z &= \frac{\Delta P}{\Delta z}; \beta_y = \frac{\Delta Y}{\Delta y}; \\ \beta_x &= \frac{\Delta N}{\Delta \lambda}; \beta_\varphi = \frac{\Delta M_\varphi}{\Delta \varphi}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\beta_z, \beta_y, \beta_x, \beta_\varphi$  – жесткости рельсовой нити при вертикальном, горизонтальном изгибе, продольном перемещении и кручении рельса соответственно;

$\Delta P, \Delta Y, \Delta N, \Delta M$  – изменение вертикальной, горизонтально-поперечной, горизонтально-продольной силы и момента соответственно;

$\Delta z, \Delta y, \Delta \varphi$  – изменение перемещений рейки, соответствующих силе и моменту;

$\Delta \lambda$  – изменение продольного перемещения рейки в направлении оси ОХ.

В свою очередь, соответствующие модули упругости пути должны определяться из выражений (2):

$$\begin{aligned} U_z &= \sqrt[3]{\frac{\beta_z^4}{(64 \cdot E \cdot I_z)}}; U_y = \sqrt[3]{\frac{\beta_y^4}{(64 \cdot E \cdot I_y)}}; \\ U_x &= \beta_x \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\Delta \lambda}{\Delta x}; U_\varphi = \frac{\beta_\varphi^2}{A \cdot G \cdot I_d}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $U_z, U_y$  – модули упругости рельсового основания при вертикальном и горизонтальном изгибе рельсовой нити;

$E$  и  $G$  – модули упругости рельса на растяжение и сдвиг;

$I_z$  и  $I_y$  – моменты инерции поперечного сечения рельса относительно вертикальной и горизонтальной оси соответственно;

$I_d$  – момент инерции поперечного сечения рельса относительно продольной оси;

$A$  – коэффициент, зависящий от типа рельса и характеристик жесткости подрельсового основания. Находится из выражения (3):

$$A = 4 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{E \cdot I_\omega \cdot U_\varphi}{G \cdot I_d}}\right)^2, \quad (3)$$

где  $I_\omega$  – секторный момент инерции поперечного сечения рельса.

В работе [5] расчеты на прочность рельсового пути и других элементов ведутся по максимальным расчетным напряжениям от временной нагрузки, которые ограничиваются допускаемыми напряжениями (4):

$$\sigma_{\text{расч}}^{\text{max}} \leq \sigma. \quad (4)$$

В зависимости от того, для какого элемента железнодорожного пути ведется расчет на прочность с такими допускаемыми напряжениями, и сравниваются максимально-расчетные. Допускаемые напряжения обеспечивают надежность железнодорожного пути и делятся на четыре вида:

$[\sigma_\kappa]$  – допустимые напряжения растяжения в кромке подошвы рельса, обусловленные изгибом последнего и кручением от вертикального и горизонтального воздействия подвижного состава;

$[\sigma_{\text{ш}}]$  – допустимые напряжения на смятие в деревянных шпалах под прокладками и в прокладках для железобетонных шпал;

$[\sigma_\sigma]$  – допустимые напряжения сжатия в балласте под шпалой в подрельсовой зоне;

$[\sigma_h]$  – допустимые напряжения сжатия на основной площадке земляного полотна.

Если при расчетах максимальные напряжения превышают допускаемые, то это означает, что требуется усиление пути.

Максимальные напряжения в элементах верхнего строения пути определяются по формулам (5) и (6):

$$\begin{aligned} \text{а) в кромках подошвы рельса} \\ \sigma_\kappa = f \cdot \sigma_o \text{ кг/см}^2; \end{aligned} \quad (5)$$



б) от его изгиба под действием момента  $M$  в подошве рельса

$$\sigma_o = \frac{M}{W} = \frac{P_{экс}}{4 \cdot k \cdot W} \text{ кг/см}^2, \quad (6)$$

где  $W$  – момент сопротивления рельса относительно его подошвы, см<sup>3</sup>;

$f$  – коэффициент перехода от осевых напряжений в подошве рельса к кромочным, учитывающим действие горизонтальных нагрузок на рельс и эксцентриситет приложения вертикальной нагрузки.

Расчетная величина допускаемых напряжений представлена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

**Оценочные критерии прочности пути  
от локомотива**

Критерии	Значения оценочных критериев прочности в кг/см <sup>2</sup> . При грузонапряженности в млн ткм бр. на км в год			
	>50	50–25	24–10	<10
$[\sigma_k]$	1900	2000	2400	3400
$[\sigma_{ш}]$	12	16	20	30
$[\sigma_{\delta}]$	4,0	4,2	4,5	5,0
$[\sigma_h]$	1,0	1,0	1,1	1,2

Теоретические расчеты показывают, что при проходе локомотива ВЛ-80 в рельсах возникают допускаемые напряжения растяжения в кромке подошвы рельса порядка  $\sigma_k = 1300 \div 1600$  кгс/см<sup>2</sup>.

