

Логическое управление содержанием контактной подвески в системе токосъема при интенсивном движении поездов

А. Т. Бурков, М. Ф. Мухамеджанов✉

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ mokhirbek@mail.ru

Резюме

Разработка и реализация требований по определению и подтверждению надежности, эксплуатационной готовности, ремонтпригодности и безопасности при интенсивном движении поездов с учетом показателей качества токосъема базируется на решении задачи логического управления текущим содержанием контактной подвески. Анализ неисправностей и отказов электротяговой сети выполнен методом декомпозиции путем разделения системы передачи электроэнергии на подсистемы, включая подсистему токосъема. Физические процессы, сопровождающиеся сложными механическими, электрическими и тепловыми явлениями в скользящем контакте, использованы при разработке алгоритма прогнозирования технического состояния контактной подвески и токоприемника методом логического управления. При повышении скорости движения учтена способность системы находиться в состоянии стабильного токосъема в режимах скользящего и электродугового контакта. Изучены факторы, влияющие на нарушение стабильности токосъема. Предложен способ логического контроля элементов системы токосъема по отклонениям их характеристик в статических и динамических режимах работы контактной сети. По результатам исследований обоснована структура интегрированной интеллектуальной системы контроля и логического управления с применением средств непрерывной комплексной диагностики и мониторинга для оценки текущего состояния контактной подвески и токоприемника. Разработанная система применяется для обслуживания контактной сети по фактическому состоянию в условиях повышения технической и участковой скорости, среднесуточного пробега и среднесуточной производительности локомотива при снижении расхода электроэнергии на тягу поездов.

Ключевые слова

логическое управление, система токосъема, скользящий контакт, контактная подвеска, вставка токоприемника

Для цитирования

Бурков А. Т. Логическое управление содержанием контактной подвески в системе токосъема при интенсивном движении поездов / А. Т. Бурков, М. Ф. Мухамеджанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 78–88. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).78-88

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.01.2021, поступила после рецензирования: 22.01.2021, принята к публикации: 05.02.2021

Logical control of the catenary maintenance in the current collection system at intensive train traffic

A. T. Burkov, M. F. Mukhamedzhanov✉

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, the Russian Federation

✉ mokhirbek@mail.ru

Abstract

The development and implementation of requirements for determining and confirming reliability, operational readiness, maintainability, and safety at intensive train traffic, taking into account the quality indicators of current collection, is based on solving the problem of logical control of the current maintenance of the catenary. The analysis of faults and failures of the electric traction system is carried out by the decomposition method by means of dividing the power transmission system into subsystems, including the current collection subsystem. Physical processes accompanied by complex mechanical, electrical and thermal phenomena in the sliding contact are used in the development of an algorithm of predicting the technical condition of the contact catenary and the current collector by the method of logical control. When increasing the speed of movement, the ability of the system to be in a state of stable current collection in the sliding and electric arc contact modes is taken into account. The factors influencing the violation of the stability of the current collector are studied. A method of logical control of the elements of the current collection system by deviations of their characteristics in static and dynamic modes of operation of the catenary is proposed. Based on the results of the research, the structure of an integrated intelligent control and logic control system with the use of continuous complex diagnostics and monitoring tools to assess the current state of the catenary and current collector is justified. The developed system is used to maintain the overhead system according to the actual condition in the context of increasing

the technical and local speed, the average daily mileage and the average daily productivity of the locomotive while reducing the power consumption for train traction.

Keywords

logical control, current collection system, sliding contact, catenary, current collector strip

For citation

Burkov A.T., Mukhamedjanov M.F. Logicheskoe upravlenie sodержaniem kontaktnoi podveski v sisteme tokos"ema pri intensivnom dvizhenii poezdov [Logical control of the catenary maintenance in the current collection system at intensive train traffic]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp.78–88.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).78-88

Article Info

Received: 15.01.2021, Revised: 22.01.2021, Accepted: 05.02.2021

Анализ неисправностей и отказов в электротяговой сети при скоростном движении электрического подвижного состава

Развитие высокоскоростного железнодорожного движения сопровождается решением трех важнейших проблем: «колесо – рельс», «экипаж – тяговый привод», «токоприемник – контактная подвеска» [1, 2]. При скорости движения свыше 250 км/ч достижение устойчивого токосъема возможно при совершенствовании механических и электрических элементов системы – контактная сеть, скользящий контакт, токоприемник.

Контактная сеть высокоскоростных магистралей (ВСМ), являясь распределительным звеном системы тягового электроснабжения, обеспечивает показатели перевозочного процесса в условиях повышения скоростей движения электроподвижного состава (ЭПС). Как показывает практика, при высокоскоростном движении наиболее важным фактором является стабильность токосъема, которая зависит от контактного нажатия токоприемника и параметров контактной подвески. Усиленное контактное нажатие вызывает механические повреждения как в то-

коприемнике, так и в контактной подвеске. В то же время недостаточное контактное нажатие приводит к возникновению электрической дуги, что влечет за собой электромагнитное, радио- и оптическое излучение, усиленный электрический износ контактирующих элементов (рис. 1). В результате производительность системы токосъема снижается, а затраты на обслуживание увеличиваются. Учитывая важность этих процессов, актуальной задачей является обнаружение наиболее чувствительных параметров системы токосъема для создания логического контроля с использованием современных цифровых технологий [3].

Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» за последние годы эксплуатации участков скоростного движения показывает на значительную долю отказов и неисправностей в работе контактной сети. Основная доля неисправностей в контактной сети ВСМ приходится на обрывы проводов, тросов и струн и пережоги контактного провода, т. е. на элементы контактной подвески (рис. 2) [4].

