

Моделирование переходных процессов в тяговой сети при проходе секционного изолятора

Е.В. Добрынин, М.А. Гаранин, Е.М. Плохов, А.В. Скольский✉

Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара, Российская Федерация
✉a.skolski@samgups.ru

Резюме

Возникновение отказов в контактной сети, связанных с повреждением секционных изоляторов, является недопустимым, но все же остается актуальной проблемой на данный момент. Повреждения изоляторов разделяются на механические и электрические. Первые появляются в результате удара токоприемника электроподвижного состава о тело секционного изолятора, вторые – вследствие коммутаций, формирующихся в контактной сети при проходе электроподвижного состава под секционным изолятором. В данной статье авторами рассматриваются переходные процессы, возникающие в тяговой сети постоянного тока при проходе токоприемника электроподвижного состава под секционным изолятором. Составлены схема замещения схемы питания участка тяговой сети и уравнения, описывающие фазу прохождения электровоза секционного изолятора. Построена математическая модель, учитывающая токовую нагрузку электроподвижного состава, скорость его движения и тяговую характеристику. Математическая модель состоит из двух частей. В первой электровоз рассматривается как источник тока, во второй модели описывается электромеханическая схема электроподвижного состава и его движение. Рассчитана энергия дуги, которая появляется на секционном изоляторе, определена ее зависимость от скорости электроподвижного состава и величины потребляемого тока. Предложен способ, позволяющий снизить негативное влияние переходных процессов на элементы контактной сети и, соответственно, повысить надежность и безопасность системы. Результаты исследования будут полезны при разработке систем автоматизированного управления движением электроподвижных составов при переходах между секциями контактной сети.

Ключевые слова

контактная сеть, секционный изолятор, токоприемник, переходные процессы, математическая модель, автоворедение, электроподвижной состав

Для цитирования

Моделирование переходных процессов в тяговой сети при проходе секционного изолятора / Е.В. Добрынин, М.А. Гаранин, Е.М. Плохов, А.В. Скольский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 10–19. DOI 10.26731/1813-9108.2025.3(87).10-19.

Информация о статье

поступила в редакцию: 30.05.2025 г.; поступила после рецензирования: 04.09.2025 г.; принята к публикации 05.09.2025 г.

Simulation of transients in a traction network during passage of a sectional insulator

Е.В. Dobrynin, М.А. Garanin, Е.М. Plokhov, А.В. Skol'skii✉

Volga State Transport University, Samara, the Russian Federation

✉a.skolski@samgups.ru

Abstract

Overhead contact network failures due to damaged sectional insulators are unacceptable, yet remain a pressing issue. Insulator damage is divided into mechanical and electrical. Mechanical failures occur when the rolling stock pantograph strikes the sectional insulator, while electrical failures result from switching events occurring in the overhead contact system when the rolling stock passes under the sectional insulator. In this article, the authors examine transient processes occurring in a DC traction network when the rolling stock pantograph passes under the sectional insulator. An equivalent circuit diagram for the power supply circuit of a section of the traction network and equations describing the phase of an electric locomotive's passage through the sectional insulator have been compiled. A mathematical model is constructed that takes into account the rolling stock current load, its speed, and traction characteristics. The mathematical model consists of two parts. The first considers the electric locomotive as a current source, while the second model describes the electromechanical circuit of the electric rolling stock and its motion. The arc energy generated on the section insulator is calculated, and its dependence on the rolling stock speed and the current consumption is determined. A method is proposed to reduce the negative impact of transient processes on overhead contact network components, thereby increasing the system's reliability and safety. The research results will be useful in developing automated control systems for electric rolling stock movements between overhead contact system sections.

Keywords

contact network, sectional insulator, pantograph, transients, mathematical model, auto guidance, electric rolling stock

For citation

Dobrynnin E.V., Garanin M.A., Plokhov E.M., Skol'skii A.V. Modelirovaniye perehodnykh processov v tyagovoi seti pri prokhode sektsionnogo izolyatora [Simulation of transients in a traction network during passage of a sectional insulator]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. № 3(87). Pp. 10–19. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87).10-19.

Article Info

Received: May 30, 2025; Revised: September 4, 2025; Accepted: September 5, 2025.

Введение

Работу электроподвижного состава (ЭПС) невозможно представить без контактной сети, основной частью которой является контактная подвеска. Главной задачей контактной подвески является обеспечение надежного и непрерывного токосъема с причинением минимального ущерба контактному проводу, токоприемнику электроподвижного состава и другим элементам инфраструктуры. Для качественного токосъема при движении поезда должны быть исключены все разрывы между токоприемником и контактным проводом, а также все удары токоприемника о контактную сеть, возникающие из-за разницы в эластичности в контактной подвеске. Помимо механических повреждений недопустимо электромагнитное влияние на сторонние устройства, возникающее вследствие появления электрической дуги при движении ЭПС [1, 2]. К факторам, ухудшающим качество токосъема, можно отне-

сти отрывы токоприемника от контактного провода из-за разницы в эластичности контактной подвески, колебания ЭПС при движении, возникающие вследствие неравномерной структуры железнодорожных путей, высокое значение потребляемого тока, использование нескольких токоприемников [3].

Анализ причин отказов контактной сети (рис. 1) показывает, что основными причинами нарушения нормальной работы являются обрывы и пережоги проводов контактной сети (24 % от количества отказов).

