

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

УДК 629.423.33:629.423.2  
doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-6

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ТОКОПРИЕМНИКА МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

А. В. Волков<sup>1</sup>, С. Н. Ивлиев<sup>2</sup>, П. В. Венчаков<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет имени Н. П. Огарева, Саранск, Россия  
<sup>1</sup>elsoldador@rambler.ru, <sup>2</sup>ivliev\_sn@mail.ru, <sup>3</sup>pvenchakov96@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Железнодорожный транспорт в силу больших объемов перевозок должен своевременно и качественно обслуживаться. Одной из главных проблем в процессе перевозок является возникновение неконтролируемой электрической дуги между токоприемником и контактным проводом. Описывается важность проблемы исследования переходных процессов при возникновении электрической дуги в сетях постоянного и переменного тока. Целью исследования является изучение временных переходных процессов параметров электрической дуги и выявление закономерных особенностей ее возникновения. *Материалы и методы.* Рассмотрена математическая модель электрической дуги тока «токоприемник – контактный провод» с применением пакета Simulink Matlab. *Результаты и выводы.* Возникновение электрической дуги сопровождается переходными процессами тока, значение которого может достигать нескольких сотен ампер, и эти токи совместно с током, потребляемым нагрузкой, могут повредить контактный провод, пережигая его. Анализируя характер переходного процесса, можно предусмотреть возможность предсказывать износ полоза токоприемника на ранних стадиях, что позволит избежать негативных последствий.

**Ключевые слова:** токоприемник, электрическая дуга, постоянный ток, переменный ток, РЖД, переходной процесс, износ, выжигание, контактный провод, токовая вставка

**Для цитирования:** Волков А. В., Ивлиев С. Н., Венчаков П. В. Исследование переходных процессов токоприемника моторвагонного подвижного состава // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 50–55. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-6

## STUDY OF TRANSIENT PROCESSES OF THE CURRENT COLLECTOR OF MOTOR-CAR ROLLING STOCK

A.V. Volkov<sup>1</sup>, S.N. Ivliev<sup>2</sup>, P.V. Venchakov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia  
<sup>1</sup>elsoldador@rambler.ru, <sup>2</sup>ivliev\_sn@mail.ru, <sup>3</sup>pvenchakov96@gmail.com

**Abstract.** *Background.* Railway transport, due to large volumes of traffic, must be serviced in a timely and high-quality manner. One of the main problems in the transportation process is the occurrence of an uncontrolled electric arc between the current collector and the contact wire. The article describes the importance of the problem of studying transients in

the occurrence of an electric arc in DC and AC networks. The purpose of the study is to study the temporary transients of the parameters of the electric arc and to identify the natural features of its occurrence. *Materials and methods.* A mathematical model of the electric arc of the current "current collector – contact wire" using the Simulink Matlab package is considered. *Results and conclusions.* The occurrence of an electric arc is accompanied by transient current processes, the value of which can reach several hundred amperes, and these currents, together with the current consumed by the load, can damage the contact wire, burning it out. By analyzing the nature of the transition process, it is possible to predict the wear of the pantograph slide in the early stages, which will avoid negative consequences.

**Keywords:** current collector, electric arc, direct current, alternating current, RZD, transient process, wear, burning out, contact wire, current insert

**For citation:** Volkov A.V., Ivliev S.N., Venchakov P.V. Study of transient processes of the current collector of motor-car rolling stock. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(4): 50–55. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-6

Железнодорожный транспорт является основной транспортной системой России. Согласно официальным данным компании ОАО «РЖД» за 2020 – начало 2023 г. электровозы составляют более половины численности всех тяговых машин [1], поэтому обеспечение условий для стабильного функционирования железнодорожных путей требует непрерывного контроля и технического обслуживания.

Электровоз – это локомотив на основе тяговых электродвигателей, который питается от распределенных электросистем переменного или постоянного тока. Электровоз получает энергию от контактной сети через токоприемник, который установлен на крыше и скользит по контактному проводу при движении железнодорожного состава.