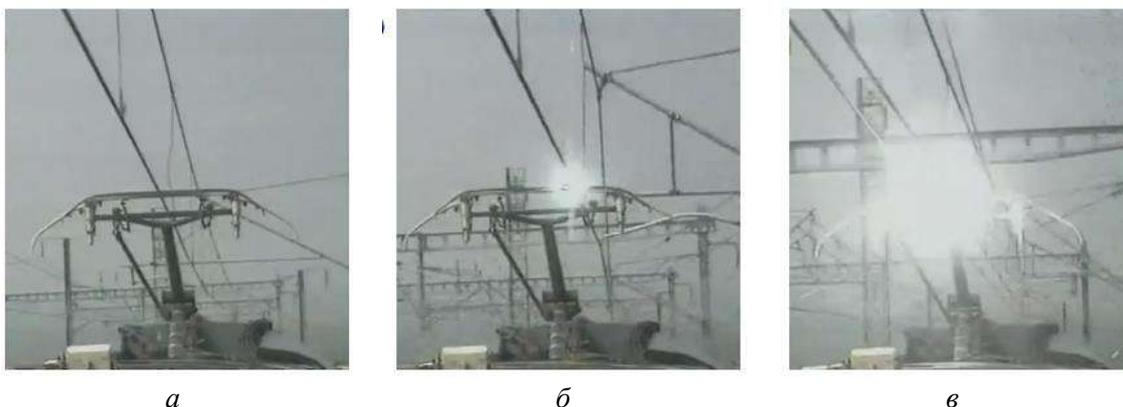


Рис. 1. Фрагменты токосъема при высокой скорости движения:
a – бездуговой токосъем; *б* – дуговой токосъем при проходе опорного узла;
в – дуговой токосъем при проходе сопряжения анкерных участков

Fig. 1. Fragments of current collection at high speed:
a – arcless current collection; *b* – arc current collection during the passage of the reference node; *c* – arc current collection during the passage of the coupling of anchor sections

Физические процессы в сильноточном скользящем контакте

Процесс передачи электрической энергии из электротяговой сети к тяговым двигателям ЭПС протекает на участке электрической цепи в зоне сильноточного скользящего контакта контактных проводов и токоведущих элементов – вставок полоза токоприемника [5]. Неподвижные контактные провода и движущиеся вставки токоприемника, электрически связанные скользящим контактом, образуют механическую систему токосъема.

Физические явления, сопровождающие сложное скользящее взаимодействие элементов системы токосъема, характеризуются электромагнитными, электрическими, механическими и тепловыми показателями, влияющими на износ контактирующих элементов, отрицательное воздействие на смежные коммуникационные системы, а главное – на снижение безотказности, эксплуатационной готовности и ремонтпригодности устройств токосъема [6].

В изучение и исследования процессов в скользящих контактах электрического транспорта внесли вклад многие ученые и специалисты. В работе [7] для уменьшения износа вставки токоприемника предложено использовать твердую смазку на основе дисульфида молибдена. Поверхность контактирующих элементов рассматривается с учетом микрошероховатости. Созданы и применяются в исследованиях экспериментальные установки для изучения токосъема в системе скользящей вставки и неподвижного контактного провода [8]. Опытными данными установлено, что при взаимодействии контактной пары «провод – вставка» с увеличением токовой нагрузки ЭПС уменьшается контактное сопротивление. Изучено явление возникновения на изношенной поверхности контактной вставки слоя ржаво-красных частиц, переносимых с контактного

провода. Установлено, что токовая нагрузка влияет на морфологию ржаво-красных слоев в более сложную микроструктуру, шероховатость которой характеризуется большим количеством изнашиваемых частиц, участвующих в режиме чистого трения. Вместе с тем при протекании тока изношенная поверхность может сформировать гораздо более плотное и гладкое состояние поверхностного слоя контактирующего элемента.

Полученные результаты исследования сильноточного скользящего контакта приводят к выводу о значительной сложности изучения физических явлений, учет влияния которых на показатели надежности представляется существенно важным.

Переходное сопротивление в контактной паре «контактный провод – вставка токоприемника»

Профиль контактирующих поверхностей оказывает существенное влияние на все контактные характеристики. Другим важным фактором, влияющим на характеристики, является образование разнообразных пленок, например, окислы, загрязняющих веществ, реактивов, образующихся на контактирующей поверхности.

Далее показана модель линий тока в контактной паре «контактный провод – вставка токоприемника» бездугового сильноточного скользящего контакта системы токосъема (рис. 3).

Линии тока в зоне контакта с неровными поверхностями контактирующих элементов стягиваются в зонах выступающих слоев шероховатого вещества. Площадь пятен, через которые замыкаются линии тока, меньше контактирующей геометрической площади соприкасающихся токоведущих элементов.

Поскольку линии протекания тока стягиваются в контактные пятна, сопротивление цепи увеличива-

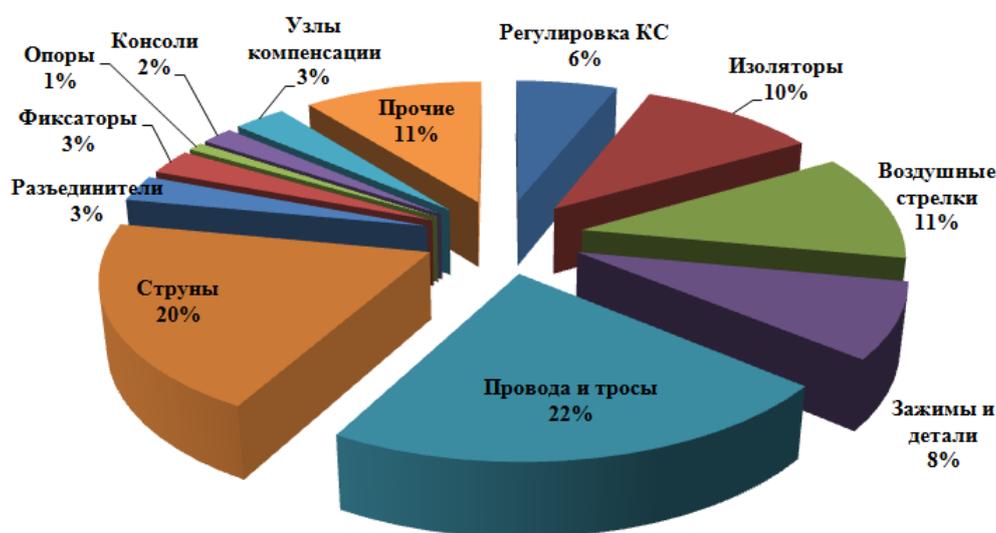


Рис. 2. Распределение неисправностей и отказов в контактной сети высокоскоростных магистралей
Fig. 2. Distribution of faults and failures in the high-speed mainline overhead system