При оценке надежности рельсов типа Р50 и Р65 важно определить напряжения, возникающие в зоне перехода головки в шейку рельса при загрузке его колесной нагрузкой [6].

В. Н. Даниловым был предложен аналитический метод расчета номинальных напряжений под головкой рельса при действии вертикальной и горизонтальной нагрузок. Решение основано на раздельном исследовании деформации головки в плоскости симметрии рельса, а также ее горизонтального изгиба и кручения.

Уравнения, характеризующие деформацию головки рельса в вертикальной плоскости, выглядят следующим образом:

$$E\omega \frac{d^2 U}{dx^2} - \alpha_x U + \alpha_x h_2 \frac{dy}{dx} = 0; \quad (7)$$

$$\alpha_x h_2 \frac{dU}{dx} + EI \frac{d^4 y}{dx^4} - \alpha_x h_2^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + \alpha_y y = 0,$$

где  $E$  – модуль упругости рельсовой стали;

$\omega$  – площадь поперечного сечения головки рельса, м<sup>2</sup>;

$\frac{dU}{dx}$  – относительная деформация оси балки;

$U$  – перемещение точки оси головки рельса в направлении  $x$ , м;

$h_2$  – расстояние от оси головки до уровня критического сечения в зоне перехода головки в шейку рельса, м;

$\alpha_x, \alpha_y$  – коэффициент упругости, равный значениям силовых реакций основания при единичных перемещениях головки вдоль осей  $x$  и  $y$ .

Уравнения, характеризующие горизонтальный изгиб и кручение головки рельса, представлены в следующем виде:

$$EI \frac{d^4 z}{dx^4} + a_z z + a_\phi = 0; \quad (8)$$

$$G \frac{d^2 \phi}{dx^2} - \mu_\phi - \mu_z z = 0,$$

где  $G$  – модуль сдвига;

$a_z, a_\phi$  – коэффициенты, равные значениям силовых реакций основания при единичных перемещениях центра тяжести головки вдоль оси  $z$  и повороте его на единичный угол  $\phi$  относительно продольной оси;

$\mu_\phi, \mu_z$  – реактивные моменты, возникающие при единичном перемещении головки вдоль оси  $z$  и соответственно при повороте головки на единичный угол  $\phi$  вокруг продольной оси.

Шейка рельса рассматривается как ряд консольных балок, заземленных в подошве. Для учета концентраций напряжений в расчет вводятся коэффициенты, определяемые экспериментальным путем.

Напряжения концентрации под головкой железнодорожных рельсов  $\sigma_z$  от действия вертикальной внецентренной (приложенной к головке с эксцентриситетом  $e$ ) колесной нагрузки  $P_{дин}$  с учетом коэффициентов концентрации определяются по формуле:

$$\sigma_z = \frac{P_{дин}}{2d_1} \sqrt{\frac{d_{ш}}{4h_{ш}I}} C_1^K \cdot 10^{-6} + \frac{3P_{дин}e}{d_1^2} \sqrt{\frac{Ed_{ш}^3}{12h_{ш}GI_K}} C_2^K \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

где  $d_{ш}$  и  $h_{ш}$  – средняя толщина и высота шейки, м;

$d_1$  – толщина шейки в критическом сечении, м;

$I$  – момент инерции головки относительно горизонтальной оси, м<sup>4</sup>;

$I_K$  – момент инерции головки на кручение, м<sup>4</sup>;

$C_1^K$  и  $C_2^K$  – коэффициенты концентрации напряжений соответственно осевого сжатия и изгиба.

$e$  – эксцентриситет приложения вертикальной нагрузки, м;

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} - \text{модуль сдвига, МПа.}$$

Зависимости напряжений концентрации под головкой  $\sigma_z$  от величины нагрузки, эксцентриситета и жесткости основания приведены на рис. 1.

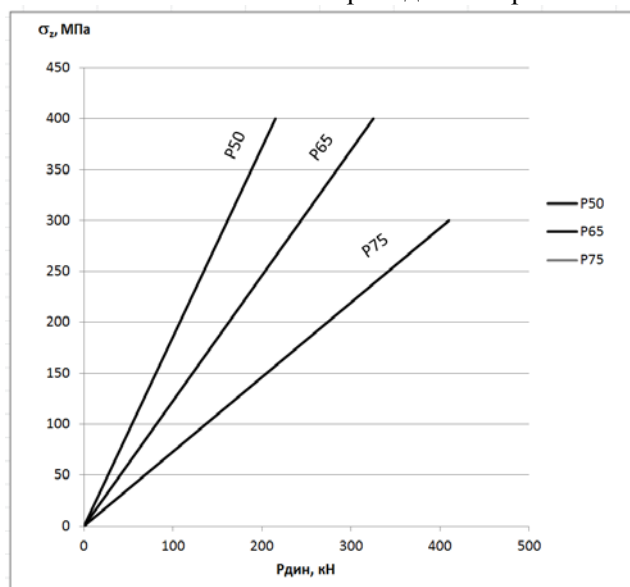


Рис. 1. Графики зависимостей напряжений от величины нагрузки и эксцентриситета

По расчету этой методики допускаемые значения напряжений под головкой рельса равны 290–330 МПа в зависимости от типов рельс.

