

УДК 621.316.925

Выявление дуговых процессов в контактной сети городского электротранспорта методами осциллографического мониторинга и спектральной обработки

**А. В. Агунов¹, А. В. Щербань², Д. Д. Архипов², А. А. Кузнецов³,
К. Д. Симоненко¹**

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² СПб ГУП «Горэлектротранс», Россия, 196105, Санкт-Петербург, Сызранская ул., 15.

³ ООО «Институт проблем энергетики», Россия, 196608, Санкт-Петербург, вн. тер. г. Пушкин, бульвар Алексея Толстого, 9, литера А, кв. 94.

Для цитирования: Агунов А. В., Щербань А. В., Архипов Д. Д., Кузнецов А. А., Симоненко К. Д. Выявление дуговых процессов в контактной сети городского электротранспорта методами осциллографического мониторинга и спектральной обработки // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 65–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-65-72

Аннотация

Цель: исследование направлено на разработку эффективных методов выявления дуговых процессов в контактной сети постоянного тока наземного городского электрического транспорта, негативно влияющих на работоспособность системы электроснабжения. **Методы:** использованы данные осциллографирования мгновенных значений токов и напряжений, регистрируемые устройствами аварийных событий. Алгоритмы спектрального анализа и статистической обработки применены для анализа полученных осциллограмм, включая искусственное моделирование дуговых повреждений и последующую проверку данных с реальных тяговых подстанций. **Результаты:** разработаны алгоритмы выявления дуговых процессов, подтвержденные экспериментально и путем анализа массивов данных, зарегистрированных на трех подстанциях. Установлены оптимальные уровни уставок для регистрации дуговых событий (среднее значение — около 20 А), выявлены особенности чувствительности алгоритмов и необходимость дальнейшей калибровки параметров. **Практическая значимость:** полученные результаты позволят повысить надежность системы электроснабжения городского электротранспорта за счет своевременного выявления и устранения негативных воздействий дуговых процессов. Предложенный метод может быть внедрен в существующие системы мониторинга и диагностики, обеспечивая снижение рисков выхода из строя электрооборудования и повышение общей эффективности функционирования транспортных сетей.

Ключевые слова: городской электрический транспорт, защита контактной сети, короткое замыкание, рекуперация энергии, мониторинг

В настоящей публикации продолжены исследования возможных методов выявления процессов, предшествующих возникновению электрической дуги с малыми токами короткого замыкания в контактной сети наземного городского электрического транспорта, первые результаты которых были представлены в предыдущих публикациях. Настоящий этап работы характеризуется систематизированным подходом с разделением исследования на последовательные этапы [1–3].

Методология выявления дуговых процессов в контактной сети постоянного тока основана на использовании данных осциллографирования мгновенных

значений токов и напряжений, которые могут быть получены от регистраторов аварийных событий, интегрированных в систему электроснабжения. Использование таких устройств обеспечивает регистрацию осциллограмм с высокой частотой дискретизации и значительно расширяет объем получаемой информации о режимах работы сети и отдельных нагрузок. Анализ данной информации и ее статистическая обработка дают возможность контроля возникающих в сети переходных процессов и могут быть использованы для решения ряда важных практических задач.

Одним из наиболее перспективных направлений анализа осциллограмм режимных параметров в контактной сети постоянного тока представляется определение факта возникновения дугового повреждения и выявление фидера, в котором оно возникло [4]. Такие повреждения являются относительно кратковременными, происходят через высокие сопротивления и сопровождаются токами с величинами, варьирующимися в широком диапазоне значений в зависимости от удаленности точки повреждения от центра питания и сопротивления дуги, в связи с чем их выявление представляет значительную сложность.

Для разработки и апробации алгоритмов, обеспечивающих выявление дуговых процессов в контактных сетях постоянного тока, были использованы результаты осциллографирования процессов при искусственно смоделированных дуговых повреждениях, выполненных ночью на ТПС-27. Дуга здесь имитировалась в фидере «Комаровский» с помощью сварочного электрода, включенного последовательно с резистором.

