

## Проектирование системы управления преобразователя городского электротранспорта

Н. К. Третьяков<sup>1✉</sup>, В. Е. Кузнецов<sup>1</sup>, Д. Н. Кокшаров<sup>2</sup>, П. В. Ренье<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ООО «Двинго», Краснодар, Россия

✉ nktretyakov@stud.etu.ru

**Аннотация.** Исследование направлено на разработку адаптируемой скалярной системы управления преобразователя частоты, управляющего асинхронными электрическими машинами, эксплуатируемыми в городском электротранспорте. Разработанная система включает в свою структуру классическое скалярное управление, но позволяет поддерживать оптимальные режимы работы электродвигателя в широком диапазоне входного питающего напряжения (250...800 В) посредством ограничения задания номинальной частоты вращения и добавления коэффициента умножения для изменения длительности импульса ШИМ. Используются методы натурных испытаний и структурного анализа. Приведены осциллограммы работы модели и макетного образца преобразователя с внедренной адаптируемой системой управления при частоте ШИМ 2 кГц при изменении входного питающего напряжения. Математическое моделирование и экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и эффективность применения разработанной системы управления.

**Ключевые слова:** преобразователь, скалярное управление, напряжение, ШИМ, коэффициент заполнения, адаптивное управление

**Для цитирования:** Проектирование системы управления преобразователя городского электротранспорта / Н. К. Третьяков, В. Е. Кузнецов, Д. Н. Кокшаров, П. В. Ренье // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 10. С. 100–107. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-10-100-107.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

## Design of Control System for City Electric Transport Converter

N. K. Tretiakov<sup>1✉</sup>, V. E. Kuznetsov<sup>1</sup>, D. N. Koksharov<sup>2</sup>, P. V. Rene<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

<sup>2</sup> LLC «Dvingo», Krasnodar, Russia

✉ nktretyakov@stud.etu.ru

**Abstract.** The study is aimed at developing an adaptive scalar control system for a frequency converter that controls asynchronous electric machines used in urban electric transport. The developed system includes classical scalar control in its structure, but allows maintaining optimal operating modes of the electric motor in a wide range of input supply voltage (250–800 V) by limiting the nominal rotation frequency and adding a multiplication factor to change the PWM pulse duration. The article uses methods of full-scale testing and structural analysis. Oscillograms of the model and prototype of the converter with an implemented adaptive control sys-

tem at a PWM frequency of 2 kHz with a change in the input supply voltage are given. Mathematical modeling and experimental studies confirmed the operability and efficiency of the developed control system.

**Keywords:** converter, scalar control, voltage, PWM, duty cycle, adaptive control

**For citation:** Design of Control System for City Electric Transport Converter / N. K. Tretiakov, V. E. Kuznetsov, D. N. Koksharov, P. V. Rene // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 10. P. 100–107. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-10-100-107.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** Сегодня наиболее востребованными средствами перемещения населения в больших городах являются наземный и подземный городской транспорт. Наибольший объем пассажиропотока приходится на вагоны метро и трамваев. Важно отметить, что в Санкт-Петербурге большинство станций метрополитена – закрытого типа и расположены на большой глубине, а следовательно, на вагон с пассажирами не попадают прямые солнечные лучи, которые служат основными теплопритоками. Именно поэтому в вагонах метрополитена Санкт-Петербурга не предусмотрены штатные системы охлаждения воздуха (кондиционеры). Трамвайное сообщение, особенно современные модели, напротив, имеет большую площадь остекления и большее влияние солнечных лучей на среднюю температуру в салоне. Таким образом, оснащение трамваев системами охлаждения воздуха совершенно необходимо.

Наиболее распространенные современные модели трамваев – 71-931М «Витязь-Ленинград»/«Витязь-М», 71-923М «Богатырь-М», 71-934 «Лев» и другие, созданные на базе вышеперечисленных, производства ООО ПК «Транспортные системы». Данные модели оснащены системой кондиционирования и вентиляцией салона, установленной на крыше вагона (рис. 1) [1].