Под головкой рельса имеет место сложное напряженное состояние. Для оценки прочности головки определяются эквивалентные напряжения:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + \sigma_x^2 + 3\tau^2} \leq \frac{[\sigma_{0.2}^p]}{k_3}, \quad (10)$$

где  $\sigma_x$  – напряжения изгиба головки в критическом сечении, МПа;

$\tau$  – касательные напряжения, МПа;

$[\sigma_{0.2}^p]$  – условный предел текучести рельсовой стали;

$k_3$  – коэффициент запаса, равный 1,2.

Величина напряжений зависит от множества факторов, таких как скорость движения, радиус кривой, строение пути (верхнего и нижнего) и т. д. Повышенные показатели напряженно-деформированного состояния зачастую возникают в местах переменной жесткости на подходах к мостам.

Подходы к мостам и путепроводам с безбалластным мостовым полотном наиболее подвержены различным отклонениям от нормативных значений пути. Об этом свидетельствует статистика

по ограничениям скоростей на подходах к мостам из-за дефектов пути.

При исследовании статистических данных о возникновении деформаций на участках подходов железнодорожного пути к искусственным сооружениям с безбалластным мостовым полотном определено, что большая часть дефектов с определенной регулярностью возникают в одних и тех же местах. Это значит, что на подходах к мостам присутствуют определенные места с повышенной динамической нагрузкой. По изученным данным было установлено, что наиболее повышенное вибродинамическое воздействие в пределах шести метров за шкафной стенкой крайних береговых опор со стороны съезда с мостового перехода [9, 10].

На рис. 2 отображены характерные места с частым проявлением дефектов пути (просадки, перекосы, уширение колеи), которые указывают на повышенное вибродинамическое воздействие при проходе подвижного состава.

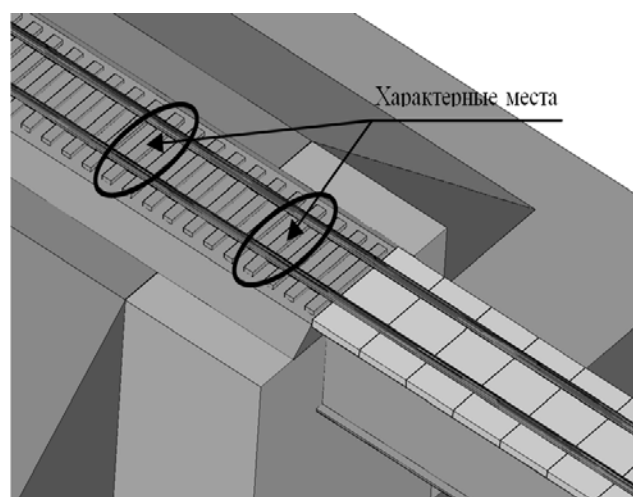


Рис. 2. Места частого появления дефектов пути

В рельсовом пути, расположенном на переходном участке, возникают повышенные деформационные напряжения. Эти напряжения влияют на состояние верхнего и нижнего строения пути, что приводит к отклонению от нормативных значений.

Данные напряжения возможно измерить различными способами, один из которых – с использованием тензометрических датчиков.

Такие измерительные работы можно провести с помощью специализированного оборудования [11–13].

#### Измерительный комплекс «Тензор МС»

«Тензор МС» – это многофункциональный измерительный комплекс для экспресс-диагностики технического состояния искусственных сооружений по контролируемым параметрам



(напряжения, собственные и вынужденные частоты колебаний, прогибы и т. п.).

Конструктивно прибор представляет собой устройство распределенно-модульного типа, содержащего систему блоков сбора информации, сопряженных с многофункциональными первичными датчиками, системой комбинированной (беспроводной или проводной) связи между блоками и мобильным компьютером (КПК).

Для работы такого комплекса используются датчики различных типов и номиналов (тензорезисторы, датчики линейных перемещений, виброперемещений), интеллектуальная система коррекции параметров съема первичной информации и динамическое подключение программ обработки данных измерения с экспресс-анализом результатов. На рис. 3 представлен измерительный комплекс «Тензор МС».

