



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 621.332.3

EDN: <https://elibrary.ru/dywrie>

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-235-250>

Научная специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



Создание контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных железнодорожных магистралей

В. Е. Андреев¹, Е. В. Кудряшов²✉

¹Департамент технической политики ОАО «РЖД» (ЦТЕХ),
Москва, Российская Федерация

²Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта (АО «ИЦ ЖТ»),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены основные научно-технические проблемы, возникающие при создании контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных железнодорожных магистралей, и пути их решения на основе математического моделирования и поэтапных испытаний. При высоких скоростях движения возрастают токовые нагрузки и существенно усложняются условия динамического взаимодействия токоприемников и контактной подвески. Для достижения требуемого качества токосъема необходима тщательная проработка параметров взаимодействующих систем с учетом механических, электрических и тепловых процессов. Цель работы — обеспечить надежную работу узлов и конструкций контактной сети в широком диапазоне эксплуатационных условий.

Материалы и методы. При разработке технических решений по контактной сети использованы методы математического моделирования. Контактная сеть представлена детальной конечно-элементной моделью, токоприемник — моделью, построенной на основе методов многотельной динамики. Моделирование выполняется в пространственной нелинейной постановке задачи. Расчет динамики производится во временной области методом прямого интегрирования уравнений по времени. Контактная задача о взаимодействии контактной сети и токоприемника реализована методом штрафа. Подтверждение соответствия параметров контактной сети и ее отдельных элементов нормативным требованиям выполняется посредством механических, ресурсных, электрических, тепловых и других видов испытаний.

Результаты. Параметры узлов и конструкций контактной сети КС-400 определены по результатам математического моделирования. Показано, что показатели качества токосъема находятся в нормируемых пределах. Приведены особенности технических решений контактной сети КС-400, рассмотрены основные этапы ее разработки и сооружения.

Обсуждение и заключение. К настоящему времени выполнен значительный объем проектных, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных магистралей. Изготовлены опытные образцы изделий, построен опытный участок контактной сети на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ», выполняются необходимые испытания. Для подтверждения эксплуатационной совместимости КС-400 с другими подсистемами железной дороги и проверки показателей качества токосъема при взаимодействии с токоприемниками высокоскоростного электропоезда запланированы испытания на опытном полигоне Крюково – Новая Тверь на проектируемой высокоскоростной магистрали Москва – Санкт-Петербург.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железная дорога, высокоскоростная магистраль, контактная сеть, контактная подвеска, токоприемник, токосъем

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Андреев В. Е., Кудряшов Е. В. Создание контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных железнодорожных магистралей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 4. С. 235–250. EDN: <https://elibrary.ru/dywrie>.



Original article

UDK 621.332.3

EDN: <https://elibrary.ru/dywrie>

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-235-250>

Scientific specialty: 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification



Design and construction of the KS-400 overhead contact line for Russian high-speed railways

Vladimir E. Andreyev¹, Evgeny V. Kudryashov²✉

¹Technical Policy Department of JSC Russian Railways,
Moscow, Russian Federation

²Engineering Centre of Railway Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article examines the key scientific and technical problems arising at design and construction of the KS-400 overhead contact line for Russian high-speed railways and presents their solutions based on the results of numerical simulations and stage-by-stage tests. At high train speed, electric current loads increase and dynamic interaction between pantographs and catenary becomes more complex. To provide a required quality of current collection, an extensive study of the parameters affecting mechanical, electrical and thermal processes in the pantograph-catenary interaction system must be carried out. The aim of the presented study is to ensure reliable operation of the overhead contact line assemblies and components in the wide range of operational conditions.

Materials and methods. Numerical simulation methods have been employed in the design of the KS-400 overhead contact line. The contact line is simulated with a detailed finite element model and the pantographs are modeled using multibody dynamics approach. Numerical models employ a three-dimensional nonlinear formulation. Dynamic problems are directly solved in the time domain by numerical integration of the system of finite element equations over time. Contact interaction between catenary and pantographs is modeled using the penalty method. The compliance of the overhead contact line parameters and the individual hardware components with regulatory requirements is confirmed by mechanical, electrical, thermal and other types of tests.

Results. The KS-400 overhead contact line assemblies and components have been designed based on the results of numerical simulation. It has been shown that the obtained indicators of current collection quality are within the allowable margins. The main technical solutions for the KS-400 overhead contact line and the key stages of its design and construction are presented in the article.

Discussion and conclusion. To date, large amount of design, research and development work on implementing the KS-400 overhead contact line for Russian high-speed railways have been carried out. The prototype hardware components have been manufactured. A pilot overhead contact line section has been built at the Experimental Loop of the Railway Research Institute. The tests due are currently underway. In order to confirm operational compatibility of the KS-400 with other railway subsystems and to check the quality of current collection at high train speed, further field tests are scheduled at the Kryukovo – Novaya Tver experimental site which is a part of the designed Moscow – St. Petersburg high-speed railway.

KEYWORDS: railway, high-speed railway, overhead contact line, catenary, pantograph, current collection

FOR CITATION: Andreyev V. E., Kudryashov E. V. Design and construction of the KS-400 overhead contact line for Russian high-speed railways. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(4):235–250. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-235-250>.

Введение. При проектировании и строительстве российских высокоскоростных железнодорожных магистралей (далее — ВСЖМ) одной из наиболее сложных и наукоемких проблем является создание системы токосъема — контактной сети и токоприемников, обеспечивающих высокую надежность и безотказность при передаче электрической энергии подвижному составу в широком диапазоне эксплуатационных условий при скоростях движения до 400 км/ч.

При высоких скоростях движения существенно усложняются условия динамического взаимодействия токоприемников и контактной подвески, возрастают токовые нагрузки [1]. Решающую роль начинают играть колебательные и волновые процессы в проводах контактной сети, а также аэродинамические воздействия на элементы токоприемника. Для обеспечения приемлемого качества токосъема необходима тщательная проработка параметров взаимодействующих систем с учетом механических, аэродинамических, электрических и тепловых процессов.

Технические решения для зарубежных высокоскоростных линий невозможно напрямую применить на контактной сети для ВСЖМ России. Это связано с необходимостью обеспечения расчетной скорости движения 400 км/ч (на подавляющем большинстве ВСЖМ в мире скорости движения не превышают 350 км/ч), существенно отличающимися климатическими условиями, необходимостью сохранить возможность пропуска подвижного состава габарита «Т», значительными отличиями от зарубежных аналогов других подсистем ВСЖМ, от которых зависят решения по контактной сети (подвижной состав, железнодорожный путь, искусственные сооружения, железнодорожная автоматика и телемеханика и др.), а также существенно более жесткими нормативными требованиями, действующими в Российской Федерации.

Основными научно-техническими проблемами при разработке контактной сети КС-400 для российских ВСЖМ являются:

- выбор параметров узлов и конструкций контактной сети, позволяющих обеспечить требуемое качество токосъема при скоростях движения до 400 км/ч;
- обеспечение передачи электрической энергии к движущимся высокоскоростным поездам с учетом повышенного энергопотребления при заданном уровне напряжения;
- обеспечение надежной работы контактной сети в широком диапазоне климатических условий, характерных для российских ВСЖМ, в том числе при гололедообразовании.

Цель работы — разработка и сооружение контактной сети для скоростей движения до 400 км/ч, обеспечивающей надежную работу в составе проектируемых в России высокоскоростных магистралей.

Создание контактной сети для ВСЖМ реализуется ОАО «РЖД» как комплексный научно-технический проект, результатами которого являются не только технические решения по узлам контактной сети, конструкторская и технологическая документация для производства изделий, опытные образцы, но и нормативная документация, технологии выполнения строительно-монтажных работ, а также регламенты по эксплуатации и техническому обслуживанию.

Историческая справка. Разработка контактной сети для высоких скоростей движения в России имеет свою многолетнюю историю. В 2001 г. была завершена реконструкция основной части магистрали Москва — Санкт-Петербург для повышения скоростей движения до 200 км/ч с монтажом новой (на тот момент) контактной сети КС-200 постоянного тока первого поколения, разработанной российскими специалистами. В 2005–2009 гг. на участке Калашниково — Лихославль Октябрьской железной дороги ОАО «РЖД» были проведены комплексные испытания контактной сети для скоростей движения до 250 км/ч, предназначенной для эксплуатации с электропоездами «Сапсан». По результатам испытаний были разработаны технические решения по контактной сети КС-200 и КС-250 второго поколения [2]. В 2008–2010 гг. выполнена адаптация инфраструктуры магистрали Москва — Санкт-Петербург для скоростей движения до 250 км/ч по новым проектам, а также реконструкция линии Санкт-Петербург — Бусловская для скоростей движения до 200 км/ч. В 2013–2014 гг. разработаны проекты КС-200 и КС-250 третьего поколения на основе развивающихся в России методов математического моделирования.