Рис. 1. Транспортный кондиционер производства НПФ «ЭТНА» для трамваев «Витязь-М» производства ПК «Транспортные системы»

Fig. 1. Transport air conditioner manufactured by NPF «ETNA» for trams «Vityaz-M» manufactured by PC «Transport Systems»

Важно подчеркнуть, что силовое питание кондиционера рассчитано на переменное трехфазное напряжение с межфазным значением 380 В и частотой 50 Гц, так как в состав оборудования моноблока (рис. 1) входят промышленные вентилятор(ы) и компрессор(ы). Трамвай получает питание от городской электросети постоянного тока и для питания различных установок, в том числе кондиционера, в нем установлен преобразователь «ИТ-БПТ» с синусоидальным выходным напряжением (статический преобразователь) [2], формирующий сеть переменного тока.

Согласно ГОСТ 29322–2014 (IEC 60038:2009) [3] в системах постоянного тока, чем и является трамвайная сеть, номинальное значение напряжения составляет 600 В, а диапазон – 400...720 В. Для формирования переменного трехфазного напряжения с межфазным значением 380 В в звене постоянного тока преобразователя (например, «ИТ-БПТ»), даже с учетом применения метода пространственной векторной модуляции (англ. Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM)), позволяющей увеличить выходное напряжение на 15 %, необходимо поддерживать значение напряжения порядка 650 В (с учетом падения на выходном LC-фильтре, который необходим для формирования переменного напряжения). Следовательно, в «ИТ-БПТ» для обеспечения работоспособности при низком значении входного напряжения (менее 650 В) применен каскад стабилизации напряжения звена постоянного тока (ЗПТ) – повышающий (англ. boost converter) или повышающий/понижающий (англ. buck-boost converter) преобразователь. Таким образом, «ИТ-БПТ» выполняет двойное преобразование напряжения для формирования стабилизированной сети. Кроме того, сеть постоянного тока, к которой физически подключен токоприемник трамвая, разделена на определенные промежутки, подключенные к разным подстанциям, соединенные через нейтральные вставки (участки контактной сети без электрического напряжения), где во время проезда (3...5 с) происходит отклю-

чение преобразователя. Наличие значительного числа нейтральных вставок (более десяти на пятикилометровом участке маршрута), применение двойного преобразования в «ИТ-БПТ», отсутствие функции автоподхвата частоты электродвигателя приводит к увеличению времени включения системы, а также снижению общего КПД и надежности.

Авторы считают, что оптимальное решение, позволяющее избежать вышеописанных недостатков и снизить общую себестоимость, – это применение преобразователя частоты с выходным напряжением прямоугольной формы и с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [4], подключенного непосредственно к контактной сети без каскада стабилизации ЗПТ и работающего в широком диапазоне входного напряжения с различными моделями электродвигателей (вентиляторов и компрессоров).

С учетом описанного, цель исследования заключается в разработке адаптируемой системы управления преобразователя частоты с ШИМ-выходом, работающим в диапазоне входных напряжений, превышающих установленные стандарты, для снижения количества отключений и сокращения времени запуска системы.

**Разработка системы управления.** В системе микроклимата основные исполнительные элементы – вентилятор конденсатора, вентилятор испарителя и компрессор (для одного гидравлического контура). На рис. 1 на верхней плоскости крышки видны три вентилятора конденсатора, подключенные параллельно; данное решение распространено и на других видах установок средней мощности. Как упоминалось ранее, двигатели рассчитаны на промышленную сеть и питаются от одного источника питания, что свидетельствует о типе электродвигателей – асинхронные. Данные уточнения необходимы для первоначального выбора типа управления электродвигателями: скалярное или векторное. Асинхронными электродвигателями можно управлять любым из них, но по эффективности и широкому диапазону питающего напряжения более предпочтительное и адаптируемое – векторное. Векторное управление подразумевает замкнутый контур регулирования, где вычисляется реальная скорость вращения и далее происходит регулирование по обратной связи. Однако данный тип управления имеет значительное ограничение в рамках поставленной задачи – управления несколькими электродвигателями. Параллельное управление невозможно в связи с формированием общего управляющего