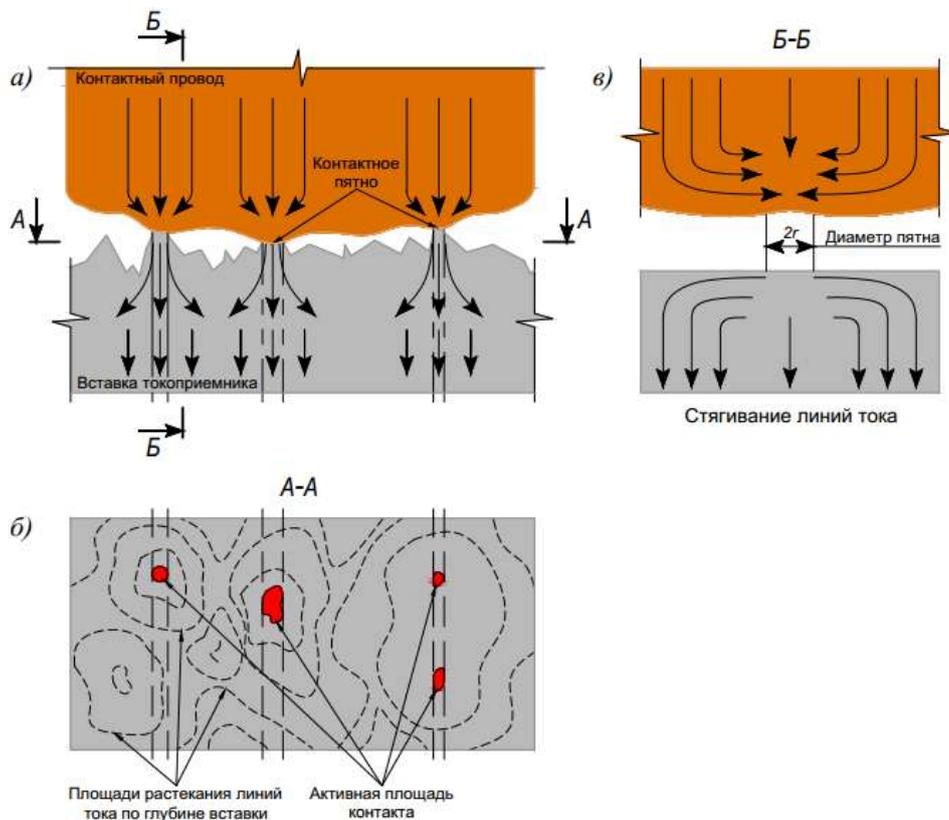


Рис. 3. Модель линий тока в контактной паре токоприемника и контактного провода:

a – продольный разрез; *б* – вид сверху; *в* – поперечный разрез

Fig. 3. Model of the current lines in the contact pair of the pantograph and contact wire:

a – longitudinal section; *b* – top view; *c* – transverse section

ется по сравнению с предполагаемым контактом, в котором линии тока проходят равномерно по всей площади. Указанное сопротивление называется сопротивлением стягивания.

Влияние оксидных, масляных, водяных пленок и пыли отражается на сопротивлении пятен переходного слоя, увеличивая его значение. Эта составляющая называется сопротивлением пленки.

Полное сопротивление, вызванное сопротивлением стягивания и сопротивлением пленки, называется контактным сопротивлением [9]. Применяется эмпирическая формула, описывающая зависимость контактного сопротивления от силы контактного нажатия:

$$R_K = \frac{k_{mx}}{F_k^n}, \quad (1)$$

где k_{mx} – коэффициент, учитывающий материал, формы и профиль поверхности контакта; F_k^n – сила контактного нажатия (в зависимости от точек соприкосновения контакта, $n = 0,5-1,0$).

Сопротивление стягивания, как основную составляющую переходного сопротивления, предлага-

ется определять, используя модель стягивания линий тока по эмпирической формуле:

$$R_c = \frac{\rho}{2rn} = \frac{\rho}{dn}, \quad (2)$$

где R_c – сопротивление стягивания; r, d – радиус и диаметр проводящего пятна; ρ – удельное сопротивление контактирующих элементов; n – число контактных пятен.

Механизм образования сопротивления пленки более сложен. Он связан с различными воздействиями окружающей среды. В сильноточном электрическом контакте из-за механического воздействия, особенно от воздействия электрической дуги, поверхностная пленка легко разрушается. Поэтому влияние пленки на общее переходное сопротивление сказывается слабо.

Нагревание сильноточного скользящего контакта

При протекании тока через скользящий контакт неизбежно возникает определенное падение напряжения на переходном сопротивлении. Это падение называется падением контактного напряжения U_K .

Джоулевы потери, создаваемые контактным сопротивлением, вызывают увеличение температуры зоны стягивания и передачу теплового потока в тепло контактирующих элементов. Это приводит к повышению температуры токоведущих частей полоза токоприемника над температурой окружающей среды.

Связь между падением контактного напряжения и температурой перегрева над окружающей средой описывается следующим образом:

$$\Delta T = \frac{U_K^2}{8\lambda\rho}, \quad (3)$$

где ΔT – температура перегрева над температурой окружающей среды от джоулевых потерь в скользящем контакте; U_K – контактное падение напряжения; $\overline{\lambda\rho}$ – среднее значение произведения теплопроводности и удельного сопротивления двух контактных материалов [9].

Структурный синтез системы токосъема

Общее воздействие на систему токосъема оказывают комбинации механических и электрических явлений.

Выделение теплоты при высокой плотности тока

скользящего контакта вызывает деформацию контактных элементов, изменяет коэффициент трения, усиливает износ и повреждает поверхность скольжения. Токовое повышение температуры – это джоулевы потери, выделяемые в зоне контакта, что является обобщенным фактором отрицательного влияния токовой нагрузки на контактное трение. Таким образом, в точках контакта образуется дополнительный источник тепловыделения из-за трения скольжения.

В случае расхождения контактирующих элементов происходит выделение тепловой энергии из-за образования столба электрической дуги между катодными и анодными областями. В данном случае выделяемая тепловая энергия распределяется по разным законам в областях развития процесса горения дуги. Тепловая энергия распределяется в соответствии с законами теплообмена посредством теплопроводности, тепловой конвекции и тепловой радиации (рис. 4).