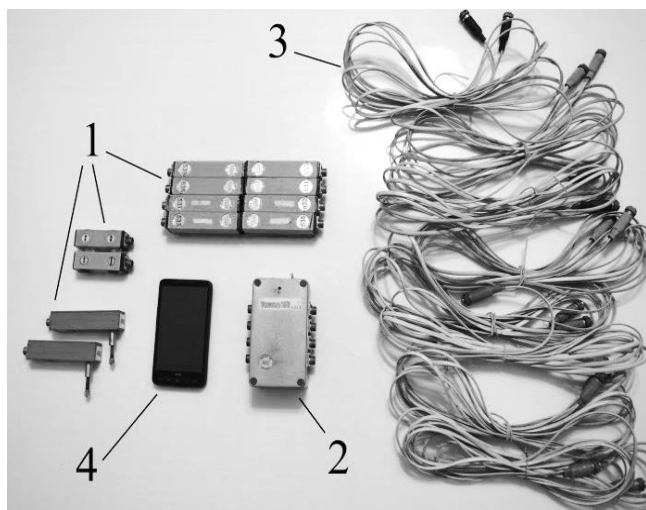


Рис. 3. Комплекс измерительный многофункциональный «Тензор МС»

Работа датчиков основана на использовании тензорезисторов и пьезоэлектрических преобразователей. Датчики (1) выполняют измерения различных параметров и преобразуют их в электрический сигнал, который поступает на контроллер (2).

Контроллер (2) осуществляет сбор измерительной информации по кабелям связи (3) с каждого датчика (одновременно возможно подключение до 8 датчиков), определение температуры окружающей среды, передачу данных по беспроводному каналу связи на карманный персональный компьютер (4).

Карманный персональный компьютер (КПК) представляет собой электронное устройство, оснащенное системным и специализированным программным обеспечением, позволяющим взаи-

модействовать с контроллером и удаленно управлять процессом измерения [14].

#### Замеры напряжений на пути

Для проведения замеров объектами испытаний были выбраны мосты на 5183 км, ПК4, 1п. через реку Иркут и 5364 км, ПК3, 2п. через реку Шанхайка.

Места установки измерительных приборов были определены на основании анализа деформаций пути по данным последнего проезда вагона путеизмерителя.

Анализ показал, что характерные точки, в которых чаще всего появляются расстройки пути, находятся непосредственно за задней гранью устоев на расстоянии от 1–2 м со стороны съезда с моста.

Для выполнения замеров применялись съемные магнитные датчики деформаций с диапазоном измеряемых относительных деформаций ( $\epsilon$ )  $\pm 1000 \text{ млн}^{-1}$  и диапазоном измеряемых частот в пределах от 0 до 100 Гц.

На рис. 4 представлены места установки и закрепления оборудования на шейке путевого рельса, которые тщательно зачищаются для того, чтобы исключить погрешности в измерениях из-за неплотного прилегания датчиков [15].



Рис. 4. Установленные датчики на 5364 км, 2п. через р. Шанхайка

На каждом объекте было проведено по 3 замера под проходящими нагрузками. При обработке результатов учитывались напряжения, возникающие только под проходящим локомотивом.

Все замеры были обработаны программным комплексом «Тензор+» v.1.4, предназначенным для обработки и просмотра результатов испытаний искусственных сооружений. Он реализован в

среде разработки Borland Delphi и работает под управлением операционной системы Windows.

В рабочем режиме программы отображаются графики прохождения нагрузки над каждым датчиком. Каждый тензометрический датчик отображает измерения в условных единицах. Для отображения напряжений для каждого датчика используется индивидуальный коэффициент перевода в  $\text{кг/см}^2$  или в МПа. Таким образом, на графике по горизонтальной оси отображается время в секундах от начала запуска измерений, а по вертикальной оси – напряжения [16].

На рис. 5 показан график измерения поперечных напряжений на 5364 км по установленным датчикам на подходе к мосту. На графике отображены спектральные линии с трех датчиков:

- 1 – на 1,5 м от устоя;
- 2 – на 6 м от устоя;
- 3 – на береговой опоре.

