



13. Kosarev A.B., Kosarev B.I. Osnovy elektromagnitnoi bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Fundamentals of Electromagnetic Safety of Railway Power Supply Systems]. Moscow: Intekst Publ., 2008. 480 p.
14. Bader M.P. Elektromagnitnaya sovmestimost' [Electromagnetic compatibility.]. Moscow: UMK MPS Publ., 2002. 638 p.
15. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog: modelirovaniye i upravleniye [Electromagnetic safety in power supply systems of railways: modeling and control]. Angarsk : AnSTU Publ., 2018. 382 p.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonesimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh system [Complex non-symmetrical modes of electrical systems]. Irkutsk : Irkut. state un-ty Publ., 2005. 273 p.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another. *Power Technology and Engineering*, 2015. Vol. 49, No. 4. Pp. 304–309.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric Systems. *Innovation & Sustainability of Modern Railway – Proceedings of ISMR '2008*. Beijing : China Railway Publishing House, 2008. Pp. 504–508.
19. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A. Imitative Modelling of Electromagnetic Safety Conditions in Smart Power Supply Systems. *Advances in Intelligent Systems Research. Vol. 158. : Vth International workshop "Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security" (IWCI 2018)*, 2018. Pp. 20–25.
20. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A. et al. Electromagnetic Safety Enhancing in Railway Electric Supply Systems. *E3S, Web of Conferences 58, 01006(2018) RSES 2018*. Pp. 1–6.
21. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures. *Advances in Engineering Research. Vol. 158. International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018)*, 2018. Pp. 219–225.

Информация об авторах

Authors

Буякова Наталья Васильевна – к. т. н., доцент, Ангарский государственный технический университет, e-mail: bn_900@mail.ru

Закарюкин Василий Пантелеймонович – д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: zakar49@mail.ru

Крюков Андрей Васильевич – д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутский национальный исследовательский технический университет, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Степанов Андрей Дмитриевич – к. т. н., доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: stepanov_andrey_1978@mail.ru

Natal'ya Vasil'evna Buyakova – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Angarsk State Technical University, e-mail: bn_900@mail.ru

Vasilii Panteleimonovich Zakaryukin – Doctor of Engineering Science, Professor, Irkutsk State Transport University, e-mail: zakar49@mail.ru

Andrei Vasil'evich Kryukov – Doctor of Engineering Science, Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Andrei Dmitrievich Stepanov – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Irkutsk State Transport University, e-mail: stepanov_andrey_1978@mail.ru

Для цитирования

For citation

Буякова Н. В. Электромагнитная безопасность в системах внешнего электроснабжения железных дорог / Н. В. Буякова, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. Д. Степанова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 133–141. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).133–141

Buyakova N. V., Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Stepanov A. D. Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Electromagnetic safety in railroad external power supply systems]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 62, No. 2. Pp. 133–141. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).133–141

УДК 625.14:62.91:681.5

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).141–150

Н. Г. Мудрая¹, В. С. Марюхненко², Ю. Ф. Мухонад¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, г. Балашиха, Российская Федерация

Дата поступления: 28 марта 2019 г.

АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТИ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ

Аннотация. В статье описан алгоритм выявления неисправности рельсовой цепи в системе непрерывного контроля с применением квазиоптимальной обработки широкополосных сигналов. Применение широкополосных сигналов как стимулирующих существенно повышает качественные показатели контроля параметров безопасности железнодорожных перевозок, а именно, позволяет применить сложные помехоустойчивые коды, улучшает электромагнитную совместимость с другими устройствами и системами автоматики и телемеханики, повышает помехоустойчивость передачи информационных сигналов, а также уменьшает энергозатраты. Обработка широкополосного сигнала осуществляется посредством цифровой согласованной фильтрации или корреляционного анализа и отличается высокой точностью и быстродействием, так что задачи контроля рельсовых цепей решаются практически в реальном времени. Применение дискретных широкополосных сигналов



позволяет использовать гибкость цифровых алгоритмов обработки стимулирующих сигналов и адаптацию к конкретной помеховой обстановке в контрольной точке рельсовой цепи, что существенно снижает влияние дестабилизирующих факторов на результаты обработки. Для обеспечения надежной работы рельсовых цепей в реальном времени требуется построение системы контроля на основе алгоритмов робастных к изменениям сопротивления балласта. Предложен вариант алгоритма контроля рельсовой цепи с применением широкополосных сигналов. С использованием алгоритма выявления неисправности рельсовой цепи в системе контроля ее работоспособности, сократятся большие затраты, исчезнет необходимость прекращения движения на время проведения работ по плановому осмотру и измерению параметров рельсовой цепи, что повысит показатели безопасности и надежности.

Ключевые слова: рельсовая цепь, квазиоптимальная обработка, широкополосный сигнал, безопасность движения поездов, спектральная плотность, цифровая согласованная фильтрация, алгоритм, аналого-цифровой преобразователь.

N. G. Mudraya¹, V. S. Maryukhnenko², Yu. F. Mukhopad¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² Military Academy of Strategic Rocket Troops after Peter the Great

Received: March 28, 2019

AN ALGORITHM OF IDENTIFYING FAULTY RAIL TRACK CIRCUIT IN THE CONTROL SYSTEM WITH THE USE OF BROADBAND SIGNALS

Abstract. The article describes an algorithm for detection of rail track circuit failure in the system of continuous monitoring using quasi-optimal processing of broadband signals. The use of broadband signals as a stimulant significantly improves the quality indicators of railroad transportation safety monitoring. Namely, it allows applying complex noise-immune codes, improving electromagnetic compatibility with other devices and systems of automatics and telemechanics, increases the robustness of transmission of information signals and reduces energy costs. The broadband signal processing is carried out by means of digital matched filtering or correlation analysis and is characterized by high accuracy and speed, so that the problems of control of rail track circuits are solved in almost real time. The use of discrete broadband signals makes it possible to use the flexibility of digital algorithms of processing stimulatory signals and adapt to a specific noise situation at the control point of the rail track circuit, which significantly reduces the impact of destabilizing factors on the processing results. To ensure reliable operation of rail track circuits in real time requires the construction of a control system based on algorithms robust to changes in the ballast resistance. A variant of the control algorithm of the rail track circuit with the use of broadband signals is proposed. By using the algorithm of detecting the failure of the rail track circuit in the system of monitoring the performance of the rail track circuit will reduce the high costs. There will be no need to stop the traffic at the time of the planned inspection and measurement of the parameters of the rail track circuit, which will increase the safety and reliability.