Измерения проводились в следующих режимах:

- длительная дуга на участке контактной сети, ближайшем к месту подключения фидера (три опыта);
- длительная дуга на конечном участке контактной сети (три опыта);
- длительная дуга одновременно с проходом трамвая с включенным двигателем (два опыта);
- прохождение трамвая через секционный изолятор с включенным двигателем и отключенным двигателем (с рекуперацией) [5] в прямом и обратном направлении (всего шесть опытов).

При выполнении опытов осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений фидеров, получающих питание от ТПС-27, записывались регистратором аварийных событий в условиях ручного запуска по телефонной команде.

Анализ записанных осциллограмм выполнялся с использованием специально разработанного программного обеспечения, выполняющего обработку мгновенных значений контролируемых напряжений и токов с использованием адаптивных алгоритмов спектрального анализа и статистической обработки.

Краткие результаты выполненных опытов с осциллограммами мгновенных значений напряжений на шинах питающей подстанции и тока в фидере, в котором

имитировалось повреждение, можно видеть на рис. 1–3. В каждом случае показан интервал времени, на котором, согласно принципам работы алгоритма, фиксировалось существование дугового процесса.

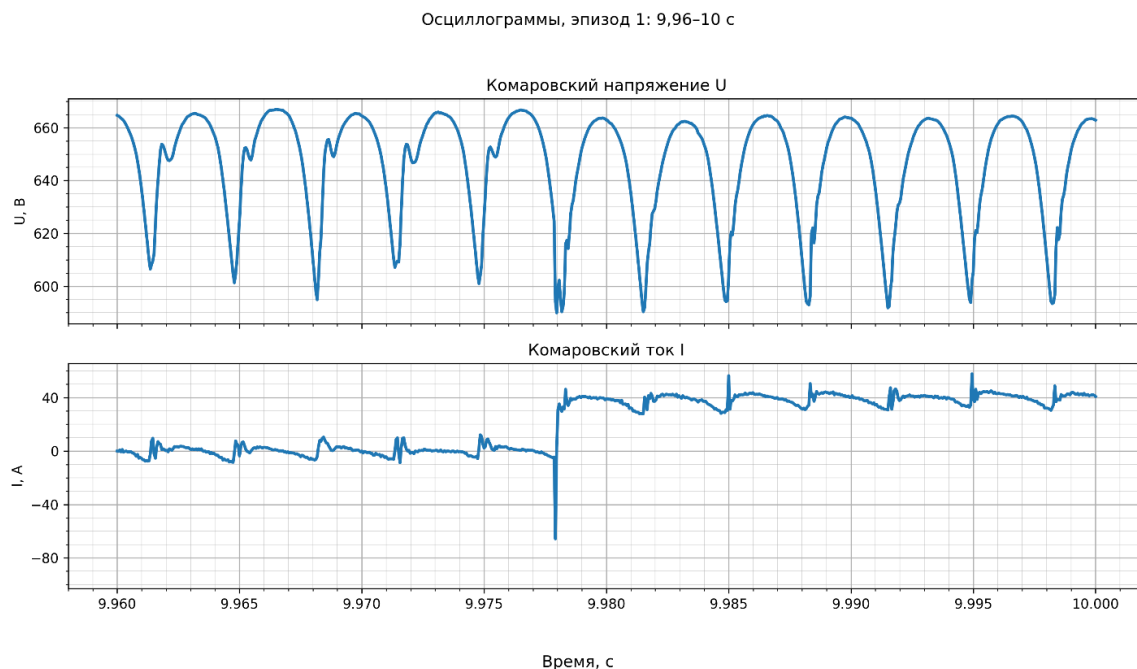


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения фидера «Комаровский» ТПС27 в момент зажигания дуги в начале линии