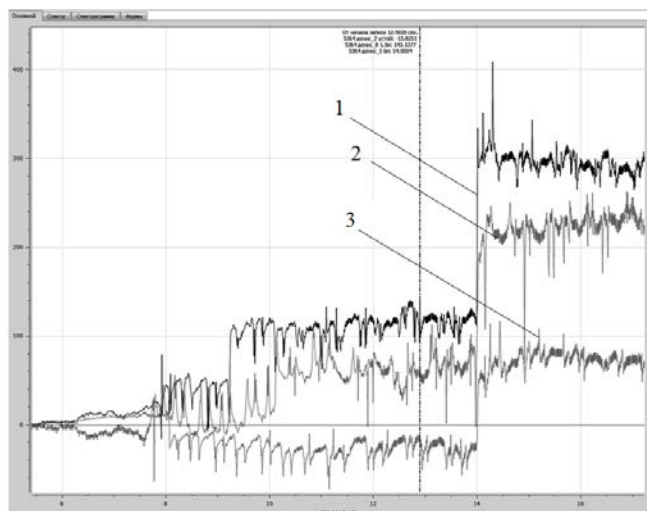


Рис. 5. Фрагмент результатов измерения поперечных напряжений на 5364 км

Максимальные значения напряжения демонстрирует спектральная линия 1, соответствующая датчику, установленному на удалении от устоя на 1,5 м. Ориентировочно на восьмой секунде графика виден резкий подъем напряжений, свидетельствующий о прохождении локомотива над точкой установки, максимальное напряжение, вызванное локомотивом при проходе, составило  $143,8 \text{ кг/см}^2$ . В момент прохождения груженных вагонов напряжения поднимаются до  $300\text{--}350 \text{ кг/см}^2$ . Усредненные значения напряжений составляют от локомотива –  $111,4 \text{ кг/см}^2$ , а от грузовых вагонов –  $291 \text{ кг/см}^2$ .

Все результаты измерений были обработаны и представлены в виде сводных таблиц для дальнейшего анализа.

#### Результаты выполненных измерений

При расшифровке замеренных напряжений, возникающих в шейке рельса поперек оси пути, данные обрабатывались с четырех датчиков, установленных на местах:

- 1 – конец пролета;
- 2 – середина устоя;
- 3 – на удалении от устоя на 1,5 м;
- 4 – на удалении от устоя на 6 м.

#### Характеристики объекта № 1:

Наименование объекта: Мост на 5364 км ПКЗ, 2п. через реку Шанхайка.

Погодные условия:  $T = 15^\circ\text{C}$ , солнечно.

Характеристика пути: Бесстыковой на железобетонных шпалах, рельсы типа Р65, на мосту железобетонные плиты БМП, крепление КБ.

Установленная скорость: 75 км/ч (груз.);

80 км/ч (пас.).

Место установки оборудования: Съезд с моста (с восточной стороны).

Результаты измерения приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

#### Результаты замеров на 5183 км, ПК4

№ п/п	$\sigma_{\text{max}}$ кг/см <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{сред.}}$ кг/см <sup>2</sup>
1. ВЛ80 – нагрузка на ось 23 т, грузовой.		
1	114,3	63,2
2	84,2	53,6
3	<b>149,3</b>	<b>109,4</b>
4	131,4	100,8
2. ВЛ80 – нагрузка на ось 23 т, грузовой.		
1	113,7	60,4
2	73,7	40,2
3	<b>143,8</b>	<b>111,4</b>
4	129,4	101,2
3. ВЛ85 – нагрузка на ось 24 т, грузовой.		
1	117,9	61,2
2	81,0	51,9
3	<b>149,2</b>	<b>122,3</b>
4	136,7	105,1

#### Характеристики объекта № 2:

Наименование объекта: Мост на 5183 км, ПК4, 1п. через р. Иркут.

Погодные условия:  $T = 10^\circ\text{C}$ , солнечно.

Характеристика пути: Бесстыковой на железобетонных шпалах, рельсы типа Р65, на мосту железобетонные плиты БМП, крепление КБ.

Установленная скорость: 60 км/ч (груз.);

70 км/ч (пас.).





Место установки Сьезд с моста (с западной стороны).  
оборудования: стороны).

Результаты замеров приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

**Результаты замеров на 5364 км, ПКЗ**

№ п/п	$\sigma_{\max}$ кг/см <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{сред.}}$ кг/см <sup>2</sup>
<b>1.ЭД9М – нагрузка на ось 16 т, пассажир.</b>		
1	70,6	36,5
2	39,6	17,9
3	<b>131,1</b>	<b>102,2</b>
4	110,4	96,3
<b>2.ЭП1П – нагрузка на ось 22 т, пассажир.</b>		
1	82,5	41,7
2	59,7	30,6
3	<b>148,8</b>	<b>110,2</b>
4	124,7	99,8
<b>3.ЭП1П – нагрузка на ось 22 т, пассажир.</b>		
1	81,1	40,2
2	63,2	35,8
3	<b>145,3</b>	<b>105,4</b>
4	122,4	103,7

**Анализ полученных результатов**

В полученных результатах прослеживается закономерность изменения напряжений на подходе к мосту.

При прохождении по мосту в шейке рельса возникают напряжения порядка 40–60 кг/см<sup>2</sup>, а на береговых опорах средний показатель падает в пределах 15–55 кг/см<sup>2</sup>, после того как подвижной состав съезжает с береговой опоры, происходит резкий скачок напряжения до 150 кг/см<sup>2</sup>, в дальнейшем напряжения постепенно угасают с удалением от мостового перехода. На рис. 6 видно изменение напряжения при прохождении переходного участка.

