

УДК 621.332.3

Особенности проектирования контактной сети в современных условиях

А. В. Агунов, Д. Д. Иванов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Агунов А. В., Иванов Д. Д. Особенности проектирования контактной сети в современных условиях // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 444–454. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-444-454

Аннотация

Цель: Произвести анализ, направленный на выявление ограничений, связанных с применением существующих модификаций контактной подвески и методов их расчета в современных условиях. **Методы:** Разработана математическая модель расчета цепной полукompенсированной контактной подвески на основе метода конечных элементов (далее — МКЭ), с реализацией этой модели в программном комплексе ANSYS Workbench. Для подтверждения эффективности разработанной модели произведено сравнение результатов расчетов, полученных с помощью данной МКЭ-модели, с результатами, полученными по существующей методике. Это позволило оценить преимущества и недостатки каждого подхода и обосновать необходимость перехода на более современные и точные методы расчета. **Результаты:** Анализ показал, что существующие методы расчета контактных подвесок не учитывают реальные условия, что может вызывать недочеты как в проектировании, так и в эксплуатации. В процессе работы продемонстрирована необходимость совершенствования существующих методов и их адаптации к реалиям, с акцентом на внедрение современных подходов, таких как математическое моделирование, что позволит значительно увеличить точность и достоверность расчетов. **Практическая значимость:** Различия в расчетах подчеркивают необходимость внедрения современных методов для определения параметров контактной сети, особенно при тяжелых условиях. Модели с применением метода конечных элементов обладают широким функционалом, позволяя учитывать такие факторы, влияющие на работу контактной сети, как ток, температура нагрева и изменение натяжения проводов. Они могут быть эффективно использованы специалистами в проектировании, в том числе при переходе к технологии BIM и в научной деятельности.

Ключевые слова: Контактная сеть, контактная подвеска, несущий трос, контактный провод, температура нагрева провода, стрела провеса, натяжение несущего троса.

Введение

Основным потребителем электрической энергии на электрифицированных железных дорогах является электроподвижной состав (ЭПС), относящийся к первой категории по надежности электроснабжения [1], питание которого должно осуществляться от двух независимых взаиморезервирующих источников питания [2]. Контакт-

ная подвеска как часть тяговой сети является сложным инженерным сооружением, обеспечивающим процесс передачи электроэнергии к ЭПС для осуществления необходимых производственных и технологических операций. Однако ввиду конструктивных особенностей, не позволяющих выполнить резервирование, к ней предъявляют ряд особых требований.

Сегодня в Российской Федерации широкое распространение получила модификация контактной сети (КС) КС-160, разработанная в 2001–2009 гг. в нескольких вариантах по роду тока и способу натяжения проводов. Стратегия развития транспорта в Российской Федерации подразумевает развитие тяжеловесного движения, увеличение удельного веса и длины поездов, а также развитие железных дорог с максимальной скоростью движения 160 километров в час и более [3]. Рост объемов и темпов перевозок сопровождается высокими токовыми нагрузками на контактную сеть, при которых температура нагрева проводов может достигать, а в некоторых случаях и превысить допустимые для медного несущего троса (НТ) 100 °С [4], а для низколегированного медного контактного провода (КП) — 80 °С [5]. Однако существующие модификации контактных сетей не рассчитаны для таких условий работы. При нагреве проводов до температур, близких к экстремальным, значительно увеличивается риск повреждений, вызванных нарушениями вертикального габарита контактной подвески.

Контактная сеть в современных условиях проектирования и эксплуатации

Во исполнение поручения президента Российской Федерации [6] реализован комплекс мероприятий по развитию доступности центрального транспортного узла. Так, в рамках объекта «Организация пригородно-городского пассажирского железнодорожного движения на участке Крюково — Раменское (МЦД-3)» в период с 2022 по 2024 г. реализовано строительство парка экипировки электропоездов ЭГЭ2Тв-024 «Иволга-4.0», электрифицированного по системе тягового электроснабжения постоянного тока с полукompенсированной контактной сетью по проекту КС-160. Московские центральные диаметры (МЦД) представляют собой сеть железнодорожных маршрутов для пригородных электропоездов, проло-

женных через центр столицы, при этом интервал движения поездов по ним составляет в среднем 5 минут. Контактная сеть нового парка по балансовой и эксплуатационной ответственности относится к Панковской дистанции электроснабжения (ЭЧ-3) Московской дирекции по энергообеспечению Трансэнерго — филиала ОАО «РЖД». Упрощенный фрагмент схемы питания и секционирования парка экипировки представлен на рис. 1.