В 2015–2016 гг., на основе опыта эксплуатации контактной сети КС-200 и КС-250 и значительного объема дополнительных научных исследований, разработан первый проект технических решений по контактной сети КС-400 для участка Москва — Казань (ВСМ-2 Москва — Казань — Екатеринбург). Технические решения разработаны с учетом сложных условий эксплуатации ВСМ-2, не имеющих аналогов в мире: максимальная расчетная скорость движения поездов 400 км/ч, минимальная температура воздуха -50°C , толщина стенки гололеда до 15 мм и др. [3].

Проект КС-400 для ВСМ-2 был разработан с учетом анализа зарубежного опыта проектирования, монтажа и эксплуатации контактной сети для высокоскоростных магистралей в Японии, Франции, Германии, Испании, Италии, Китае и Южной Корее. Решения выполнены при тесном научно-техническом сотрудничестве с китайской компанией «Эр-Юань». Проект получил положительное экспертное заключение международного консультанта — французской компании SYSTRA и прошел Главгосэкспертизу России

в составе проектной документации по всем этапам проекта ВСМ-2 Москва – Казань.

В последние десятилетия ОАО «РЖД» выполнен большой объем работ в области технического регулирования и нормативного обеспечения проектирования, строительства и последующей эксплуатации ВСЖМ. В части контактной сети разработан ряд национальных и межгосударственных стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технического регламента Таможенного союза «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта»¹. Сформированы специальные технические условия «Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург (ВСЖМ-1)»², на основе которых разработан стандарт организации «Инфраструктура высокоскоростного железнодорожного транспорта. Технические нормы и требования к проектированию и строительству»³.

В 2020–2022 гг. под руководством ОАО «РЖД» разработан обновленный проект технических решений по контактной сети КС-400 для ВСЖМ-1 Москва – Санкт-Петербург с учетом изменений в российской и международной нормативной базе в период 2015–2022 гг., климатических особенностей трассы Москва – Санкт-Петербург, данных по другим подсистемам ВСЖМ-1, от которых зависят решения по контактной сети, а также требований по импортозамещению и локализации производства компонентов контактной сети в России. В отличие от проекта для ВСМ-2, этот проект предусматривает применение узлов и конструкций контактной сети российского производства.

Большинство изделий в составе контактной сети КС-400 для ВСЖМ-1 являются новыми по отношению к серийно применяемым для скоростей движения до 250 км/ч. При этом в условиях ВСЖМ изделия испытывают повышенные механические и электрические нагрузки и должны разрабатываться с учетом повышенных требований к надежности и ответственности. В 2023 г. ОАО «РЖД» приступило к выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию комплекса изделий контактной

сети для ВСЖМ-1 на основе проекта КС-400, а также – к разработке российского высокоскоростного токоприемника в составе электропоезда ЭВС360.

Математическое моделирование контактной сети и процесса ее взаимодействия с токоприемниками. В соответствии с мировым опытом для успешного создания высокоскоростных конструкций контактной сети и токоприемников используются специализированные математические модели системы токосъема. В настоящее время в мире насчитывается не менее 14 подобных моделей – в том числе у крупнейших операторов железных дорог Deutsche Bahn [4], SNCF [5], фирм Siemens⁴, Alstom [6], Talgo [7], ведущих научных центров, таких как Шанхайский университет транспорта [8], Миланский политехнический университет [9] и др. В Европе имеется специальный стандарт EN 50318⁵, посвященный особенностям валидации данных моделей. Аналогичный стандарт действует в Китайской Народной Республике⁶. В 2011 г. на базе Политехнического университета Милана была организована кросс-валидация моделей взаимодействия контактной сети и токоприемников, используемых в разных странах. Проект занял 4 года, результаты кросс-валидации были опубликованы в 2015 г. [10] и явились основой для актуализации стандарта EN 50318 в 2018 г. В проекте участвовало 10 независимых моделей из 9 стран (Италия, Португалия, Испания, Франция, Германия, Швеция, Южная Корея, Япония, Китай).

В России детальные модели контактной подвески с распределенными параметрами ранее разрабатывались в Уральском и Омском государственных университетах путей сообщения [11, 12], а также компанией АО «Универсал – контактные сети» совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого [13]. Модели [13] и [12] использовались при разработке проектов КС-400 для ВСМ-2 и ВСЖМ-1, однако на текущий момент они отстали от передового мирового уровня и имеют серьезные ограничения. В частности, контактная сеть в данных моделях представлена только системой основных проводов – контактной подвеской. Опорные и поддерживающие конструкции, конструкции в анкеровках, провода полевой стороны не моделируются.

¹ Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта»: принят решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710. М.: Центрмаг, 2025. 112 с.

² Специальные технические условия. Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург (ВСЖМ-1). ФГБОУ ВО ПГУПС. 2023. 278 с.

³ СТО РЖД 14.004-2025. Инфраструктура высокоскоростного железнодорожного транспорта. Технические нормы и требования к проектированию и строительству: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 04 апреля 2025 г. № 747/р. М.: ОАО «РЖД», 2025.

⁴ Кисслинг Ф., Пушмайн Р., Шмидер А. Контактные сети электрифицированных железных дорог. М.: Сименс Россия, 2018. 1176 с.

⁵ BS EN 50318:2018+A1:2022. Railway applications. Current collection systems. Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. BSI Standards Limited, 2022. 78 р.

⁶ GB/T 32591-2016. Railway applications. Current collection systems. Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. Standards Press of China. Beijing, 2016.

Данные модели не позволяют определить требования к значительной части конструкций контактной сети и проверить работу всех изделий в едином комплексе.

Для дальнейших этапов создания контактной сети КС-400 на ВСЖМ-1, а также токоприемника ЛА-400 для ЭВС360 в 2023 г. ОАО «РЖД» было принято решение о разработке математической модели контактной сети и процесса ее взаимодействия с токоприемниками нового поколения. Соответствующая модель разработана и верифицирована под руководством Департамента технической политики ОАО «РЖД» специалистами АО «Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта». Новая модель (рис. 1) имеет следующие основные особенности:

1. Моделируется не только контактная подвеска (система проводов), а вся контактная сеть с учетом опорных, поддерживающих, фиксирующих и других конструкций в единой системе, что позволяет, например, определять перемещения, нагрузки и механические напряжения во всех элементах контактной сети в различных расчетных режимах.

2. Модель позволяет гибко и с высокой степенью детализации моделировать различные участки контактной сети на перегонах и станциях с учетом широкого разнообразия возможных конструктивных и проектных

решений, включая сопряжения анкерных участков различных типов, воздушные стрелки, участки с разными длинами пролетов, участки на эстакадах и т. д. Для достижения требуемой гибкости используются методы цифрового информационного моделирования, объектно-ориентированный подход и сквозная параметризация.

3. Для численного моделирования контактная сеть представляется как стержневая система. Моделирование контактной сети выполняется методом конечных элементов в пространственной конструктивно и геометрически нелинейной постановке задачи. Провода и элементы конструкций контактной сети представлены конечными элементами растяжимого стержня Эйлера – Бернули. Расчет динамики производится во временной области – прямым интегрированием уравнений по времени с учетом модели демпфирования по Рэлею. Контактная задача о взаимодействии контактной сети и токоприемника реализована методом штрафа: при возникновении в модели нефизической ситуации, когда полоз токоприемника проникает сквозь конечный элемент контактного провода, к полозу и элементу провода прикладываются «штрафные» силы, моделирующие контактное нажатие и исправляющие возникшую ситуацию.