Keywords: rail track circuit, quasi-optimal processing, broadband signal, train traffic safety, spectral density, digital matched filtering, algorithm, analog-to-digital converter.

Введение

В системах железнодорожной автоматики и телемеханики существенную роль играют рельсовые цепи. Рельсовая цепь представляет собой систему, состоящую из рельсовой линии и аппаратуры формирования входных сигналов и аппаратуры контроля ее выходных сигналов.

Рельсовая линия включает рельсы, стыковые соединители, изолирующие стыки и другие устройства, необходимые для функционирования рельсовой цепи.

Рельсовые цепи в системе устройств железнодорожной автоматики и телемеханики выполняют функции контроля занятости пути и целостности рельсового пути; передачи информации о показаниях путевых светофоров в систему автоматической локомотивной сигнализации; увязки показаний между проходными светофорами в системах числовой кодовой автоматической блокировки.

Из перечисленных функций следует важность обеспечения высокой надежности работы рельсовых цепей и достоверности контроля их состояния. Это объясняется, с одной стороны, существенным влиянием их состояния на безопасность перевозок, с другой – тяжелыми условиями эксплуатации. Рельсовые цепи испытывают постоянные динамические нагрузки различного характера от проходящих поездов, колебаний температуры и влажности окружающей среды, протекания тяго-

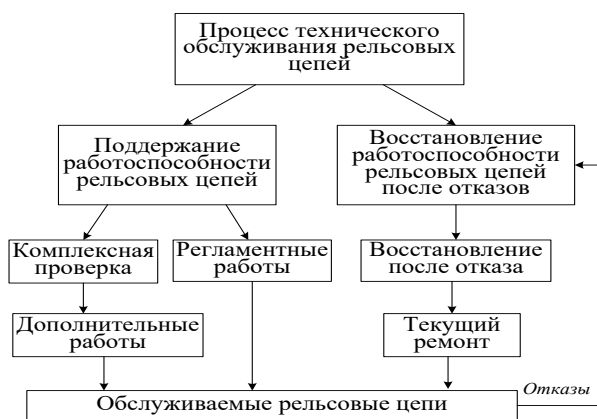


Рис. 1. Структурная схема процесса технического обслуживания рельсовых цепей



вых токов, интенсивного засорения балластного материала сыпучими грузами и т. д. [1].

Особенно подвержены воздействиям неблагоприятных факторов применяемые в рельсовой цепи соединительные и изоляционные элементы, которые имеют ограниченный запас механической прочности и допусков на электрические параметры. Анализ отказов основных устройств автоматики и телемеханики показывает, что около 30 % отказов всех устройств автоматики и телемеханики приходится на рельсовые цепи [2].

Подавляющее большинство отказов в рельсовых цепях происходит вследствие изменения электрического сопротивления рельсовой цепи, которое может быть вызвано либо обрывом, либо несанкционированным коротким замыканием, либо параметрическим повышением сопротивления цепи, включающей балласт как проводник тока [3].

Существующий процесс технического обслуживания рельсовых цепей (рис. 1) – профилактика отказов и оперативное устранение неисправностей, он распределен между специалистами сигнализации, централизации и блокировки и работниками службы пути [4].

Работники сигнализации, централизации и блокировки проводят профилактические измерения и определяют место отказа, но, без привлечения работников службы пути, не имеют возможности самостоятельно устранить отказ или выполнить работы по его предотвращению. Следовательно, восстановление сопротивления изоляции в реальном масштабе времени практически невозможно [5].

Таким образом, актуальной является задача синтеза рельсовой цепи со встроенным автоматическим контролем и с альтернативным принципом действия, а именно, инвариантной к изменениям сопротивления балласта и перемычек в широких пределах, исключая режим холостого хода и короткого замыкания.

Перспективным направлением обеспечения надежной работы рельсовых цепей в реальном масштабе времени, является построения системы контроля на основе алгоритмов робастных к изменениям сопротивления балласта.

Целью статьи является анализ методов обработки широкополосных сигналов и разработка алгоритма выявления неисправности рельсовой цепи с применением широкополосных стимулирующих сигналов (ШПС) и квазиоптимальной их обработки.

Широкополосные сигналы как инструмент контроля рельсовых цепей

Вопрос о применении ШПС в системе контроля работоспособности рельсовой цепи ставился

ранее [6]. Как функция времени t ШПС $u_{шпс}(t)$ будет иметь вид

$$u_{шпс}(t) = U_{шпс} \cos[(\omega(t)t + \theta_0)], \quad t \in [0, T_{cc}], \quad (1)$$

где $\omega(t) = \omega_0 + a t$, a – скорость изменения частоты, $[a] = 1/c^2$; θ_0 – начальная фаза; T_{cc} – длительность ШПС.

Обработка широкополосных сигналов [6, 7], включая и сигналы с ЛЧМ вида (1), производится в согласованном фильтре (СФ) с импульсной характеристикой

$$h_{сф}(t) = u_{шпс}(-t). \quad (2)$$

При применении сигнала с ЛЧМ время запаздывания различных составляющих его спектра в согласованном фильтре зависит от их частоты таким образом, что все спектральные составляющие входного для СФ сигнала на выходе появляются одновременно [8, 9]. Тем самым обуславливается узкий пик выходного сигнала $u_{сж}(\tau)$, $\tau = (t - T_{cc})$, большой амплитуды (рис. 2).

В результате согласованной фильтрации широкополосного стимулирующего сигнала $u_{шпс}(t)$, $t \in (0, T_{cc})$, ограниченной длительности T_{cc} на выходе СФ формируется функция напряжения $u_{сж}(\tau)$, главный лепесток которой по нулевому уровню имеет длительность $\tau_{сж}$, а его максимум задержан относительно начала обработки на время T_{cc} [10].