Можно отметить, что значительная часть отказов приходится на секционные изоляторы (СИ) – 20 в год [4]. Излом секционных изоляторов приводит к экономическим потерям, связанным с устранением повреждений и задержкой в движении поездов. Повреждение СИ влияет и на безопасность персонала при выполнении работ. Таким образом, проблема эксплуа-

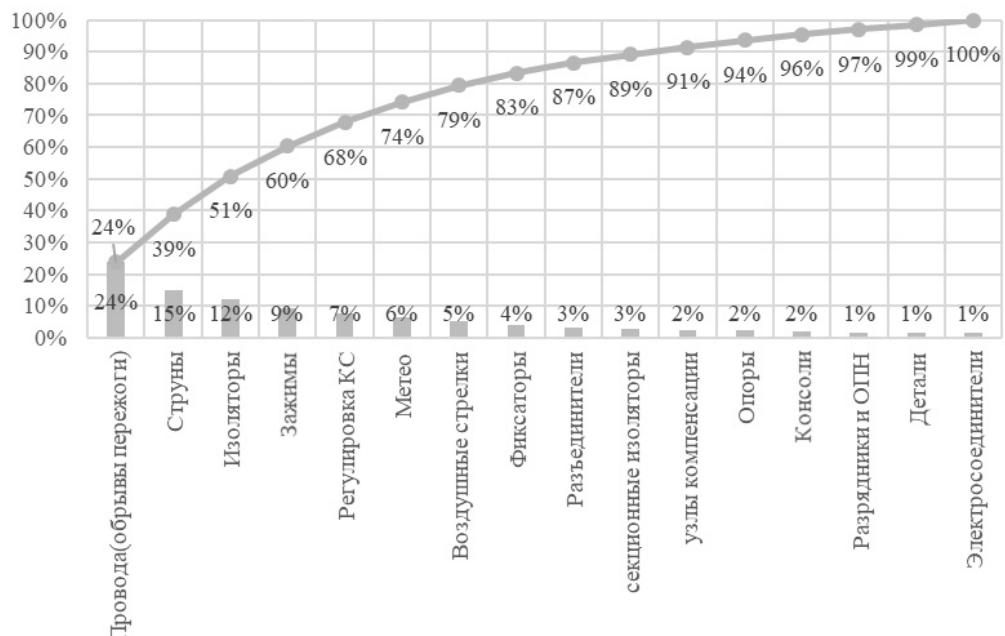


Рис. 1. Статистический анализ причин отказов контактной сети за 2022 г.

Fig. 1. Statistical analysis of the causes of contact network failures in 2022

тации СИ является актуальной. Приобретение новых СИ связано с большими капиталовложениями, поэтому перспективным направлением можно считать совершенствование правил прохода электроподвижного состава под СИ.

Для повышения надежности работы контактной сети, а также для удобства ее обслуживания контактная сеть разделяется на секции. Каждая секция имеет свой фидер, что позволяет выводить в ремонт отдельные участки, не нарушая работу других секций, а также передавать питание на секции от других тяговых подстанций. Электрическое разделение секций осуществляется за счет СИ, встраиваемого в контактную сеть. СИ состоит из изолирующей детали, присоединяемой к контактному проводу с помощью металлических оконцевателей, боковых скользунов и дугогасительного устройства, работающего по принципу удлинения дуги через дугогасительные рога (рис. 2). Помимо электрической прочности СИ должен обладать и механической прочностью, позволяющей выдерживать натяжение контактной подвески и нажатие токоприемника на СИ.

Отличительная особенность заключается в возможности прохождения ЭПС с поднятым токоприемником по СИ. При проходе по СИ полоз токоприемника ЭПС попадает на боковые скользуны. За счет смещенного расположения воздушных промежутков между скользунами токоприемник на протяжении всего СИ остается в соприкосновении минимум с одним из скользунов. Данная конструкция позволяет обеспечить

непрерывное электроснабжение ЭПС. Проход токоприемника по СИ должен обеспечиваться как при низких скоростях, так и при организации скоростного движения, для чего конструкцию его совершенствуют и максимально облегчают, сохранив прочностные характеристики [5–7].

При проходе токоприемника по СИ за счет разности в характеристиках жесткости контактного провода и СИ происходит удар токоприемника о СИ. Ударные воздействия на протяжении длительного времени приводят к ухудшению токосъема, а также к повреждениям СИ и токоприемника [8].

Помимо механических повреждений при проходе токоприемника могут возникать кратковременные электрические дуги разных мощностей. Дуги малых мощностей формируются при резком возрастании нагрузки на контактных вставках токоприемника, что происходит при уменьшении числа вставок, контактирующих со скользуном, вследствие попадания токоприемника в воздушный промежуток между скользунами. Дуги высоких мощностей возникают при замыкании токоприемником различных скользунов при проходе ЭПС на нейтральные вставки или отключенные секции контактной сети. Дуги высоких мощностей гасятся на рогах токоприемника. Электрические дуги появляются при условии работы ЭПС с полной нагрузкой [8]. Целью данной статьи является представление результатов факторного анализа негативного воздействия на СИ электрических процессов, возникающих при проходе его ЭПС.