Приведена модель структуры функционирования системы токосъема, учитывающая физические процессы тепловыделения, параметры системы токосъема, микроструктуру контактирующих поверхностей и тип контактного материала (рис. 5).

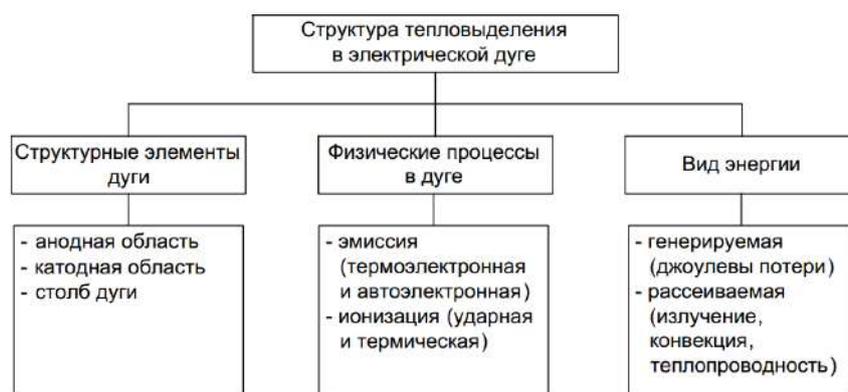


Рис. 4. Классификация тепловыделения в электрической дуге

Fig. 4. Heat release classification in an electric arc

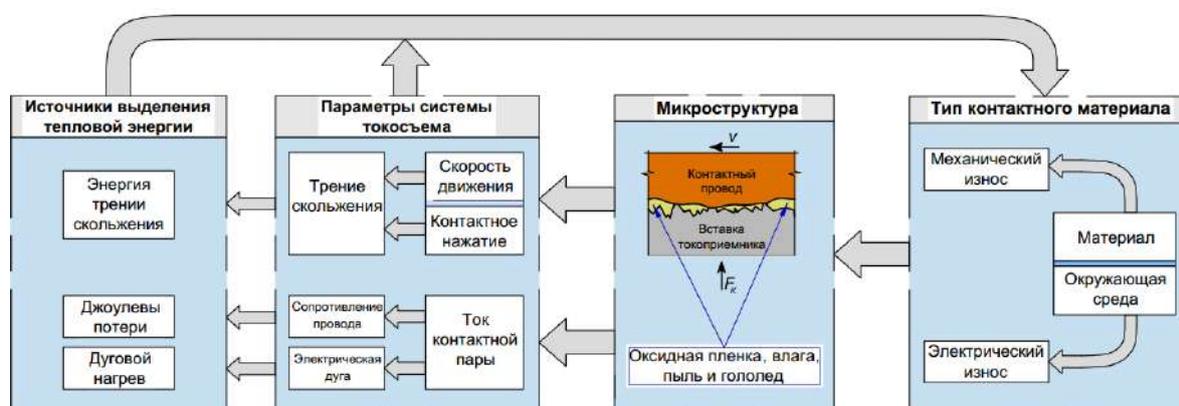


Рис. 5. Структурная модель энергетических процессов в системе токосъема

Fig. 5. Structural model of energy processes in the current collection system

В динамических системах в контактирующих элементах характерным является процесс рассеяния энергии, при котором механическая энергия обычно преобразуется в тепловую (до 90 %). В процессе трения скольжения в контактных точках образуется дополнительная тепловая энергия, а трение скольжения является основным источником тепловыделения.

Динамические характеристики высокоскоростной контактной подвески

Переходное сопротивление и трение скользящего контакта зависят от силы нажатия токоприемника и расположения проводов контактной подвески в пространстве. Положение и колебание контактного провода приводят к динамическому изменению контактного нажатия. При моделировании динамических процессов контактную подвеску рассматривают в виде системы с распределенными параметрами, в частности контактный провод представляется в виде натянутой гибкой нити.

В данном случае согласно [10] волновое уравнение натянутой нити записывается в следующей форме:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{\gamma}{\sigma} \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = 0, \quad (5)$$

где γ – плотность материала контактного провода, кг/м³; σ – механическое напряжение, Н/м².

Соответственно общее решение уравнения (5) имеет следующий вид:

$$y = f(x \pm c_p t). \quad (6)$$

При этом скорость распространения волны можно представить как

$$c_p = \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}} = \sqrt{\frac{K}{m_K}}, \quad (7)$$

где K – натяжение контактного провода, кН; m_K – масса единицы длины контактного провода, кг/м.

Состояние контактного провода, нагруженного силой F_k' от токоприемника, движущегося со скоростью v , описывается уравнением

$$y(x,t) = \frac{2F_k' l}{m_K \pi^2 (c_p^2 - v^2)} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi x}{l} \left(\sin \frac{n\pi v t}{l} - \frac{v}{c_p} \sin \frac{n\pi c_p t}{l} \right), \quad (8)$$

где F_k' – постоянная сила контактного нажатия, кН; l – длина рассматриваемого участка контактной сети, в котором происходят колебания контактного провода.

Коэффициент Доплера α характеризует возможность контактной подвески при взаимодействии с токоприемником реализовать заданную наибольшую скорость движения для контактной подвески и определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{c_p - v}{c_p + v}. \quad (9)$$

Коэффициент Доплера должен быть не менее 0,2 в соответствии с нормативами [10, 11].

Наиболее важной динамической характеристикой контактной подвески является скорость распространения волны. Она накладывает принципиальное физическое ограничение на возможную скорость движения ЭПС. Фактически, по условию токосъема, превысить скорость распространения волны невозможно. Существует требование, что максимальная расчетная скорость ЭПС не должна превышать 70 % от скорости распространения волны [12].

В соответствии с международными и российскими нормами качество токосъема считается удовлетворительным при выполнении следующих условий:

- статистический минимум $F_{\min} = F_m - 3\sigma$ должен быть положительным;
- статистический максимум $F_{\max} = F_m + 3\sigma$ не превышает 300 Н для скоростей движения до 200 км/ч включительно, 350 Н – свыше 200 и до 350 км/ч (для системы тягового электроснабжения на переменном токе);
- стандартное отклонение σ не превышает $0,3 F_m$;
- процент искрений NQ не превышает 0,2;
- максимальное отжатие контактного провода токоприемником под фиксаторами без учета климатического влияния не превышает 150 мм [12–15].