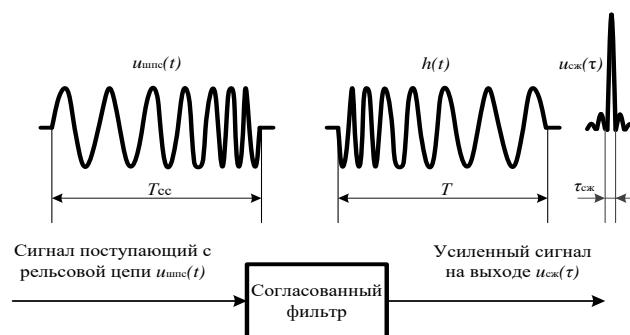


Рис. 2. Процесс сжатия широкополосного сигнала

Предполагая, что в процессе обработки энергия сигнала на входе $E_{св}$ и выходе $E_{сж}$ СФ изменяется незначительно [11], справедливо записать:

$$E_{вх} \approx E_{вых}. \quad (3)$$

Энергия и стимулирующего $u_{шпс}(t)$, и сжатого в СФ $u_{сж}(\tau)$ сигналов (без учета боковых лепестков)

$$E_{вх} = P_{вх} T_{cc}; \quad E_{вых} = P_{вых} \tau_{сж}, \quad (4)$$

где $P_{вх}$ и $P_{вых}$ – соответственно их мощности.

Коэффициент сжатия вычисляем по формуле:

$$k_{сж} \approx P_{вых} / P_{вх} = T_{cc} / \tau_{сж}. \quad (5)$$

С учетом обозначения

$$\Delta f_{св} = 1 / \tau_{сж}, \quad (6)$$



где Δf_{cc} – эффективная ширина спектра входного (стимулирующего) сигнала СФ.

Формулы (4) и (5) принимают вид:

$$k_{сж} = T_{cc} \Delta f_{эф} = B_{cc}, \quad \tau_{сж} = T_{cc} / B_{cc}, \quad (7)$$

где B_{cc} – база стимулирующего сигнала.

Из формул (5)–(7) следует, что с точностью до постоянного коэффициента $0 < k_{\phi} \leq 1$, который зависит от конкретного алгоритмического и / или технологического исполнения согласованного фильтра

$$U_{сж} \approx \bar{U}_{шпс} \sqrt{k_{\phi} k_{сж}} = \bar{U}_{шпс} \sqrt{k_{\phi} B_{cc}}, \quad (8)$$

где $U_{сж}$ – размах сжатого сигнала,

а также

$$\tau_{сж} \approx \bar{U}_{шпс} \sqrt{k_{\phi} k_{сж}} = \bar{U}_{шпс} \sqrt{k_{\phi} B}, \quad (9)$$

где $\bar{U}_{шпс}$ – усредненная амплитуда стимулирующего (широкополосного) сигнала.

Коэффициент сжатия зависит от свойств ШПС и, как правило, $k_{сж} \gg 1$ [7]. Даже при малой мощности, но большой стимулирующего сигнала, можно получить отклик согласованного фильтра, существенно превышающий уровень шумов и помех [12–14]. Выбирая базу ШПС с применением к нему согласованной фильтрации, можно добиться:

– превышения размахом $U_{сж}$ сжатого сигнала $u_{сж}(t)$ уровня шумов и помех N не хуже заданного

$$Q = U_{сж} / N \geq Q_{зад}; \quad (10)$$

– существенного сокращения времени отклика СФ, а именно:

$$\tau_{сж} \ll T_{cc}, \quad (11)$$

Благодаря этим свойствам можно добиться повышения достоверности контроля, соответственно, с одновременным снижением энергии стимулирующих сигналов и с улучшением точности локализации рельсовой цепи.

Таким образом, целесообразно использование ШПС для передачи стимулирующих сигналов по рельсовой цепи с целью контроля ее состояния. Те же кодированные сигналы можно использовать для передачи информационных сигналов системам железнодорожной автоматики и телемеханики. При этом достигается ряд преимуществ:

- повышается помехоустойчивость рельсовой цепи;
- улучшается электромагнитная совместимость с другими устройствами и системами;
- уменьшаются энергозатраты на контроль РЦ.

В предположении, что скорость распространения стимулирующего сигнала вдоль линии рельсовой цепи постоянна и равна $c_{л}$, выражение (1) можно переписать как функцию стимулирующего напряжения от текущего расстояния l , отсчи-

тываемого от точки подключения ГСС к контролируемой линии [15]. Тогда на прямолинейном участке контроля:

$$u_{шпс}(l) = U_{шпс} g(l) \cos[(\omega(l) l + \theta_0 + \Theta(l)), \quad l \in [0, L_{ук}], \quad (12)$$

где $l = c_{л} \nu$ – текущее расстояние по рельсовой цепи от ГСС; $\nu \geq t + T_{cc}$ – текущее время распространения стимулирующего ШПС после окончания его генерирования; $g(l)$ и $\Theta(l)$ – показатели, характеризующие амплитудные и фазовые частотные искажения стимулирующего ШПС (1); $L_{ук} \geq c_{л} T_{cc}$ – длина плоского участка контроля рельсовой цепи:

$$L_{ук} = \int_{x_n}^{x_k} \left\{ 1 + \left[\frac{dL(x)}{dx} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} dx, \quad (13)$$

где $L(x)$ – аналитическое описание рельсовой линии на плоскости; x_n и x_k – соответственно координаты начала и окончания участка контроля.

Исследование методов и алгоритмов согласованной фильтрации ШПС является важной задачей предварительной проработки особенностей их применения для контроля РЦ. В условиях бурного развития технологии и математического обоснования применения микропроцессорных устройств целесообразной следует считать цифровую согласованную фильтрацию [16, 17].

Обработка широкополосных сигналов при контроле рельсовых линий

Структура ШПС рельсовой цепи включает генератор стимулирующих широкополосных сигналов и приемники контрольных сигналов [3, 13], ГСС устанавливается в начале участка контроля. Он вырабатывает ЛЧМ сигналы из класса широкополосных и его выходной каскад нагружен на контролируемую рельсовую линию.

Приемники ШПС устанавливаются на участке контроля в контрольных точках вдоль рельсовой линии. Каждому из приемников ШПС присваивается кодированный двоичный адрес m . Адрес состоит из кодовых двоичных слов, а именно:

- индивидуального номера ГСС на участке контроля;
- координат установки ГСС на участке контроля;
- индивидуального номера приемника ШПС на РЦ;
- координат установки приемника ШПС на РЦ.

