
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.3.072.2

DOI 10.46960/2658-6754_2023_4_78

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА СТАБИЛИЗАЦИИ
НАПРЯЖЕНИЯ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА****Н.К. Третьяков**

ORCID: 0000-0003-4795-5181 e-mail: nt7836655@yandex.ru

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения*Санкт-Петербург, Россия***В.П. Кузьменко**

ORCID: 0000-0002-0270-4875 e-mail: mr.konnyy@gmail.com

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения*Санкт-Петербург, Россия***О.Я. Солёная**

ORCID: 0000-0003-4901-3884 e-mail: osolenaya@guap.ru

Санкт-Петербургский государственный университет
Аэрокосмического приборостроения*Санкт-Петербург, Россия*

Представлены результаты практических измерений амплитудного значения напряжения электросети постоянного тока. Выявлены несоответствия значениям, установленным современными нормативно-техническими документами. Проведенный анализ существующего решения показал необходимость разработки нового подхода к решению проблемы. Рассмотрена возможность стабилизации напряжения электросети постоянного тока путем распределения электроэнергии импульсным преобразователем. В *Matlab/Simulink* выполнено компьютерное моделирование устройства стабилизации напряжения с учетом особенностей электросети. Модель содержит и учитывает необходимые для построения программной части системы управления переходные процессы. Проведен анализ возможности проектирования устройства стабилизации напряжения на современной отечественной компонентной базе. Полученные результаты моделирования подтвердили возможность стабилизации напряжения электросети с диапазоном $\pm 15\%$ от номинального (600 В), а также целесообразность разработки устройства.

Ключевые слова: городская электросеть постоянного тока, источник напряжения, источник тока, качество электрической энергии, стабилизация напряжения.

Для цитирования: Третьяков Н.К., Кузьменко В.П., Солёная О.Я. Моделирование устройства стабилизации напряжения городской электросети постоянного тока // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 78-89.

DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_78

SIMULATION OF VOLTAGE STABILIZATION DEVICE OF URBAN DC ELECTRIC NETWORK

N.K. Tretyakov

ORCID: 0000-0003-4795-5181 e-mail: nt7836655@yandex.ru

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Saint-Petersburg, Russia

V.P. Kuzmenko

ORCID: 0000-0002-0270-4875 e-mail: mr.konnny@gmail.com

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Saint-Petersburg, Russia

O.Ya. Solenaya

ORCID: 0000-0003-4901-3884 e-mail: osolenaya@guap.ru

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The results of practical measurements of the amplitude range of the voltage of the DC electric network are presented. Inconsistencies with the values established by modern regulatory and technical documents are revealed. The analysis of the existing solution showed the need to develop a new approach to solving this problem. The possibility of stabilizing the voltage of the DC electric network by distributing electrical energy by a pulse converter is considered. A simulation of a voltage stabilization device in Matlab/Simulink has been performed, taking into account the features of the electric network. The model contains and takes into account the transients necessary for the construction of the software part of the control system. The analysis of the possibility of designing a voltage stabilization device on a modern domestic component base is carried out. The obtained results confirmed the possibility of stabilizing the mains voltage in a range of $\pm 15\%$ of the nominal (600 V), as well as the feasibility of device developing.

Keywords: DC network, current source, power quality, voltage source, voltage stabilization.

For citation: N.K. Tretyakov, V.P. Kuzmenko and O.Ya. Solenaya, "Simulation of voltage stabilization device of DC urban electric network", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 78-89, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_78

1. Введение

Городской электротранспорт (трамваи, троллейбусы, метро) питается от пассивных выпрямительных подстанций, подключенных к распределительным сетям среднего напряжения. В качестве современного тягового устройства трамваев в основном используют асинхронные электродвигатели переменного тока, приводимые в действие преобразователями частоты, питающимися от сети постоянного тока напряжением 400-700 В [1-3]. Поскольку тяговые преобразователи подключены непосредственно к контактной сети, такие процессы как разгон и торможение влияют на амплитудное значение напряжения, что является серьезной проблемой [4-6].

Одним из важнейших параметров электронных устройств, применяемых в электротранспорте, является диапазон входного напряжения, который, согласно ГОСТ 29322-2014 (IEC 60038:2009), для систем постоянного тока номинальным напряжением 600 В равен 400-720 В [7]. При пониженном напряжении питания электронное устройство не гарантирует поддержание заданных параметров или находится в режиме ожидания, при повышении возможен выход из строя, так как применяемые компоненты имеют определенный класс изоляции. Так, согласно данным компании «ORTEA», зафиксирован неоднократный выход из строя оборудования французских трамваев консорциума «Alstom» из-за скачков напряжения контактной электросети.