воздействия (преобразователь имеет один выход для подключения нагрузки). Кроме того, штатные электродвигатели не оборудованы датчиками положения какого-либо типа [5], и для вычисления скорости в системе управления необходимо применять «наблюдатель», в котором указываются параметры двигателя. С учетом периодичности обслуживания и срока эксплуатации компонентов также возможна замена моделей электродвигателей на ближайшие аналоги с отличающимися параметрами. Таким образом, применение векторного бездатчикового управления практически теряет свою эффективность в рамках рассмотренной задачи. Скалярное управление имеет разомкнутый контур, т.е. отсутствие обратной связи в системе управления, и построено на поддержании соотношения  $U/f = \text{const}$ , где  $U$  – значение межфазного напряжения,  $f$  – формируемая частота. С учетом возможных отклонений напряжения контактной сети, а именно в диапазоне от 359 до 813 В [3], применение стандартного скалярного управления приведет к выходу из строя электродвигателя вследствие перегрева (при повышенном напряжении) или к опрокидыванию (*англ.* pull-out или breakdown) (при пониженном напряжении) из-за невозможности поддержания требуемого момента.

Авторы предполагают, что оптимальным решением построения адаптируемой системы управления преобразователя, работающей в широком диапазоне входных напряжений и при нагрузке различных типов (моделях электродвигателей), служат применение базовой структуры скалярного управления с добавлением коэффициента, компенсирующего задание длительности ШИМ, непосредственно зависящего от номинального значения напряжения ЗПТ и уставки, которая ограничивает формируемую частоту. Для реализации выдвинутой концепции можно взять за основу структуру ориентируемого по полю (*англ.* Field-Oriented Control FOC) управления асинхронным двигателем – управления моментом (SY-ось) и потокосцеплением (SX-ось) [6], [7]. Для применения данной структуры в адаптируемой скалярной системе управления допустимо подавать на блок обратное преобразование Парка формируемые при скалярном управлении  $\theta$ ; SY, соответствующие соотношению  $U/f = \text{const}$ ;  $SX = 0$ . Для поддержания номинального момента электродвигателя в широком диапазоне необходимо добавить ограничение максимальной частоты формируемого напряжения исходя из значения  $0.0925 \cdot U_{\text{ЗПТ}}$ , означающего, что при напряжении

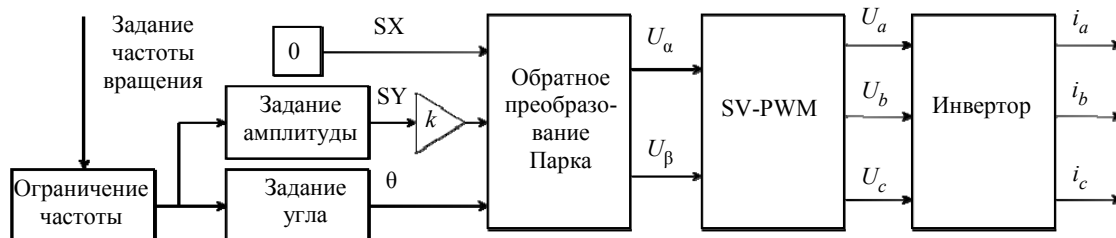


Рис. 2. Структурная схема разработанной СУ  
 Fig. 2. Structural diagram of the developed control system