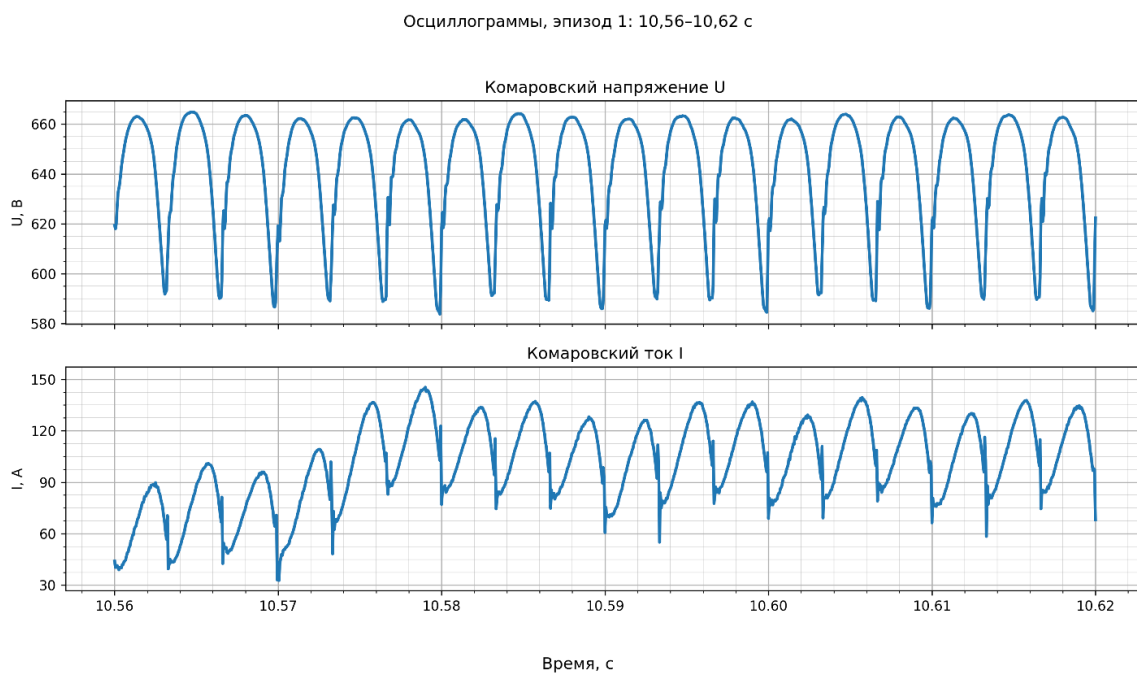


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения фидера «Комаровский» ТПС27 в момент зажигания дуги в конце линии