II. Практические измерения

На рис. 1 представлены измерения напряжения городской электросети постоянного тока с полученными максимальным и минимальным значениями амплитуды напряжения 813 В и 359 В, где вертикальная ось – напряжение (U , В), горизонтальная – время (t , мс). Для определения значения напряжения выполнена настройка автоматического выведения значения RMS измеряемого канала. Измерения проводились в г. Санкт-Петербург с приблизительной удаленностью от тяговой подстанции равной 3 км цифровым осциллографом планшетного типа *Micsig STO1104C Plus* с высоковольтным пробником *Micsig DP20003* непосредственно на пантографе (токосприемник с подъемным механизмом для подключения к электросети) городского трамвая относительно корпуса в дневной пик потока пассажиров.

Полученные измерения показали несоответствие требованиям современных нормативно-правовых актов, что доказывает необходимость проведения работ по исследованию возможности повышения качества электрической энергии сетей постоянного тока в заданном амплитудном диапазоне напряжений [8, 9]. Стоит отметить, что существующее решение [10] имеет ряд недостатков, среди которых: значительная доработка тяговых подстанций для внедрения системы стабилизации; ограниченный рабочий диапазон

напряжений, так как устройство работает как понижающий инвертор; высокие потери, обусловленные постоянным режимом работы устройства; мощность изделия, равная мощности электросети, требующая применения силовых полупроводниковых компонентов; отключение электросети при выходе из строя преобразователя.

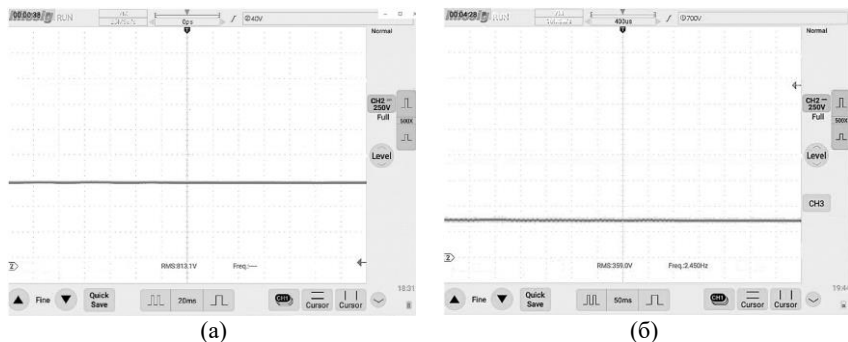


Рис. 1. Осциллограммы максимального (а) и минимального (б) напряжения городской электросети

Fig. 1. Oscillograms of the maximum (a) and minimum (b) voltage of the city power grid

III. Стабилизация напряжения электросети постоянного тока посредством распределения энергии

В качестве решения поддержания амплитуды напряжения электросети в заданном диапазоне предлагается использование импульсного преобразователя энергии, выполняющего функцию распределения энергии. При повышении напряжения сети, где основным источником является рекуперация тяговых преобразователей электротранспорта, преобразователь выполняет функцию источника тока, заряжая аккумуляторную батарею (АКБ), что понижает напряжение электросети. При понижении напряжения сети устройство переходит в режим источника напряжения, направляя энергию с АКБ в сеть, чем поднимает напряжение электросети. Устройство представляет собой подключенный к сети двунаправленный инверторный преобразователь, построенный по схеме полный мост с звеном постоянного тока (ЗПТ). Преобразователь построен на модулях силовых транзисторов, *MOSFET* или *IGBT*, подключенных по схеме полумоста, ЗПТ – параллельно и/или последовательно подключенные электролитические или пленочные конденсаторы (рис. 2).