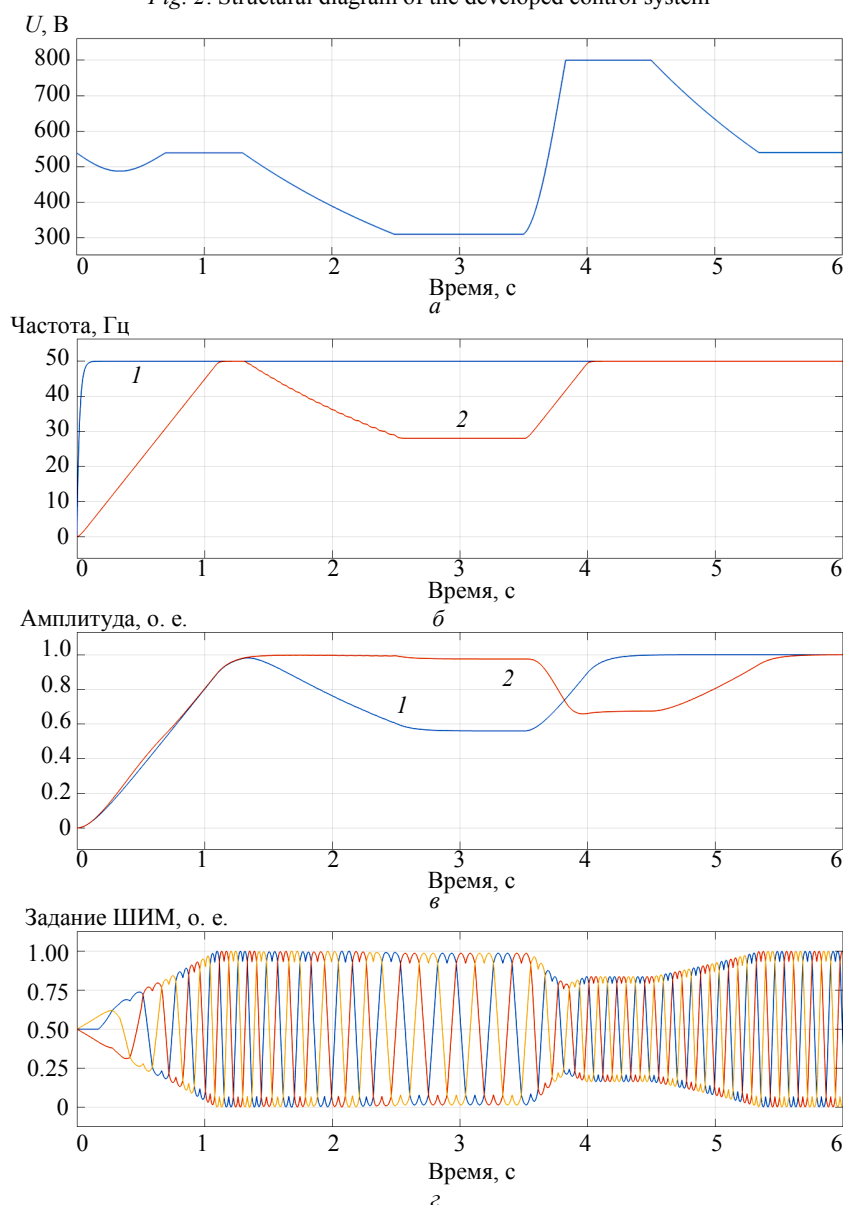


Рис. 3. Осциллограммы работы модели инвертора с применением разработанной СУ  
 Fig. 3. Oscillograms of the inverter model operation using the developed control system

ЗПТ, равном 540 В, максимальная формируемая частота составит 50 Гц (в разрабатываемой системе применяется SV-PWM) [8]. Вторым регулируемым параметром, кроме частоты, служит амплитуда формируемого напряжения, которую также необходимо изменять в зависимости от значения ЗПТ через коэффициент  $k$  (рис. 2). Разработанная система

управления представлена на рис. 2, где  $U_\alpha$ ,  $U_\beta$  – двухфазные компоненты напряжения в неподвижной системе координат;  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  – управляющие сигналы длительности ШИМ модуляции (пофазное задание);  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  – значение фазных токов (токов фаз подключенного электродвигателя).