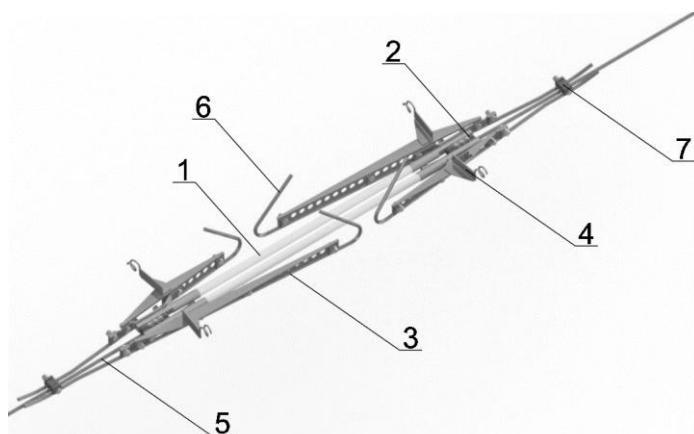


Рис. 2. Внешний вид секционного изолятора:
1 – изолирующие стержневые элементы; 2 – монтажная плата; 3 – боковой скользун; 4 – подвесной кронштейн; 5 – контактный провод; 6 – дугогасящие рога; 7 – зажимы

Fig. 2. External appearance of the sectional insulator:

1 – insulating rod elements; 2 – mounting board; 3 – side bearing;
4 – suspension bracket; 5 – contact wire; 6 – arc-extinguishing horns; 7 – clamps

Методика исследования

Рассмотрим модель прохождения СИ токоприемником электровоза под нагрузкой. СИ разделяет две секции контактной сети, запитанные от разных фидеров, из-за чего при подходе к нему электровоза под нагрузкой образуется разница потенциалов: напряжение в секции с нагруженной стороны, откуда движется ЭПС, оказывается ниже напряжения с противоположной стороны. Разница потенциалов определяется сопротивлением от шин питающей подстанции до места установки изолятора. При заходе на отключенную секцию разница потенциалов будет равна уровню напряжения в контактной сети, откуда движется ЭПС [9].

Схема питания составлена для участка контактной сети с двухсторонним питанием. СИ установлен в районе расположения тяговой подстанции, разделяя секции, запитанные от разных фидеров. Параметры контактной подвески включают активное и индуктивное сопротивление. На тяговой подстанции учитывается индуктивность реактора. Модель упрощена в части сглаживающего фильтра, а преобразователи, трансформаторы подстанции и система внешнего электроснабжения представлены одним элементом – внутренним активным сопротивлением.

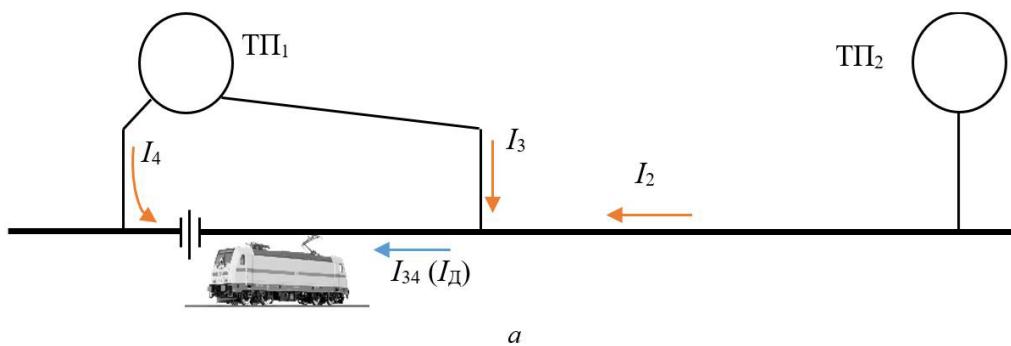
Конструкция СИ предполагает, что при проходе токоприемника происходит замыкание секций с последующим размыканием. Замыкание осуществляется через полоз токоприемника, контактирующего одновременно с двумя скользунами, подключенным к контактным проводам с двух сторон изолятора. Цепь разрывается, когда полоз токоприемника остается в контакте только с одним скользуном.

Процесс прохождения СИ можно разбить на три интервала: подход токоприемника; замыкание секций; разрыв цепи, соединяющей секции.

В момент подхода поезд движется, потребляя ток, который зависит от профиля, массы состава и управления его движением. Рекомендуется производить переход с одной секции на другую без нагрузки и с опущенным токоприемником, чтобы снизить вероятность его повреждения. Однако обратный подъем после выхода на следующую секцию может ухудшить ситуацию: при высоких скоростях движения или при сильном ветре обратный подъем токоприемника будет затруднен за счет аэродинамического воздействия.

При проходе изолятора без опускания токоприемника ток нагрузки может составлять от 0 до номинального тока ЭПС (2 500 А для грузового электровоза). Переход между секциями под нагрузкой будет сопровождать временный разрыв цепи, что повлечет образование дуги. Разрыв цепи выполняется за счет токоприемника, но при движении расстояние будет увеличиваться, пока токоприемник не перейдет на следующий скользун. Тогда дуга, образовавшаяся при разрыве контакта, перекинется между скользунами и посредством магнитного поля, протекающего по ней тока, растягивается на разрядных рогах.

Схема замещения участка тяговой сети с ЭПС представлена на рис. 3. $E_1, E_2, R_1, R_2, L_1, L_2$ – параметры тяговых подстанций 1 и 2: напряжение холостого хода, внутреннее сопротивление и индуктивность реакторов; R_3, L_3 – параметры линии питающей секцию, по которой движется ЭПС, до перехода; R_{34}, L_{34} – параметры контактной сети от точки присоединения питающей линии до СИ; R_{21}, L_{21} – параметры контактной сети, где движется ЭПС, от тяговой подстанции 2 до точки присоединения питающей линии; R_4, L_4 – параметры линии, питающей секцию, на которую переходит ЭПС, и участок контактной сети от точки присоединения питающей линии до СИ; R_d – сопротивление