Одна из актуальных проблем – определение и в будущем прогнозирование износа токопроводящих частей системы «контактный провод – токоприемник». Проблема объясняется тем, что во время движения сложно точно определить степень износа токопроводящей вставки пантографа, а ее замена возможна только в специализированных пунктах технического обслуживания (ПТО). ПТО в свою очередь располагаются не на каждом пути следования подвижного состава, а плановый осмотр токоприемников не всегда является достаточным основанием для уверенности в том, что в пути следования не возникнет нештатных ситуаций. Указанная выше проблема актуальна, так как если изучить характер переходных процессов, то можно более точно предсказывать, когда нужно менять накладку токоприемника, чтобы избежать его перегорания в пути следования подвижного состава и дальнейших возможных негативных последствий.

Наряду с износом угольных накладок пантографа в процессе эксплуатации контактный провод также может быть поврежден в результате возникновения электрической дуги. Электрическая дуга представляет собой процесс прохождения тока в среде ионизированных газов при термическом характере их ионизации [2]. Составляющие компоненты электрической дуги [2] представлены на рис. 1.

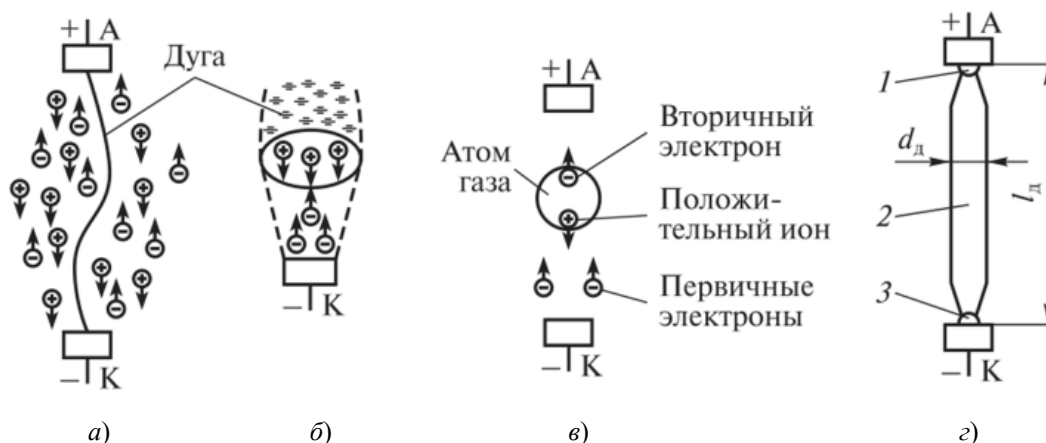


Рис. 1. Составляющие компоненты электрической дуги: а – направление движения электронов и ионов в дуге; б – возникновение автоэлектронной эмиссии из катода; в – возникновение ударной ионизации атомов газа в пространстве между контактами; г – состав электрической дуги

В электрической дуге постоянного тока в установившемся режиме определяющей является термическая ионизация. В дуге переменного тока при переходе тока через нуль существенную роль играет ударная ионизация, а в течение остального времени горения дуги – термическая ионизация [2, 3].

Выделим две опасных ситуации, которые могут возникнуть вследствие электрической дуги: прогорание контактного провода и прогорание контактной части токоприемника.

Анализ случаев пережогов контактных проводов на железных дорогах постоянного тока показал, что они происходят как при открытой электрической дуге, так и при контакте между ползцом и проводом [3, 4]. Дуга появляется:

- при заворачивании ползцом пантографа на воздушных промежутках и секционных изоляторах контактных проводов, находящихся под большой разностью потенциалов;
- при опускании пантографа под нагрузкой;
- при соприкосновении контактного провода с заземленными предметами;
- при гололеде на контактном проводе и т.д.