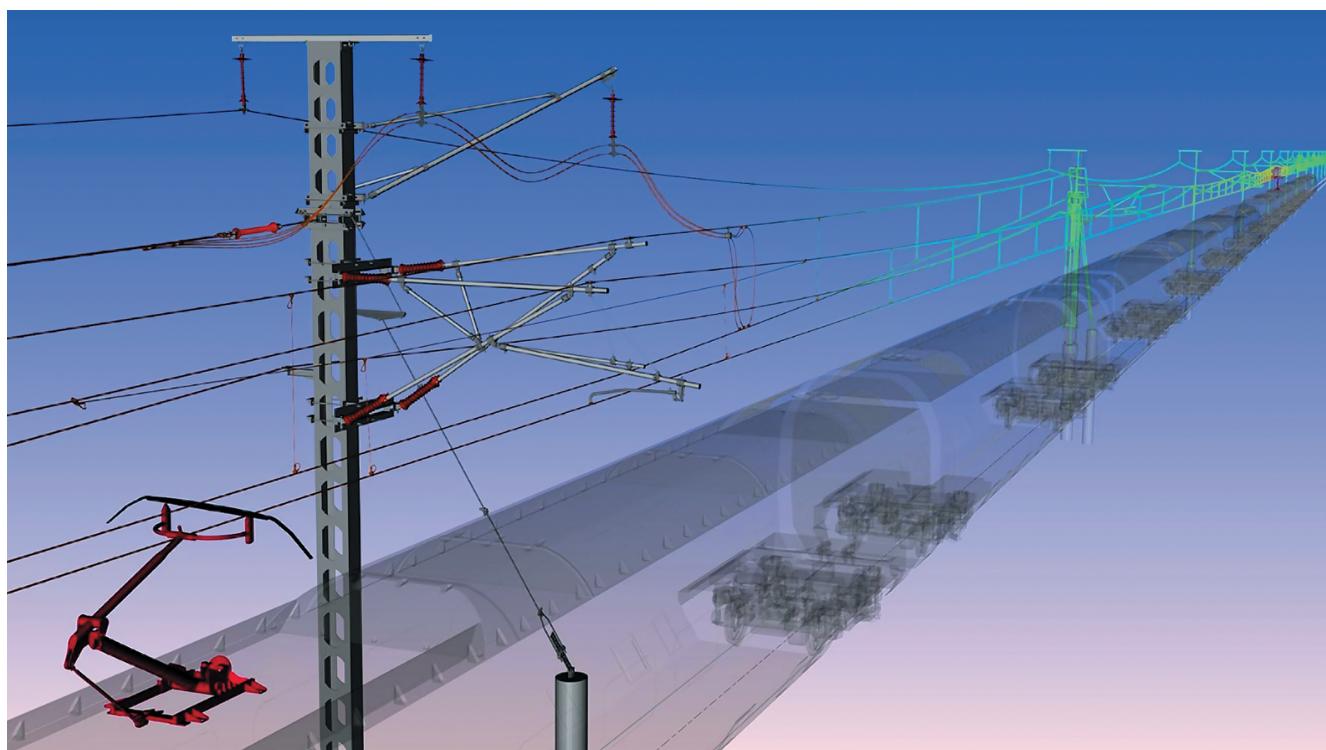


Рис. 1. Модель контактной сети КС-400 и токоприемника ЛА-400 на поезде ЭВС360 (фрагмент)*

* Источник: данные авторов

Fig. 1. Model of the KS-400 overhead contact line and LA-400 pantograph on the EVS360 train (fragment)*

* Source: authors' data

4. Расчетные модели токоприемников выполнены в нескольких вариантах: сосредоточенные модели с двумя, тремя и четырьмя степенями свободы, сложные многотельные модели, учитывающие реальную кинематику работы полоза, каретки и системы подвижных рам, а также их гибрид — комбинированная модель с детальным представлением полоза токоприемника и упрощенным представлением системы подвижных рам.

5. Учитываются влияния на контактную сеть и токоприемники климатических условий (изменение температуры, ветровые, гололедные, снеговые нагрузки), колебаний земляного полотна или пролетных строений эстакад, колебаний крыши подвижного состава, процессов износа контактного провода и контактных вставок токоприемников, а также аэродинамических воздействий.

6. Разработка компонентов модели выполнена на «низком уровне» — с описанием математических основ и имплементацией их на языках программирования, без применения внешних программных комплексов инженерного либо математического анализа.

Модель успешно верифицирована на основе решения множества проверочных задач, имеющих аналитическое решение или решение в сторонних сертифицированных системах инженерного анализа, на эталонных моделях контактной подвески и токоприемника согласно европейскому стандарту EN 50318 и национальному стандарту КНР GB/T 32591, а также на основе сравнения с результатами натурных испытаний, приведенными в стандарте EN 50318.

При разработке модели ставились цели снижения рисков принятия ошибочных технических решений при создании системы токосъема на ВСЖМ-1, оптимизации объема натурных испытаний, а также — снижения расходов на эксплуатацию контактной сети и токоприемников за счет выбора наиболее рациональных параметров этих систем.

Результаты моделирования позволили уточнить технические решения по контактной сети КС-400 и токоприемникам ЛА-400 высокоскоростного поезда ЭВС360, а также определить детальные технические требования к изделиям контактной сети КС-400 для дальнейшего выполнения опытно-конструкторских работ.

Основные особенности технических решений контактной сети КС-400. Контактная сеть спроектирована с учетом максимальной расчетной скорости движения электроподвижного состава 400 км/ч. При данной скорости, согласно расчетам и моделированию, все показатели качества токосъема, а также параметры надежности контактной сети должны оставаться в нормируемых пределах. Скорость 400 км/ч может быть достигнута при испытаниях подвижного состава

и инфраструктуры, при этом в регулярной эксплуатации ВСЖМ-1 максимальная скорость составит 360 км/ч (эксплуатационная скорость). Таким образом, в конструкции КС-400 заложен десятипроцентный запас надежности по скорости, который учитывает возможное несовершенство расчетных методов и положений нормативной документации, а также отклонение фактических параметров сооружения контактной сети от проектных значений.

Наибольшие скорости движения поездов будут реализованы на высокоскоростном участке ВСЖМ-1 с системой тягового электроснабжения переменного тока напряжением 2×25 кВ. Входы в Москву и Санкт-Петербург электрифицируются по системе постоянного тока напряжением 3 кВ, скорость движения на данных участках не будет превышать 200 км/ч.

Технические решения по системе электроснабжения ВСЖМ-1 включают несколько типов контактной сети: КС-400 для главных путей высокоскоростного участка, КС-170 — для диспетчерских съездов и станционных путей, КС-220-3 и КС-170-3 — для участков постоянного тока. Эти контактные сети отличаются типами проводов и их натяжениями, схемой контактной подвески, но имеют унифицированные конструктивные решения по основным элементам.

Контактная подвеска для расчетной скорости 400 км/ч предусматривает применение контактного провода Бр3ФВ-150 сечением 150 мм^2 с номинальным натяжением 33,7 кН из высокопрочной магниево-бронзы с времененным сопротивлением при растяжении не менее 580 МПа. Для сравнения: натяжение контактных проводов в типовой контактной сети КС-160 составляет около 10 кН, в КС-200/КС-250 — 18–20 кН. В качестве несущих тросов контактной подвески применены тросы типа Бр2-120 с разрывным усилием не менее 71 кН при номинальном натяжении 27 кН (в типовых контактных сетях КС-160, КС-200, КС-250 соответствующее натяжение составляет 13,5–18,0 кН). Повышенные натяжения проводов позволяют обеспечить необходимую скорость распространения волн по контактной подвеске, повысить жесткость и снизить неравномерность эластичности контактной подвески, и в конечном итоге — достичь условия обеспечения надежного токосъема при скоростях движения до 400 км/ч, в том числе при двух рабочих токоприемниках на сдвоенном электропоезде ЭВС360 в 16-вагонном исполнении. Тип контактной подвески КС-400 — цепная компенсированная одинарная рессорная (для пролетов длиной 45 м и более). В подвеске применены токопроводящие струны мерной длины из гибких бронзовых тросов сечением 10 мм^2 . Максимальная длина пролета контактной подвески на защищенных от ветра участ-

ках составляет 70 м. Номинальная высота подвеса контактного провода принята 5,8 м от уровня головки рельса (УГР).

В контактной подвеске КС-170 для диспетчерских съездов и станционных путей применяется несущий трос Бр1-120 и контактный провод Бр1Ф-120 с натя-

жениями 18 и 15 кН соответственно. Данные провода применяются в типовых контактных сетях КС-200 и КС-250.

Сравнение основных параметров контактных подвесок на некоторых зарубежных высокоскоростных магистралях с параметрами КС-400 приведено в табл. 1.