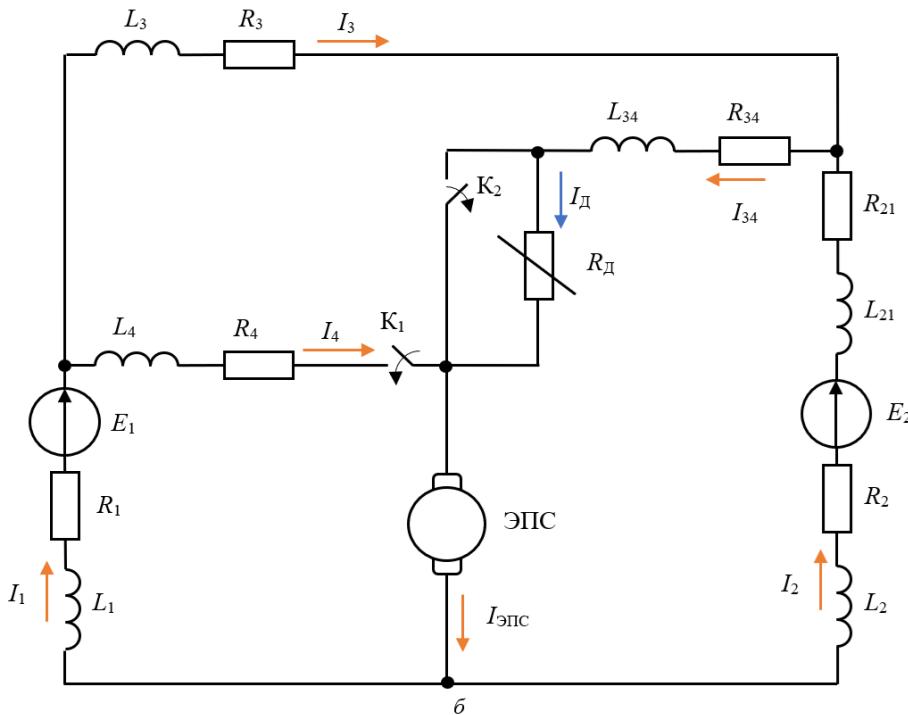


Рис. 3. Схема питания участка тяговой сети (а) и схема замещения (б)
Fig. 3. Power supply diagram of the traction network section (a) and replacement diagram (b)

ние дуги. Коммутация ключа K_2 приводит к разрыву цепи, содержащей индуктивность. Поскольку такой разрыв должен мгновенно изменить ток в цепи до нулевого значения, что произойти не может, то в области размыкающихся контактов резко повышается напряжение, происходит пробой и ток продолжает течь, но уже через канал образовавшейся элек трической дуги. Для этого в схему замещения введен элемент с переменным сопротивлением, имитирующим сопротивление дуги.

Электрическая дуга имеет нелинейное сопротивление, зависящее от ее длины и величины протекающего тока. В момент разрыва цепи длина дуги составляет 50 мм (расстояние между дугами разрядника на СИ для систем постоянного напряжения), но за счет электромагнитного воздействия она растягивается по рогам разрядника и цепь разрывается окончательно. Для описания вольтамперной характеристики дуги возможно использовать уравнение Г. Айртона:

$$U_D = \alpha + \beta \cdot l + \frac{\gamma + \delta \cdot l}{I_D},$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – постоянные, зависящие от материала дуг разрядника и параметров воздуха (состав, температура); l – длина дуги; I_D – ток дуги.

Дуга представляет собой токопроводящий канал, состоящий из плазмы и включающий процессы движения частиц как под действием электромагнитных полей (внешнего и внутреннего), так и механизму взаимодействия разогнанных частиц (температура в дуге достигает порядка 2 500–3 000 К). Сложность моделирования дуги заключается в учете ее инерционных составляющих – индуктивности и тепловых процессов [10, 11]. При быстрых изменениях тока (изменяется быстрее, чем тепловые процессы в дуге) эти две составляющие могут компенсировать действия друг друга, в этом случае сопротивление дуги будет преимущественно активным.

Если рассматривать упрощенную статическую характеристику дуги [12], то ее активное сопротивление можно задать как

$$R_D = \frac{\alpha + \beta \cdot l}{I_D} + \frac{\gamma + \delta \cdot l}{I_D^2}.$$

ЭПС в задачах по расчету нагрузки в системе тягового электроснабжения замещается источником тока, который потребляется электровозом. Но для задачи с переходными процессами ЭПС следует рассматривать как для полной схемы, учитывающей характеристики двигателей, их соединение и управление, а

также механическую составляющую движения поезда [13–15]. За счет большой массы состава его скорость при прохождении СИ не успеет измениться и, соответственно, напряжение на клеммах электродвигателя останется постоянным, в отличие от электрических процессов в тяговой сети [16].

Модель состоит из двух частей – системы дифференциальных уравнений, описывающих электрическую схему, где ЭПС представлен источником тока, и дифференциальных уравнений, описывающих электромеханическую схему ЭПС и его движение.

Последние два выражения в системе уравнений отражают функциональную связь параметров работы электровоза, получаемую по результатам экспериментов – зависимость тока ЭПС от скорости и напряжения на токоприемнике, а также управления (схема питания, ток возбуждения двигателя, сопротивление в цепи якоря) и зависимость силы тяги от тока ЭПС и работы системы управления:

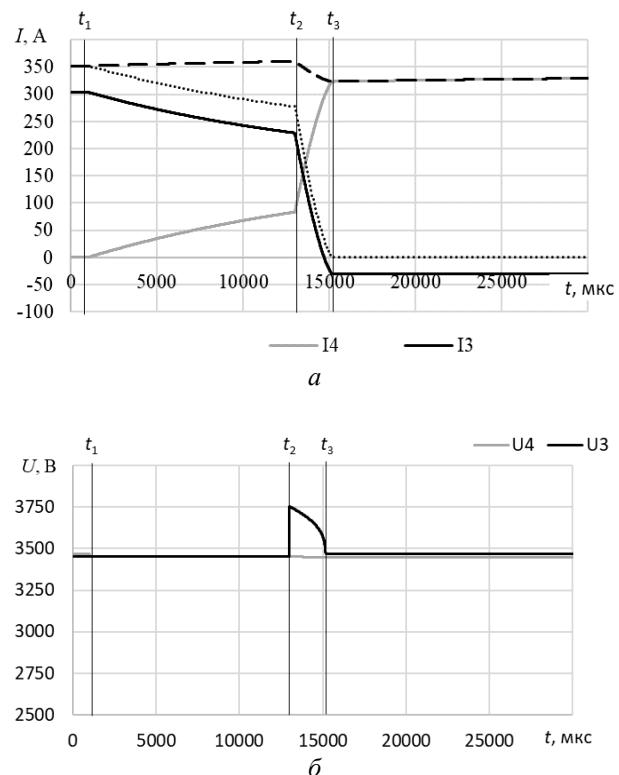
$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 + I_2 - I_5 = 0; \\ I_2 + I_3 - I_{34} = 0; \\ I_4 + I_{34} - I_{\text{ЭПС}} = 0; \\ I_3 \cdot R_3 + L_3 \frac{dI_3}{dt} + I_{34} \cdot R_{34} + L_{34} \frac{dI_{34}}{dt} - \\ - I_4 \cdot R_4 - L_4 \frac{dI_4}{dt} - R_{\text{д}} = 0; \\ I_1 \cdot R_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + I_3 \cdot R_3 + L_3 \frac{dI_3}{dt} - \\ - I_2 \cdot (R_2 + R_{21}) - (L_{21} + L_2) \frac{dI_2}{dt} = E_1 - E_2; \\ U_{\text{ЭПС}} = E_1 - I_1 \cdot R_1 - L_1 \frac{dI_1}{dt} - I_3 \cdot R_3 - L_3 \frac{dI_3}{dt} - \\ - I_{34} \cdot R_{34} - L_{34} \frac{dI_{34}}{dt} - R_{\text{д}}; \\ F_{\text{T}} - F_{\text{сопр}} - m \frac{dv}{dt} = 0; \\ I_{\text{ЭПС}} = f(U_{\text{ЭПС}}, v_{\text{ЭПС}}, I_{\text{в}}, R_{\text{ш}}); \\ F_{\text{T}} = f(I_{\text{ЭПС}}, I_{\text{в}}, R_{\text{ш}}). \end{array} \right.$$

Результаты исследования и их обсуждение

Время между двумя моментами коммутации зависит от скорости движения ЭПС и конструкции изолятора. Замыкание двух секций между собой приводит к распределению тока

нагрузки между двумя питающими линиями, подключенными к разным секциям контактной сети. Но с учетом индуктивности воздушных линий процесс этот занимает время. При малой скорости движения ток в момент замыкания может снизиться почти в 2 раза (зависит от соотношения сопротивления линий 3-й и 4-й), что создает более благоприятные условия для прохождения токоприемника с точки зрения образования дуги.

На рис. 4 приведены графики изменения токов и напряжений в секциях контактной сети, полученных в результате моделирования прохода токоприемника СИ при скорости 60 км/ч с токами 350 А и 1 600 А. Поскольку скорость прохода смоделирована одинаковая, то время между коммутациями (t_1 – замыкание, t_2 – разрыв цепи) совпадает, но из-за разницы токов нагрузки ЭПС продолжительность горения дуги различается. Это видно по графикам тока I_{34} и напряжения U_3 , приходящих со стороны секции, откуда движется ЭПС. В момент размыкания цепи напряжение резко поднимается, и между рогами разрядника образуется дуга. По мере ее растягивания и увеличения сопротивления ток снижается до нуля и напряжение становится равным напряжению в точке подключения питающей линии.



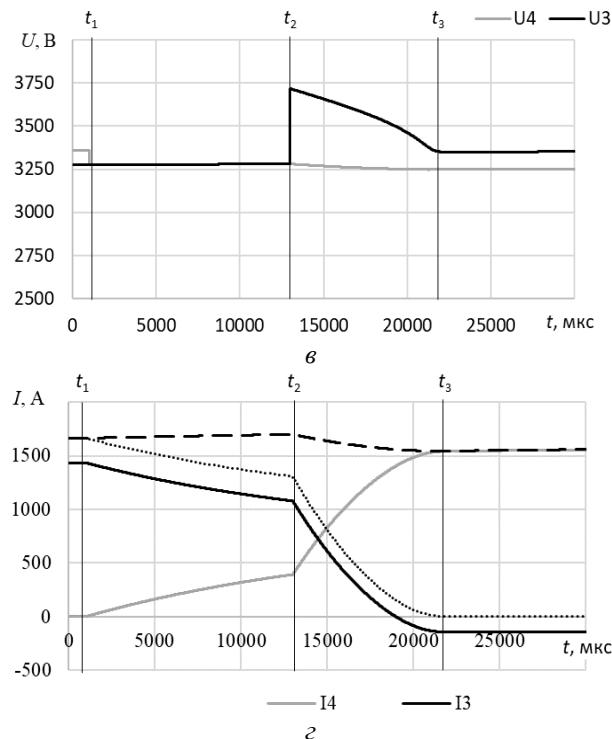


Рис. 4. Токи и напряжения в контактной сети при проходе секционного изолятора электроподвижного состава:
а и б – при токе 350 А; в и г – при токе 1 600 А

Fig. 4. Currents and voltages in the contact network during the passage of the sectional insulator of electric rolling stock:
a and б – at 350 A; в and г – at 1 600 A

Разрушительное действие дуги определяется количеством энергии, выделяемой в процессе ее горения. Она может быть определена по закону Джоуля – Ленца и зависит как от тока, так и от продолжительности его действия. Причем зависимость нелинейная, поскольку продолжительность протекания тока имеет прямую зависимость от его величины.