Координаты установки ГСС приемников ШПС на РЦ определяются с высокой доступной точностью по спутниковой радионавигационной системе ГЛОНАСС или GPS.



ЛЧМ сигнал $\dot{E}(\omega)$ с известными амплитудным и фазовым спектрами, сформированный определенным ГСС распространяется вдоль рельсовой линии, сопротивление которой имеет в общем случае комплексный характер. Между точками подключения ГСС и i -го приемника ШПС оно представляет собой некоторую комплексную функцию $\dot{Z}_i(\omega)$. Вследствие протекания в рельсовой линии тока, вызванного сигналом $\dot{E}(\omega)$, при активном входном сопротивлении i -го приемника ШПС $R_{вх.i}$ на входных клеммах приемника выделяется напряжение $\dot{U}_{вх.i}(\omega)$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{вх.i}(\omega) &= \frac{\dot{E}(\omega)}{\dot{Z}_i(\omega, l) + R_{вх.i}} R_{вх.i} = \\ &= |\dot{U}_{вх.i}(\omega, l)| \exp[j\varphi(\omega, l)] = \\ &= U_{вх.i}(\omega, l) \exp[j\varphi_{вх.i}(\omega, l)], \end{aligned} \quad (14)$$

амплитудный $U_{вх.i}(\omega)$ и фазовый $\varphi_{вх.i}(\omega)$ спектры, которого понятным образом отличаются от соответствующих спектров ЛЧМ сигнала $\dot{E}(\omega)$.

Эти отличия в дальнейшем будем характеризовать соответственно амплитудными и фазовыми искажениями

$$g(\omega) = |\dot{U}_{вх.i}(\omega)| / |\dot{E}(\omega)|; \quad (15)$$

$$\gamma(\omega) = \{\arg[\dot{U}_{вх.i}(\omega)]\} - \{\arg[\dot{E}(\omega)]\}. \quad (16)$$

Собственно показатели искажений $g(\omega)$ и $\gamma(\omega)$ и характеризуют работоспособность контролируемой линии. Следовательно, обработку сигналов в точках контроля следует производить с учетом замечаний (15) и (16), что сводится к введению предискажений в спектры обрабатываемого сигнала.

Широкополосный ЛЧМ сигнал можно сжимать (обрабатывать) с применением аналоговых элементов или элементов функциональной электроники [3, 6], однако по ряду преимуществ предпочтительнее цифровая согласованная фильтрация. К ним относятся:

- высокая точность обработки, которая ограничена только возможностями аналого-цифрового преобразователя широкополосного сигнала;
- решение задачи контроля РЦ практически в реальном времени;
- гибкость применяемых алгоритмов и возможность адаптации цифровой фильтрации ШПС к конкретной помеховой обстановке в контрольной точке РЦ;
- существенное снижение влияния дестабилизирующих факторов на результаты обработки.

Спектральная плотность одиночного ЛЧМ-импульса [11], сформированного определенным

ГСС, описывается выражением

$$\dot{E}(\omega) = U_{шпс} \int_{-\tau_n/2}^{\tau_n/2} \cos(\omega_0 t + at^2/2) \cdot e^{(-j\omega t)} dt, \quad (17)$$

где $U_{шпс}$ – амплитудное значение импульса; ω_0 – несущая частота; τ_n – длительность импульса; a – скорость изменения частоты во времени, $[a] = c^{-2}$.

С учетом того, что девиация частоты за время длительности импульса

$$\Delta\omega = a\tau_n \ll \omega_0, \quad (18)$$

Если в (17) заменим

$$\sqrt{a} \cdot \left(t - \frac{\omega - \omega_0}{a} \right) = \sqrt{\pi} x, \quad (19)$$

получаем

$$\begin{aligned} \dot{E}(\omega) &= \frac{U_{шпс}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \exp\left[-j \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2a}\right] \times \\ &\times \int_{-X1}^{X2} \exp\left[j \frac{\pi x^2}{2}\right] dx. \end{aligned} \quad (20)$$

Формула для спектральной плотности ЛЧМ-импульса (20) имеет еще более компактный вид, если ввести обозначения

$$C(x) = \int_0^x \cos \frac{\pi y^2}{2} dy, \quad S(x) = \int_0^x \sin \frac{\pi y^2}{2} dy, \quad (21)$$

где $C(x)$, $S(x)$ – интегралы Френеля, и преобразовать пределы интегрирования

$$\begin{aligned} X1 &= \left[\frac{a\tau_n}{2} + (\omega - \omega_0) \right] / \sqrt{\pi a}, \\ X2 &= \left[\frac{a\tau_n}{2} - (\omega - \omega_0) \right] / \sqrt{\pi a}. \end{aligned} \quad (22)$$

В результате преобразований (20)–(22) получаем окончательное выражение для определения спектральной плотности ЛЧМ-импульса

$$\begin{aligned} \dot{E}(\omega) &= \frac{U_{шпс}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \exp\left[j \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2a}\right] \cdot \{C(X1) + \\ &+ C(X2) + j[S(X1) + S(X2)]\}. \end{aligned} \quad (23)$$

Согласно выражению (14), делаем вывод, что амплитудный спектр имеет вид

$$\begin{aligned} |\dot{E}(\omega)| &= \frac{U_{шпс}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \cdot \sqrt{[C(X1) + C(X2)]^2 + \\ &+ [S(X1) + S(X2)]^2}, \end{aligned} \quad (24)$$

а фазовый спектр ЛЧМ-сигнала

$$\begin{aligned} \arg[\dot{E}(\omega)] &= -\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2a} + \\ &+ \arctg \frac{S(X1) + S(X2)}{C(X1) + C(X2)}. \end{aligned} \quad (25)$$

Изменения соответствующего сигнала на входе i -го приемника, вызванные движением его вдоль контролируемого участка рельсовой цепи, влияют на амплитудный спектр сигнала



$$|\dot{U}_{\text{вх}i}(\omega)| = \frac{U_{\text{шпс}}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \cdot R_{\text{вх}i} \times \frac{\sqrt{[C(X1)+C(X2)]^2 + [S(X1)+S(X2)]^2}}{(|\dot{Z}_i(\omega)| + R_{\text{вх}i})}, \quad (26)$$

а также фазовый спектр

$$\arg[\dot{U}_{\text{вх}i}(\omega)] = -\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2a} + \arctg \frac{S(X1)+S(X2)}{C(X1)+C(X2)} + \gamma_{Z_i}, \quad (27)$$

где $|\dot{Z}_i(\omega)|$ – модуль комплексного сопротивления i -го участка контроля, Ом/км; γ_{Z_i} – фаза комплексного сопротивления i -го участка контроля; $R_{\text{вх}i}$ – активное входное сопротивление i -го приемника, Ом.