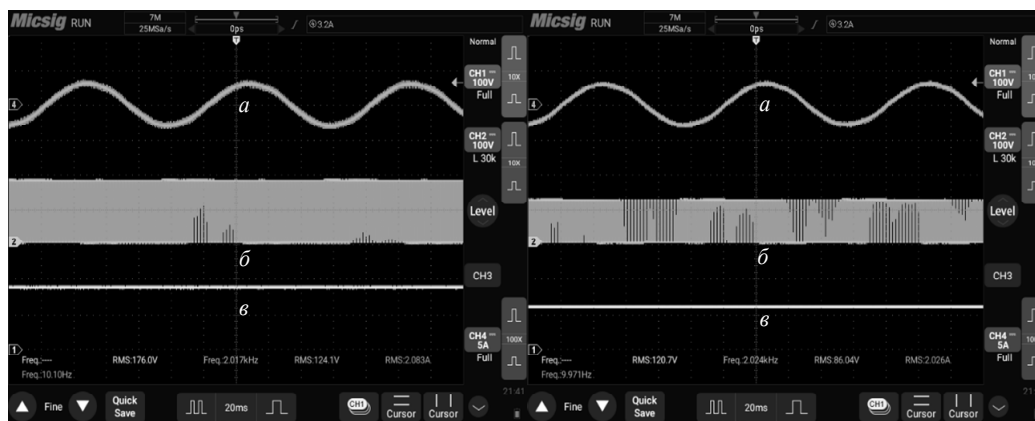


Рис. 4. Осциллограммы работы преобразователя с применением разработанной СУ  
Fig. 4. Oscillograms of the converter operation using the developed control system

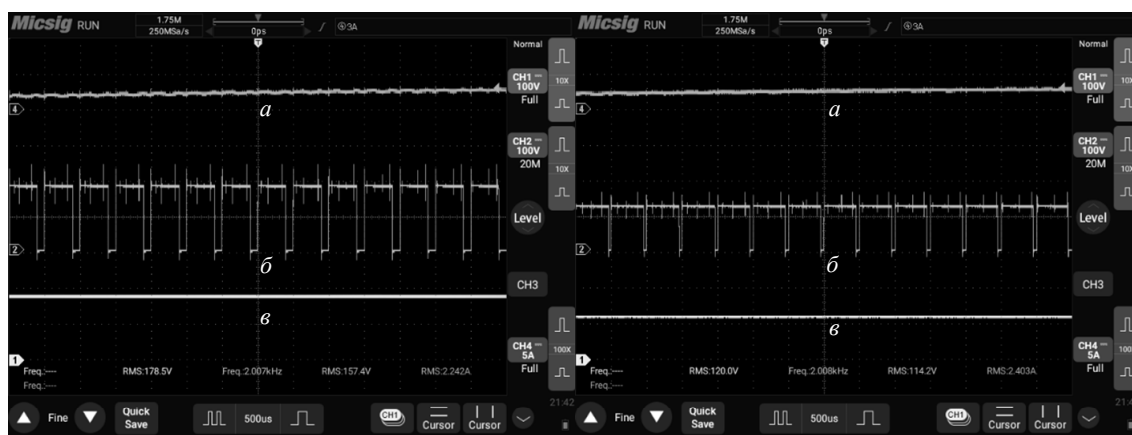


Рис. 5. Осциллограммы работы преобразователя с применением разработанной СУ  
Fig. 5. Oscillograms of the converter operation using the developed control system

Таким образом, разработанная система управления позволит поддерживать номинальный момент электродвигателя при изменении напряжения питания (ЗПТ). Например, если напряжение меньше номинального, будет выполнено ограничение формируемой частоты до максимально возможной и добавлен коэффициент умножения амплитуды  $>1$ . При повышенном напряжении, наоборот, формируемая частота будет соответствовать заданной, а коэффициент умножения, влияющий на формируемую амплитуду напряжения, будет  $<1$ .