На I и II главных путях смонтирована контактная подвеска М-120+2хНлФ-100+2М 120, а на боковых путях — М-120+2хНлФ-100. Технология работы нового парка предусматривает подготовку ЭПС перед отправкой в рейс (в направлении МЦД-3), а также прием и отправку грузовых поездов массами до 6000 т в Рязанском направлении. Процесс подготовки электропоезда в рейс связан с потреблением из тяговой сети электроэнергии собственных нужд для обогрева (в зимний период) или охлаждения (в летний период) пространства для пассажиров, заряда аккумуляторных батарей и других технологических операций. На электропоездах «Иволга» установлены тяговые двигатели мощностью 380 кВт и преобразователи собственных нужд типа ПСН-200-У1 максимальной выходной мощностью 175 кВт.

Согласно данным Панковской дистанции электроснабжения, в 2024 г. при одновременном нахождении электропоездов типа «Иволга», готовящихся в рейс на 33Д–40Д путях, и грузового поезда массой 6000 т с локомотивом 2ВЛ-10, находящегося в режиме тяги на 53 пути, нарушился вертикальный габарит контактной подвески на 33Д, 35Д и 53 путях вследствие нагрева проводов контактной подвески до температуры, близкой или выше допустимой по термическому разуплотнению провода, что привело к значительному нарушению графика движения поездов. Дистанциями электроснабжения ежегодно составляется проект планово-предупредительных работ в целях предупреждения возникновения

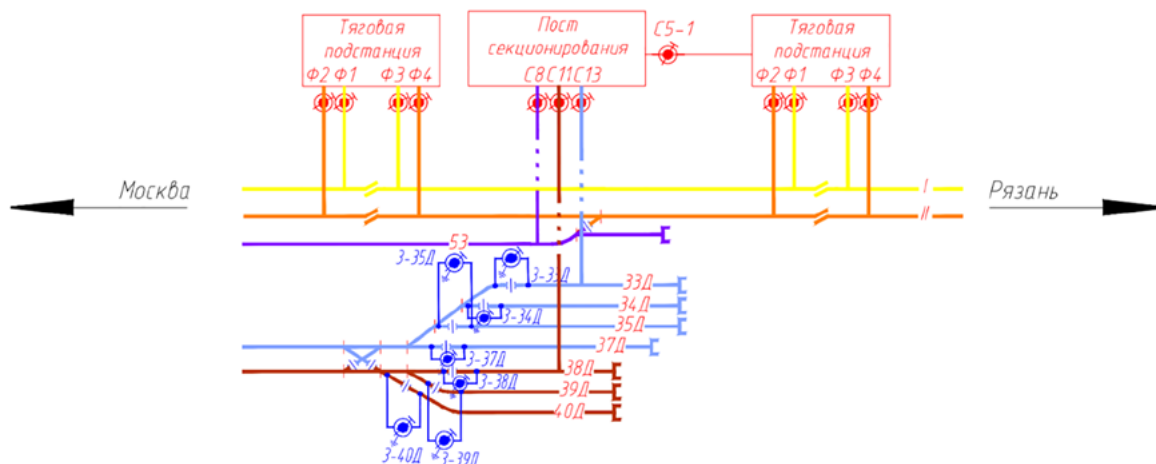


Рис. 1. Фрагмент схемы питания и секционирования парка экипировки поездов

отказов технических средств, однако темпы роста железнодорожных перевозок часто не позволяют полностью исключить вероятность отказа. На рис. 2 представлена диаграмма отказов технических средств на контактной сети Панковской дистанции электроснабжения с разделением по годам.

Опыт применения типовой КС-160 на особо грузонапряженных участках или с интенсивным пассажирооборотом не ставит под сомнение возможность использования данной модификации в современных условиях. Однако ввиду того, что существующая типовая КС разрабатывалась без учета перспективы увеличения токовых нагрузок, на ряде участков возникает рост интенсивности отказов технических средств.