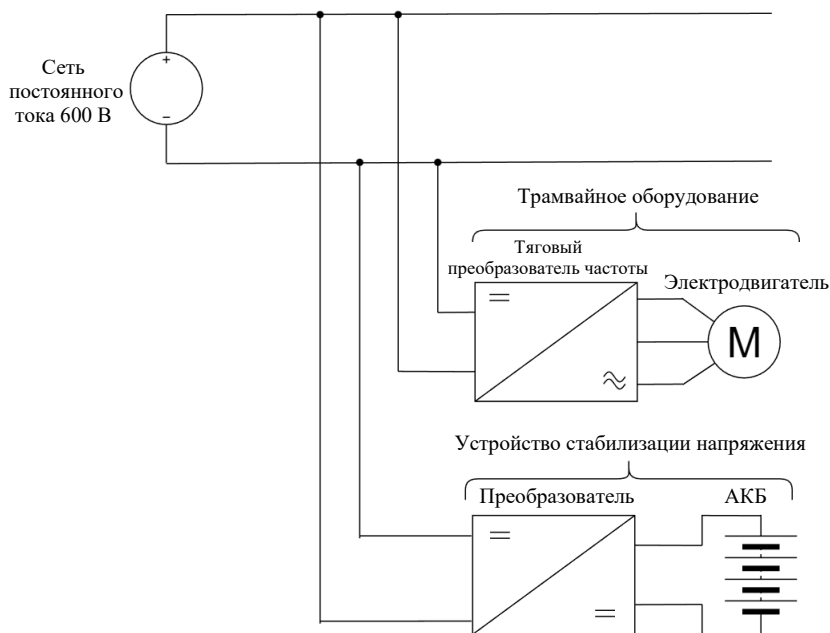


Рис. 2. Структурная схема подключения устройства стабилизации к электросети

Fig. 2. Structural diagram of connecting the stabilization device to electrical networks

Значительными преимуществами данного решения стабилизации напряжения являются: отсутствие необходимости значительной доработки действующей инфраструктуры электросети; возможность параллельной работы устройств для повышения мощности; безопасность эксплуатации (выход из строя устройства не ведет к отключению электросети).

IV. Моделирование устройства стабилизации напряжения городской электросети постоянного тока

Для подтверждения возможности стабилизации напряжения электросети предлагаемым путем необходимо выполнить моделирование работы устройства и его воздействия на сеть с фактически измеренными параметрами (рис. 1), где максимальное и минимальное значение напряжения примерно равны 806 В и 350 В соответственно.

На рис. 3 представлена модель городской электросети ограниченной мощности номинальным напряжением 600 В в *Matlab Simulink* при работе на нагрузку, имитирующую тяговый преобразователь электротранспорта, с измеренными амплитудными значениями напряжения.

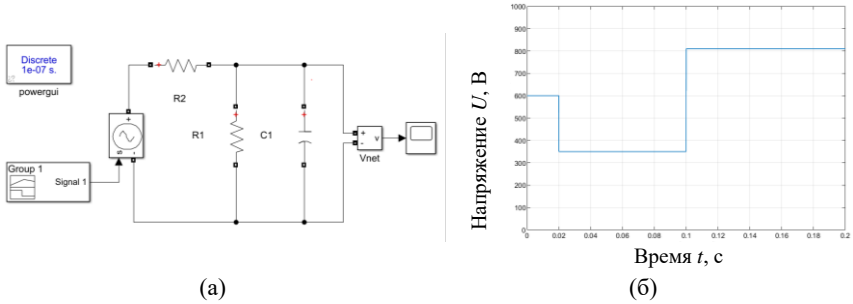


Рис. 3. Схема (а) и осциллограмма (б) модели работы электросети ограниченной мощности на нагрузку

Fig. 3. Scheme (a) and oscillograms (b) of the model of operation of the power network of limited power to the load

Очевидно, что емкости конденсаторов преобразователя недостаточно для сглаживания пульсаций напряжения сети. Кроме того, изменение напряжения сети влечет за собой повышение требований к электронным устройствам в области поддержания выходных параметров [11, 12].

На рис. 4 представлена модель устройства стабилизации напряжения электросети, параметры которой приведены в табл. 1.

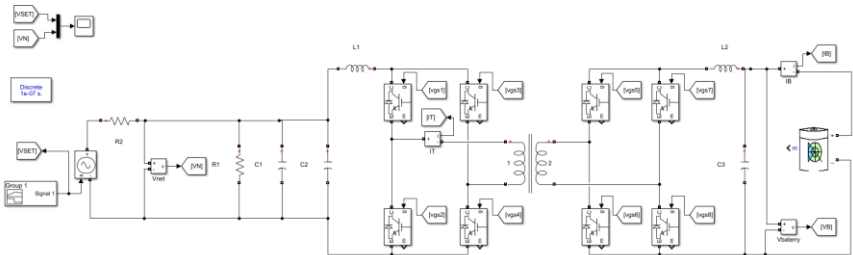


Рис. 4. Схема модели сети и устройства стабилизации напряжения электросети в *Matlab Simulink*

Fig. 4. Diagram of the network model and the device for stabilizing the voltage of the power network in the *Matlab Simulink*

V. Анализ результатов моделирования

На рис. 5 представлены осциллограммы напряжения сети при работе устройства стабилизации (красная) и задания напряжения источника, имитирующего электросеть ограниченной мощности (синяя).