На рис. 3 представлены осциллограммы работы модели преобразователя с внедренной структурой системы управления, где выполняются измерения напряжения ЗПТ (диапазон 300...800 В) (рис. 3, а), задания (кривая 1) и реального значения (кривая 2) формируемой частоты (рис. 3, б), задания (кривая 1) и реального значения (кривая 2) формируемой амплитуды (рис. 3, в) и задания ШИМ (задания длительности открытия транзисторов) (рис. 3, г). Для наглядности функционирования системы, а именно, снижения формируемой частоты от изменений напряжения ЗПТ,

соотношение  $U/f = \text{const}$ , применяемое при скалярном управлении, изменено до соотношения  $U/0.1f = \text{const}$ .

Согласно полученным осциллограммам, разработанная система управления поддерживает соотношения зависимости формируемой частоты и напряжения при изменении напряжения ЗПТ в заданном диапазоне.

**Практические испытания.** На рис. 4 приведены осциллограммы (снимок экрана) работы преобразователя с внедренной СУ, измеренные цифровым осциллографом Micsig STO2202C [9] с полосой пропускания 200 МГц, где а – выходной ток фазы преобразователя; б – напряжение на фазе преобразователя относительно минуса ЗПТ; в – напряжение ЗПТ. На обеих осциллограммах среднеквадратичное значение тока составляет порядка 2 А, формируемая частота – около 10 Гц, но главное отличие заключается в значениях напряжения ЗПТ: на левой осциллограмме оно составляет 176 В, на правой – 120.7 В. При проведении эксперимента задание частоты вращения электродвигателя составляло 10 Гц.

Результатом проведенных измерений, подтверждающих работоспособность разработанной структуры системы управления, служит практически идентичный ток выходной фазы, что при равных условиях измерения (момента нагрузки) подтверждает идентичные условия эксплуатации электродвигателя при заданной частоте. Для более детального анализа на рис. 5 приведены осциллограммы аналогичные рис. 4, но отличающиеся по временной развертке осциллографа (500 мкс) для наглядности изменения длительности импульса ШИМ выходной фазы [10].

Основным результатам натурных испытаний стало поддержание заданной частоты, а именно 10 Гц, при изменении напряжения ЗПТ (178...120 В).

**Выводы.** Разработанная система управления, построенная на базе векторного управления, позволяет поддерживать номинальный момент асин-

хронного электродвигателя без обратной связи при значительном отклонении значения питающего напряжения посредством внесения изменений в задание частоты вращения и формирования напряжения. Безусловно, реальная скорость вращения электродвигателей будет отличаться на значение величины скольжения, что не критично в рамках рассмотренной системы. Подключение преобразователя непосредственно к контактной сети (отсутствие каскада стабилизации) и отсутствие синус-фильтра на выходе значительно снизит себестоимость и время запуска системы после проезда нейтральной ставки трамвая.

Дальнейшее развитие исследований направлено на более детальную проработку системы управления, где одна из важнейших функций, которые необходимо реализовать, – автоподхват частоты [11]–[13].

### Список литературы

1. Научно-производственная фирма ЭТНА. Кондиционеры. URL: [http://www.etna.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=61&Itemid=147](http://www.etna.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=147) (дата обращения: 15.06.2025).
2. Гуляев А. С. Модернизация трамвая ЛМ-68М и создание новой модели 71-301 // Вестн. Ин-та проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2016. № 4 (36). С. 50–54.
3. Третьяков Н. К., Кузьменко В. П., Солена О. Я. Моделирование устройства стабилизации напряжения городской электросети постоянного тока // Интеллектуальная электротехника. 2023. № 4 (24). С. 78–89. doi: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_78.
4. Олейников К. А., Скляр С. А., Заруцкая Т. А. Силовая микроконтроллерная система управления асинхронным двигателем // Практическая силовая электроника. 2022. № 3 (87). С. 44–49.
5. Штукин А. Г. Повышение точностных характеристик датчиков положения ротора // Энергия – XXI век. 2019. № 3 (107). С. 54–58.
6. Третьяков Н. К., Кузнецов В. Е., Ренье П. В. Метод юстировки абсолютного датчика положения ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами и распределенной обмоткой // Электричество. 2025. № 6. С. 59–69. doi: 10.24160/0013-5380-2025-6-59-69.
7. Воробьева А. П., Антропова И. А. Создание математической модели бесколлекторного двигателя постоянного тока с использованием MatLab Simulink

// Политехн. молодежн. журн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2024. № 6 (95). С. 1–12.