При корректировке требуемых значений указанных динамических показателей контактной сети необходимо также учитывать точность регулировки таких параметров контактной подвески, как конструктивная высота контактной подвески, длина пролета между опорами, распределение эластичности в пролете. Неравномерность эластичности в пролете – значимая характеристика контактной подвески, которая выражается как

$$U = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\max} + e_{\min}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где e_{\max} и e_{\min} – максимальная и минимальная эластичности в пролете [16].

Классификация методов обслуживания контактной подвески

В настоящее время для сокращения числа нарушений в работе устройств контактной сети широкое применение находят бесконтактные методы мониторинга состояния контактной сети на базе мобильных и стационарных средств комплексной диагностики контактной сети, оснащенных датчиками и телевизионными устройствами.

Настоящие мобильные системы диагностики контактной сети (ВИКС) базируются на данных, полученных с видеорегиистраторов. Имеются исследования по обнаружению отказов по дуговым нару-

нениям в системе токосъема на основе радио- и опико-электронных методов регистрации [17].

Широкое применение в определении оптимальных параметров системы токосъема находят аппараты искусственных нейронных сетей [4]. Данный метод, основанный на машинном обучении, может быть использован также для анализа рисков и прогнозирования состояния контактной сети.

На европейских ВСМ для контроля силы контактного нажатия в контактные вставки токоприемника встраиваются датчики измерения. Эти датчики регистрируют статические и динамические силы, ускорение вставок токоприемника. Для обнаружения дуговых процессов в направлении движения за токоприемником устанавливаются детекторы электрической дуги.

В КНР существует шестиуровневая система мониторинга безопасности электроснабжения высокоскоростных железных дорог «бС-система» [18]. Основной целью данной системы контроля является проведение комплексного мониторинга системы тягового электроснабжения (СТЭ), который включает в себя определение параметров высокоскоростной контактной подвески, параметров работы токоприемника, обследование контактной подвески и других показателей СТЭ. Однако увеличение интенсивности движения поездов требует также учитывать обнаружение параметров контактной сети, мониторинг состояния вставки токоприемника ЭПС и расположение элементов контактной сети в реальном времени. В связи с этим разрабатываются технологии диагностики и обследования эксплуатационных характеристик токоприемника и контактной сети ВСМ, которые в основном включают в себя три аспекта: обследование контактного провода, обследование вставки и динамических характеристик токоприемника. Исследования в этой области должны ограничиваться не только текущим состоянием и динамическим поведением токоприемника высокоскоростного поезда, но и требуется изучение процесса взаимодействия токоприемника и контактной подвески. Для того чтобы обеспечить качество конструкции высокоскоростного поезда, эксплуатационные характеристики токоприемника ЭПС и контактной сети необходимо проверять и контролировать в течение всего срока службы.

Логическое управление системой токосъема

Несвоевременное обнаружение неисправностей элементов контактной сети, неточная регулировка контактной подвески и некачественное выполнение планово-предупредительного ремонта (ППР) приводят к ухудшению показателей качества токосъема и, как следствие, к различным отказам в работе контактной сети. На повреждения в контактной сети также влияют сторонние факторы, связанные с ка-

чеством изготовления материалов, особенностью метеоусловий, погрешностями монтажа (рис. 6).

Оценка состояния контактной подвески выполняется на основе данных измерений геометрии контактной подвески и анализа показателей взаимодействия токоприемника и контактной подвески. В состоянии статики контактной подвески, без взаимодействия с токоприемником, геометрические параметры контактного провода, включая высоту, зигзагообразное расположение, толщину, а также информация о взаимном расположении проводов в пространстве являются основными данными статических измерений. При контакте с токоприемником данные динамических измерений контактной подвески в основном включают силу контактного нажатия между токоприемником и контактной подвеской, вертикальное ускорение токоприемника, вертикальное смещение (отжатие) контактного провода и токоприемника, наличие случаев возникновения дуги и т. д.

Как правило, для оценки состояния контактной подвески следует объединять оценки статического и динамического состояний. Однако, поскольку линии традиционной скорости не предъявляют высоких требований к данным динамических измерений, учет статического состояния остается доминирующим методом контроля. Для линий традиционных скоростей долгосрочная оценка состояния контактной подвески оказалась эффективной за счет элементарного замера статических данных и вычислительных приборов. Из-за технической сложности и высокой стоимости выполнения оценки динамического состояния большинство скоростных линий используют динамические данные лишь на этапе приемки, но не на этапе эксплуатации. Однако с увеличением скорости движения поездов оценка статического состояния становится недостаточной для эксплуатации и технического обслуживания высокоскоростных линий. Поскольку динамическая оценка состояния основана на данных, которые непосредственно отражают динамическое взаимодействие, она более применима для оценки состояния контактной подвески по сравнению с оценкой статического состояния.

Объектом управления (ОУ) технической системы является технологический процесс или комплекс взаимосвязанных технических устройств и подсистем. Взаимодействие ОУ и управляющего устройства организуется с помощью множества датчиков, расположенных в устройствах объекта и сигнализирующих о состоянии самого объекта и воздействии внешней среды, в которой работает объект (техническая система) или о фазе самого технологического процесса [19].

Показанные устройства управления являются логическими в том смысле, что осуществляют обработку дискретной информации (рис. 7). Сигналы

