

УДК 621.316

Построение системы увеличенного автономного хода с ограничением потребляемого тока из контактной сети

В. А. Шаряков¹, О. Л. Шарякова², К. В. Шаряков³, В. А. Лебедева⁴

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

²Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (ВШТЭ СПбГУПТД), Российская Федерация, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4

³Санкт-Петербургское государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение Академия транспортных технологий, Российская Федерация, 192102, Санкт-Петербург, ул. Салова, 63

⁴ООО «Научно-производственное предприятие «ЭПРО», Российская Федерация, 195253, Санкт-Петербург, дор. Салтыковская, 18, Литера М

Для цитирования: Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Шаряков К. В., Лебедева В. А. Построение системы увеличенного автономного хода с ограничением потребляемого тока из контактной сети // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 146-157. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-146-157

Аннотация

Цель: Показать необходимость ограничения токов, потребляемых из контактной сети, и обосновать возможность такого ограничения, используя литий-ионную тяговую аккумуляторную батарею в качестве дополнительного источника электрической энергии. Рассмотреть возможность ограничения влияния на контактную сеть потребляемых токов на троллейбусах с увеличенным автономным ходом за счет их снижения при использовании литий-ионной тяговой аккумуляторной батареи. **Методы:** Использование известных аналитических выражений и результатов заездов, полученных при эксплуатации троллейбусов с увеличенным автономным ходом на городских линиях, и результатов опытных заездов троллейбуса с увеличенным автономным ходом, у которого схема силовой части тягового привода в качестве дополнительного источника энергии использует тяговую аккумуляторную батарею. **Результаты:** Показано, что предложенная в работе схема силовой части тягового привода позволяет ограничить потребляемый ток из контактной сети; дополнительно выявлено, что при такой реализации при торможении троллейбуса не происходит увеличение напряжения в контактной сети. **Практическая значимость:** Показано, что предложенная схема силовой части тягового привода позволяет ограничить влияние потребляемого тока на контактную сеть за счет его снижения и, как следствие, уменьшить пульсации напряжения в контактной сети.

Ключевые слова: Ограничение потребляемого тока, электрический подвижной состав, городской электротранспорт, электробус, тяговый электропривод, рекуперативное торможение, накопитель энергии, неравномерность энергопотребления, тяговая аккумуляторная батарея, литий-ионная батарея.

В настоящее время отмечается тенденция к закупкам нового подвижного состава, что связано с принятием национального проекта «Безопасные качественные дороги», в рамках которого запланировано обновление 1,5 тыс. единиц подвижного состава городского электротранспорта к 2024 году. Многие регионы

проявляют интерес к закупкам электрического подвижного состава — трамвайных вагонов и троллейбусов.

Интерес к троллейбусам обусловлен их экономической эффективностью в рамках жизненного цикла (рис. 1) [1]. Как видно из графиков, затраты на эксплуатацию обыкновенных троллейбусов на 6 % меньше по сравнению с автобусами на компримированном природном газе (КПГ), а затраты на эксплуатацию троллейбусов с увеличенным автономным ходом (УАХ) практически соизмеримы с затратами на эксплуатацию автобусов (КПГ). Затраты на содержание электробусов ОРС, получивших распространение в г. Москве, превышают содержание дизельных автобусов на 8 %, автобусов (КПГ) на 22 %, обыкновенных троллейбусов на 26 % и на 23 % троллейбусов УАХ.