Для цифрового представления спектральной плотности с амплитудными и фазовыми искажениями ЛЧМ сигнала, целесообразно использовать квадратурное аналого-цифровое преобразование (АЦП).

Спектральную плотность дискретного сигнала можно определить путем дискретизации по времени аналогового сигнала, соответствующего $\dot{U}_{\text{вх}i}(\omega)$. При этом в формулах преобразований (20)–(22) следует:

- заменить непрерывное время t на дискретное nT_d , где n – текущий номер отсчета, T_d – интервал дискретизации, при числе интервалов дискретизации за период N ;
- интегрирование на конечном суммирование и dt на T_d ;
- пределы суммирования (22) в суммах, соответствующих интегралам (21), заменяются на

$$X1 = \left[\frac{aT}{2} + \left(\frac{2\pi T_d}{N} - \frac{2\pi T_d}{N_0} \right) \right] / \sqrt{\pi a},$$

$$X2 = \left[\frac{aT}{2} - \left(\frac{2\pi T_d}{N} - \frac{2\pi T_d}{N_0} \right) \right] / \sqrt{\pi a}; \quad (28)$$

$$C(x) = \sum_0^x \cos \frac{\pi y^2}{2}, \quad S(x) = \sum_0^x \sin \frac{\pi y^2}{2}. \quad (29)$$

Тогда амплитудный спектр примет вид

$$|\dot{U}_{\text{вх}i}(nT_d)| \approx T_d R_{\text{вх}i} \frac{U_{\text{шпс}}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \sqrt{[C(X1)+C(X2)]^2 + [S(X1)+S(X2)]^2} \div (|\dot{Z}_i(n)| + R_{\text{вх}i}), \quad (30)$$

а фазовый спектр –

$$\arg[\dot{U}_{\text{вх}i}(nT_d)] \approx -\frac{\left(\frac{2\pi T_d}{N} - \frac{2\pi T_d}{N_0} \right)^2}{2a} + \arctg \frac{S(X1)+S(X2)}{C(X1)+C(X2)} + \gamma_{Z_i}. \quad (31)$$

Последовательность отсчетов с выходов АЦП записывается в регистры, в которых она хранится на интервале дискретизации и используется для дальнейшей обработки.

Алгоритм обработки широкополосных сигналов

Для обеспечения надежной работы рельсовых цепей в реальном масштабе времени требуется построение системы контроля на основе алгоритмов робастных к изменениям сопротивления балласта. Одним из наиболее важных алгоритмов системы контроля РЦ является алгоритм обработки ШПС, который обладает высоким уровнем точности и зависит от характеристик сигнала, количества отсчетов обрабатываемой последовательности и задач, поставленных перед цифровой системой обработки сигналов, а именно, определение амплитудных и частотных искажений $g(\omega)$ и $\gamma(\omega)$, с последующим выводом параметров, влияющих на работоспособность контролируемого участка РЦ, на автоматизированные рабочие места.

На начальном этапе разработанного алгоритма обработки ШПС (рис. 3) фиксируется поступление сигнала определенного адреса m , который соответствует номеру i -го приемника, происходит инициализация.

На основании ее рассчитываются импульсные характеристики фильтра.

При согласованной фильтрации комплексный коэффициент передачи фильтра, согласованный с сигналом $u_{\text{шпс}}(t)$, должен иметь амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), пропорциональную, с коэффициентом K , амплитудному спектру сигнала, и фазовую характеристику (ФЧХ), равную инвертированному со сдвигом на $-\varphi(\omega)$ фазовому спектру сигнала:

$$|W_{\text{согл}}(\omega)| = K \cdot |\dot{E}(\omega)|; \quad (32)$$

$$\arg[W_{\text{согл}}(\omega)] = \{-\arg[\dot{E}(\omega)] - \varphi(\omega)\}. \quad (33)$$

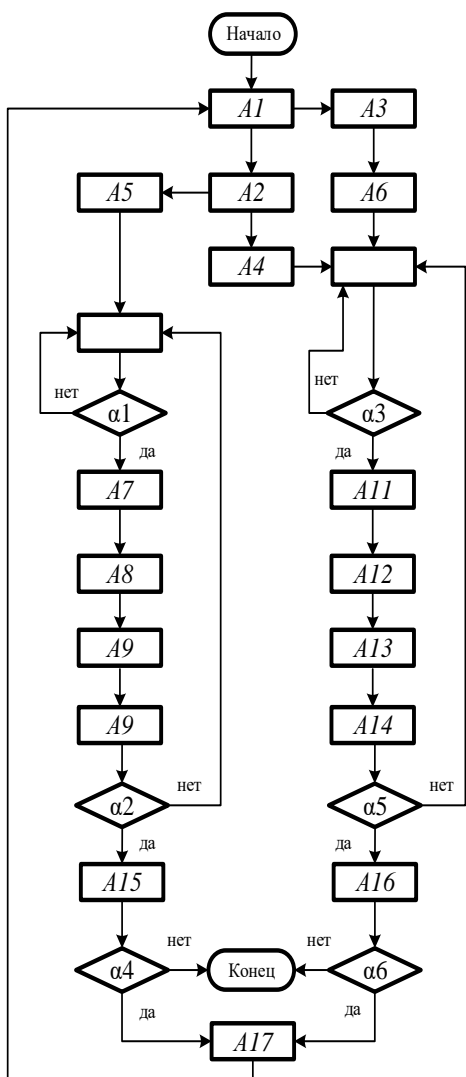
Колесания сигнала с рельсовой цепи поступают параллельно на входы аналого-цифрового преобразователя (АЦП), которые с частотой дискретизации F_d образуют отсчеты сигнала в виде двоичных чисел – цифровую последовательность, пропорциональную уровню входного сигнала. Оптимальное значение интервала дискретизации или частоты дискретизации устанавливается в соответствии с требованиями теоремы Котельникова.