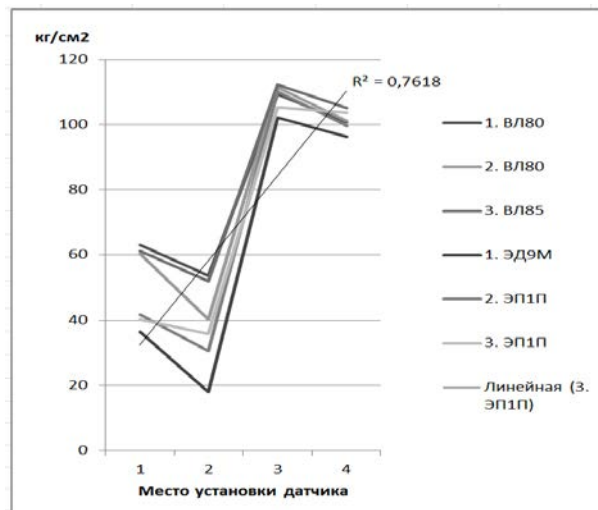


Рис. 6. Графики напряжений от локомотивной нагрузки

**Выводы**

Из всего вышеизложенного стоит отметить, что при прохождении подвижного состава по мостовому переходу возникают различные напряжения в рельсовом пути. Повышенным напряжениям подвержены места на подходах к мостам. Железнодорожный путь в таких местах предрасположен к ускоренному развитию дефектов.

В данных местах показатели значений напряжений увеличены в 3–4 раза, это говорит о повышенных вибродинамических нагрузках на данных участках. А увеличение осевых нагрузок и скоростей движения в перспективном будущем приведет к еще большему росту этих значений.

Такое повышение обусловлено резким изменением жесткости пути и подтверждает тот факт, что устройство специальных конструкций переходных участков поможет снизить затраты на текущее содержание и повысить безопасность движения.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года : новая Редакция : утв. распоряжением Правительства РФ от 22 ноября 2008 г. № 1734-р [Электронный ресурс] // URL: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE\\_ID=704&layer\\_id=5104&id=6396](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=6396). (Дата обращения: 11.11.2018).
2. О стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008. [Электронный ресурс] // URL: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru/RU?STRUCTURE\\_ID=704&layer\\_id=5105&refererLayerId=5104&id=3997&print=1](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru/RU?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5105&refererLayerId=5104&id=3997&print=1) (Дата обращения: 11.11.2018).
3. Стратегия инновационного развития ОАО «РЖД» на период до 2015 года (Белая книга ОАО «РЖД») : утв. советом директоров ОАО «РЖД» от 24.06.2011. [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE\\_ID=704&layer\\_id=5104&id=4038](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=4038). (Дата обращения: 11.11.2018).
4. Ершков О. П. Характеристики пространственной упругости рельсовой нити // Тр. ВНИИЖТ. 1960. Вып. 192. С. 59–101.
5. Расчет железнодорожного пути на прочность : метод. указания / сост. Е.В. Филатов, Д.Н. Насников. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2016. 59 с.
6. Железнодорожный путь / под ред. Т. Г. Яковлевой. М. : Транспорт. 1999. 405 с.
7. Стоянович Г.М. Расчеты верхнего строения пути на прочность и устойчивость : курс лекций. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2013. 79 с.





8. Даниленко Э.И. Расчет характеристик жесткости и упругости рельсовой нити при кручении под воздействием вертикальных и горизонтальных сил // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. 2016. №5 (65). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-harakteristik-zhestkosti-i-uprugosti-relsovoy-niti-pri-kruchenii-pod-vozdeystviem-vertikalnyh-i-gorizontalnyh-sil> (дата обращения: 11.11.2018).
9. Алтынников Д. С., Ковенькин Д. А. Анализ деформаций железнодорожного пути на участках подходов к металлическим мостам с безбалластным мостовым полотном на Вост.-Сиб. железной дороге // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. 56. №4. С. 176–183.
10. Серебряков Д. В. Прочность насыпей при вибродинамическом воздействии поездов в зоне сопряжения земляного полотна с мостами : дис. ... канд. тех. наук. СПб, 2005. 158 с.
11. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие. Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 56 с.
12. Сравнительный анализ результатов силового воздействия на железнодорожный путь с применением методов шлюмпфа, «РЖД-2016» и «НВЦ-ТКП» / А.А. Петров и др. // БРНИ. 2017. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-rezultatov-silovogo-vozdeystviya-na-zheleznodorozhnyy-put-s-primeneniem-metodov-shlyumpfa-rzhd-2016-i-nvts-tpk> (дата обращения: 11.11.2018).
13. ГОСТ 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний М. : Стандартинформ, 2013. 16 с.
14. Научные подразделения СГУПС - НИЛ Мосты - Разработки - 6. Разработка и изготовление измерительного оборудования для испытания мостов. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.stu.ru/science/index.php?page=1094> (Дата обращения: 11.11.2018).
15. Эксплуатационные измерения напряжений в рельсе при воздействии подвижного состава С.А. Косенко и др. // Изв. Транссиба. 2017. №2 (30). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekspluatatsionnye-izmereniya-napryazheniy-v-relse-pri-vozdeystvii-podvizhnogo-sostava> (дата обращения: 11.11.2018).
16. Комплекс измерительный многофункциональный тензор МС : руководство по эксплуатации : утв. ВМНИИ411739.001ТУ-ЛЮ. 2011. 26 с.