Основные параметры контактных подвесок на высокоскоростных магистралях разных стран мира*

Таблица 1

Table 1

The main parameters of catenaries at high-speed railways in the world*

Страна	Линия или тип контактной сети	Год открытия/год разработки линии	$V_{\text{ЭПС}}, \text{км/ч}$	Тип контактной подвески ¹	$L_{\text{max}}, \text{м}$	Тип проводов (материал и сечение, мм^2): HT, КП	$T, \text{kH}, K, \text{kH}$	$V_{\text{C}}, \text{км/ч} (D_{\text{C}}, \%)$
Япония	Токайдо-Синкансэн (вариант ²)	1960-е	210	Двойная нерессорная ³	50	St-180 + Cu-150 Cu-170	25 + 15 15	393 (53%)
	Синкансэн, различные линии (вариант ²)	2000-е	300	Одинарная нерессорная	50	Cu-150 CuCrZr-110	19,6 19,6	469 (64%)
Франция	LGV Paris Sud-Est	1981	260	Одинарная рессорная	63	BzII-65 Cu-120	14 15	481 (54%)
	LGV Atlantique, LGV Rhône Alpes, LGV Nord	1989–1993	300	Одинарная нерессорная	63	BzII-65 Cu-150	14 20	483 (62%)
	LGV Méditerranée	2001	320	Одинарная нерессорная	63	BzII-116 CuMg-150	20 25	497 (64%)
	LGV Est Européenne, LGV Rhin-Rhône	2007–2011	350	Одинарная нерессорная	63	BzII-116 CuMg-150	20 26	503 (70%)
Германия	Re 250	1991	280	Одинарная рессорная	65	BzII-70 CuAg-100	15 15	512 (55%)
	Re 330	1992	330	Одинарная рессорная	65	BzII-120 CuMg-120	21 27	541 (61%)
	SICAT H1.0	2002	350	Одинарная рессорная	70	BzII-120 CuMg-120	21 27	541 (65%)
Испания	EAC-350 (Мадрид – Валенсия и др.)	2010	350	Одинарная рессорная	64	BzII-95 CuMg-150	15,5 31,5	528 (66%)
Италия	Рим – Неаполь	2009	300	Одинарная нерессорная	60	Cu-120 CuMg-150	16,25 20	443 (68%)
Китай	Пекин – Тяньцзинь	2008	350	Одинарная нерессорная	50	BzII-120 CuMg-120	21 27	541 (65%)
	Чжэнчжоу – Сиань	2010	350	Одинарная рессорная	50	BzII-120 CuMg-150	23 28,5	528 (66%)
	Ухань – Гуанчжоу	2010	350	Одинарная рессорная	60	BzII-120 CuMg-150	21 30	526 (67%)
	Пекин – Шанхай	2011	380	Одинарная рессорная	60	BzII-120 CuCrZr-150	21 37	560 (68%)
Россия	КС-400 ВСЖМ-1, проект	2025 (проект)	400	Одинарная рессорная	70	Бр2-120 Бр3ФВ-150	27 33,7	573 (70%)

¹ Все приведенные в таблице контактные подвески – цепные компенсированные.

² В Японии отмечается большое разнообразие технических решений по контактной сети. Данные приведены для двух вариантов.

³ Для двойной контактной подвески данные в строках по несущему тросу соответствуют суммарным параметрам несущего и вспомогательного тросов.

* Источник: разработана авторами на основе анализа зарубежных технических решений

* Source: authors' data based on the analysis of foreign technical solutions

В таблице приняты следующие обозначения: $V_{\text{ЭПС}}$ — максимальная скорость движения; L_{max} — максимальная длина пролета; T — натяжение несущего троса (НТ); K — натяжение контактного провода (КП); V_C — скорость распространения волны по контактной подвеске; D_C — отношение скорости движения к скорости распространения волны. Материал проводов: St — сталь; Cu — медь; CuSn — бронзовый сплав медь-олово; CuAg — медь-серебро; CuMg — медь-магний; CuCrZr — медь-хром-цирконий; BzII — бронза второго типа по стандарту DIN 48201-2⁷ или аналогичная. Для типовых российских контактных проводов и несущих тросов по ГОСТ Р 55647–2018⁸ и ГОСТ 32697–2019⁹ используются стандартные обозначения.

Как видно из табл. 1, на всех ВСЖМ мира отношение максимальной скорости движения к скорости распространения волны (D_C) не превышает 70 %. Данное условие закреплено в ряде международных стандартов (например, IEC 60913:2024¹⁰) и является ключевым для обеспечения качества токосъема при высоких скоростях движения, что подтверждается также результатами моделирования. Для обеспечения указанного условия при скорости движения 400 км/ч в контактной сети КС-400 применены провода с наиболее высоким (по отношению к зарубежным аналогам) суммарным натяжением. Повышенные натяжения позволяют также увеличить максимальную длину пролета до 70 м (в большинстве зарубежных решений длина пролета не превышает 65 м). Тип контактной подвески (цепная компенсированная одинарная рессорная) соответствует решениям на большинстве ВСЖМ мира.

На рис. 2 приведена схема пролета контактной подвески КС-400 в пролете максимальной длины, график высотного положения контактного провода и распределение эластичности в пролете, рассчитанное на математической модели при контактном нажатии 200 Н, соответствующем скорости движения 400 км/ч. Для уменьшения неравномерности эластичности первые нерессорные струны контактной подвески отодвинуты от опор на максимальное расстояние: межструнные пролеты в опорном узле приняты 10 м, а в средней части пролета струны установлены с меньшими расстояниями.

Максимальная длина анкерного участка контактной подвески КС-400 составляет 1400 м. Неизолирующие сопряжения выполняются четырех- или пятипролетными.

На эстакадах при малых длинах пролетов применяются сопряжения с большим числом пролетов. Изолирующие сопряжения, как правило, пятипролетные.

Воздушные стрелки по главным путям ВСЖМ-1 над стрелочными переводами 1/25 выполняются без пересечения контактных проводов с дополнительной третьей подвеской, что исключает боковой подхват токоприемником контактного провода примыкающего пути. При прохождении воздушной стрелки полоз токоприемника подхватывает контактный провод дополнительной (третьей) контактной подвески в верхней рабочей зоне, аналогично тому, как это происходит на сопряжениях. При движении по главному пути контактный провод подвески примыкающего пути вообще не взаимодействует с токоприемником. Это дает возможность использовать для примыкающих путей контактную подвеску КС-170 со сниженными натяжениями проводов, при этом в контактный провод этой подвески могут врезаться секционные изолаторы обычной конструкции. Такая воздушная стрелка ранее в России не применялась и является инновационным решением.

Параметры узлов контактной сети определены по результатам математического моделирования. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты моделирования динамического взаимодействия токоприемников ЛА-400 на поезде ЭВС360 с контактной подвеской КС-400 при прохождении пятипролетного неизолирующего сопряжения с пролетами максимальной длины 70 м на скорости 400 км/ч.

В табл. 2 и на рис. 4 для того же вычислительного эксперимента приведены показатели, используемые для оценки качества токосъема. Все нормируемые показатели у обоих токоприемников находятся в допустимых пределах, однако качество токосъема у второго по ходу движения токоприемника несколько хуже. Это связано с тем, что он работает в более сложных условиях: первый токоприемник возбуждает колебания и волны, которые распространяются по контактной подвеске и ухудшают условия работы второго токоприемника.

Технические решения КС-400 учитывают сложные климатические условия ВСЖМ-1 с расположением части трассы на эстакадах высотой до 30 м. Максимальная расчетная скорость ветра (с учетом локальных условий) принята 32,8 м/с, толщина стенки гололеда — до 22,5 мм. В сложных климатических условиях

⁷ DIN 48201-2. Bronze stranded conductors. 1981. 2 р.

⁸ ГОСТ Р 55647–2018. Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 октября 2018 г. № 757-ст. М.: Стандартинформ, 2018. 18 с.

⁹ ГОСТ 32697–2019. Тросы контактной сети железной дороги несущие. Технические условия: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 марта 2019 г. № 75-ст. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.

¹⁰ IEC 60913:2024. Railway applications. Fixed installations. Electric traction overhead contact lines systems. 2024. 138 р.