Проектная документация и результаты инженерных изысканий, реализация которых выполняется в рамках стратегии ОАО «РЖД», — это комплексные инфраструктурные проекты, источниками финансирования которых являются как средства ОАО «РЖД», так и средства федерального бюджета. Применение технологии BIM-моделирования с выходом постановлений Правительства РФ [7, 8] стало обязательным при разработке проектной документации на объектах, финансирование которых осуществляется из государственного бюджета вне зависимости от их сметной стоимости. Проектирование объектов железнодорожной инфраструктуры с применением BIM находится еще на своем начальном

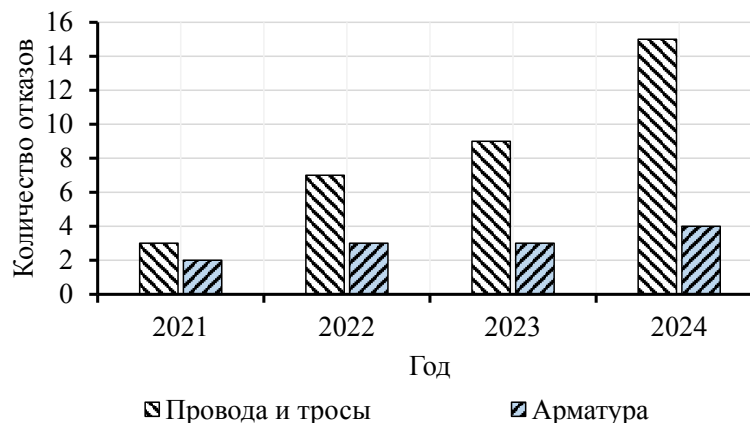


Рис. 2. Количество отказов на контактной сети с разделением по годам

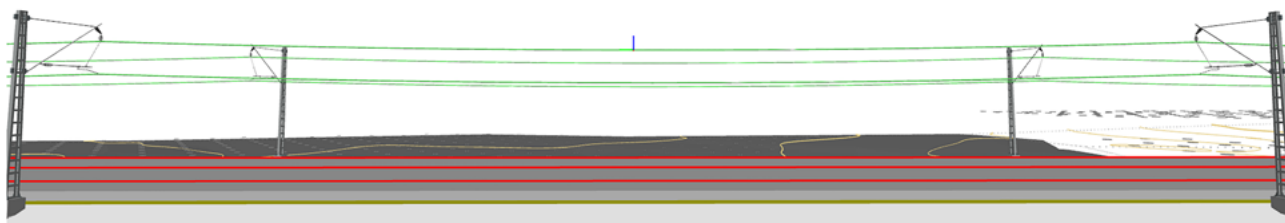


Рис. 3. Визуализация информационной модели железнодорожного участка с контактной сетью, выполненная на базе «Топоматик Robur — Инженерные сети»

этапе, однако согласно [1] на объектах железнодорожного транспорта заказчик оставляет за собой право включения в задание на проектирование требований по разработке документации в формате информационной модели.

В настоящее время разработан ряд программного обеспечения, использующего технологию BIM. Для объектов ОАО «РЖД» проектирование ведется на базе программного комплекса «Топоматик Robur — Инженерные сети» (разработка НПФ «Топоматик») с базой данных по контактной сети, не имеющей аналогов. На рис. 3 приведен фрагмент визуализации информационной модели железнодорожного участка с контактной сетью, разработанной одним из проектных институтов транспортного строительства при участии автора.

Как видно из рис. 3, имитационное моделирование в данном ПО в части проводов контактной подвески достаточно условное, не учитывающее реальные стрелы провеса проводов, расстановку звеньевых струн, рессорных тросов и тросов средней анкеровки. Это связано с отсутствием возможности проведения механических расчетов КС в данной программе. Опыт проектирования контактной сети показывает возможность применения данного ПО только при достаточно простых условиях, например новое строительство в «чистом поле». При усложнении исходных данных, которые требуют учета соблюдения вертикального габарита контактной подвески (строительство путепроводов, пересекающих ж/д пути; тоннелей или мостов «с ездой по низу»), выполнение механических расчетов с построением стрел

провеса проводов является острым вопросом при полноценном отказе от 2D-проектирования. Данный факт показывает необходимость расширения существующих возможностей BIM-проектирования в сторону учета реальных условий и требований к проектированию.

Существующие методы расчета цепных контактных подвесок

Работа КС обусловлена различными сочетаниями нагрузок по [9]. Полукомпенсированные контактные подвески сильнее подвержены температурным перемещениям проводов по сравнению с компенсированными. Это связано с отсутствием компенсаторов температурных удлинений в узле анкеровки несущего троса на анкерной опоре. Сегодня для расчета пространственного положения проводов полукомпенсированной контактной подвески применяют расчеты, основанные на решении уравнения состояния и уравнения равновесия, которые рассмотрены в работе [10].