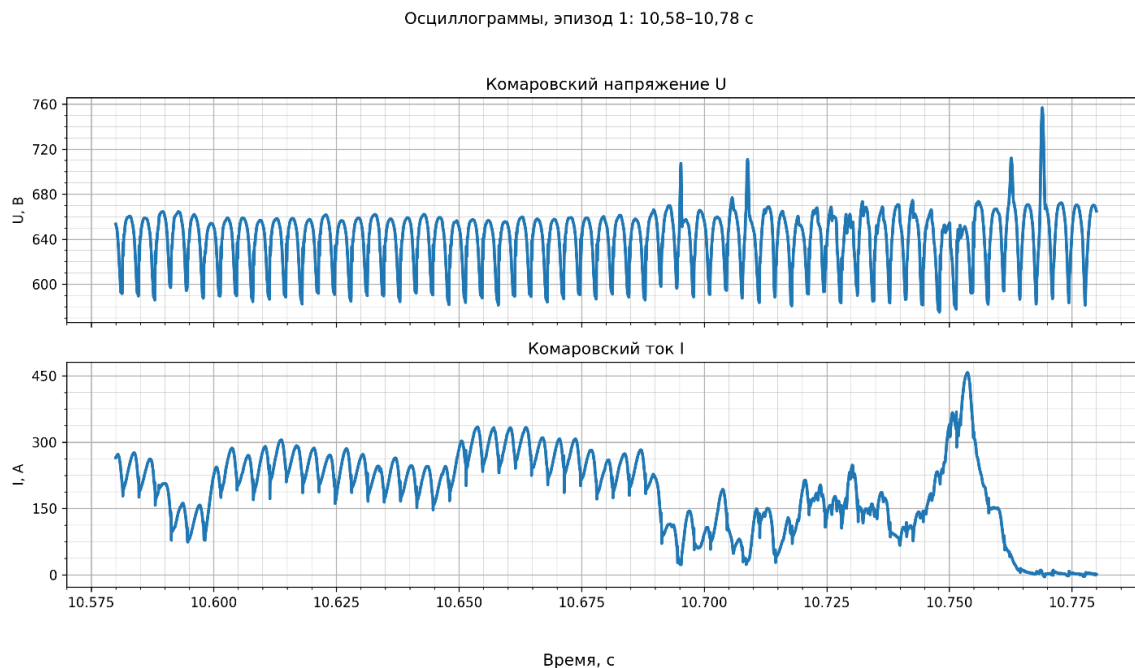


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения фидера «Комаровский» ТПС27 для случая пересечки обратной без тока

В ходе выполнения исследований, помимо анализа результатов искусственного моделирования дуговых процессов [6], была проведена обработка значительного объема осциллограмм, записанных регистраторами аварийных событий, установленными на подстанциях ТПС27, ТПС52 и ТПС70, за все время их работы начиная с конца декабря 2025 года.

Всего было обработано 1617 осциллограмм (952, 633 и 32 соответственно для указанных выше подстанций). Ожидается, наибольшее количество осциллограмм было записано на ТПС27, где регистратор был установлен раньше всего.

Рассмотрим полученную дополнительную информацию, которая, в частности, может быть использована для определения параметров уставок, позволяющих запустить регистраторы аварийных событий по факту возникновения потенциальных дуговых событий.

ТПС-27

На данной подстанции было зафиксировано 490 осциллограмм, содержащих в себе данные о возникших дуговых процессах.

Наиболее «аварийным» здесь является фидер «Комаровский», где была зафиксирована 271 осциллограмма с дуговыми процессами. Обратим внимание, что слово «аварийный» здесь заключено в кавычки, так как разработанные алгоритмы позволяют фиксировать и предельно кратковременные процессы, возникающие при нормальной эксплуатации сети и связанные со вспышками дуги, например, при отрыве пантографа от провода или в условиях плохой погоды (снег, дождь

и т. п.). В фидере «Шаумяна» было зафиксировано 105 осциллограмм, а в фидере «Республиканский» — 89.

В качестве основного параметра, позволяющего выявить факт возникновения переходных процессов, прием величину тока первой гармоники, которая всегда появляется принципиально в спектре токовых сигналов при их быстром значительном изменении. Согласно выполненной статистической обработке, ее максимальная величина на всех проанализированных осциллограммах находится в диапазоне 2,6–1538 А при среднем значении 20,5 А.

Столь высокий уровень разброса усложняет выбор уставки, позволяющей уверенно осуществлять запуск осциллографа. В связи с этим представляется возможным установить относительно низкое значение уставки для записи максимального объема осциллограмм, которые впоследствии должны автоматически анализироваться на факт возникновения дугового процесса с последующим удалением всех ложнозаписанных осциллограмм. Также при выборе уставки нужно определить, является ли необходимым контроль и учет коротких дуговых вспышек, неизменно возникающих при эксплуатации контактных сетей.

С учетом сказанного выше в качестве первого приближения в сети ТПС-27 рекомендуется выбрать уставку на уровне среднего значения 20 А. Также обратим внимание, что вследствие высокой скорости затухания процессов и их предельной нестабильности во времени работа осциллографа должна быть обеспечена по первому периоду появления заданного уровня гармоник.

ТПС-52

В сети данной подстанции наиболее «аварийным» является фидер «Коллонтай», где зафиксировано 218 (из 490) осциллограмм, потенциально содержащих дуговые процессы.

Далее со значительным отставанием следуют остальные фидеры: «Товарищеский» — 75 осциллограмм; «Антонова-Овсиенко» — 53; «Крыленко» — 49; «Солидарность» — 38; «Заречная» — 30 и «Подвойского» — 27.

Разброс величины тока первой гармоники здесь также велик и составляет 4,8–743 А при среднем значении 21,6 А, близком к зафиксированному в сетях ТПС-27.

Здесь также можно рекомендовать в качестве уставки выбрать величину 20 А.