На рис. 5 представлены результаты моделирования энергии дуги, образуемой при проходе ЭПС через СИ с поднятым токоприемником под нагрузкой. С ростом тока нагрузки, как отмечено ранее, продолжительность горения дуги увеличивается, что сказывается и на возрастании выделяемой энергии. Скорость движения ЭПС влияет на момент разрыва цепи: чем меньше скорость, тем больше времени длится коммутационный процесс, вызванный замыканием секций, и тем меньше становится ток, который далее прерывается на изоляторе. Как следствие, с увеличением скорости движения ЭПС возрастает и количество энергии, выделяемой в дуге.

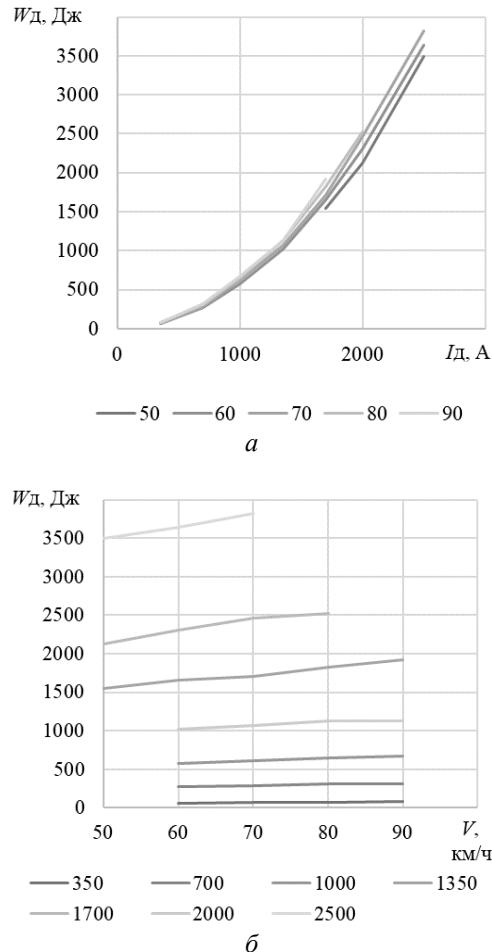


Рис. 5. Зависимость энергии дуги:
а – от тока; б – от скорости поезда

Fig. 5. Arc energy dependence:
a – from current; б – from train speed

Горение дуги на секционном изоляторе происходит не только на его разрядных рогах, но и в месте контакта с токоприемником. Это вызвано динамикой механического взаимодействия. Поскольку секционный изолятор является жесткой точкой контактной сети, то движение по нему может сопровождаться механическим ударом с последующим отрывом. Кроме того, наклон изолятора (следствие разрегулировки), локальные износы его скользунов и вставки токоприемника создают разрывы цепи, сопровождающиеся дугой. С продолжительностью эксплуатации такие локальные повреждения ухудшают процесс токосъема, ускоряя износ и приводя к поломке секционного разъединителя [2, 7].

Как следует из результатов моделирования и опыта эксплуатации, проход СИ ЭПС должен проходить без тока нагрузки. Это мож-

но сделать, отключив питание двигателей, перейдя в режим выбега. Однако при движении состава на подъем отключение питания и переход на выбег с дальнейшим включением режима тяги будут сопровождаться коммутациями, которые негативно скажутся на ресурсе электрооборудования электровоза. Более эффективно в данном случае использовать управление режимом тяги за счет тока возбуждения, как это реализовано в электровозах ЭС6 «Синара». Увеличение тока возбуждения позволяет перейти на тяговую характеристику, при которой движение будет происходить с минимальным током (рис. 6) [17].

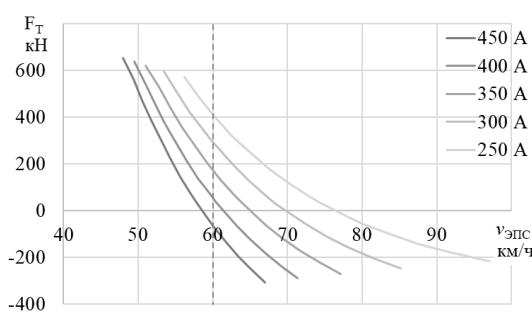


Рис. 6. Зависимости силы тяги электровоза от скорости движения электроподвижного состава при различных токах возбуждения
Fig. 6. Dependence of the traction force of an electric locomotive on the speed of the electric rolling stock at different ignition currents

В этот момент, когда сила тяги будет стремиться также к нулю, поезд пройдет участок по инерции. Затем ток возбуждения выводится на требуемый уровень и тяговые усилия восстанавливаются. В отличие от первого способа управления прохода СИ, резких скачков тягового тока в цепи не будет.

Заключение

Для реализации управления движения ЭПС таким способом потребуется ввести соответствующий алгоритм в автоматику локомотива. Включение автоматики может производиться вручную или по данным системы контроля движения, в которую необходимо будет внести информацию о точках на пути следования, где потребуется движение либо с опущенным токоприемником, либо с нулевым тяговым током. Как вариант, возможно использование датчиков в зоне СИ, совмещенных с датчиками напряжения. В таком случае будет контролироваться заезд на секцию, питание которой отключено. Учитывая развитие технологий автоматизации ведения поездов и концепции единого информационного пространства [18, 19], реализация предложенного способа прохода СИ может быть выполнена без конструктивных изменений существующих систем.