## REFERENCES

1. Transportnaya strategiya RF na period do 2030 goda. Novaya Redaktsiya. Uтверждена распоряжением Правительста RF от 22 ноябрю 2008 г. No. 1734-р (v redaktsii rasporyazheniya Pravitel'stva RF ot 11 iyunya 2014 g. No. 1032-р [Elektronnyi resurs] [Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030. New edition. Approved by the order of the Government of the Russian Federation of November 22, 2008 No. 1734-p (as amended by the order of the Government of the Russian Federation of June 11, 2014 No. 1032-p). Access mode: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE\\_ID=704&layer\\_id=5104&id=6396](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=6396). Screen title. (Access date: 11.11.2018).
2. O strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 17.06.2008. [Elektronnyi resurs] [On the strategy of development of railway transport in the Russian Federation until 2030. Order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008]. Access mode: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru/RU?STRUCTURE\\_ID=704&layer\\_id=5105&refererLayerId=5104&id=3997&print=1](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru/RU?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5105&refererLayerId=5104&id=3997&print=1). Screen title. (Access date: 11.11.2018).
3. Strategiya innovatsionnogo razvitiya OAO «RZhD» na period do 2015 goda (Belaya kniga OAO «RZhD»). Uтверждена советом директоров OAO «RZhD» ot 24.06.2011. [Elektronnyi resurs] [The strategy of innovation development of Russian Railways for the period up to 2015 (White Book of JSC Russian Railways). Approved by the Board of Directors of Russian Railways on June 24, 2011]. Access mode: [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE\\_ID=704&layer\\_id=5104&id=4038](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=4038). Screen title. (Access date: 11.11.2018).
4. Ershkov O. P. Kharakteristiki prostranstvennoi uprugosti rel'sovoi niti [Characteristics of the spatial elasticity of a rail]. Tr. VNIIZhT [Proceedings of Railway Research Institute], 1960, Iss. 192, pp. 59 – 101.
5. Filatov E.V., Nasnikov D.N. (compilers). Raschet zheleznodorozhnogo puti na prochnost': metod. Ukazaniya [The calculation of the railway track strength: method. instructions]. Irkutsk : IrGUPS Publ., 2016, 59 p.
6. Yakovleva T.G., Karpushchenko N. I., Klinov S. I., Putrya N. N., Smirnov M.P. Zheleznodorozhnyi put' [Railway track]. In Yakovleva T. G. (ed.). Moscow: Transport Publ., 1999. 405 p.
7. Stoyanovich G.M. Raschety verkhnego stroeniya puti na prochnost' i ustoychivost': kurs lektsii [Calculations of the superstructure of the track for strength and stability: a course of lectures]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2013, 79 p : il.
8. Danilenko E.I. Raschet kharakteristik zhestkosti i uprugosti rel'sovoi niti pri kruchenii pod vozdeystviem vertikal'nykh i gorizont'al'nykh sil [Calculation of the characteristics of stiffness and elasticity of the rail during torsion under the influence of vertical and horizontal forces]. Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta [Science and transport advancements. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport], 2016, No.5 (65). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-harakteristik-zhestkosti-i-uprugosti-relsovoy-niti-pri-kruchenii-pod-vozdeystviem-vertikalnyh-i-gorizontalnyh-sil> (access date: 11.11.2018).
9. Altyinnikov D. S., Koven'kin D. A. Analiz deformatsii zheleznodorozhnogo puti na uchastkakh podkhodov k metallicheskim mostam s bezballastnym mostovym polotnom na Vostochno-Sibirskoi zheleznoi doroge [Analysis of deformations of a railway track on sections of approaches to metal bridges with a ballast-free bridge at the East-Siberian railway]. Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2017, 56, No.4, pp. 176 – 183.
10. Serebryakov D. V. Prochnost' nasypei pri vibrodinamicheskom vozdeystvii poezdov v zone sopryazheniya zemlyanogo polotna s mostami [The strength of elevated approaches under the vibrodynamic effect of trains in the zone of junction of the roadbed with bridges]: Ph.D. (Engineering) thesis: 05.22.06. Sankt-Peterburg, 2005, 158 p.
11. Mekheda V.A. Tenzometricheskii metod izmereniya deformatsii: ucheb. posobie [Tensometric method for measuring strain: a manual]. Samara: Samar. state aerospace un-ty Publ., 2011, 56 p.