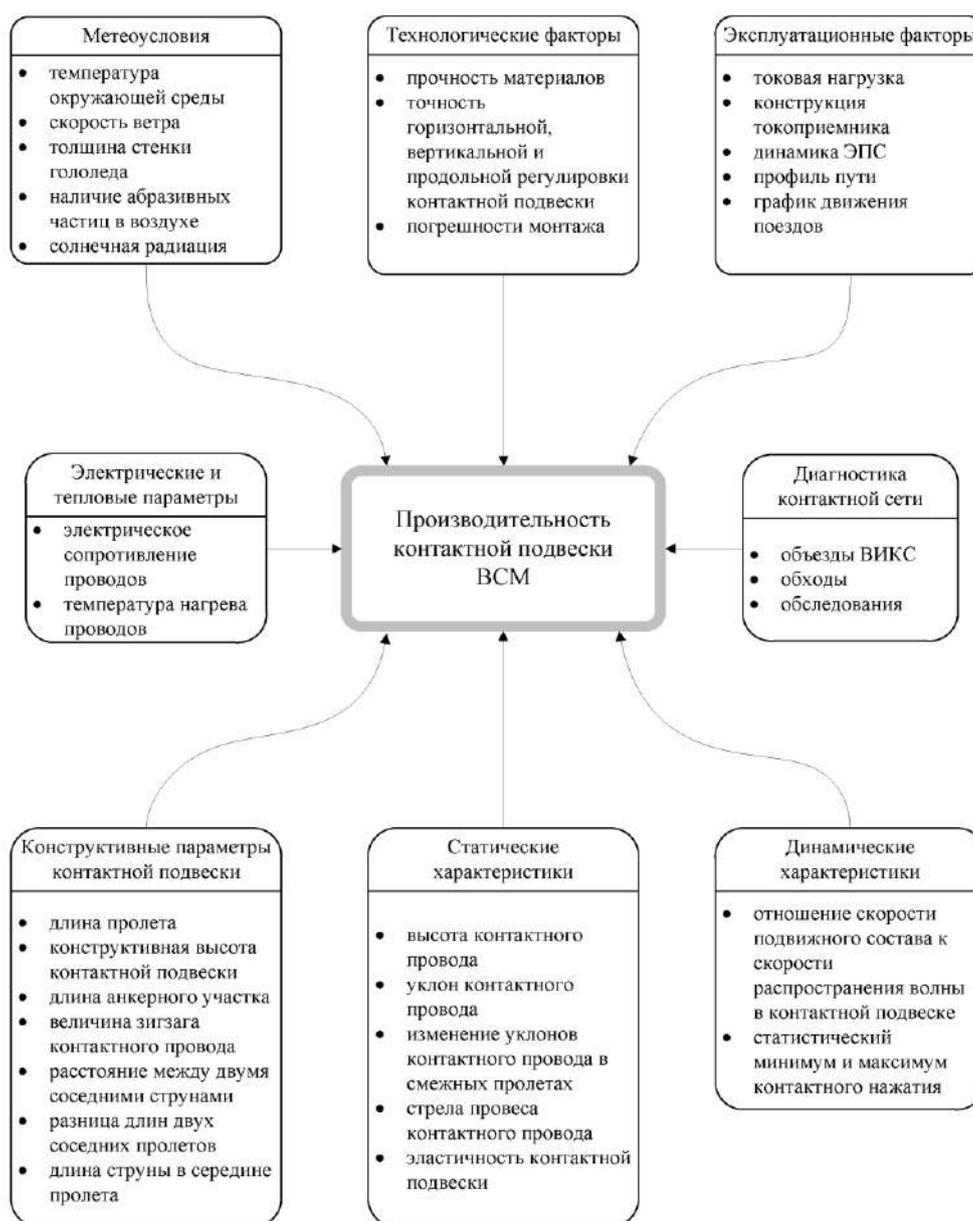


Рис. 6. Факторы, влияющие на производительность высокоскоростной контактной подвески на этапе жизненного цикла

Fig. 6. Factors affecting the performance of a high-speed catenary at the lifecycle stage

датчиков системы токозъема, как и управляющие воздействия, дискретны. Двоичные сигналы представляются некоторыми физическими величинами с двумя резко различающимися возможными значениями («бездуговой токозъем» – «дуговой токозъем»).

В случае двоичного представления сигналов управление становится логическим, а системы управления называются системами логического управления (ЛУ).

Системы ЛУ находят широкое применение в различных отраслях техники и технологий, в част-

ности, на высокоскоростном железнодорожном транспорте. Достаточность сигналов систем ЛУ обеспечивает возможность использования развитого аппарата алгебры логики для описания и реализации алгоритмов их действия.

Алгоритм управления, в том числе и логического, принципиально отличается от вычислительных алгоритмов. С помощью таких алгоритмов описывают способ гипотетической управляющей системы с некоторой средой или объектом управления. В таком устройстве теряется смысл исходного данного, так как между системой управления и объектом

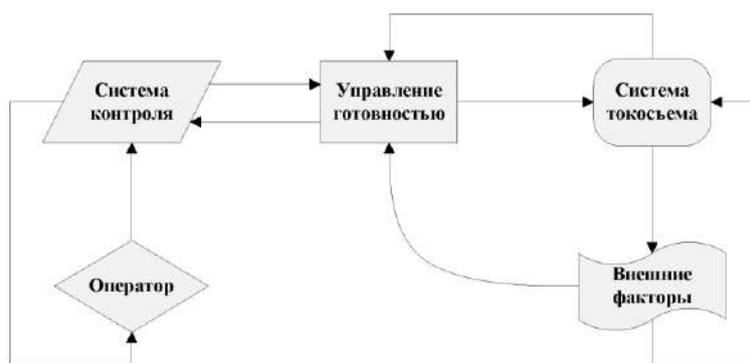


Рис. 7. Граф-схема логического управления устройствами токосъема
 Fig. 7. Graph-scheme of the logical control of current collection devices

ведется постоянный обмен информацией, данные могут поступать на вход нескончаемым потоком. Целью алгоритма является уже не получение некоторого конечного результата, а выдача ответной последовательности управляющих сигналов.

Заключение

Изучение состояния и обеспечение бездугового токосъема ВСМ должно выполняться на основе исследования физических основ формирования скользящего контакта в бездуговой области ее работы. Следует определить критериальную зависимость отклонения показателей эффективности токосъема. На основе данной зависимости необходимо создать интегрированную интеллектуальную систему кон-

троля и логического управления с применением датчиков обнаружения наиболее чувствительных параметров системы токосъема, которые в наибольшей степени влияют на формирование контакта в реальных условиях эксплуатации.

Учитывая особенности условий работы системы токосъема, при создании единой системы контроля и мониторинга необходимо принимать во внимание не только механические характеристики взаимодействия подсистемы «токоприемник – контактная подвеска» и воздействие внешней среды, но и влияние электромагнитной силы, тепловых и дуговых процессов на отклонение статических и динамических параметров контактной подвески.