Пережоги проводов при контакте между ползцом пантографа и проводом происходят обычно при коротких замыканиях на электроподвижном составе, вследствие чего возникает электрическая дуга. В самом худшем случае возможно повреждение контактного провода и/или частей токоприемника в месте трения.

На рис. 2 и 3 представлены основные виды износа ползца токоприемника (все снимки сделаны под микроскопом с увеличением  $X10$  для более детального изучения).

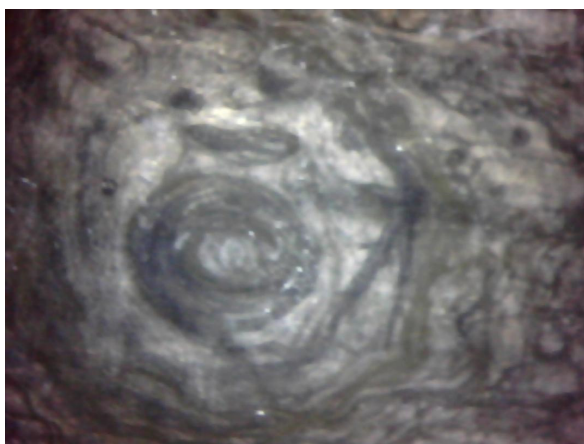


Рис. 2. Результат возникновения электрического пробоя в графитовой вставке в результате возникновения электрической дуги (верхняя сторона графитовой вставки)

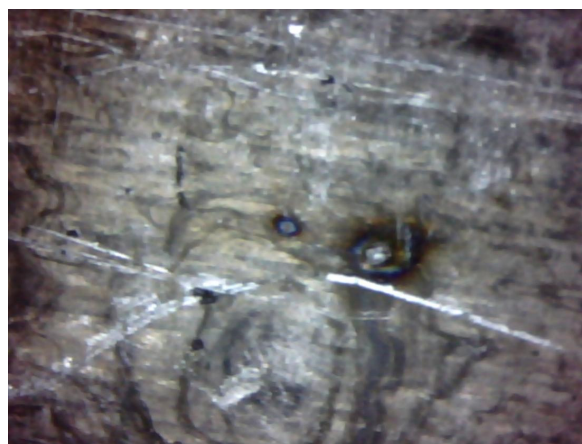


Рис. 3. Результат возникновения электрического пробоя в графитовой вставке в результате возникновения электрической дуги (нижняя сторона графитовой вставки)

Исследование переходных процессов токоприемника проводилось в среде MATLAB. Для упрощения математического моделирования представим токоприемник в виде схемы замещения, представленной на рис. 4. Система представляет из себя источник постоянного напряжения  $U_g$ , активное сопротивление  $R$  токоприемника, а точнее графитовой вставки ползца и индуктивность  $L$  токоприемника. Напряжение возникновения дуги представлено в виде  $U_{arc}$  – это напряжение возникает в случае, когда происходит пробой между ползцом и контактным проводом в процессе движения моторвагонного подвижного состава.

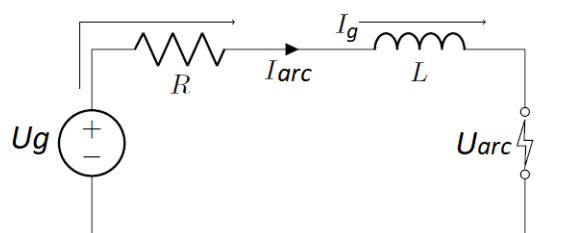


Рис. 4. Схема замещения тока приемника

В начальный момент времени пробой не возникает, так  $U_{arc} = 0$ , при этом в цепи протекает ток равный току нагрузки  $I_g$ , искровой зазор минимален, так как он представляет из себя процесс скольжения полоза по контактному проводу. В момент, когда контакт между проводом и ползком начинает пропадать, увеличивается искровой зазор и возникает пробой, напряжение  $V_{arc}$  начинает расти до того момента, пока напряжение  $V_{arc}$  не достигнет величины, определяемой следующим выражением:

$$U_g = U_R + U_{arc} + L \frac{di}{dt}. \quad (1)$$

При этом следует учитывать тот факт, что ток электрической дуги  $I_{arc}$  будет расти, пока не выполнится следующее выражение:

$$I_g = -I_{arc} + \int_{t_0}^t \frac{U(t)}{L} dt. \quad (2)$$

Также следует отметить, что величина тока, протекающего в нагрузке и ток образования электрической дуги зависят в первую очередь от того, как будет меняться искровой зазор, при этом может получиться так, что соотношения тока, показанного в выражении (2), а также соотношение значений напряжений в выражении (1) будут меняться скачкообразно.

Необходимо отметить, что в процессе образования электрической дуги ток будет ограничен лишь сопротивлением  $R$ , а изменение напряжения электрической дуги  $U_{arc}$  будет определяться величиной индуктивности  $L$  в начальный момент времени, когда дуга зажжется, то величина индуктивности  $L$  вообще не окажет никакого влияния на величину тока, так как активным сопротивлением ее можно пренебречь, оно очень мало по сравнению с величиной  $R$ .

На рис. 5 представлены результаты моделирования процессов образования электрической дуги в процессе движения моторвагонного подвижного состава.

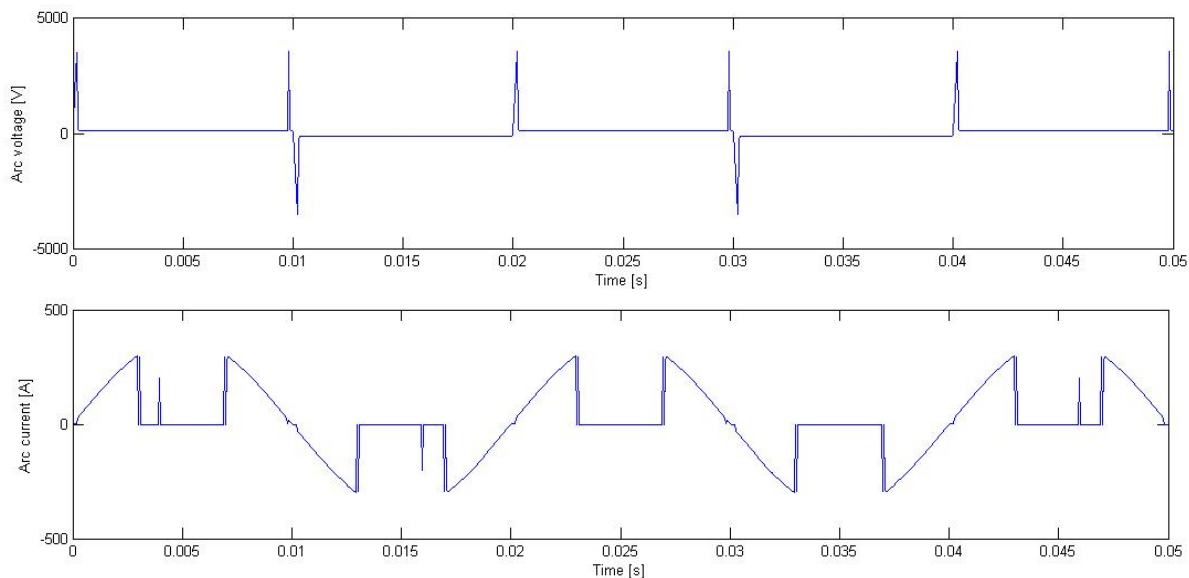


Рис. 5. Результаты моделирования

Из рис. 5 видно, что в моменты возникновения электрической дуги возникают переходные процессы как в токе, так и в напряжении. Нулевое значение тока на графике означает нормальный режим работы токоприемника, а импульсы, указанные на графике, показывают характер переходного процесса во время возникновения электрической дуги в ходе движения моторвагонного подвижного состава.