Таблица 1.
 Параметры блоков модели

Table 1.
 Model block parameters

| Наименование блока | Параметр | Единица измерения | Значение |
|--|---|-------------------|----------|
| <i>Series RLC Branch</i> (C1, C2, C3) | Емкость | мФ | 2 |
| | Номинальное напряжение при инициализации модели | В | 600 |
| <i>Series RLC Branch</i> (L1, L2) | Индуктивность | мкГн | 100 |
| <i>Linear Transformer</i> | Частота | кГц | 8 |
| | Соотношение витков | Единицы | 1:1 |
| | Номинальная мощность | кВт | 100 |
| <i>Battery</i> | Номинальное напряжение | В | 600 |
| | Номинальная емкость | А·ч | 200 |

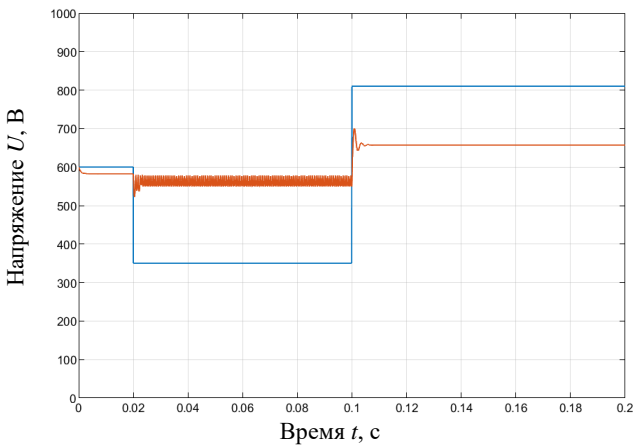


Рис. 5. Осциллограммы напряжения электросети при работе устройства

Fig. 5. Oscillograms of mains voltage during operation of the device

Моделирование устройства стабилизации напряжения городской электросети постоянного тока оказалось успешным в рамках задачи поддержания амплитуды напряжения электрической цепи в заданном диапазоне. Преобразователь функционировал как распределитель энергии, заряжая аккумулятор для снижения напряжения электросети, когда напряжение повышалось из-за рекуперации тяговых преобразователей электротранспорта.

Когда сетевое напряжение понижалось, преобразователь переключался в режим источника напряжения, направляя энергию от аккумуляторной батареи в сеть для повышения сетевого напряжения.

Устройство представляет собой двунаправленный импульсный преобразователь, построенный по схеме полного моста с подключением постоянного тока (DCT) и сконструированный из модулей силовых IGBT транзисторов, соединенных по схеме полумоста, ЗПТ – из параллельно соединенных пленочных конденсаторов.

Имитация работы устройства проводилась на модели городской электросети с ограниченной пропускной способностью номинальным напряжением 600 В и крайними значениями с использованием *Matlab Simulink*. Нагрузка имитировала тяговый преобразователь электротранспорта.

Результаты показали, что устройство стабилизации напряжения было эффективным в поддержании амплитуды напряжения электрической цепи в требуемом диапазоне. Устройство функционировало по назначению, переключаясь между режимом источника тока и режимом источника напряжения в зависимости от уровня напряжения в электросети. Измеренные значения амплитуды напряжения соответствовали желаемому диапазону, указывая на то, что устройство смогло стабилизировать уровни напряжения городской электросети постоянного тока.

В целом результаты моделирования продемонстрировали эффективность предлагаемого решения применения импульсного преобразователя энергии для стабилизации напряжения в городских электросетях постоянного тока. Однако, очевидно, требуется дальнейшее тестирование и оценка точности и надежности моделирования для выявления любых потенциальных ограничений или областей для улучшения.

Время моделирования уменьшено до 0,2 с для возможности просчета переходных процессов устройства. В момент времени 0,02 с и 0,1 с напряжение электросети принимает крайние, фактически измеренные, значения напряжения примерно равные 350 В и 810 В. Устройство выполняет функцию стабилизации напряжения путем распределения энергии между электросетью и АКБ. Важно отметить, что идеально стабилизировать сеть до номинального значения напряжения равного 600 В невозможно по следующим причинам: частота работы преобразователя; высокая мощность; скорость работы регулятора; ограниченная емкость АКБ; ограничение тока транзисторов; номинальные (реальные) значения емкостных и индуктивных элементов модели.