8. Chandran R., Suganthi M. Hexagram Statcom and SV-PWM for Optimizing Power Quality in PMSG based Wes // J. Control Engin. and App. Informatics. 2024. Vol. 26, no. 4. P. 59–68. doi: 10.61416/ceai.v26i4.9130.

9. Третьяков Н. К., Кузнецов В. Е. Разработка энергоэффективной системы управления импульсных источников однофазного переменного напряжения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 6. С. 86–96. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-86-96.

10. Имитационное моделирование источников переменного напряжения / Н. К. Третьяков, В. П. Кузьменко, А. В. Рысин, М. С. Романова // Наука и бизнес: пути развития. 2024. № 4(154). С. 103–106.

11. Воронцов А. Г. Подхват асинхронного двигателя после потери питания транзисторного электропривода // Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2023. Т. 16, № 1. С. 94–100. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-1-94-100.

12. Zhao D., Zhang X. Automatic control method of AC asynchronous motor variable frequency speed control based on CEEMDAN-wavelet threshold // Int. J. of Modelling, Identification and Control. 2024. Vol. 45, no. 2/3. P. 100–109. doi: 10.1504/IJMIC.2024.142261.

13. Domakhin E. A., Kotin D. A. Synchronization algorithm for soft switching of an induction motor between a frequency converter and supply network // Russ. Electr. Engin. 2021. Vol. 92, no. 6. P. 314–319. doi: 10.3103/S1068371221060067.

### Информация об авторах

**Третьяков Никита Константинович** – аспирант кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [nktretyakov@stud.etu.ru](mailto:nktretyakov@stud.etu.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-4795-5181>



**Кузнецов Владимир Евгеньевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: vekuznetcov@etu.ru

**Кокшаров Дмитрий Николаевич** – канд. техн. наук, генеральный директор ООО «Двинго». ООО «Двинго», ул. им. Ковалева, д. 48, оф. 59, Краснодарский край, г. Краснодар, 350062, Россия.

E-mail: info@dvingo.com

<https://orcid.org/0009-0009-5514-3811>

**Рень Павел Владиславович** – аспирант кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: pvrene@stud.etu.ru

#### **Вклад авторов**

Третьяков Н. К. – разработка методологии исследования, аналитические расчеты.

Кузнецов В. Е. – общее руководство, разработка концепции.

Кокшаров Д. Н. – выполнение натурных экспериментов, подготовка иллюстраций.

Рень П. В. – выполнение натурных экспериментов.