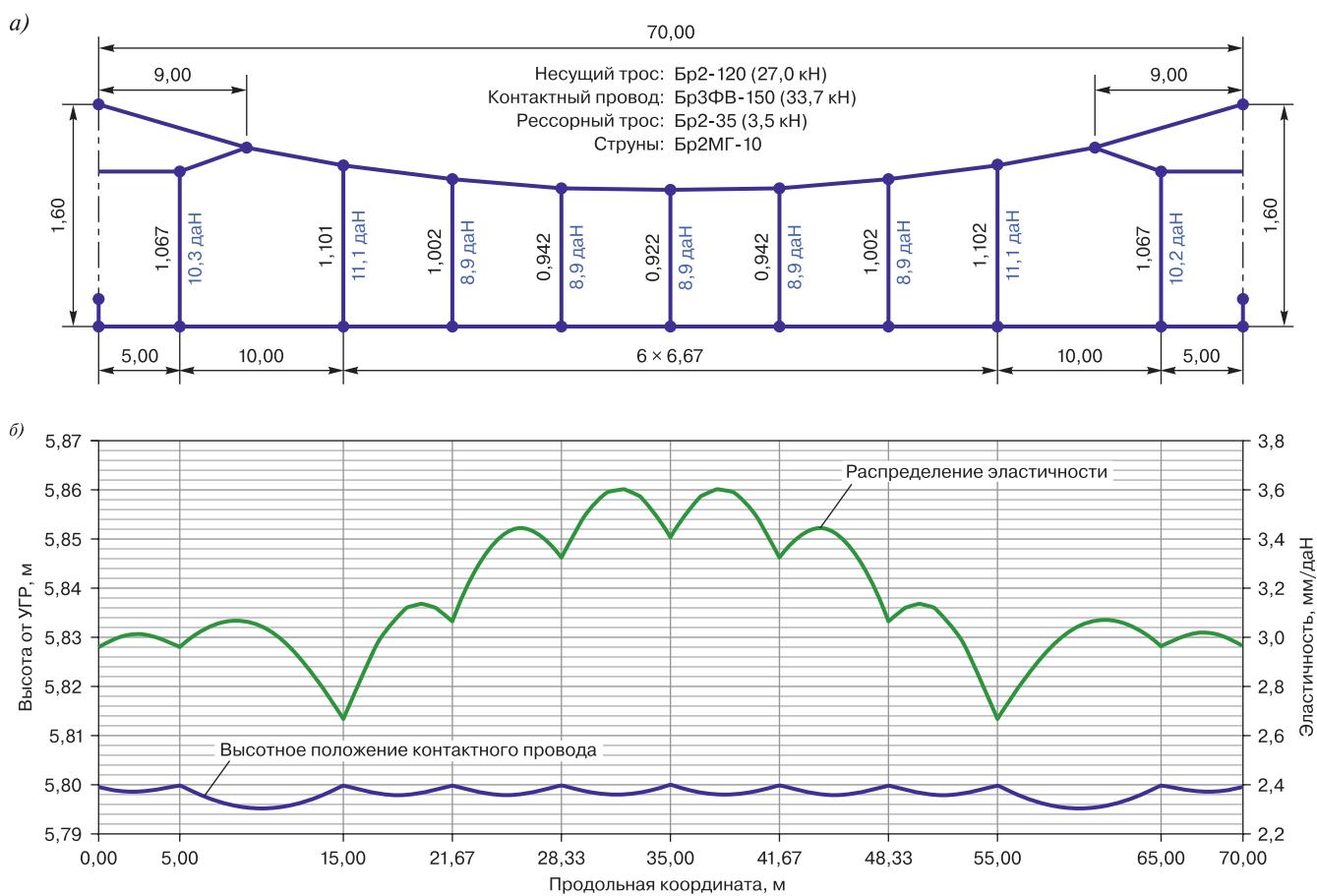


Рис. 2. Схема пролета контактной подвески КС-400 (а), графики распределения эластичности в пролете и высотного положения контактного провода (б)*:

— распределение эластичности; — высотное положение контактного провода

* Источник: данные авторов

Fig. 2. Scheme of the span of the KS-400 catenary (a), distribution of elasticity along the span and vertical position of the contact wire (b)*:

— elasticity distribution; — vertical position of the contact wire

* Source: authors' data

длины пролетов контактной подвески сокращаются. Температурный диапазон работы контактной сети составляет от -50°C (абсолютная минимальная температура воздуха на части трассы) до $+80^{\circ}\text{C}$ (максимальная рабочая температура проводов с учетом нагрева токами нагрузки и солнечной радиацией). Реализация высоких скоростей движения невозможна в условиях интенсивного гололедообразования. Для борьбы с гололедом предусмотрены схемы плавки и профилактического подогрева проводов. На сопряжениях анкерных участков и воздушных стрелках по ходу высокоскоростного движения предусматривается про-

плывание гололеда не только на контактном проводе в зоне взаимодействия с токоприемником (как это принято в технических решениях по контактной сети для обычных скоростей движения), но также и на несущем тросе контактной подвески, что позволяет избежать колебаний на проводах дополнительных масс гололедных образований и обеспечить необходимые условия динамического взаимодействия с токоприемниками при скоростях движения до 400 км/ч. Соответствующие решения отражены в патентах^{11, 12} и на высокоскоростных магистралях реализуются впервые в мире.

¹¹ Патент № 2670942 Российской Федерации, МПК B60M 1/12, H02G 7/16. Устройство контактной подвески высокоскоростной магистрали: № 2017146590: заявл. 28.12.2017: опубл. 25.10.2018 / М. А. Артемов, Е. В. Кудряшов; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские железные дороги». EDN: <https://elibRARY.ru/ojgbll>.

¹² Патент № 2668234 Российской Федерации, МПК H02G 7/16. Способ удаления гололеда с проводов контактной подвески высокоскоростной магистрали в зоне воздушной стрелки без пересечения проводов: № 2017146586: заявл. 28.12.2017: опубл. 27.09.2018 / М. А. Артемов, Е. В. Кудряшов; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские железные дороги». EDN: <https://elibRARY.ru/wcfwvf>.

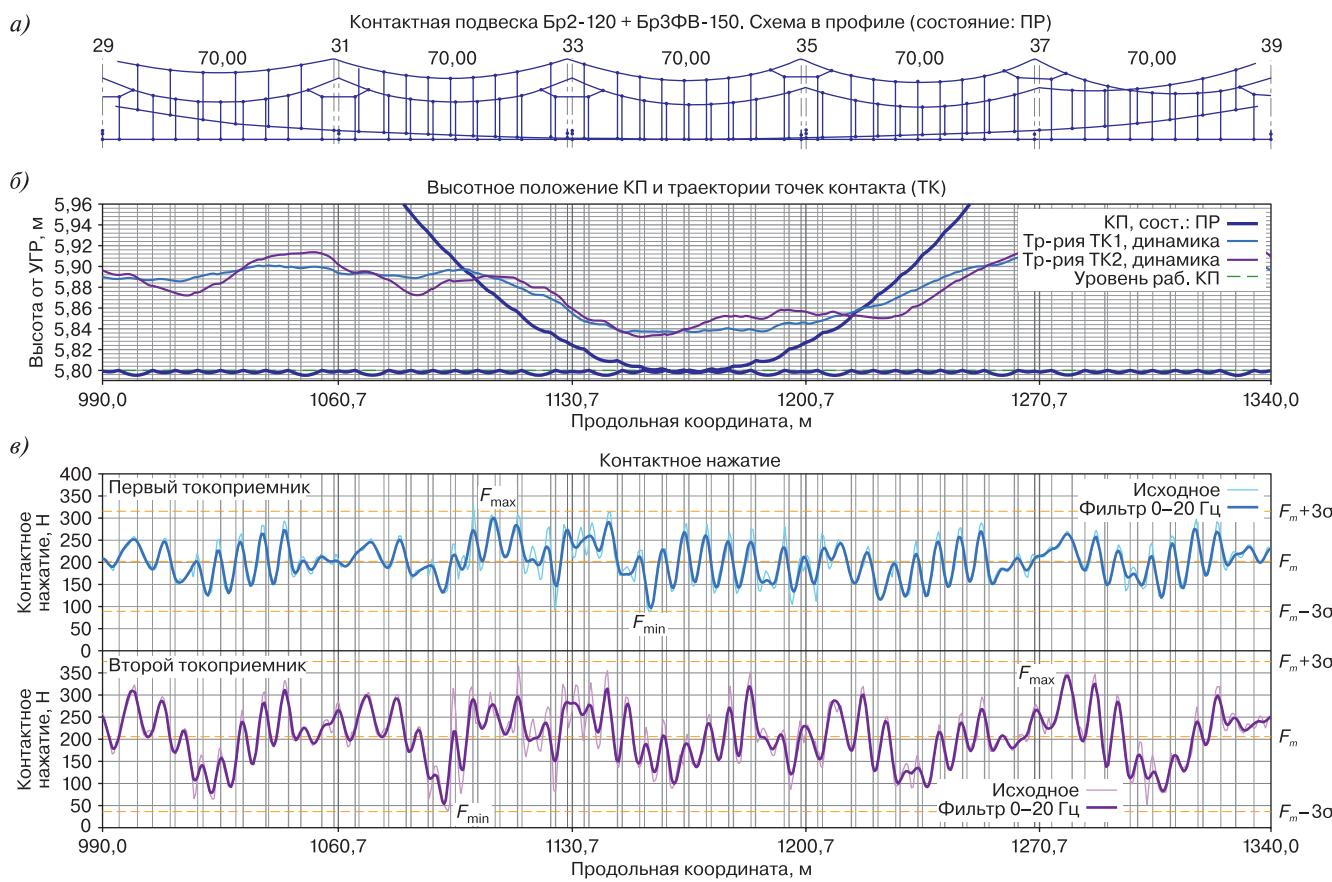


Рис. 3. Результаты моделирования взаимодействия токоприемников ЛА-400 с контактной подвеской КС-400 при прохождении пятипролетного неизолирующего сопряжения на скорости 400 км/ч*:
 а — схема контактной подвески в зоне сопряжения; б — графики высотного положения контактных проводов (в статическом состоянии), динамические траектории точек контакта с контактным проводом для первого и второго рабочего токоприемника на поезде ЭВС360 при прохождении сопряжения; в — графики контактного нажатия