12. Petrov A. A., Eliseev K. V., Tret'yakov A. V., Marikin A. N., Nikitin V. V., Zimakova M. V., Kozlov P. V. Sravnitel'nyi analiz rezul'tatov silovogo vozdeystviya na zheleznodorozhnyi put' s primeneniem metodov Shlyumpfa, «RZHD-2016» I «NVTs-TKP» [Comparative analysis of the results of force impact on the railway track using Schlumph method, «RZD-2016» and «NVTs-TKP»]. *BRNI [Bulletin of scientific research results]*, 2017, No.4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-rezultatov-silovogo-vozdeystviya-na-zheleznodorozhnyy-put-s-primeneniem-metodov-shlyumpfa-rzhd-2016-i-nvts-tpk> (access date: 11.11.2018).

13. GOST 55050-2012. Zheleznodorozhnyi podvizhnoi sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na zheleznodorozhnyi put' i metody ispytaniy [GOST 55050-2012. Railway rolling stock. Norms of permissible impact on the railway track and test methods]. Moscow: Standartinform Publ., 2013, 16 p.

14. Nauchnye podrazdeleniya SGUPS - NIL Mosty – Razrabotki - 6. Razrabotka i izgotovlenie izmeritel'nogo oborudovaniya dlya ispytaniya mostov [Elektronnyi resurs]. [Scientific divisions of SGUPS - SRL Bridges - Developments - 6. Development and manufacturing of measuring equipment for testing bridges]. Siberian state transport university. Access mode: <http://www.stu.ru/science/index.php?page=1094> – Screen title. (Access date: 11.11.2018).

15. Kosenko S.A., Kvashnin M. Ya., Bondar' I. S., Akimov S. S. Ekspluatatsionnye izmereniya napryazhenii v rel'se pri vozdeystvii podvizhnogo sostava [Operational stress measurements in the rail when exposed to rolling stock]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2017, No.2 (30). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekspluatatsionnye-izmereniya-napryazheniy-v-relse-pri-vozdeystvii-podvizhnogo-sostava> (access date: 11.11.2018).

16. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kompleks izmeritel'nyi mnogofunktsional'nyi tenzor MS [Operation manual. Measuring complex multifunctional tensor MS]: approved by VMNII411739.001TU-LU, 2011, 26 p.

### Информация об авторах

### Authors

Алтынников Денис Сергеевич – аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [denis.altinnikov@yandex.ru](mailto:denis.altinnikov@yandex.ru)

Ковенькин Дмитрий Александрович – заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [kovenkin\\_pph@irgups.ru](mailto:kovenkin_pph@irgups.ru)

Denis Sergeevich Altynnikov – Ph.D. student, the Subdepartment of Railway Track and Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, e-mail: [denis.altinnikov@yandex.ru](mailto:denis.altinnikov@yandex.ru)

Dmitrii Alexandrovich Koven'kin – Head of the Subdepartment of Railway Track and Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, e-mail: [kovenkin\\_pph@irgups.ru](mailto:kovenkin_pph@irgups.ru)

### Для цитирования

### For citation

Алтынников Д. С. Определение поперечных напряжений в шейке рельсов в зависимости от динамических нагрузок на подходах к мостам / Д. С. Алтынников, Д. А. Ковенькин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 60, № 4. - С. 108–117. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).108-117

Altynnikov D. S., Koven'kin D. A. Opredelenie poperechnykh napryazhenii v sheike rel'sov v zavisimosti ot dinamicheskikh nagruzok na podkhodakh k mostam [Determining transverse tensions in the rail web depending on dynamic loadings at approaches to bridges]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2018, Vol. 60, No. 4, pp. 108–117. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).108-117

УДК 621.311:620.92

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).117-124

**В. С. Степанов, Т. Б. Степанова, А. А. Старикова**

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация  
Дата поступления: 21 сентября 2018 г.

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОЗДАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

**Аннотация.** Описаны результаты системного анализа эффективности электроснабжения изолированных районов на базе ветроэнергетических установок (ВЭУ). Были сопоставлены две схемы электроснабжения района: вариант 1 – от энергетической системы (ЭЭС) с генерацией в ней электроэнергии на угольных КЭС; вариант 2 – от локальной системы, сформированной на базе ВЭУ (ветропарка). Определены технико-экономические показатели схемы электроснабжения от ЭЭС с вариацией основных параметров – протяженности высоковольтной линии до рассматриваемого района, стоимости дополнительного киловатта мощности на тепловой электростанции, удельного расхода топлива на выработку электроэнергии на ней и его стоимости. Для варианта локальной энергосистемы с генерацией от ветропарка обозначенные показатели были определены при вариации удельных затрат на установленную мощность на ВЭУ и стоимости реализованной в районе электроэнергии. Показана зависимость срока окупаемости капиталовложений от удаленности региона от энергосистемы и цены электроэнергии в ней для 1-го варианта электроснабжения, а также зависимость рентабельности сооружения ветропарка в рассматриваемом регионе от величины удельных затрат на киловатт генерируемой мощности и стоимости электроэнергии.

**Ключевые слова:** ветроэнергетические установки, электроснабжение, локальные энергосистемы, экономическая оценка.