Список литературы

1. Бурков А.Т., Блажко Л.С., Иванов И.А. Индустриальные технологии, мобильность и энергоэффективность электрической тяги рельсового транспорта // *Электротехника*. 2016. № 5. С. 7–13.
2. Боброва Ю.М., Пузина Е.Ю. Необходимость активизации энергосбережения в России // *Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием*. Иркутск : ИРНТУ. 2016. Т. 2. С. 142–147.
3. Хананов В.В., Бурков А.Т., Барч Д.В. Нововведения и инновационные процессы в тяговом электроснабжении // *Транспорт Российской Федерации*. 2012. № 6 (43). С. 34–39.
4. Смердин А.Н. Совершенствование системы токосъема магистральных электрических железных дорог в условиях высокоскоростного и тяжеловесного движения : дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2018. 600 с.
5. ГОСТ 32793-2014. Токосъем токоприемником железнодорожного электроподвижного состава. Номенклатура показателей качества и методы их определения. Введ. 2015–09–01. М. : Стандартинформ, 2015
6. Берент В.Я. Материалы и свойства электрического контакта в устройствах железнодорожного транспорта // М. : Интекст. 2005. 408 с.
7. Скользящий токосъем с дисульфидной смазкой в скоростных транспортных системах / К.К. Ким, А.Ю. Панычев, Л.С. Блажко и др. // *Электротехника*. 2019. № 10. С. 3–10.
8. Characteristics of the Sliding Electric Contact of Pantograph. *Contact Wire Systems in Electric Railways* / G. Wu, J. Wu, W. Wei et al. // *Energies*. 2018. № 11 (17). P. 1–13.
9. Хольм Р. Электрические контакты. М. : Издательство иностр. лит., 1961. 464 с.
10. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A. *Contact lines for electrical railways: Planning, design, implementation, maintenance*. Berlin and Munich : Siemens, 2012. 994 p.
11. UIC 799. Characteristics of a.c. overhead contact systems for lines worked at speeds of over 200 km/h // *Translation International Union of Railways (UIC)*. 2002.
12. IEC 60913. Railway applications, fixed installations, electric traction overhead contact lines, 2013. 206 p.
13. EN 50119. Railway applications, fixed installations, electric traction overhead contact lines, 2009. 50 p.
14. Железнодорожное электроснабжение участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству // *Петербург. гос. ун-т путей сообщ. Императора Александра I : сайт*. URL: <https://www.pgups.ru/science/science-news-in-the-field-of-transport/high-speed-transport> (дата обращения 18.02.2021).

15. Тяговое электроснабжение высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства // Петербург. гос. ун-т путей сообщ. Императора Александра I : сайт. URL: <https://www.pgups.ru/science/science-news-in-the-field-of-transport/high-speed-transport/normative-documents-developed-by-fsbei-hpe-pstu/> (дата обращения 18.02.2021).
16. Математическое моделирование механического взаимодействия токоприемников и контактной подвески для скоростных электрифицированных железных дорог / Б.С. Григорьев, О.А. Головин, Е.Д. Викторов и др. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. № 4. С. 155–162.
17. Жарков Ю.И., Семенов Ю.Г. Методологические основы обнаружения опасных дефектов контактной сети и токоприемников по дуговым нарушениям токосъема автоматизированными системами контроля // Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте : материалы пятого Междунар. симпозиума Eltrans-2010. ПГУПС. 2010. С. 143–151.
18. Han Z, Liu Z, Zhang G et al. Overview of non-contact image detection technology for pantograph–catenary monitoring // J China Railw Soc. 2013. № 35 (06). P. 40–47.
19. Закревский А.Д., Поттосин Ю.В., Черемисинова Л.Д. Логические основы проектирования дискретных устройств. М. : Физматлит, 2007. 592 с.

Reference

1. Burkov A.T., Blazhko L.S., Ivanov I.A. Industrial'nye tekhnologii, mobil'nost' i energoeffektivnost' elektricheskoi tyagi rel'sovogo transporta [Industrial technologies, mobility and energy efficiency of electric traction of rail transport]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2016, No. 5. Pp. 7–13.
2. Bobrova Yu.M., Puzina E.Yu. Neobkhodimost' aktivizatsii energosberezheniya v Rossii [The necessity to activate energy saving in Russia]. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri. Materialy Vseross. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem* [Improving the efficiency of energy production and use in Siberia. Materials All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2016, Vol. 2. Pp. 142–147.
3. Hananov V.V., Burkov A.T., Barch D.V. Novovvedeniya i innovatsionnye protsessy v tyagovom elektrosnabzhenii [Innovations and innovative processes in traction power supply]. *Transport Rossijskoi Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2012. No. 6 (43). Pp. 34–39.
4. Smerdin A.N. Sovershenstvovanie sistemy tokos"ema magistral'nykh elektricheskikh zheleznykh dorog v usloviyakh vysokoskorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya: dis. ... d-ra tekhn. nauk 05.22.07 [Improvement of the current collection system of main electric railways in conditions of high-speed and heavy traffic. D. Sc. (Engineering) diss. 05.22.07] Omsk, 2018. 600 p.
5. GOST 32793-2014. Tokos"em tokopriemnikom zheleznodorozhnogo elektropodvizhnogo sostava. Nomenklatura pokazatelei kachestva i metody ikh opredeleniya. [GOST 32793-2014. [Current collection using a current collector of the railway electric rolling stock. The nomenclature of quality indicators and methods of their determination].
6. Berent V.Ya. Materialy i svoystva elektricheskogo kontakta v ustrojstvakh zheleznodorozhnogo transporta [Materials and properties of electric contact in railway transport devices]. Moscow: Intekst Publ., 2005, 408 p.
7. Kim K.K., Panychev A.Yu., Blazhko L.S., Kolesova A.V. Skol'zyashchii tokos"em s disulfidnoi smazkoi v skorostnykh transportnykh sistemakh [Sliding current collector with a disulfide grease in high-speed transport systems]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2019. No. 10. Pp. 3–10.
8. Wu G., Wu J., Wei W., Zhou Y., Yang Z., Gao G. Characteristics of the Sliding Electric Contact of Pantograph/Contact Wire Systems in Electric Railways. *Energies*, No. 11 (17). 2018. Pp. 1–13.
9. Khol'm R. Elektricheskie kontakty [Electric contacts]. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury Moscow: Publishing house of foreign literature, 1961, 464 p.
10. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A. Contact lines for electrical railways: Planning, design, implementation, maintenance. Berlin and Munich: Siemens, 2012. 994 p.
11. UIC 799. Characteristics of a.c. overhead contact systems for lines worked at speeds of over 200 km/h. *Translation International Union of Railways (UIC)*, 2002.
12. IEC 60913. Railway applications, fixed installations, electric traction overhead contact lines. 2013. 206 p.
13. EN 50119. Railway applications, fixed installations, electric traction overhead contact lines. 2009. 50 p.
14. Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya "Zheleznodorozhnoe elektrosnabzhenie uchastka Moskva – Kazan' vysokoskorostnoi zheleznodorozhnoi magistrali Moskva – Kazan' – Ekaterinburg. Tekhnicheskie normy i trebovaniya k proektirovaniyu i stroitel'stvu" [Special technical conditions "Railway power supply of the Moscow – Kazan section of the Moscow – Kazan – Ekaterinburg high-speed railway. Technical standards and requirements for design and construction"], PGUPS Publ., 2014. 46 p.
15. Proekt svoda pravil "Tyagovoe elektrosnabzhenie vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh linii. Pravila proektirovaniya i stroitel'stva" [Draft code of regulations "Traction power supply of high-speed railway lines. Rules of design and construction"]. PGUPS Publ., 2015–2017.
16. Grigor'ev B.S., Golovin O.A., Viktorov E.D., Kudryashov E.V. Matematicheskoe modelirovanie mekhanicheskogo vzaimodeistviya tokopriemnikov i kontaktnoi podveski dlya skorostnykh elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Mathematical modeling of the mechanical interaction of pantographs and the catenary for high-speed electrified railways. Science and education]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovanie* [Scientific and Technical Bulletin of SPbSPU. Science and education], 2012. No. 4. Pp. 155–162.
17. Zharkov Yu.I., Semenov Yu.G. Metodologicheskie osnovy obnaruzheniya opasnykh defektov kontaktnoi seti i tokopriemnikov po dugovym narusheniyam tokos"ema avtomatizirovannyimi sistemami kontrolya [Methodological bases of detection of dangerous defects of the contact network and current collectors by arc violations of current collection by automated control sys-