* Источник: данные авторов

Fig. 3. Simulation results for the interaction between LA-400 pantographs and KS-400 catenary when passing five-span non-insulated overlap at the speed of 400 km/h*:

а — scheme of the catenary in the overlap area; б — vertical position of the contact wires (in static state), dynamic trajectories of the contact points at the contact wire with the first and second operative pantographs on the EVS360 train when passing overlap; в — contact force

* Source: authors' data

Таблица 2

Показатели качества токосъема*

Table 2

Current collection quality indicators*

Показатель	Норма	Значение для первого токоприемника	Значение для второго токоприемника
Среднее значение контактного нажатия F_m , Н	—	202,8	206,0
Стандартное отклонение σ , Н	$<0,3F_m$	37,8	56,7
Стандартное отклонение в полосе частот 0–5 Гц σ_{0-5} , Н	—	23,6	44,2
Стандартное отклонение в полосе частот 5–20 Гц σ_{5-20} , Н	—	28,9	34,4
Статистический максимум $F_m + 3\sigma$, Н	<450	316,3	376,0
Статистический минимум $F_m - 3\sigma$, Н	>0	89,3	36,1
Фактический максимум F_{max} , Н	—	301,8	344,7

Окончание табл. 2

Показатель	Норма	Значение для первого токоприемника	Значение для второго токоприемника
Фактический минимум F_{\min} , Н	—	96,6	52,1
Коэффициент асимметрии s_k	—	-0,05	-0,17
Коэффициент эксцесса e_k	—	-0,46	-0,54
Максимальное отжатие контактного провода под фиксатором Δh_{Φ} , мм	<150	109,4	115,0
Коэффициент искрения K_i , %	<0,2	0,0	0,0
Удельное число искрений N_{iy} , 1/км	—	0,0	0,0
Размах колебаний точки контакта 2A, мм	—	76,7	89,2

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

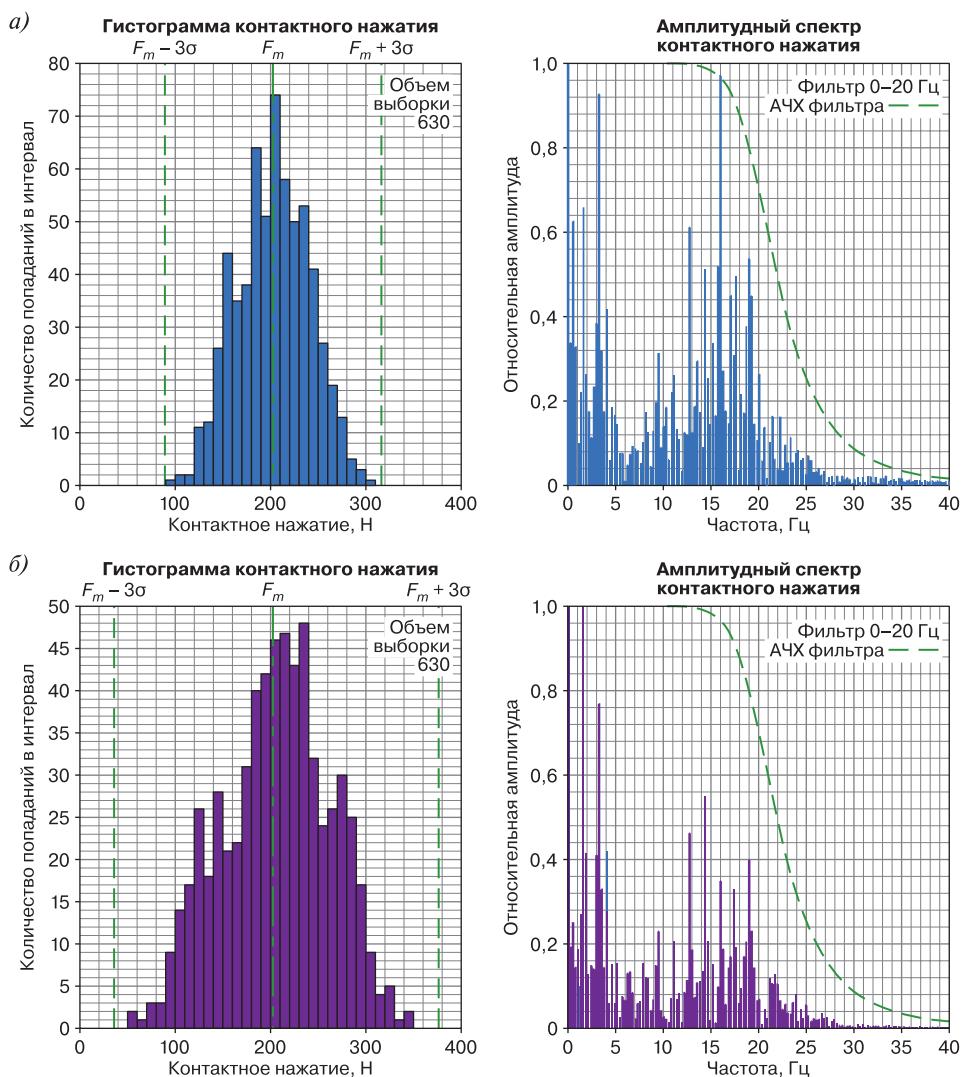


Рис. 4. Гистограмма и амплитудный спектр контактного нажатия*:

а — первый токоприемник; б — второй токоприемник

* Источник: данные авторов

Fig. 4. Histogram and amplitude spectrum of contact force*:

a — first pantograph; б — second pantograph

* Source: authors' data

В качестве фундаментов для опор контактной сети на высокоскоростном участке применяются буронабивные сваи. По сравнению с альтернативными решениями технология сооружения буронабивных свай оказывает наименьшее динамическое воздействие на земляное полотно и верхнее строение безбалластного пути ВСЖМ-1. На участках постоянного тока используются вибропогруженные трехлучевые фундаменты. Аварийно-восстановительный вариант — металлические винтовые сваи. Стойки опор контактной сети — металлические двухшвеллерные. Для промежуточных опор используется облегченный вариант стоек с наклонными поясами. Конструкция стоек усиlena с учетом повышенных нагрузок и требований высокоскоростного движения.

Кроме контактной подвески на опорах контактной сети подвешивается также питающий провод системы электроснабжения 2×25 кВ и обратный провод, который выполняет, в том числе, функцию заземления опор контактной сети. С учетом особенностей конструкции земляного полотна ВСЖМ-1 габарит опор составляет 3,5 или 3,8 м, а заглубление обреза фундамента относительно уровня головки рельса — от 0,25 до 1,0 м. На эстакадах из-за особенностей конструкции пролетных строений габарит опор принят 3,1 м.

Компенсированные анкеровки контактной подвески приняты с барабанными компенсаторами, снабженными устройством защиты от падения грузов в аварийном режиме при обрыве компенсируемого провода. Такое решение позволяет уменьшить последствия возможных повреждений, связанных с обрывами проводов.

Консоли и фиксаторы контактной сети выполняются из алюминиевых труб. Консольная арматура имеет втулочную конструкцию и выполняется из алюминиевых сплавов методом точного литья. Дополнительные фиксаторы — трубчатые из алюминиевых сплавов. Конструкция дополнительных фиксаторов обеспечивает минимальную массу, передаваемую на контактный провод, и допустимое отжатие контактного провода при проходе токоприемником до 250 мм. При достижении максимального отжатия у фиксатора срабатывает специальный ограничитель подъема контактного провода. Шарнирные соединения консолей и фиксаторов по пути протекания тока между контактным проводом и несущим тросом электрически зашунтированы. Это позволяет избежать повреждения элементов арматуры в условиях вибрации при нагреве электрическим током. Электрически зашунтированная консоль фактически выполняет функцию поперечного электрического соединителя.

В контактной сети КС-400 применяется специализированная линейная арматура, обладающая повышенными механическими и электрическими характеристиками. Арматура, устанавливаемая на провода контактной подвески, оптимизирована по массе с целью улучшения динамических показателей контактной подвески при взаимодействии с токоприемниками.

Изоляторы — полимерные стержневые с цельнолитой кремнийорганической оболочкой в птицезашщщенном исполнении. Длина пути тока утечки консольных, фиксаторных и подвесных изоляторов переменного тока увеличена и составляет 1,3 м, натяжных — 1,5 м.