#### **References**

1. Nauchno-proizvodstvennaja firma JeTNA. Kondicionery. URL: [http://www.etna.su/index.php?option=com\\_content&view=article&id=61&Itemid=147](http://www.etna.su/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=147) (data obrasheniya: 15.06.2025). (In Russ.).
2. Gul'tjaev A. S. Modernizacija tramvaja LM-68M i sozdanie novoj modeli 71-301 // Vestn. In-ta problem estestvennyh monopolij: Tehnika zheleznyh dorog. 2016. № 4(36). S. 50–54. (In Russ.).
3. Tret'jakov N. K., Kuz'menko V. P., Solenaja O. Ja. Modelirovanie ustrojstva stabilizacii naprjazhenija gorodskoj jelektroseti postojannogo toka // Intellektual'naja jelektrotehnika. 2023. № 4(24). S. 78–89. doi: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_78. (In Russ.).
4. Olejnikov K. A., Skljarov S. A., Zaruckaja T. A. Silovaja mikrokontrollernaja sistema upravlenija asinhronnym dvigatelem // Prakticheskaja silovaja jelektronika. 2022. № 3(87). S. 44–49. (In Russ.).
5. Shtukin A. G. Povyshenie tochnostnyh harakteristik datchikov polozhenija rotora // Jenergiya – XXI vek. 2019. № 3(107). S. 54–58. (In Russ.).
6. Tret'jakov N. K., Kuznecov V. E., Ren'e P. V. Metod justirovki absoljutnogo datchika polozhenija rotora sinhronnogo dvigatelja s postojannymi magnitami i raspredelennoj obmotkoj // Jelektrichestvo. 2025. № 6. S. 59–69. doi: 10.24160/0013-5380-2025-6-59-69. (In Russ.).
7. Vorob'eva A. P., Antropova I. A. Sozdanie matematicheskoj modeli beskollektornogo dvigatelja postojannogo toka s ispol'zovaniem MatLab Simulink // Politehni-cheskij molodezhn. zhurn. MG TU im. N. Je. Bauman a. 2024. № 6(95). S. 1–12. (In Russ.).
8. Chandran R., Suganthi M. Hexagram Statcom and SV-PWM for Optimizing Power Quality in PMSG based Wes // J. Control Engin. and App. Informatics. 2024. Vol. 26, no. 4. P. 59–68. doi: 10.61416/ceai.v26i4.9130.
9. Tret'jakov N. K., Kuznecov V. E. Razrabotka jenergojeffektivnoj sistemy upravlenija impul'snyh istochnikov odnofaznogo peremennogo naprjazhenija // Izv. SPbGETU «LETI». 2025. T. 18, № 6. S. 86–96. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-86-96. (In Russ.).
10. Imitacionnoe modelirovanie istochnikov peremennogo naprjazhenija / N. K. Tret'jakov, V. P. Kuz'menko, A. V. Rysin, M. S. Romanova // Nauka i biznes: puti razvitiya. 2024. № 4(154). S. 103–106. (In Russ.).
11. Voroncov A. G. Podhvat asinhronnogo dvigatelja posle poteri pitaniya tranzistornogo jelektoprivoda // Izv. SPbGJeTU LJeTI. 2023. T. 16, № 1. S. 94–100. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-1-94-100. (In Russ.).
12. Zhao D., Zhang X. Automatic control method of AC asynchronous motor variable frequency speed control based on CEEMDAN-wavelet threshold // Int. J. of Modelling, Identification and Control. 2024. Vol. 45, no. 2/3. P. 100–109. doi: 10.1504/IJM IC.2024.142261.
13. Domakhin E. A., Kotin D. A. Synchronization algorithm for soft switching of an induction motor between a frequency converter and supply network // Russ. Electr. Engin. 2021. Vol. 92, no. 6. P. 314–319. doi: 10.3103/S1068371221060067.

---

#### **Information about the authors**

**Nikita K. Tretiakov** – postgraduate student of the Department of Automatic Control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: nktretyakov@stud.etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4795-5181>

**Vladimir E. Kuznetsov** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automatic Control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vekuznetsov56@mail.ru

**Dmitry N. Koksharov** – Cand. Sci. (Eng.), the General Director of Dvingo LLC. Dvingo LLC, im. Kovalева, 48, office 59, Krasnodar Territory, Krasnodar, 350062, Russia.

E-mail: info@dvingo.com

<https://orcid.org/0009-0009-5514-3811>

**Pavel V. Rene** – Postgraduate student of the Department of Automatic Control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: pvrene@stud.etu.ru

#### **Contribution of the authors**

Tretiakov N. K. – research methodology development, analytical calculations.

Kuznetsov V. E. – general supervision, conception development.

Koksharov D. N. – performing field experiments, preparing illustrations.

Rene P. V. – performing field experiments.

Статья поступила в редакцию 22.07.2025; принята к публикации после рецензирования 15.10.2025; опубликована онлайн 30.12.2025.

Submitted 22.07.2025; accepted 15.10.2025; published online 30.12.2025.

---