tems] *Elektrifikatsiya, innovatsionnye tekhnologii, skorostnoe i vysokoskorostnoe dvizhenie na zheleznodorozhnom transporte. Materialy pyatogo Mezhdunarodnogo simpoziuma Eltrans-2010 [Electrification, innovative technologies, high-speed and high-speed rail transport. Proceedings of the Fifth International Symposium Eltrans-2010]*, 20–23 oktyabrya 2009 g., PGUPS Publ., 2010. Pp. 143–151.

18. Han Z, Liu Z, Zhang G et al. Overview of non-contact image detection technology for pantograph–catenary monitoring. *J China Railw Soc.*, 2013. No. 35 (06). Pp. 40–47.

19. Zakrevskii A.D., Pottosin Yu.V., Cheremisinova L.D. Logicheskie osnovy proektirovaniya diskretnykh ustroystv [Logical bases of designing discrete devices]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2007. 592 p.

Информация об авторах

Бурков Анатолий Трофимович – д-р техн. наук, профессор кафедры электроснабжения железных дорог, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, e-mail: atburkov@gmail.com

Мухамеджанов Мохирбек Фуркатович – аспирант кафедры электроснабжения железных дорог, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, e-mail: mokhirbek@mail.ru

Information about the authors

Anatolii T. Burkov – Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of the Subdepartment of Power Supply of Railways, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, e-mail: atburkov@gmail.com

Mokhirbek F. Mukhamedzhanov – Ph.D. student of the Subdepartment of Power Supply of Railways, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, e-mail: mokhirbek@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).88-96

УДК 656.222

Северомуйский тоннель: развитие с учетом пропускной способности

А. В. Дмитренко, С. В. Карасёв, К. В. Королёв, А. Д. Калидова✉

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Российская Федерация

✉ alexsandra_kd@bk.ru

Резюме

Северо-Муйский тоннель находится на протяженном перегоне, ограничивающем пропускную способность всей Байкало-Амурской магистрали в целом. В статье рассмотрены различные схемы пропуска поездов через однопутный элемент – тоннель. Выполнено моделирование пропуска встречных поездопотоков с целью определения возможных задержек поездов на подходе к лимитирующему однопутному элементу, в качестве которого может рассматриваться тоннель. Приведены зависимости среднего времени задержки (замедления пропуска) одного грузового поезда от продолжительности занятия однопутного элемента при различной интенсивности подхода к нему. Показаны зависимости среднего и суммарного времени задержки пропуска грузовых поездов от продолжительности занятия однопутного элемента при средней интенсивности подхода к нему шести поездов в час. В создавшихся обстоятельствах недостаточности капитальных средств для освоения возрастающих объемов перевозок, увеличения пропускной способности лимитирующего тоннельного перегона можно достичь за счет пропуска по нему пакетов поездов, организованных на вставках вторых главных путей, примыкающих к тоннелю в четном и нечетном направлениях. Предложено конструктивно-технологическое решение по увеличению пропускной способности однопутного тоннеля за счет развития смежных разъездов. На протяженных перегонах с тоннелем увеличение количества пропущенных по нему поездов обеспечивается за счет роста размеров движения, пропускаемых по ограничивающему перегону. В перспективе в случае значительного увеличения размеров движения на магистрали становится целесообразным строительство второго пути в тоннеле.

Ключевые слова

двухпутные вставки, задержка поездов, пропускная способность, разъезд, тоннель

Для цитирования

Дмитренко А. В. Северомуйский тоннель: развитие с учетом пропускной способности / А. В. Дмитренко, С. В. Карасёв, К. В. Королёв, А. Д. Калидова // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2021. – № 1 (69). – С. 88–96. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).88-96

Информация о статье

поступила в редакцию: 10.01.2021, поступила после рецензирования: 12.01.2021, принята к публикации: 17.01.2021

The Severomuisk tunnel: capacity-based development

A. V. Dmitrenko, S. V. Karasev, K. V. Korolev, A. D. Kalidova✉

Siberian State University of Railways, Novosibirsk, the Russian Federation

✉ alexsandra_kd@bk.ru