Результаты моделирования подтвердили возможность стабилизации напряжения электросети постоянного тока с диапазоном отклонения, не превышающим $\pm 15\%$ от номинального значения, что соответствует требованиям ГОСТ 6962–75 [3].

VI. Возможность практической реализации на отечественной электронно-компонентной базе

Эффективность работы изделия зависит от качества электронно-компонентной базы. В современных условиях самым надежным поставщиком является отечественный производитель.

Основными силовыми компонентами преобразователя являются *IGBT/MOSFET* транзисторы, емкости и моточные изделия (дроссель и трансформатор). Благодаря применению *IGBT* транзисторов производителя АО «Ангстрем» или АО «Протон-Электротекс», например, *AnM200HBEV17H / MIAA-HB17SA-300N* 62 корпус, можно добиться значительного повышения надежности изделия [13]. Транзисторы данного типа имеют возможности удержания тока короткого замыкания до 40 мкс, диапазон входных напряжений до 1700 В и рабочую частоту 1-20 кГц. При разработке моточных изделий предлагается использовать продукцию ПАО «Мстатор»: *MSTN-120A-TH / MSTN-90S-TH* для трансформатора, АРН57Р60 для дросселя. Чтобы добиться снижения масса-габаритных показателей и увеличения номинального рабочего напряжения можно использовать емкости производителя ООО «НЮКОН», например, серии *FA3, SPC, FB3*.

VII. Заключение

Проведенное исследование показывает возможность стабилизации напряжения электросети в соответствии заданным по ГОСТ 29322–2014 (*IEC 60038:2009*) [7] значениям, с диапазоном $\pm 15\%$ от номинального (600 В) путем распределения энергии посредством применения импульсных преобразователей электрической энергии. Поддержание номинального напряжения электросети подтверждает возможность повышения полезного ресурса эксплуатации применяемого оборудования, а также снижения требований к разрабатываемому. Модель содержит и учитывает все необходимые для построения программной части системы управления переходные процессы.

Изложенные в работе исследования подтверждают необходимость и целесообразность развития направления распределения энергии в городских электросетях для повышения качества электрической энергии. Следующий шаг – поиск оптимальной аппаратной части и разработка макетного образца устройства стабилизации напряжения.

© Третьяков Н.К., 2023

© Кузьменко В.П., 2023

© Солёная О.Я., 2023

Поступила в редакцию 01.03.2023

Принята к публикации 02.05.2023

Received 01.03.2023

Accepted 02.05.2023

Библиографический список

- [1] Троллейбусы – Электродпривод // ООО НПП ЭПРО. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nprepro.ru/index.php?page=elektroprivod> (дата обращения 07.10.2022).
- [2] Воробьев А.А., Будюкин А.М., Кондратенко В.Г. Анализ современных технических решений, применяемых в конструкциях низковольтных трамвайных вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18. № 1. С. 1-15. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-1-7-15
- [3] ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Введ. 1975-11-14. М.: Издательство стандартов, 1976. – 3 с.
- [4] Naseri F., Farjah E. and Ghanbari T. An efficient regenerative braking system based on battery/supercapacitor for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles with BLDC motor // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66. No. 5. P. 3724-3738. DOI: 10.1109/TVT.2016.2611655
- [5] Ghanbari T., Farjah E. and Naseri F. Power quality improvement of radial feeders using an efficient method // Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 163. P. 140-153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.05.027>
- [6] Naseri F., Farjah E., Kazemi Z., Schaltz E., Ghanbari T., Schanen J-L. Dynamic stabilization of DC traction systems using a supercapacitor-based active stabilizer with model predictive control // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2020. Vol. 6. No. 1. P. 228-240. DOI: 10.1109/TTE.2020.2964423
- [7] ГОСТ 29322-2014 (IEC 60038:2009). Напряжения стандартные. Введ. 2015-10-01. М.: Стандартинформ, 2015. – 9 с.
- [8] SIST EN 50160:2011/A1:2015. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. Approved 2015-03-03.
- [9] Кузьменко В.П., Солёный С.В., Шишлаков В.Ф., Солёная О.Я. Измерение качества электроэнергии в системе электроснабжения со светодиодными осветительными устройствами // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2019. № 1 (74). С. 197-212. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-197-212
- [10] Шапиро С.В., Муфтиев С.Р. Разработка системы стабилизации напряжения тяговой подстанции городского электротранспорта // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2010. Т. 14. № 5 (40). С. 79-85.
- [11] Сайфутдинов Р.Ф., Вильданов Р.Г., Бузаева Е.К., Ширококов Е.Д. Оборудование для создания цифровой подстанции городских электрических сетей в рамках Smart Grid // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 9 (87). С. 29-33.
- [12] Zolotov I.I., Shevtsov A.A., Mkrtychev S.V. Simulation model of dynamic voltage stabilizer for autonomous power supply systems // proc. Information technologies in business and industry, Feb. 18-20, 2019, Novosibirsk, Russia.: IOP Publishing, 2019. P. 062034. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062034
- [13] Информационный лист IGBT модуля // АО «Протон-Электротекс» [Электронный ресурс]. URL: <https://proton-electrotex.com/IGBT-МІАА-НВ17SA-300N> (дата обращения 12.11.2022).