В соответствии с этим минимальное значение F_d должно удовлетворять равенству

$$F_d = 2 F_B,$$

или

$$T_d = 1/2 F_B, \quad (34)$$



Оператор	Описание
A1	Получение адреса сигнала, начиная с $m=0$
A2	Прием сигнала $u_{шпnc}(t)$
A3	Прием сигнала $u_{шпnc}(l)$
A4	Инициализация коэффициентов фильтра K относительно $u_{шпnc}(t)$
A5	Преобразование сигнала $u_{шпnc}(t)$ в дискретные отсчеты $\dot{E}(n)$
A6	Преобразование сигнала $u_{шпnc}(l)$ в дискретные отсчеты $\dot{U}_{ex,i}(n)$
$\alpha 1$	Отсчеты сигнала готовы?
A7	Считать входной отсчет n
A8	Осуществить прямое ДПФ входных данных $\dot{E}(n)$
A9	Осуществить умножение ДПФ $\dot{E}(n)$ на результат ДПФ импульсной характеристики фильтра $h(n)$
A10	Получение результата $E_{сж}(n)$
$\alpha 2$	Отсчеты сигнала готовы?
A11	Осуществить прямое ДПФ входных данных $\dot{U}_{ex,i}(n)$
A12	Осуществить прямое ДПФ входных данных $\dot{U}_{ex,i}(n)$
A13	Осуществить умножение ДПФ $\dot{U}_{ex,i}(n)$ на результат ДПФ импульсной характеристики фильтра $h(n)$
A14	Получение результата $U_{сж}(n)$
$\alpha 3$	Все отсчеты обработаны $0 \leq n \leq N-1$?
A15	Принятие решения о наличии последовательности отсчетов $E_{сж}(n)$
$\alpha 4$	Продолжить обработку?
$\alpha 5$	Все отсчеты обработаны $0 \leq n \leq N-1$?
A16	Принятие решения о наличии последовательности отсчетов $U_{сж}(n)$
$\alpha 6$	Продолжить обработку?
A17	Накопление $m=m+1$

Рис. 3. Блок-схема алгоритма обработки широкополосных сигналов в системе контроля работоспособности рельсовых цепей с поясняющей таблицей

где F_{ϵ} – верхняя (максимальная) частота спектра обрабатываемого широкополосного сигнала, Гц.

Из (33) следует, что спектр сигнала должен располагаться в диапазоне частот от 0 до $F\delta/2$.

В режиме реального времени поступают отсчеты сигнала

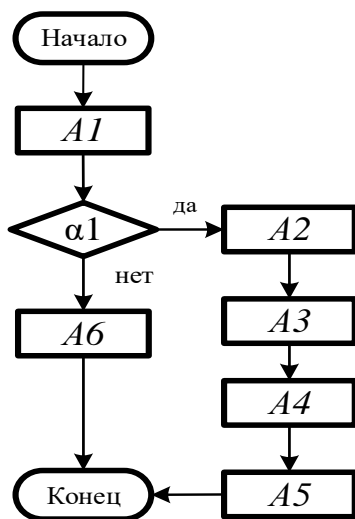
$$\dot{U}_{ex,i}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} u_{шпnc}(k)h(n-k) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)u_{шпnc}(n-k), \quad (35)$$

где k – номер временного отсчета; N – число отсчетов сигнала $u_{шпnc}(k)$ за период T ; n – номер спектрального отсчета.

Каждый вектор отсчетов сигнала характеризуется номером профиля сигнала, временной отметкой и другой дополнительной телеметрической информацией. По номеру профиля определяются параметры фильтра для оптимальной согласованной обработки сигналов. Входные данные подвергается прямому дискретному преобразованию Фурье (ДПФ)

$$u_{шпnc}(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{U}_{ex,i}(n) e^{-\frac{j2\pi nk}{N}}, \quad 0 \leq n \leq N-1. \quad (36)$$

Затем производится умножение полученных отсчетов сигнала на импульсную характеристику



Оператор	Описание
A1	Сравнение $U_{сж}(n)$ с $E_{сж}(n)$
$\alpha 1$	$E_{сж}(n) < U_{сж}(n)$? Разброс уровней $U_{сж}(n) \leq 0,1 E_{сж}(n)$?
A2	Рельсовая цепь исправна. Излома нет. Сопротивление балласта имеет допустимое значение.
A3	Определение изменения и оценка $U_{сж}(n)$ относительно $E_{сж}(n)$
A4	Вычисление $g(n)$ и $\gamma(n)$
A5	Вывод результата $Z_i(n, l)$
A6	Рельсовая цепь неисправна. Излом. Критическое значение сопротивления балласта.

Рис. 4. Алгоритм выявления неисправности рельсовой цепи с поясняющей таблицей

фильтра $h(n)$, и последним этапом является обратное дискретное преобразование Фурье (ОДПФ), результата этого перемножения. Формируется выходной отклик фильтра вида

$$U_{сж}(n) = \text{ОДПФ}(\text{ДПФ}(u_{\text{шпс}}(k)) * \text{ДПФ}(h(n))) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{U}_{\alpha, i}(n) W_N^{nk} \sum_{n=0}^{N-1} h'(n) W_N^{nk} W_N^{-nk}. \quad (37)$$

Фильтрация будет являться законченной, когда все отчеты будут обработаны. Сжатие сигналов повторяется до тех пор, пока не будут обработаны все сигналы с заранее заданными адресами.

Алгоритм выявления неисправности рельсовой цепи

Конечным этапом обработки широкополосных сигналов системы контроля РЦ является выявление неисправности РЦ. Неисправность определяется путем применения соответствующего алгоритма (рис. 4) и выполняется определенным образом. После прохождения вдоль участка рельсовой цепи выделяется принимаемый широкополосный сигнал при помощи детектора, основная энергия которого содержится в центральной спектральной составляющей, с помощью согласованного фильтра (коррелятора).