### Заключение

Возникновение электрической дуги сопровождается переходными процессами тока, значение которого может достигать нескольких сотен ампер и эти токи совместно с током, потребляемым нагрузкой, могут повредить контактный провод, пережигая его. Анализируя характер

переходного процесса, можно предусмотреть возможность предсказывать износ полоза токоприемника на ранних стадиях, что позволит избежать негативных последствий.

Величина ошибки моделирования составляет порядка 8 %, что является приемлемым значением для рассмотренной выше математической модели переходного процесса.

#### Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации № 887-р от 17 июня 2008 г.
2. Сугак Е. В. Прикладная теория надежности. Ч. 1. Основы теории. 2-е изд., стер. СПб. : Лань, 2023. 276 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/318461> (дата обращения: 01.09.2023).
3. Ишков А. С. Система поддержки принятия решения для оценивания показателей надежности изделий электронной техники // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 16–23. doi: 10.21685/2307-5538-2022-4-2
4. Чередов А. И., Щелканов А. В. Физические методы неразрушающего контроля : учеб. пособие. Омск : ОмГТУ, 2022. 136 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/343661> (дата обращения: 01.09.2023).

#### References

1. Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 : Decree of the Government of the Russian Federation No. 887-r dated June 17, 2008. (In Russ.)
2. Sugak E.V. *Prikladnaya teoriya nadezhnosti. Ch. 1. Osnovy teorii. 2-e izd., ster. = Applied theory of reliability. Part 1. Fundamentals of theory. 2nd ed., ster.* Saint Petersburg: Lan', 2023:276. (In Russ.). Available at: <https://e.lanbook.com/book/318461> (accessed 01.09.2023).
3. Ishkov A.S. Decision support system for evaluating reliability indicators of electronic equipment products. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4): 16–23. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-4-2
4. Cheredov A.I., Shchelkanov A.V. *Fizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya: ucheb. posobie = Physical methods of non-destructive testing : textbook.* Omsk: OmGTU, 2022:136. (In Russ.). Available at: <https://e.lanbook.com/book/343661> (accessed 01.09.2023).

#### Информация об авторах / Information about the authors

##### Антон Владимирович Волков

кандидат технических наук,  
доцент кафедры информационной  
безопасности и сервиса,  
Национальный исследовательский  
Мордовский государственный  
университет имени Н. П. Огарева  
(Россия, г. Саранск, ул. Б. Хмельницкого, 39)  
E-mail: [elsoldador@rambler.ru](mailto:elsoldador@rambler.ru)

##### Anton V. Volkov

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of information security and service,  
National Research Ogarev Mordovia State University  
(39 B. Khmelnitsky street, Saransk, Russia)

##### Сергей Николаевич Ивлиев

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой информационной  
безопасности и сервиса,  
Национальный исследовательский  
Мордовский государственный  
университет имени Н. П. Огарева  
(Россия, г. Саранск, ул. Б. Хмельницкого, 39)  
E-mail: [ivliev\\_sn@mail.ru](mailto:ivliev_sn@mail.ru)

##### Sergey N. Ivliev

Candidate of technical sciences, associate professor,  
head of the sub-department  
of information security and service,  
National Research Ogarev Mordovia State University  
(39 B. Khmelnitsky street, Saransk, Russia)

##### Павел Вячеславович Венчаков

аспирант,  
Национальный исследовательский  
Мордовский государственный  
университет имени Н. П. Огарева  
(Россия, г. Саранск, ул. Б. Хмельницкого, 39)  
E-mail: [pvenchakov96@gmail.com](mailto:pvenchakov96@gmail.com)

##### Pavel V. Venchakov

Postgraduate student,  
National Research Ogarev Mordovia State University  
(39 B. Khmelnitsky street, Saransk, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 01.09.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 02.10.2023**

**Принята к публикации/Accepted 01.11.2023**