Список литературы

1. Сидоров О.А., Тарабин И.В., Дерболов Е.М. Совершенствование узлов скоростных контактных подвесок // Транспорт Урала. 2007. № 2 (13). С. 6–10.
2. Тарабин И.В. Повышение качества токосъема в местах расположения секционных изоляторов и фиксаторных узлов скоростных контактных подвесок : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2008. 16 с.
3. Сидоров О.А., Смердин А.Н., Голубков А.С. Экспериментальные исследования токосъемных устройств // Железнодорожный транспорт. 2015. № 11. С. 69–70.
4. Блинкова С.А., Скользкий А.В. Оценка остаточного ресурса изоляторов контактной сети // Вестник Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2024. № 1 (93). С. 169–175.
5. Облегченные секционные изоляторы // Железные дороги мира. 2006. № 10. С. 39–45.
6. Тарабин И.В., Титова Т.С., Терехин И.А. Совершенствование конструкции секционного изолятора // Электроника и электрооборудование транспорта. 2022. № 4-5. С. 2–6.
7. Серкин И.Ю. Разработка устройства прохода токоприемника по секционному изолятору // Наукосфера. 2024. № 6-1. С. 318–323.
8. Выявление причин излома контактного провода на элементах устройств секционирования с применением фрагментарного исследования и спектрального анализа / И.В. Тарабин, Д.В. Муравьев, И.А. Кремлев и др. // Бюл. результатов науч. исслед. 2024. № 2. С. 42–50.
9. Кузнецов С.М., Демиденко И.С., Сухарева Е.А. Исследование переходных процессов в тяговой сети при проезде электроподвижного состава через секционный изолятор и совершенствование методики настройки уставок цифровой защиты // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. 2013. № 6. С. 70–72.
10. Tarczynski W., Daszkiewicz T. Switching Arc Simulation // Przegląd Elektrotechniczny. 2012. Vol. 88. Iss. 7. P. 60–64.
11. Ruempler C., Zacharias A., Stammberger H. Low-voltage circuit breaker arc simulation including contact arm motion // The 27th International Conference on Electrical Contacts. Dresden, 2014. P. 1–5.
12. Доманов В.И., Карпухин К.Е., Сергеев А.В. Разработка математической модели электрической дуги дуговой стальплавильной печи постоянного тока // Вестн. Ульяновск. гос. техн. ун-та. 2014. № 1 (65). С. 60–62.
13. Литовченко В.В., Назаров Д.В., Шаров В.А. Имитационная модель электровоза постоянного тока с коллектор-

- ными тяговыми двигателями // Электротехника. 2019. № 9. С. 60–66.
14. Будаев А.А., Третьяков Е.А. Моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2025. Т. 22. № 1. С. 92–101.
15. Фролов Н.О., Кузнецов А.И. Моделирование режимов работы тяговых электрических двигателей постоянного тока // Транспорт Урала. 2019. № 4 (63). С. 64–68.
16. Кузнецов А.И., Фролов Н.О. Математическое описание переходных процессов в силовых цепях электровозов постоянного тока с различными типами тягового электропривода // Транспорт Урала. 2019. № 2 (61). С. 76–79.
17. Жигулин Н.А., Пудовиков О.Е. Математическая модель объекта управления и модуля задатчика напряжения СТПР-1000 для системы автоматического управления скоростью поезда с электровозом 2ЭС6 // Известия Транссиба. 2023. № 1 (53). С. 10–19.
18. Авдиенко Е.Г., Третьяков Е.А. Повышение эффективности использования системы автоворедения грузовых электровозов по данным текущих измерений бортовых систем и мгновенных тяговых расчетов // Известия Транссиба. 2022. № 2 (50). С. 55–65.
19. Третьяков Е.А., Денисов И.Н., Авдиенко Е.Г. Управление электротяговыми нагрузками на основе взаимодействия с системой электроснабжения железных дорог // Транспорт Урала. 2024. № 1 (80). С. 116–123.