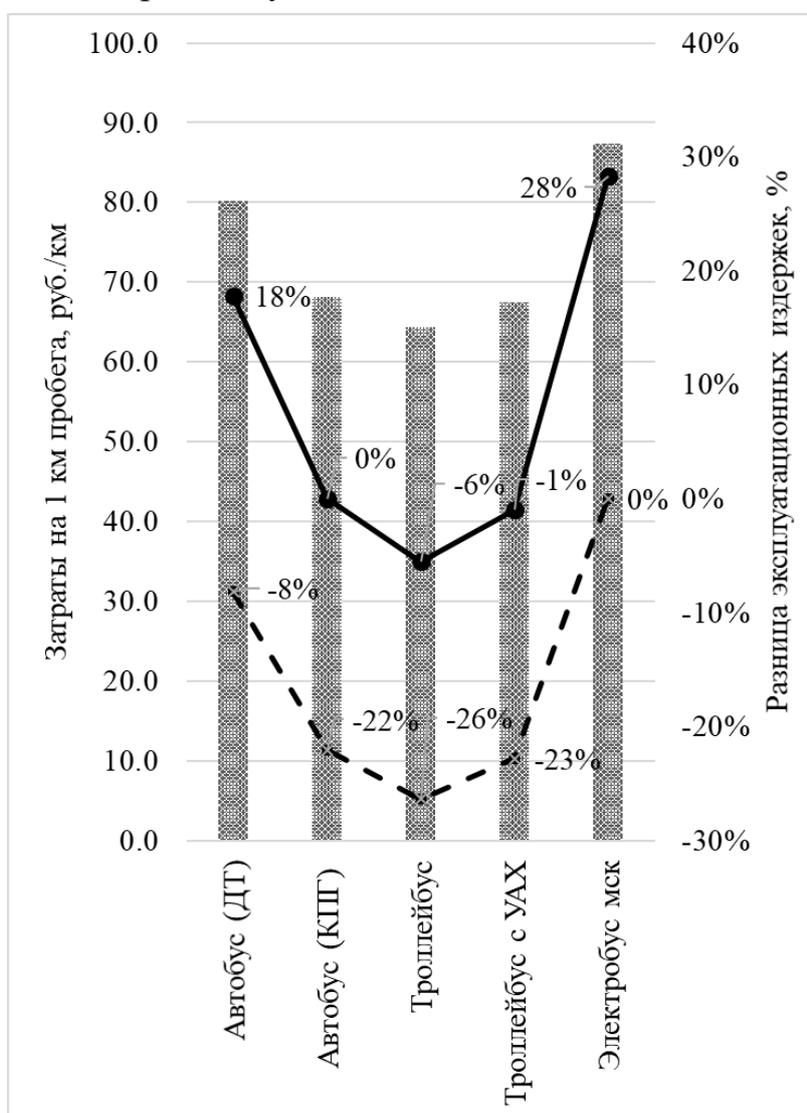


Рис. 1. Экономическая эффективность троллейбусного транспорта в рамках жизненного цикла: 15 лет в расчете на 1 км пробега: (—) — разница эксплуатационных издержек по сравнению с автобусами (КПГ); (- - -) — разница эксплуатационных издержек по сравнению с электробусами (мск)

Развитие технологий, обеспечивающих сохранение электрической энергии — литий-ионные аккумуляторные батареи, суперконденсаторы — делают доступным закупки автономного электрического подвижного состава — электробусов, которые в зависимости от количества запасаемой энергии можно разделить на следующие группы (рис. 2) [1].