Для подвесок с простыми опорными струнами вертикальная составляющая стрелы провеса несущего троса для различных режимов работы:

$$F_x = \frac{g_x l^2}{8 T_x} - f_x \frac{K}{T_x}, \quad (1)$$

где g_x — нормативная нагрузка на несущий трос в заданном режиме работы, даН;

l — длина пролета между опорами контактной сети (точками крепления несущего троса), м;

T_x — натяжение несущего троса в заданном режиме, даН;

f_x — стрела провеса контактного провода, м;

K — номинальное натяжение контактного провода (проводов), которое принимают постоянным, даН.

Здесь стрела провеса контактного провода:

$$f_x = \frac{(l - 2c_x)^2}{8(T_x + K)} \left[g_x - g_0 \frac{T_x}{T_0} \right], \quad (2)$$

где c_x — расстояние от оси опоры до первой около опорной струны в пролете l , м;

g_0 — нормативная нагрузка на несущий трос в режиме беспровесного положения контактного провода (принимается как нагрузка от собственного веса подвески), даН;

T_0 — натяжение НТ в режиме беспровесного положения КП, даН.

Как видно из уравнений (1) и (2), определение стрелы провеса несущего троса и контактного провода сопряжено с расчетом натяжения, нормативных нагрузок на провода в искомых режимах, а также натяжения НТ в режиме беспровесного положения КП. Расчеты нормативных нагрузок для различных режимов отражены в [10]. Натяжения НТ при температуре расчетного режима определяют на основании уравнения:

$$t_x = A_0 + \frac{B_x}{Z_x^2} - \frac{T_x}{\alpha_n E_n S_n}, \quad (3)$$

где A_0 — коэффициент, учитывающий нагрузки, температуру и натяжение несущего троса в режиме беспровесного положения КП;

B_x — коэффициент, учитывающий приведенные линейные нагрузки, длину эквивалентного пролета и коэффициент линейного расширения материала в расчетном режиме;

Z_x — коэффициент приведенного натяжения несущего троса в расчетном режиме, учиты-

вающий конструктивный коэффициент цепной подвески, даН;

T_x — натяжение несущего троса в расчетном режиме, даН.

Решение уравнение (3) сопряжено с определением коэффициента Z_x :

$$Z_x = T_x + \varphi_x K, \quad (4)$$

где φ_x — конструктивный коэффициент цепной подвески.

Значение конструктивного коэффициента меняется в зависимости от натяжения несущего троса:

$$\varphi_x = \frac{\frac{(l - 2c_x)^2}{l^2}}{\left(1 + \left[1 - \frac{(l - 2c_x)^2}{l^2} \right] \frac{K}{T_x} \right)}. \quad (5)$$

Коэффициенты (4) и (5), зависящие от натяжения T_x , значительно усложняют уравнение (3), что требует значительных временных затрат на его решение. Сегодня данная методика, разработанная еще в прошлом веке, широко применяется при проектировании контактной сети.

Наиболее ограничивающим с точки зрения вертикальных перемещений проводов является режим максимальной температуры, $t_{\max}$. В таком режиме натяжение несущего троса уменьшается прямо пропорционально воздействию температуры. Расчеты проводов КС при $t_{\max}$ должны учитывать нагрев проводов от солнечной радиации и значения тока нагрузки.

Ток, протекающий по всем продольным и поперечным проводам и тросам контактной подвески, составляет определенную картину токораспределения. Учитывая то, что существующие типовые модификации КС разработаны для максимальной температуры нагрева 80 °С по причине ограничений, связанных с температурными перемещениями проводов, — при механических расчетах

$t_{\max}$ принимают равной 80 °С без учета реальной картины токораспределения. Совершенствование электротепловых расчетов связано с трудами таких ученых, как А. Б. Батрашов [11], А. В. Воронин [12] и др.

Опыт проектирования КС на основе существующего метода расчета показывает необходимость в его совершенствовании в условиях роста темпа и объемов перевозок с учетом требований к современному проектированию. Разработка и реализация математической модели электротепломеханического расчета контактной подвески позволит учесть такой параметр, как реальное значение температуры нагрева провода от протекающего тока с учетом токораспределения по поперечным и продольным проводам, которое ранее было подвергнуто упрощению, а также объективно оценить возможность применения существующих модификаций КС в условиях перспективы развития ж/д транспорта. Реализацию модели можно выполнить на основе метода конечных элементов с применением программного комплекса Ansys Workbench. Дополнительной целью в части модернизации существующего метода расчета является интеграция модели электротепломеханического расчета контактной подвески в BIM-проектирование.