Отклик квазисогласованного фильтра содержит информацию о состоянии контролируемой рельсовой линии как электрической цепи, так как зависит от комплексного сопротивления $Z_i(\omega, l)$, и позволяет вести контроль ее целостности и изменений сопротивления балласта. Пороговое устройство формирует групповую оценку уровня принимаемого сигнала рельсовой цепи по совокупности текущей оценки уровня его спектральных составляющих $U_{сж}(n)$. Решение о состоянии рельсовой цепи (це-

лостность/излом) формируется в виде логического сигнала: $-K = 0$ – излом; $K = 1$ – целостность.

Для включения порогового устройства (перевода его из состояния 0 в 1 необходимо выполнение двух условий: уровень спектральных составляющих сигнала $U_{сж}(n)$ должен превысить порог срабатывания приемника ШПС сигнала $E_{сж}(n)$ и разброс уровней, превысивших порог срабатывания, должен быть не более 10 %. Одновременное выполнение этих условий возможно только в том случае, если рельсовая цепь работоспособна, а уровни и характеристики помех отвечают предельным условиям помехоустойчивости.

После включения компаратора его переход в выключенное состояние при изломе рельсовой цепи происходит тогда, когда уровень спектральных составляющих принимаемого сигнала $U_{сж}(n)$ стал ниже порога $E_{сж}(n)$.

Оценка состояния осуществляется путем сравнения $U_{сж}(n)$ с установленной заранее величиной $E_{сж}(n)$, определяется отношение этих напряжений и разность фаз (искажения) согласно (15), (16). По величине этого отношения определяются $g(n)$ и $\gamma(n)$ напряжение, соответствующее нарушению распространения сигнала вдоль контролируемого участка рельсовой цепи.

Заключение

Применяя алгоритм выявления неисправности рельсовой цепи в системе контроля работоспособности рельсовой цепи, сократятся большие затраты, исчезнет необходимость прекращения движения на время проведения работ по плановому осмотру и измерению параметров рельсовой цепи, что повысит показатели безопасности и надежности.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизированный контроль подвижного состава на ходу поезда / В.С. Марюхненко и др. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2016. 128 с.
2. Марюхненко В.С., Мудрая Н.Г. Физико-технические аспекты изменения сопротивления балласта железнодорожных путей // Вопросы естествознания. 2016. No. 1 (9). 25–34 с.
3. Мудрая Н.Г., Мухопад Ю.Ф. Обеспечение безопасности движения поездов с применением радиотехнических систем // Вестн. ИрГТУ. 2018. Т. 22, No. 6. С. 232–238.
4. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Шаманов В.И. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. М. : УМК МПС РФ, 2002. 285 с.
5. Бушуев А. В., Бушуев В. И., Бушуев С. В. Рельсовые цепи: теоретические основы и эксплуатация. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. 311 с.
6. Мудрая Н.Г., Марюхненко В.С. Применение шумоподобных сигналов для контроля сопротивления балласта железнодорожных путей // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск, 2015. С. 84–87.
7. Зачиняев Ю.В. Анализ и классификация формирователей линейно-частотно-модулированных радиосигналов с точки зрения уменьшения длительности формируемых сигналов // Современные проблемы науки и образования. 2012. No. 5. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=7173> (Дата обращения: 10.11.2018).
8. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М. : Радио и связь, 1985. 384 с.
9. Ричард Л. Цифровая обработка сигналов. М. : Бином-Пресс, 2007.
10. Иммореев И.Я. Сверхширокополосные радиосистемы. Обзор состояния и пути развития. USUIRCA 2005. URL:<http://uobgroup.ru/> (Дата обращения: 10.11.2018).
11. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М. : Высшая школа, 1988. 446 с.
12. Telliskivi T: Wheel-Rail Interaction Analysis. TRITA - MMK Report 2003:21, Ph.D. Thesis, Department of Machine Design, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm 2003.
13. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. М. : Техносфера, 2006.
14. Ifeakor E.C., Jervis B. W. Digital signal processing: a practical approach // Williams. 2004. 989 p.
15. Пат. 2592027 Рос. Федерация. Система контроля сопротивления балласта и целостности рельс железнодорожной линии с применением ЛЧМ-сигналов / А.Б. Мокшин, В.С. Марюхненко. No. 2014122877/11 ; заявл. 04.06.2014 ; опубл. 20.07.2016, Бюл. No. 20.
16. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М. : Радио и связь, 1991. 624 с.
17. Курuleв А.П. Преобразование спектров в электрорадиопеях. Минск : Изд-во БГУИР, 2017. 176 с.