References

- [1] Trolleybusy – Elektroprivod [Trolleybuses – Electric drive]. [Online]. Available at: <http://www.nppepro.ru/index.php?page=elektroprivod> [Accessed: Oct. 2, 2017] (in Russian).
- [2] A.A. Vorobyov, A.M. Budyukin and V.G. Kondratenko, “Analysis of current technical solutions applied in the design of low-floor tram cars”, *Bulletin of the Petersburg University of Communications*, vol. 18, no. 1, pp. 1-15, 2021. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-1-7-15
- [3] Transport electrified with power from the contact network, GOST 6962-75, Nov. 1975.
- [4] F. Naseri, E. Farjah and T. Ghanbari, “An efficient regenerative braking system based on battery/supercapacitor for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles with BLDC motor,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 5, pp. 3724-3738, May 2017. DOI: 10.1109/TVT.2016.2611655
- [5] T. Ghanbari, E. Farjah and F. Naseri, “Power quality improvement of radial feeders using an efficient method,” *Electric Power Systems Research*, vol. 163, pp. 140-153, Oct. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.05.027>
- [6] F. Naseri, E. Farjah, Z. Kazemi, E. Schaltz, T. Ghanbari, J-L. Schanen, “Dynamic stabilization of DC traction systems using a supercapacitor-based active stabilizer with model predictive control”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 1, pp. 228-240. Mar. 2020. DOI: 10.1109/TTE.2020.2964423
- [7] Voltages are standard, GOST 29322-2014 (IEC 60038:2009), October 2015.
- [8] Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, SIST EN 50160:2011/A1:2015, Mar. 2015.
- [9] V.P. Kuzmenko, S.V. Solonny, V.F. Shishlakov and O.Ya. Solonaya, “Measurement of power quality in the power supply system with led lightning devices”, *Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, vol. 1, no. 74, pp. 197-212, 2019. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-197-212
- [10] S.V. Shapiro and S.R. Muftiyev, “System engineering of stabilization of pressure of traction substation of city electrotransport”, *Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, vol. 14, no. 5 (40), pp. 79-85, 2010.
- [11] R.F. Sayfutdinov, R.G. Vil'danov, Ye.K. Buzayeva and Ye.D. Shirobokov, “Equipment for creation of digital substation of city electric networks within smart grid”, *Science and business: ways of development*, vol. 9, no. 87, pp. 29-33, 2018.
- [12] I.I. Zolotov, A.A. Shevtsov and S.V. Mkrtychev, “Simulation model of dynamic voltage stabilizer for autonomous power supply systems”, in proc. *Information technologies in business and industry*, Feb. 18-20, 2019, Novosibirsk, Russia, pp. 062034. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062034
- [13] Informacionnyj list IGBT modulya [Information sheet of the IGBT module]. [Online]. Available at: URL: <https://proton-electrotex.com/IGBT-MIAA-HB17SA-300N> [Accessed: Nov. 2, 2022] (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Третьяков Никита Константинович, студент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Nikita K. Tretyakov, student of the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Saint-Petersburg, Russian Federation.

Кузьменко Владимир Павлович, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Vladimir P. Kuzmenko, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Saint-Petersburg, Russian Federation.

Солёная Оксана Ярославовна, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Oksana Ya. Solenaya, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Saint-Petersburg, Russian Federation.