Совершенствование существующих методов расчета цепных контактных подвесок

Для исследования был принят пролет типовой полукompенсированной контактной подвески переменного тока КС-160-3 с проводами М-120+МФ-100, длиной 65 м, со смещенными опорными струнами из провода БСМ1 сечением 4 мм², в середине которого подключается питающая линия (ПЛ) от тяговой подстанции. К рассмотрению принимается режим, когда на одной зоне питания находятся два ЭПС. С точки зрения нагрева проводов — данный режим является наиболее тяжелым. Значение тока ПЛ в месте под-

ключения к контактной подвеске составляет 500 А и принимается на основании тяговых и электрических расчетов, выполненных методом сечения графика движения поездов, для экспериментального участка при пропуске пакета поездов массами до 6000 т. Максимальная температура окружающего воздуха принимается +30 °С.

Геометрия исследуемого пролета представляется поперечными и продольными проводами расчетного диаметра. Математическая модель определения значения величины тока, протекающего по всем продольным и поперечным проводам, основана на дифференциальной форме уравнений Д. К. Максвелла. Система уравнений основана на законе (теореме) Гаусса и законе Ампера — Максвелла:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \vec{D} = \rho \\ \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{cases}, \quad (6)$$

где D — электрическая индукция, Кл/м³;

ρ — объемная плотность стороннего электрического заряда, Кл/м³;

H — напряженность магнитного поля, А/м;

J — плотность электрического тока (плотность тока проводимости), А/м²;

t — время, с.

Определение температуры нагрева провода связано с первым законом термодинамики. На рис. 4 схематично приведен баланс тепловой энергии для участка провода контактной подвески [11].

Поступающая тепловая энергия, Дж:

$$E_{IN} = E_{SN} + E_{k IN}.$$

Отбираемая тепловая энергия, Дж:

$$E_{OUT} = E_R + E_C + E_{k OUT}.$$

Тепловая энергия внутри тела, Дж:

$$E_G = E_{ST} + E_J.$$

E_{ST} — сохраненная тепловая энергия, Дж;

$E_{k IN}$ ($E_{k OUT}$) — энергия, поступающая (отбираемая) в результате кондуктивного теплообмена, Дж;

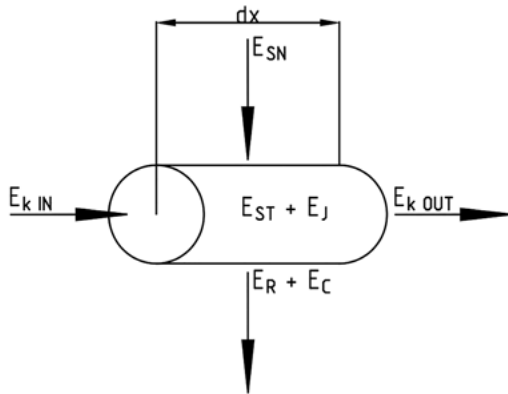


Рис. 4. Баланс тепловой энергии для участка провода контактной подвески:

E_{SN} — энергия нагрева от солнечной радиации;

$E_C (E_R)$ — энергия кондуктивного (лучистого) теплообмена, Дж;

E_J — энергия, выделяемая при резистивном нагреве, Дж.

Таким образом, классический первый закон термодинамики, записанный для участка провода, имеет вид:

$$\frac{dE_{ST}}{dx} = E_{IN} - E_{OUT} + E_G. \quad (7)$$

Уравнение нестационарного теплового баланса для КС, выраженное в потоке тепла на единицу длины провода, основанное на законе Фурье и уравнении теплового баланса, можно представить как [11]:

$$cm_{\text{пг}} \frac{\partial T}{\partial t} - kS \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = Q_J + Q_{SH} - Q_C - Q_R, \quad (8)$$

где c — теплоемкость материала провода, Дж/(кг · К);

$m_{\text{пг}}$ — погонная масса провода, кг/м;

T — температура, К;

t — время, с;

k — коэффициент теплопроводности материала провода, Вт/(м · К);

S — площадь сечения провода, м²;

dx — длина провода, м;

Q_J, Q_{SH}, Q_C, Q_R — погонный поток тепла от резистивного нагрева, солнечной радиации, конвективного охлаждения, лучеиспускания, Вт/м.