References

1. Sidorov O.A., Tarabin I.V., Derbilov E.M. Sovershenstvovanie uzlov skorostnykh kontaktynkh podvesok [Improving the nodes of high-speed contact suspensions]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2007, no 2 (13), pp. 6–10.
2. Tarabin I.V. Povyshenie kachestva tokos”ema v mestakh rraspolozheniya sektsionnykh izolyatorov i fiksatornykh uzlov skorostnykh kontaktynkh podvesok [Improving the quality of current collection at the locations of sectional insulators and locking units of high-speed contact suspensions]. Ph.D.’s theses. Omsk, 2008. 16 p.
3. Sidorov O.A., Smerdin A.N., Golubkov A.S. Eksperimental’nye issledovaniya tokos”emnykh ustroistv [Experimental researchers of current collectors]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2015, no 11, pp. 69–70.
4. Blinkova S.A., Skol’skii A.V. Otsenka ostanochnogo resursa izolyatorov kontaktnej seti [Assessment of the remaining life of contact network insulators]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2024, no 1 (93), pp. 169–175.
5. Oblegchennye sektsionnyye izolyatory [Lightweight sectional insulators]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world], 2006, no 10, pp. 39–45.
6. Tarabin I.V., Titova T.S., Terekhin I.A. Sovershenstvovanie konstruktsii sektsionnogo izolyatora [Improvement of the sectional insulator design]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2022, no 4-5, pp. 2–6.
7. Serkin I.Yu. Razrabotka ustroistva prokhoda tokopriemnika po sektsionnomu izolyatoru [Development of a device for passing a pantograph through a sectional insulator]. *Naukosfera* [The science Sphere], 2024, no 6-1, pp. 318–323.
8. Tarabin I.V., Murav’ev D.V., Kremlev I.A., Terekhin I.A. Vyyavlenie prichin izloma kontaktogo provoda na elementakh ustroistv sektsionirovaniya s primeneniem fraktograficheskogo issledovaniya i spektral’nogo analiza [Identification of the causes of contact wire breakage on the elements of sectioning devices using fractographic research and spectral analysis], *Byulleten’ rezul’tatov nauchnykh issledovanij* [Bulletin of scientific research results], 2024, no 2, pp. 42–50.
9. Kuznetsov S.M., Demidenko I.S., Sukhareva E.A. Issledovanie perekhodnykh protsessov v tyagovoi seti pri proezde elektropodvizhnogo sostava cherez sektsionnyi izolyator i sovershenstvovanie metodiki nastroiki ustavok tsifrovoi zashchity [Investigation of transients in the traction network during the passage of an electric rolling stock through a sectional insulator and improvement of the methodology for setting digital protection settings]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* [Bulletins of higher educational organizations. Electromechanics], 2013, no 6, pp. 70–72.
10. Tarczynski W., Daskiewicz T. Switching Arc Simulation // *Przeglad Elektrotechniczny*, 2012, Vol. 88, iss. 7, pp. 60–64.
11. Ruempler C., Zacharias A., Stammberger H. Low-voltage Circuit Breaker Arc Simulation Including Contact Arm Motion // The 27th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2014). Dresden, 2014.
12. Domanov V.I., Karpuhin K.E., Sergeev A.V. Razrabotka matematicheskoi modeli elektricheskoi dugi dugovoi staleplavil’noi pechi postoyannogo toka [Development of a mathematical model of the electric arc of a direct current arc steelmaking furnace]. *Vestnik Ul’yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University], 2014, no 1 (65), pp. 60–62.
13. Litovchenko V.V., Nazarov D.V., Sharov V.A. Imitatsionnaya model’ elektrovoza postoyannogo toka s kollektornymi tyagovymi dvigateleyami [Simulation model of a DC electric locomotive with collector traction motors]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2019, no. 9, pp. 60–66.
14. Budaev A.A., Tret’jakov E.A. Modelirovaniye elektricheskoi chasti gruzovogo elektrovoza na osnove tekhnologii «Tsifrovoi dvoinik» [Simulation of the electrical part of an electric freight locomotive based on the Digital Twin technology]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Saint Petersburg Transport University], 2025, Vol. 22, no 1, pp. 92–101.
15. Frolov N.O., Kuznetsov A.I. Modelirovaniye rezhimov raboty tyagovykh elektricheskikh dvigatelei postoyannogo toka [Simulation of operating modes of DC traction electric motors]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2019, no 4 (63), pp. 64–68.
16. Kuznetsov A.I., Frolov N.O. Matematicheskoe opisanie perekhodnykh protsessov v silovykh tsepyakh elektrovozov postoyannogo toka s razlichnymi tipami tyagovogo elektroprivoda [Mathematical description of transients in power circuits of DC electric locomotives with various types of traction electric drive]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2019, no 2 (61), pp. 76–79.
17. Zhigulin N.A., Pudovikov O.E. Matematicheskaya model’ ob’ekta upravleniya i modulya zadatchika napryazheniya STPR-1000 dlya sistemy avtomaticheskogo upravleniya skorost’yu poezda s elektrovozom 2ES6 [Mathematical model of the

control object and the STPR-1000 voltage sensor module for the automatic speed control system of a train with an electric locomotive 2ES6], *Izvestiya Transsib* [Bulletins of Transsib], 2023, no 1 (53), pp. 10–19.

18. Avdiенко E.G., Tret'yakov E.A. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya sistemy avtovedeniya gruzovykh elektrovozov po dannym tekushchikh izmerenii bortovykh sistem i mgnovennykh tyagovykh raschetov [Improving the efficiency of using the truck guidance system for electric locomotives based on current measurements of on-board systems and instant traction calculations]. *Izvestiya Transsib* [Bulletins of Transsib], 2022, no 2 (50), pp. 55–65.

19. Tret'yakov E.A., Denisov I.N., Avdienko E.G. Upravlenie elektrotyagovymi nagruzkami na osnove vzaimodeistviya s sistemoi elektronsnabzheniya zheleznykh dorog [Management of electric traction loads based on interaction with the railway power supply system]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2024, no 1 (80), pp. 116–123.

Информация об авторах

Добрынин Евгений Викторович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроснабжения железнодорожного транспорта, Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара; e-mail: dobrinin@samgups.ru.

Гаранин Максим Алексеевич, доктор экономических наук, доцент, ректор, Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара; e-mail: garanin@samgups.ru.

Плохов Евгений Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры тягового подвижного состава, Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара; e-mail: e.plokhov@samgups.ru.

Скольский Андрей Владимирович, аспирант кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта, Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара, e-mail: a.skolski@samgups.ru.

Information about the authors

Evgenii V. Dobrynin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Power Supply of Railway Transport, Volga State Transport University, Samara, e-mail: dobrinin@samgups.ru.

Maksim A. Garanin, Doctor of Economic Science, Associate Professor, Rector, Volga State Transport University, Samara, e-mail: garanin@samgups.ru.

Evgenii M. Plokhov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Traction Rolling Stock, Volga State Transport University, Samara, e-mail: e.plokhov@samgups.ru.

Andrei V. Skol'skii, Ph.D. Student of the Department of Power Supply of Railway Transport, Volga State Transport University, Samara, e-mail: a.skolski@samgups.ru.