REFERENCES

1. Maryukhnenko V.S. et al. Avtomatizirovannyi kontrol' podvizhnogo sostava na khodu poezda [Automated control of rolling stock on the train]. Irkutsk : IrGUPS Publ., 2016. 128 p.
2. Maryukhnenko V.S., Mudraya N.G. Fiziko-tekhnicheskie aspekty izmeneniya soprotivleniya ballasta zheleznodorozhnykh putei [Physical and technical aspects of changes in the resistance of the ballast of railway tracks]. *Voprosy estestvoznaniya* [Problems of natural science], 2016. No. 1 (9). Pp. 25–34.
3. Mudraya N.G., Muxopad Yu.F. Obespechenie bezopasnosti dvizheniya poezdov s primeneniem radiotekhnicheskikh sistem [Ensuring traffic safety of trains with the use of radio systems]. *Vestn. IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2018. Vol. 22, No. 6. Pp. 232–238.
4. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Shamanov V.I. Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoi avtomatiki, telemekhaniki i svyazi [Reliability of railway automation, telemechanics and communications]. Moscow: UMC MPS RF Publ., 2002. 285 p.
5. Bushuev A. V., Bushuev V. I., Bushuev S. V. Rel'sovye tsepi: teoreticheskie osnovy i ekspluatatsiya [Rail circuits: theoretical foundations and operation]. Ekaterinburg : UrGUPS Publ., 2014. 311 p.
6. Mudraya N.G., Maryukhnenko V.S. Primenenie shumopodobnykh signalov dlya kontrolya soprotivleniya ballasta zheleznodorozhnykh putei [The use of noise-like signals to control the ballast resistance of railway tracks]. *Sovremennye problemy radioelektroniki sb. tr. Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Modern problems of radio electronics: Coll. of art. of All-Russian scientific and practical conf.]. Krasnoyarsk, 2015. Pp. 84–87.
7. Zachinyaev Yu.V. Analiz i klassifikatsiya formirovatelei lineino-chastotno-modulirovannykh radiosignalov s tochki zreniya umen'sheniya dlitel'nosti formiruemykh signalov [Analysis and classification of linear frequency modulated radio signals formers from the point of view of reducing the duration of the generated signals]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2012. No. 5. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=7173> (Access date: 10.11.2018).
8. Varakin L.E. Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami [Communication systems with noise-like signals]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1985. 384 p.
9. Richard L. Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital Signal Processing]. Moscow: Binom-Press Publ., 2007.
10. Immoreev I.Ya. Sverkhshirokopolosnye radiosistemy. Obzor sostoyaniya i puti razvitiya [Ultra wideband radio systems. Review of the state and development trends]. *USUIRCA 2005*. URL:<http://uobgroup.ru/> (Access date: 10.11.2018).
11. Baskakov S.I. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly [Radio circuits and signals]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1988. 446 p.
12. Telliskivi T. Wheel-Rail Interaction Analysis. TRITA - MMK Report 2003:21, Ph.D. Thesis, Department of Machine Design, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm 2003.
13. Oppenheim A., Shafer R. Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2006.
14. Ifeakor E.C., Jervis B. W. Digital signal processing: a practical approach. Williams. 2004. 989 p.
15. Mokshin A.B., Maryukhnenko V.S. Sistema kontrolya soprotivleniya ballasta i tselostnosti rel's zheleznodorozhnoi linii s primeneniem LChM-signalov [The system of control of ballast resistance and rail line integrity with the use of LFM signals]. Pat. RF 2592027. No. 2014122877/11 ; applied 04.06.2014 ; publ. 20.07.2016, Bull. No. 20.
16. Tikhonov V.I. Statisticheskaya radiotekhnika [Statistical radio engineering]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1991. 624 p.
17. Kurulev A.P. Preobrazovanie spektrov v elektroradiotsepyakh [Transformation of the spectra in the electro-radio circuits]. Minsk : BGUIR Publ., 2017. 176 p.



Информация об авторах

Мудрая Наталья Георгиевна – аспирант кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: mydrayanatali@mail.ru

Марюхненко Виктор Сергеевич – д. т. н., профессор кафедры системы связи и телекоммуникаций, Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, г. Балашиха, e-mail: viktor.maryukhnenko@yandex.ru

Мухопад Юрий Федорович – д. т. н., профессор кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: mydrayanatali@mail.ru

Authors

Nataliya Georgievna Mudraya – Ph.D. student at the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, e-mail: mydrayanatali@mail.ru

Victor Sergeevich Maryukhnenko – Dr.Tech.Sc., professor at the Subdepartment of Communication and Telecommunication Systems, Peter the Great Military Academy of Strategic Rocket Troops, e-mail: viktor.maryukhnenko@yandex.ru

Yurii Fedorovich Mukhopad – Dr. Tech. Sc., professor of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, e-mail: mydrayanatali@mail.ru

Для цитирования

Мудрая Н. Г. Алгоритм выявления неисправности рельсовой цепи в системе контроля с применением шумоподобных сигналов / Н. Г. Мудрая, В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухопад // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 141–150. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).141–150

For citation

Mudraya N. G., Maryukhnenko V. S., Mukhopad Yu. F. Algorithm vyuyavleniya neispravnosti rel'sovoi tsepi v sisteme kontrolya s primeneniem shumopodobnykh signalov [An algorithm of identifying faulty rail track circuit in the control system with the use of broadband signals]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 62, No. 2. Pp. 141–150. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).141–150

УДК 629.46:629.45:629.4077

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).150–155

В. П. Ключа, П. Б. Сергеев, С. А. Мосол

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

Дата поступления: 30 марта 2019 г.

ОЦЕНКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ УДЕРЖАНИЯ СТОЯНОЧНЫМ ТОРМОЗОМ НА НОРМИРОВАННОМ УКЛОНЕ ИННОВАЦИОННОГО ПОЛУВАГОНА С НАГРУЗКОЙ 27 т ОТ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ НА РЕЛЬС

Аннотация. В статье приведен расчет обеспечения удержания стояночным тормозом инновационного полувагона с нагрузкой 27 т от колесной пары на рельс. При проверке обеспечения удержания стояночным тормозом производился тормозной расчет, по которому можно определить пригодность тормозного оборудования инновационного полувагона нагрузкой 25 т от колесной пары на рельс к использованию в инновационном полувагоне с нагрузкой 27 т от колесной пары на рельс. На основании этого сделан вывод о том, что обеспечение удержания стояночным тормозом на нормированном уклоне инновационного полувагона с нагрузкой от колесной пары на рельс 27 т в сгруженном состоянии (наиболее тяжелый режим работы тормозов) с использованием тормозной рычажной передачи и стояночного тормоза от инновационного полувагона с нагрузкой от колесной пары на рельс 25 т соответствует требуемому при условии установки стояночного тормоза на обеих тележках. Вследствие этого не исключается частичная унификация тормозной рычажной передачи и стояночного тормоза полувагонов с нагрузкой от колесной пары на рельс 25 и 27 т. В целях обеспечения безопасности движения по тормозам инновационных полувагонов с нагрузкой 27 т от колесной пары на рельс рекомендуется до принятия решения об организации их серийного выпуска проведение дополнительных тормозных испытаний опытной партии указанных полувагонов на предмет использования стояночных тормозов разных конструкций с отработкой предложенных мероприятий.

Ключевые слова: грузовой вагон, колесная пара, обеспечение удержания стояночным тормозом, тормозная рычажная передача.

V. P. Klyuka, P. B. Sergeev, S. A. Mosol

Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation

Received: March 30, 2019

ASSESSING THE STOPPING BRAKE RETENTION GUARANTEE FOR AN INNOVATIVE GONDOLA CAR ON THE STANDARDIZED DOWN GRADE WITH A 27 T LOAD FROM THE WHEELSET TO THE RAIL