Результаты электротеплового расчета методом конечных элементов температуры нагрева проводов КС в рассматриваемом пролете при воздействии внешних факторов с учетом токораспределения представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, нагрев проводов от величины протекающего тока с учетом температуры окружающего воздуха равномерно распространяется по длине всего пролета по направлению к нагрузке (ЭПС). Значения температуры частично превышают допустимые, что говорит о необходимости рассмотрения мероприятий по усилению СТЭ в целях их снижения. Рассматриваемая модель разработана на основе опыта работы [11] в части электротеплового расчета.

Переход к электротепломеханическому расчету связан с созданием математической модели механического расчета и переносом результатов электротеплового расчета в каждый из узлов «сетки». Предлагаемая математическая модель описывается уравнением предварительно натянутого стержня в рамках классической теории Эйлера — Бернулли. Пренебрегая изгибной жесткостью стержня, уравнение примет вид [13]:



Рис. 5. Результаты электротеплового расчета проводов КС

$$-H \frac{d^2 v'}{dx'^2} + q'(x') = 0, \quad (9)$$

где x' — продольная координата оси стержня;
 v' — поперечное перемещение оси стержня;
 H — натяжение, Н;
 $q'(x')$ — распределенная поперечная нагрузка.

Двойное интегрирование данного уравнения при $q' = \text{const}(x')$ дает известное выражение для провеса стержня по параболическому закону [14].

Для механического расчета начальными являются условия задания натяжения несущего троса в режиме беспровесного положения контактного провода. Для несущего троса это натяжение составляет 1470 даН, а для контактного провода — 1050 даН. Дополнительно учитываются результаты электротеплового расчета. В таблице представлены результаты расчетов натяжения, а на рис. 6 высотного положения НТ выполненного на разработанной МКЭ-модели и сравнение их с результатами по классической методике [10].

Результаты расчетов и их сравнение показывают, что в существующей методике [10] значение натяжения НТ принимается на 149 даН выше, чем при расчетах по МКЭ-модели. В то же время при меньшем натяжении значение стрелы провеса, полученное по МКЭ-модели, получается

меньше, чем по классической методике, на 0,5 м. Высотное положение НТ влияет на вертикальный габарит контактной подвески, который, в свою очередь, определяет длину пролета между опорами КС. Учет реальной картины токораспределения по проводам и, как следствие, нагрева проводов в механических расчетах может сократить затраты на строительно-монтажные работы по причине возможного увеличения длины пролета (только по условию соблюдения вертикального габарита КП).

Заключение

С учетом вышеизложенного можно утверждать, что разработанная МКЭ-модель позволит выполнять электротепломеханические расчеты для цепной контактной подвески с большей точностью, что позволит избежать ошибок и разработки избыточных технических решений при проектировании. Преимущества МКЭ-моделей заключаются не только в их высокой точности, позволяющей более надежно прогнозировать поведение системы при различных условиях, но и в их универсальности и гибкости применения. Способность задавать разнообразные начальные условия, такие как температура окружающей среды, величина тока и натяжение проводов, позволяет проанализировать влияние этих

Результаты расчетов по разработанной МКЭ-модели и по методике [10]

Параметр	Рассматриваемая методика	
	МКЭ модель	Классическая методика [10]
Натяжение НТ в режиме максимальной температуры, даН	501	650

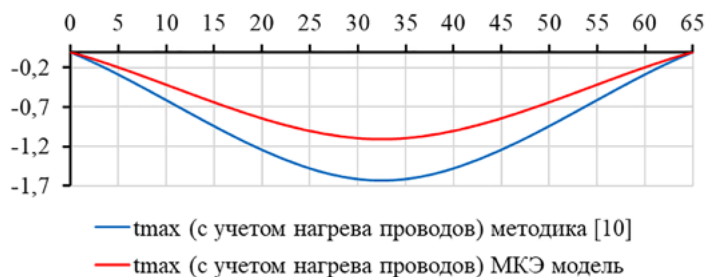


Рис. 6. Высотные положения НТ при расчетах на МКЭ-модели и по методике [10]

факторов на функциональность работы КС. Рассматриваемая МКЭ-модель может быть использована широким кругом специалистов для применения в различных отраслях, в том числе при расширении возможностей ВМ-проектирования по причине полномасштабного моделирования расчетной геометрии. Описанная в данной работе МКЭ-модель сегодня дорабатывается на кафедре «Электроснабжение железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