Для контроля за параметрами контактной сети и выявления предотказных состояний предусматривается комплексная система технической диагностики и мониторинга, состоящая из стационарных устройств мониторинга, распределенных по линии, и мобильных диагностических комплексов.

Система заземления элементов инфраструктуры ВСЖМ-1 на высокоскоростном участке разработана с учетом применения обратного провода, который выполняет функцию пропуска обратного тока, организации контура заземления элементов инфраструктуры, снижения электрических потенциалов рельсов относительно земли, а также обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) тяговой сети ВСЖМ-1 с другими техническими средствами.

Обратный провод подключается к отсасывающим линиям тяговых подстанций, автотрансформаторных пунктов, а также к средним точкам дросселей рельсовой сети, устанавливаемых на расстоянии не более 1,5 км. В местах установки дросселей дополнительно устраиваются поперечные междупутные соединители. Обратный провод наглухо соединяется со стойками опор контактной сети. Металлические сооружения или их отдельные конструкции, расположенные в зоне А по ГОСТ Р 58321–2018¹³ (по главным путям) и не находящиеся под напряжением, подлежат заземлению на обратный провод.

Для обеспечения проектных характеристик взаимодействия с токоприемниками при скоростях движения до 400 км/ч важным условием является высокоточная регулировка контактной подвески. Для этого применяется технология, предполагающая использование специализированных монтажных комплексов с раскаткой проводов под заданным натяжением и применение мерных струн контактной подвески (струн расчетной длины).

Разработка комплекса изделий КС-400. С 2023 года ОАО «РЖД» реализует системную опытно-конструк-

¹³ ГОСТ Р 58321–2018. Электроустановки систем тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Требования к заземлению: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 декабря 2018 г. № 1119-ст. М.: Стандарт-информ, 2018. 23 с.

торскую работу (ОКР) по разработке комплекса изделий КС-400, в рамках которой сформированы технические требования и технические задания к изделиям, выпущена конструкторская документация, изготовлены опытные образцы, выполняются предварительные, эксплуатационные и приемочные испытания, включающие различные виды механических, электрических, тепловых, ресурсных и других испытаний. Номенклатура изделий, из которых собирается контактная сеть КС-400, насчитывает более 800 позиций (с учетом исполнений). Изделия условно разбиты на номенклатурные группы: строительные конструкции, провода и тросы, узлы анкеровок, поддерживающие и фиксирующие конструкции, арматура и струны, изоляторы, оборудование, конструкции для заземления и обратной тяговой сети, стационарные устройства мониторинга. На момент написания настоящей статьи изготовлены опытные образцы типопредставителей изделий по всем позициям, успешно пройден этап предварительных

испытаний. Инновационные решения защищены патентами^{14, 15, 16}.

Испытания контактной сети КС-400. Как было показано выше, конструкция контактной сети содержит множество инновационных технических решений — как по отношению к российским проектам КС-160, КС-200 и КС-250, так и к зарубежным аналогам. Подтверждение соответствия параметров контактной сети и ее отдельных элементов нормативным требованиям выполняется посредством поэтапных испытаний: отдельных изделий в рамках ОКР, контактной сети КС-400 в сборе как строительного сооружения, а также испытаний подвижного состава и инфраструктуры ВСЖМ-1, включающих испытания системы токосъема при проектных скоростях движения.

На текущий момент завершено строительство опытного полигона контактной сети КС-400 на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» (рис. 5) для проведения значительной части эксплуатационных и функциональных испытаний.



Рис. 5. Контактная сеть КС-400 на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ»*
* Источник: фото авторов

Fig. 5. The KS-400 overhead contact line at the Experimental Loop of the Railway Research Institute*
* Source: photo by the authors

¹⁴ Патент на полезную модель № 235571 У1 Российская Федерация, МПК B60M 1/26. Компенсатор натяжения провода контактной сети железной дороги: № 2025106201: заявл. 17.03.2025: опубл. 09.07.2025 / В. А. Бухаров, И. Д. Виноградов, Э. Д. Загитов, Е. В. Кудряшов, С. В. Якимов; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские железные дороги». EDN: <https://elibrary.ru/xuhfiz>.

¹⁵ Патент № 2848837 Российской Федерации, МПК B60M 1/24. Фиксирующий зажим анкеруемого контактного провода контактной сети: № 2025106220: заявл. 17.03.2025: опубл. 21.10.2025 / В. А. Бухаров, И. Д. Виноградов, Э. Д. Загитов, Е. В. Кудряшов, С. П. Сердюк; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские железные дороги». EDN: <https://elibrary.ru/tweaux>.

¹⁶ Патент на полезную модель № 235024 У1 Российская Федерация, МПК E02D 27/42. Трехлучевой фундамент для установки стойки опоры контактной сети: № 2025106210: заявл. 17.03.2025: опубл. 19.06.2025 / В. А. Бухаров, И. Д. Виноградов, Э. Д. Загитов, Е. В. Кудряшов, А. А. Прямицын; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские железные дороги». EDN: <https://elibrary.ru/dgmutk>.

Целями проведения испытаний на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» являются:

- установление функциональной совместимости, собираемости комплекса изделий и узлов контактной сети КС-400;
- оценка результатов технологических процессов сооружения опорных, поддерживающих и фиксирующих конструкций, узлов анкеровки и других элементов контактной сети;
- оценка результатов выполнения технологических процессов раскатки проводов контактной сети и высокоточной регулировки контактной подвески;
- подтверждение соответствия контактной сети КС-400 и ее элементов требованиям межгосударственных и национальных стандартов, СТО РЖД 14.004-2025¹⁷, техническим требованиям к изделиям контактной сети КС-400, а также требованиям проекта технических решений КС-400;
- оценка функциональной пригодности контактной сети КС-400 и ее элементов (изделий) для последующей эксплуатации на ВСЖМ-1 при скоростях движения до 400 км/ч по совокупности конструктивных, технологических, геометрических, статических, динамических и других показателей (за исключением показателей качества токосъема и условий взаимодействия контактной сети КС-400 с другими подсистемами ВСЖМ-1, которые должны оцениваться при реализации соответствующих скоростей движения на специальном испытательном полигоне);
- проверка работоспособности конструкций и узлов контактной сети (включая средние анкеровки, сопряжения анкерных участков и воздушные стрелки) при взаимодействии с токоприемником с имитацией повышенного контактного нажатия, характерного для скоростей движения до 400 км/ч;
- оценка механической прочности и подтверждение коэффициента безопасности для основных конструкций контактной сети в сборе, а именно: фундаментов и анкеров из буронабивных свай, стоек опор, поддерживающих конструкций, а также изделий в силовой цепи повышенного натяжения проводов контактной подвески;
- оценка последствий работы контактной сети в аварийных режимах (обрыв контактного провода, повышение натяжения проводов вследствие возможного заклинивания компенсаторов);
- оценка результатов выполнения технологических процессов восстановления контактной сети после аварийных сценариев;
- валидация математической модели контактной сети на основе экспериментальных данных;

- получение массива экспериментальных данных для разработки и актуализации нормативной, технической, технологической и эксплуатационной документации по контактной сети высокоскоростных магистралей.

Для подтверждения эксплуатационной совместимости КС-400 с другими подсистемами железной дороги и проверки показателей качества токосъема при взаимодействии с токоприемниками высокоскоростного электропоезда запланированы испытания на опытном полигоне Крюково – Новая Тверь, являющимся частью проектируемой линии ВСЖМ-1.

Обсуждение и заключение. К настоящему времени выполнен значительный объем проектных, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных магистралей. Разработаны технические решения, выпущена конструкторская документация, изготовлены опытные образцы изделий контактной сети, смонтирован опытный участок на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ».

Для обеспечения качества токосъема при скоростях движения до 400 км/ч в контактной подвеске применены провода из высокопрочной магниевой бронзы с повышенным натяжением. Параметры узлов и конструкций определены на основе математического моделирования контактной сети и процесса ее динамического взаимодействия с токоприемниками. По результатам моделирования выбрана наиболее рациональная схема контактной подвески и параметры ее основных узлов: сопряжений анкерных участков, средних анкеровок, воздушных стрелок и др.

Передача электроэнергии к высокоскоростным поездам с учетом повышенного энергопотребления обеспечена за счет применения системы электроснабжения 2 × 25 кВ с обратным проводом, повышенного сечения контактного провода (150 мм²), а также токопроводящих струн контактной подвески.

Для обеспечения надежной работы контактной сети в условиях гололедообразования применены схемы плавки гололеда и профилактического подогрева проводов. Параметры узлов и конструкций рассчитаны с учетом работы контактной сети в широком диапазоне климатических условий, характерных для российских высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Ближайшими задачами проекта по созданию контактной сети КС-400 для отечественных ВСЖМ являются:

1. Проведение эксплуатационных и функциональных испытаний контактной сети КС-400 на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ».