ТПС-70

В сетях данной подстанции было зафиксировано минимальное количество дуговых событий:

- «Полтавский» — 9;
- «Херсонский» — 6;
- «Ивашенцева» — 5;

- «Золотоношский» — 4;
- «Ал. Невского» — 3.

Разброс величины тока первой гармоники здесь является намного меньшим и составляет 0,8–236 А при среднем значении 8,2 А.

Тем не менее здесь также можно рекомендовать в качестве уставки выбрать величину тока первой гармоники на уровне 20 А.

По результатам выполненной работы можно сформулировать следующие заключения:

1. Опытные исследования позволили разработать алгоритмы выявления возникающих в контактных сетях постоянного тока дуговых процессов, негативным образом влияющих на работу схемы электроснабжения подвижного состава.

2. Получено подтверждение возможности использования разработанных алгоритмов для обнаружения дуговых процессов с помощью осциллографирования текущих и предшествующих событиям значений токов и напряжений [7] в контактной сети со стороны тяговых подстанций и спектральным анализом мгновенных значений переменных.

3. Разработаны программные средства, позволяющие выполнять анализ большого массива данных с результатами осциллографирования и сбора статистической информации о параметрах возникавших переходных режимов.

4. Выявлена избыточная чувствительность разработанных алгоритмов, требующая дополнительной настройки их параметров с помощью дополнительных данных осциллографирования нормальных и аварийных режимов.

5. Необходим дополнительный технический анализ степени влияния кратковременных дуговых процессов на режимы работы оборудования и определение необходимости контроля параметров таких процессов.

Список источников

1. Правила технической эксплуатации трамвая (ПТЭ трамвай) / Минтранс России. М., 2016.
2. Правила технической эксплуатации троллейбуса (ПТЭ троллейбус) / Минтранс России. М., 2016.
3. Инструкция по устройству и обслуживанию контактной сети трамвая и троллейбуса / Минтранс России. М., 2005.
4. Афанасьев А. С. Контактные сети трамвая и троллейбуса: учебник для СПТУ. М.: Транспорт, 1988. 264 с.
5. Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Преобразование энергии рекуперации в городском электротранспорте // Вестник ПНИПУ. 2022. № 43. С. 5–28.
6. Яблоков А. А., Готовкина Е. Е. Компьютерное моделирование в электроэнергетике и электротехнике. Ч. 1. MATLAB. Иваново, 2021. 179 с.

7. Трофимов О. А., Глушков Н. В. Исследование влияния повышения напряжения и большого количества рекуперационных токов на безопасность и надежность функционирования городской контактной сети // Вестник науки и техники. 2022. № 12. С. 45–56.

Дата поступления: 24.03.2026

Решение о публикации: 06.05.2026

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — доктор техн. наук, профессор; alexagunov@mail.ru

ЩЕРБАНЬ Александр Владимирович — начальник ОСП «Энергохозяйство» СПб ГУП «Гор-электротранс»; en_gi@spbget.ru

АРХИПОВ Дмитрий Дмитриевич — заместитель начальника ПТО ОСП «Энергохозяйство» СПб ГУП «Горэлектротранс»; digital5563@icloud.com

КУЗНЕЦОВ Антон Алексеевич — технический директор ООО «Институт проблем энергетики»; ipe_rus@mail.ru

СИМОНЕНКО Кирилл Дмитриевич — лаборант; simonenko_kirill.03@mail.ru

Identification of Arc Processes in the Contact Network of Urban Electric Transport by Methods of Oscillographic Monitoring and Spectral Processing

**A. V. Agunov¹, A. V. Shcherban'², D. D. Arkhipov², A. A. Kuznetsov³,
K. D. Simonenko¹**

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

² SUE "Gorelectrotrans", 15 Syzranskaya st., Saint Petersburg, 196105, Russia

³ Institute of Energy Problems LLC, letter A, block 94, 9 Alexei Tolstoy boulevard, ext. ter. Pushkin, Saint Petersburg, 196608, Russia