Список источников

1. СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм. СНиП 32-01-95. Официальное издание. М.: ФГБУ «РСТ», 2024.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Глава 1.2. Электроснабжение и электрические сети (Издание седьмое). М.: НЦ ЭНАС, 2002.
3. Распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (с изменениями на 6 ноября 2024 года)». Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru.
4. ГОСТ 32697—2019. Тросы контактной сети железной дороги несущие. Технические условия. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019.
5. ГОСТ Р 55647—2018. Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2018.
6. Поручение Президента Российской Федерации В. В. Путина от 15.11.2017 № Пр-2320.
7. Постановление Правительства РФ от 20.12.2022 № 2357. О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 05.03.2021 № 331. Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru.
8. Постановление Правительства РФ от 05.03.2021 № 331 «Об установлении случаев, при которых застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства».
9. СТН ЦЭ 141—99. Нормы проектирования контактной сети. — М.: ЦЭ МПС РФ, 2001. — 16 с.
10. Фрайфельд А. В. Проектирование контактной сети / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1991. — 335 с.
11. Батрашов А. Б. Совершенствование электро-тепловых расчетов и характеристик контактной сети постоянного тока: дисс. ... канд. тех. наук / А. Б. Батрашов. — Екатеринбург, 2019. — 216 с.
12. Воронин А. В. Токораспределение между продольными проводами контактной сети и тепловой расчет ее элементов: дисс. ... канд. тех. наук / А. В. Воронин. — М., 1946. — 143 с.
13. Работнов Ю. Н. Сопротивление материалов / Ю. Н. Работнов. — М.: Физматгиз, 1962. — 456 с.
14. Кудряшов Е. В. Совершенствование механических расчетов контактных подвесок на основе статических конечно элементных моделей: дисс. ... канд. тех. наук / Е. В. Кудряшов. — СПб., 2010. — 162 с.

Дата поступления: 23.03.2025

Решение о публикации: 18.05.2025

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Электроснабжение железных дорог»; agunov@pgups.ru

ИВАНОВ Денис Дмитриевич — аспирант кафедры «Электроснабжение железных дорог»; denis_08a@mail.ru

Designing a Modern Catenary System

A. V. Agunov, D. D. Ivanov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Agunov A. V., Ivamov D. D. Designing a Modern Catenary System. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 444–454. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-444-454

Summary

Purpose: To analyse and identify the limitations associated with the use of existing catenary suspension technologies and calculation methods in modern conditions. **Methodology:** A mathematical model for calculating a semi-compensated overhead suspension was developed. This model was based on the finite element method (hereinafter referred to as FEM), and its implementation was carried out in the ANSYS Workbench software package. To confirm the effectiveness of the developed model, the calculation results obtained using this FEM model were compared with the results obtained using the existing methodology. This enabled a thorough evaluation of the pros and cons of each method, highlighting the rationale behind transitioning to more contemporary and precise calculation techniques. **Results:** The analysis has revealed that the current calculation methods for catenary suspension do not accurately reflect real conditions, potentially leading to issues in design and operation. The research has demonstrated the need to improve the existing methods and adapt them to realities, with an emphasis on the introduction of modern approaches, such as mathematical modelling, which will significantly increase the accuracy and reliability of calculations. **Practical significance:** The disparities in the calculations emphasise the necessity to employ contemporary methodologies for determining the parameters of the catenary system, particularly in challenging circumstances. The finite element method is a highly versatile modelling technique. It can be used in models that will consider a range of factors impacting the operation of the catenary system, such as current, heating temperature and changes in wire tension. Design specialists can effectively utilise such models, including when transitioning to BIM technology and engaging in scientific activities.

Keywords: Catenary system, catenary suspension, carrier cable, contact wire, wire heating temperature, sag, carrier cable tension.