¹⁷ СТО РЖД 14.004-2025. Инфраструктура высокоскоростного железнодорожного транспорта. Технические нормы и требования к проектированию и строительству.

2. Проведение приемочных испытаний комплекса изделий КС-400.

3. Освоение серийного производства комплекса изделий КС-400.

4. Сертификация продукции.

5. Завершение разработки проектной документации для строительства высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург (ВСЖМ-1).

6. Строительство опытного полигона Крюково – Новая Тверь для испытаний инфраструктуры и подвижного состава ВСЖМ-1.

7. Испытания контактной сети КС-400 и системы токосъема с реализацией скоростей движения до 400 км/ч на опытном полигоне Крюково – Новая Тверь. Проверка условий взаимодействия контактной сети с другими элементами инфраструктуры ВСЖМ-1. Опытная эксплуатация.

8. Актуализация нормативной, технической, технологической и эксплуатационной документации по результатам испытаний.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бурков А. Т., Серонов В. В., Кудряшов Е. В., Степанская О. А. Физические основы проектирования электротяговых сетей высокоскоростных железнодорожных магистралей // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 2 (57). С. 36–41. EDN: <https://elibrary.ru/twphab>.

Burkov A. T., Seronov V. V., Kudryashov E. V., Stepanskaya O. A. Principal physics for designing electric traction networks for high-speed railways. *Transport of the Russian Federation*. 2015;2(57):36–41. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/twphab>.

2. Хананов В. В., Попов С. В., Кудряшов Е. В., Чередников Д. И., Бухаров В. А. Схемные решения и варианты конструкций контактной сети на экспериментальном участке Калашниково – Лихославль // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе. Сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекс, 2010. С. 19–32.

Khananov V. V., Popov S. V., Kudryashov E. V., Cherednikov D. I., Bukharov V. A. Engineering solutions and design variants for overhead

contact line on the experimental section Kalashnikovo – Likhoslavl. *Current collection and traction power supply for high-speed traffic at a direct current. Coll. of sci. papers of JSC VNIIZHT (Railway Research Institute)*. Moscow: Intext, 2010. P. 19–32. (In Russ.).

3. Балабанов Г. Н., Кудряшов Е. В., Артемов М. А., Кацкин Н. В. Технические решения по контактной сети высокоскоростной магистрали Москва – Казань // Железнодорожный транспорт. 2018. № 6. С. 27–33. EDN: <https://elibrary.ru/xpuibf>.

Balabanov G. N., Kudryashov E. V., Artemov M. A., Kashkin N. V. Technical solutions for overhead contact line of high-speed railway Moscow – Kazan. *Railway Transport*. 2018;(6):27–33. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xpuibf>.

4. Finner L., Poetsch G., Sarnes B., Kolbe M. Program for catenary-pantograph analysis, PrOSA statement of methods and validation according EN 50318. *Vehicle System Dynamics*. 2015;3(53):305–313. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.958501>.

5. Massat J.-P., Balmes E., Bianchi J.-Ph., Van Kalsbeek G. OSCAR statement of methods. *Vehicle System Dynamics*. 2015;3(53):370–379. <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1005016>.

6. Oumri M., Leouatni M., Chentouf S.-A., Rachid A. INPAC a new simulation tool for the prediction of dynamic interaction between the pantograph & the catenary. *International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*. April 2016. Paper 0123456789. URL: https://www.researchgate.net/publication/317091290_INPAC_a_new_simulation_tool_for_the_prediction_of_dynamic_interaction_between_the_pantograph_the_catenary (access date: 19.09.2025).

7. Tur M., Baesa L., Fuenmayor F. J., García E. PACDIN statement of methods. *Vehicle Systems Dynamics*. 2015;3(53):402–411. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.963126>.

8. Zhou N., Lv Q., Yang Y., Zhang W. <TPL-PCRUN> Statement of methods. *Vehicle Systems Dynamics*. 2015;3(53):380–391. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.982136>.

9. Collina A., Bruni S., Facchinetti A., Zuin A. PCaDA statement of methods. *Vehicle Systems Dynamics*. 2015;3(53):347–356. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.959027>.

10. Bruni S., Ambrosio J., Carnicer A. et al. The results of the pantograph–catenary interaction benchmark. *Vehicle Systems Dynamics*. 2015;3(53):412–435. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.953183>.

11. Паранин А. В., Ефимов Д. А., Батрашов А. Б. Взаимодействие токоприемника высокоскоростного подвижного состава и контактной подвески в различных условиях эксплуатации // Транспорт Урала. 2022. № 3 (74). С. 94–99. EDN: <https://elibrary.ru/tqlfyg>.

Paranin A. V., Efimov D. A., Batrashov A. B. Interaction of current collector of high-speed rolling stock and catenary suspension in various conditions of operation. *Transport of the Urals*. 2022;3(74):94–99. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tqlfyg>.

12. Смердин А. Н., Голубков А. С., Жданов В. А. Совершенствование методики исследования волновых процессов в контактной подвеске на основе конечно-элементной модели // Известия Транссиба. 2011. № 1 (5). С. 30–37. EDN: <https://elibrary.ru/ndyuerp>.

Smerdin A. N., Golubkov A. S., Zhdanov V. A. Improvement of wave process research methodology in overhead contact line based on finite element model. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2011;1(5):30–37. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ndyuerp>.

13. Григорьев Б. С., Головин О. А., Викторов Е. Д., Кудряшов Е. В. Математическое моделирование механического взаимодействия токоприемников и контактной подвески для скоростных электрифицированных железнодорожных дорог // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2012. № 4 (159). С. 155–162. EDN: <https://elibrary.ru/plukbh>.

Grigoryev B. S., Golovin O. A., Viktorov E. D., Kudryashov E. V. Numerical simulation of mechanical interaction of pantographs and catenary line for high-speed electrified railways. *St. Petersburg Polytechnic University Journal*. 2012;4(159):155–162. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/plukbh>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Евгеньевич АНДРЕЕВ,

канд. техн. наук, начальник Департамента технической политики ОАО «РЖД» (ЦТЕХ, 107174, Россия, г. Москва, Новая Басманская ул., 2/1, стр. 1), Author ID: 1045354, <https://orcid.org/0009-0006-4059-9654>

Евгений Владимирович КУДРЯШОВ,

канд. техн. наук, начальник отдела моделирования контактных сетей, АО «Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта» (АО «ИЦ ЖТ», 121205, г. Москва, инновационный центр Сколково, Большой бул., д. 40), SPIN-код: 3841-3064, <https://orcid.org/0009-0004-8527-1770>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir E. ANDREYEV,

Cand. Sci. (Eng), Head of Technical Policy Department of JSC Russian Railways (107174, Moscow, bldg. 1, 2/1, Novaya Basmannaya St.), Author ID: 1045354, <https://orcid.org/0009-0006-4059-9654>

Evgeny V. KUDRYASHOV,

Cand. Sci. (Eng), Head of Overhead Contact Lines Simulation Department, JSC "Engineering Center of Railway Transport" (121205, Moscow, Skolkovo Innovation Centre, 40, Bolshoi Blvd.), SPIN-code: 3841-3064, <https://orcid.org/0009-0004-8527-1770>

ВКЛАД АВТОРОВ

Владимир Евгеньевич АНДРЕЕВ. Постановка целей и задач, общее руководство исследованием, разработка разделов «Введение», «Историческая справка», «Разработка комплекса изделий КС-400», «Испытания контактной сети КС-400», редактирование и подготовка текста статьи (50 %).

Евгений Владимирович КУДРЯШОВ. Математическое моделирование, разработка разделов «Математическое моделирование контактной сети и процесса ее взаимодействия с токо-приемниками», «Основные особенности технических решений контактной сети КС-400», подготовка рисунков, редактирование и подготовка текста статьи (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladimir E. ANDREYEV. Setting goals and objectives, general management of the research, development of the sections "Introduction", "Historical background", "Development of a set of hardware components for the KS-400", "KS-400 catenary system testing", editing and article text preparation (50 %).

Evgeny V. KUDRYASHOV. Numerical simulation, development of sections "Numerical simulation of the catenary system and its interaction with pantographs", "Main features of technical solutions of KS-400 catenary system", figure preparation, editing and article text preparation (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 09.10.2025, рецензия от первого рецензента получена 16.10.2025, рецензия от второго рецензента получена 20.10.2025, принята к публикации 07.11.2025.

The article was submitted 09.10.2025, first review received 16.10.2025, second review received 20.10.2025, accepted for publication 07.11.2025.