For citation: Agunov A. V., Shcherban' A. V., Arkhipov D. D., Kuznetsov A. A., Simonenko K. D. Identification of Arc Processes in the Contact Network of Urban Electric Transport by Methods of Oscillographic Monitoring and Spectral Processing // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 65–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-65-72 (In Russian)

Abstract

Objective: the research is aimed at developing effective methods for detecting arc processes in the DC contact network of ground-based urban electric transport that negatively affect the performance of the power supply system. **Methods:** the oscilloscope data of instantaneous values of currents and voltages recorded by emergency event devices is used. Spectral analysis and statistical processing algorithms are used to analyze the obtained waveforms, including artificial modeling of arc damage and subsequent verification of data from real traction substations. **Results:** algorithms for detecting arc processes have been developed, which have been confirmed experimentally and by analyzing data arrays recorded at three substations. Optimal levels of settings for recording arc events have been established (the average value is about 20 A), the sensitivity features of the algorithms and the need for further calibration of the parameters have been identified. simulation of arc damage and subsequent verification of data from real traction substations. **Practical**

importance: the results obtained will improve the reliability of the urban electric transport power supply system by timely identifying and eliminating the negative effects of arc processes. The proposed method can be implemented into existing monitoring and diagnostic systems, reducing the risks of electrical equipment failure and improving the overall efficiency of transport networks.

Keywords: urban electric transportation, overhead contact network protection, short circuit, energy recuperation, monitoring

References

1. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii tramvaya (PTE tramvay) [Technical Rules for Tramway Operation], Ministry of Transport of Russia, Moscow, 2016. (In Russian)
2. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii trolleybusa (PTE trolleybus) [Technical Rules for Trolleybus Operation], Ministry of Transport of Russia, Moscow, 2016. (In Russian)
3. Instruktsiya po ustrojstvu i obsluzhivaniyu kontaktnoy seti tramvaya i trolleybusa [Instructions on Construction and Maintenance of Tramway and Trolleybus Overhead Contact System], Ministry of Transport of Russia, Moscow, 2005. (In Russian)
4. Afanasiev A. S. Kontaktnije seti tramvaja i trolleybusa: uchebnik dlja SPTU [Contact Networks of Trams and Trolleybuses: A Textbook for Secondary Specialized Educational Institutions], Moscow, Transport, 1988, 264 p. (In Russian)
5. Katsaj A. V. Preobrazovaniye energii rekuperatsii v gorodskom elektrotransportye [Conversion of Recuperated Energy in Urban Electric Transport], *Vestnik PNIPU [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University]*, 2022, no. 43, pp. 5–28. (In Russian)
6. Yablokov A. A., Gotovkina E. E. Komp'yuternoye modelirovaniye v elektroenergetike i elektrotekhnike. Chast' 1. MATLAB [Computer Modeling in Electrical Engineering and Electrotechnology. Part 1. MATLAB], Ivanovo, 2021, 179 p. (In Russian)
7. Trofimov O. A., Glushkov N. V. Issledovanie vliyaniya povysheniya napryazheniya i bol'shogo kolichyestva rekuperatsionnykh tokov na bezopasnost' i nadyozhnost' funktsionirovaniya gorodskoy kontaktnoy seti [Study of the Influence of Increased Voltage and a Large Number of Recuperative Currents on the Safety and Reliability of City Contact Network Functioning], *Vestnik nauki i tekhniki [Science and Technology Bulletin]*, 2022, no. 12, pp. 45–56. (In Russian)

Received: March 24, 2026

Accepted: May 06, 2026

Author's information:

Alexander V. AGUNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; alexagunov@mail.ru

Alexander V. SHCHERBAN' — Head of the SSE “Energokhozhestvo” of SUE “Gorelectrotrans”; en_gi@spbget.ru

Dmitry D. ARKHIPOV — Deputy Head of the PTO SSE “Energokhozhestvo” of SUE “Gorelectrotrans”; digital5563@icloud.com

Anton A. KUZNETSOV — Technical Director, Institute of Energy Problems LLC; ipe_rus@mail.ru

Kirill D. SIMONENKO — Laboratory Assistant; simonenko_kirill.03@mail.ru