References

1. SP 119.13330.2024. *Zheleznnye dorogi kolei 1520 mm. SNiP 32-01-95. Ofitsial'noe izdanie* [SP 119.13330.2024. 1520 mm gauge railways. SNiP 32-01-95. Official publication]. Moscow: FGBU “RST” Publ., 2024. (In Russian)
2. *Pravila ustroystva elektroustanovok (PUE). Glava 1.2. Elektroshabzhenie i elektricheskie seti (Izdanie sed'moe)* [Electrical Installation Rules (PUE). Chapter 1.2. Power supply and electrical networks (Seventh edition)]. Moscow: NTs ENAS Publ., 2002. (In Russian)
3. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 27.11.2021 № 3363-r “O Transportnoy strategii Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda (s izmeneniyami na 6 noyabrya 2024 goda)”* [Order of the Government of the Russian Federation of November 27, 2021 № 3363-r “On the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035 (as amended on November 6, 2024)”]. Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii www.pravo.gov.ru [Official Internet portal of legal information www.pravo.gov.ru]. (In Russian)

4. GOST 32697—2019. *Trosy kontaktной seti zheleznoy dorogi nesushchie. Tekhnicheskie usloviya. Ofitsial'noe izdanie* [GOST 32697—2019. Load-bearing cables of the railway contact network. Specifications. Official publication]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian)
5. GOST R 55647—2018. *Provoda kontaktnye iz medi i ee splavov dlya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. Tekhnicheskie usloviya. Ofitsial'noe izdanie* [GOST R 55647—2018. Contact wires made of copper and its alloys for electrified railways. Specifications. Official publication]. Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian)
6. *Poruchenie Prezidenta Rossiyskoy Federatsii V. V. Putina ot 15.11.2017 № Pr-2320* [Instruction of the President of the Russian Federation V.V. Putin dated 15.11.2017 № Pr-2320]. (In Russian)
7. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 20.12.2022 № 2357. Ovnesenii izmeneniy v postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 05.03 2021 № 331* [Resolution of the Government of the Russian Federation dated 20.12.2022 № 2357. On Amendments to the Resolution of the Government of the Russian Federation dated 05.03 2021 № 331]. Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii www.pravo.gov.ru [Official Internet portal of legal information www.pravo.gov.ru]. (In Russian)
8. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 05.03.2021 № 331 "Ob ustanovlenii sluchaev, pri kotorykh zastroyshchikom, tekhnicheskim zakazchikom, litsom, obespechivayushchim ili osushchestvlyayushchim podgotovku obosnovaniya investitsiy, i (ili) litsom, otvetstvennym za ekspluatatsiyu ob"ekta kapital'nogo stroitel'stva, obespechivayutsya formirovaniye i vedeniye informatsionnoy modeli ob"ekta kapital'nogo stroitel'stva"* [Resolution of the Government of the Russian Federation of 05.03.2021 № 331 "On the establishment of cases in which the developer, technical customer, person providing or carrying out preparation of investment justification, and (or) the person responsible for the operation of a capital construction project ensure the formation and maintenance of an information model of a capital construction project"]. (In Russian)
9. STN TsE 141—99. *Normy proektirovaniya kontaktной seti* [STN CE 141-99. Standards for designing contact networks]. Moscow: TsE MPS RF Publ., 2001, 16 p. (In Russian)
10. Frayfel'd A. V., Brod G. N. *Proektirovaniye kontaktной seti, 3-e izd., pererab. i dop.* [Design of contact networks, 3rd ed., revised and enlarged]. Moscow: Transport Publ., 1991, 335 p. (In Russian)
11. Batrashov A. B. *Sovershenstvovanie elektroteplovyykh raschetov i kharakteristik kontaktной seti postoyannogo toka: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of electrothermal calculations and characteristics of a DC contact network: diss. ... Cand. Tech. sciences]. Ekaterinburg, 2019, 216 p. (In Russian)
12. Voronin A. V. *Tokoraspredeleniye mezhdu prodol'nymi provodami kontaktной seti i teplovoy raschet ee elementov: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Current distribution between longitudinal wires of the contact network and thermal calculation of its elements: diss. ... candidate of technical sciences]. Moscow, 1946, 143 p. (In Russian)
13. Rabotnov Yu. N. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1962, 456 p. (In Russian)
14. Kudryashov E. V. *Sovershenstvovanie mekhanicheskikh raschetov kontaktnykh podvesok na osnove staticheskikh konechno elementnykh modeley: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of mechanical calculations of contact suspensions based on static finite element models: diss. ... candidate of technical sciences]. St. Petersburg, 2010, 162 p. (In Russian)

Received: March 23, 2025

Accepted: May 18, 2025

Author's information:

Alexander V. AGUNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Department of "Electric Power Supply of Railways"; agunov@pgups.ru

Denis D. IVANOV — Postgraduate Student, Department of "Electric Power Supply of Railways"; denis_08a@mail.ru