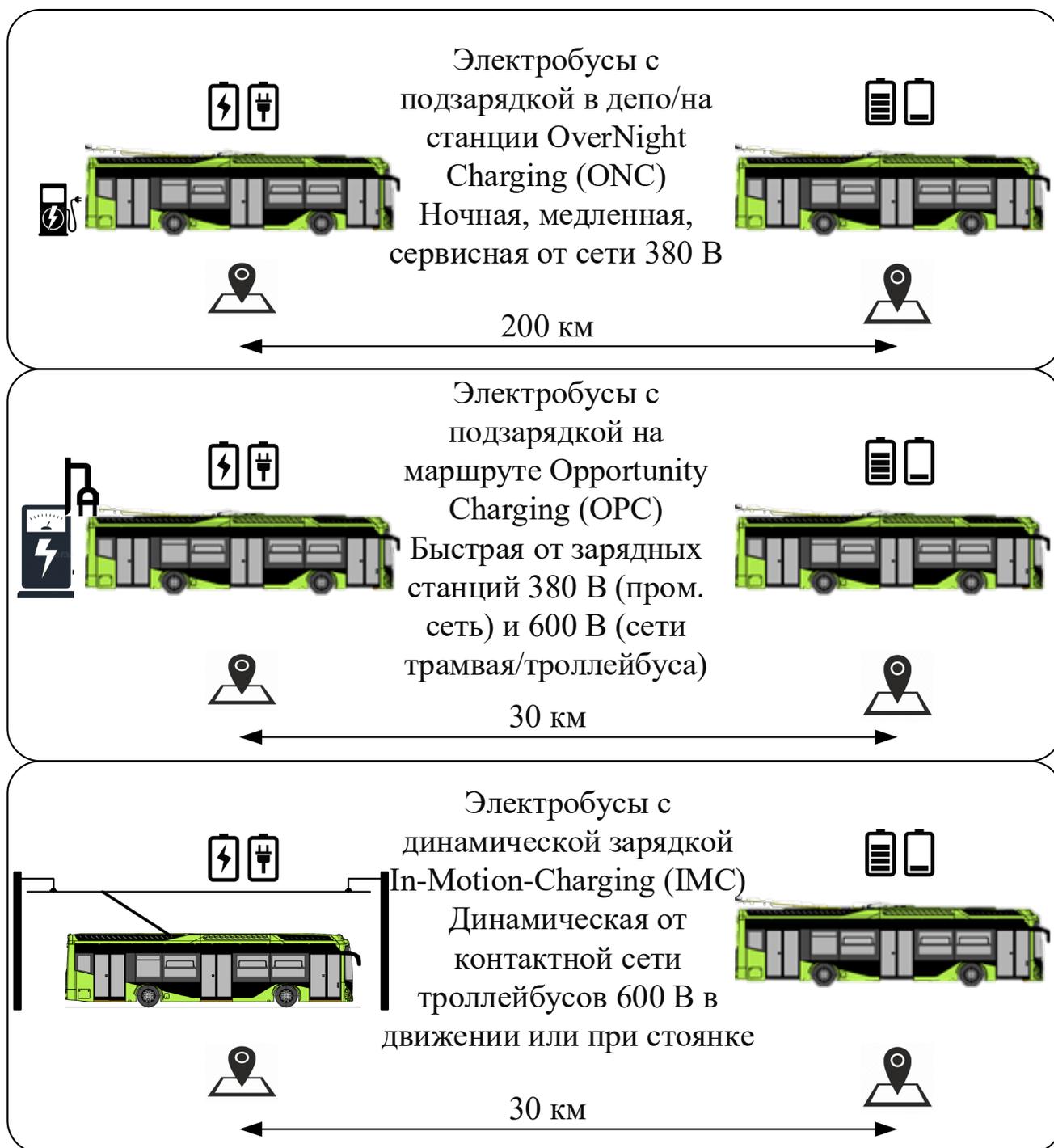


Рис. 2. Классификация электробусов

Электробусы ОНС обладают значительным автономным ходом и требуют для зарядки специальных станций, устанавливаемых на конечных остановках и депо, и выделения соответствующих электромощностей для обеспечения процессов зарядки.

Широкое распространение получили троллейбусы с увеличенным автономным ходом (ТУАХ), первое коммерческое применение которых началось в Санкт-Петербурге в 2017 г. В классификации (рис. 2) такие троллейбусы называются электробусами ИМС.

Распространение ТУАХ объясняется тем, что такие электробусы не требуют создание новой инфраструктуры и могут работать как на старых линиях в режиме троллейбуса, так и на линиях без контактной сети в режиме электробуса — автономном ходе.

На рис. 3 показаны изменения напряжения КС, потребляемого тока тяговым преобразователем (ТП), напряжения ТАБ и скорости при движении троллейбуса. Данные для графиков на рис. 3 и последующих получены при расшифровке архивов движения троллейбусов по городским линиям.

Отметим, что в большинстве реализаций ТУАХ накопитель электрической энергии (НЭЭ) аккумулирует энергию, получаемую от контактной сети (КС) в режиме заряда тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ). Часть энергии рекуперации также используется для заряда НЭЭ. После окончания заряда ТАБ энергия рекуперации отдается в КС или гасится на тормозных реостатах (рис. 3).

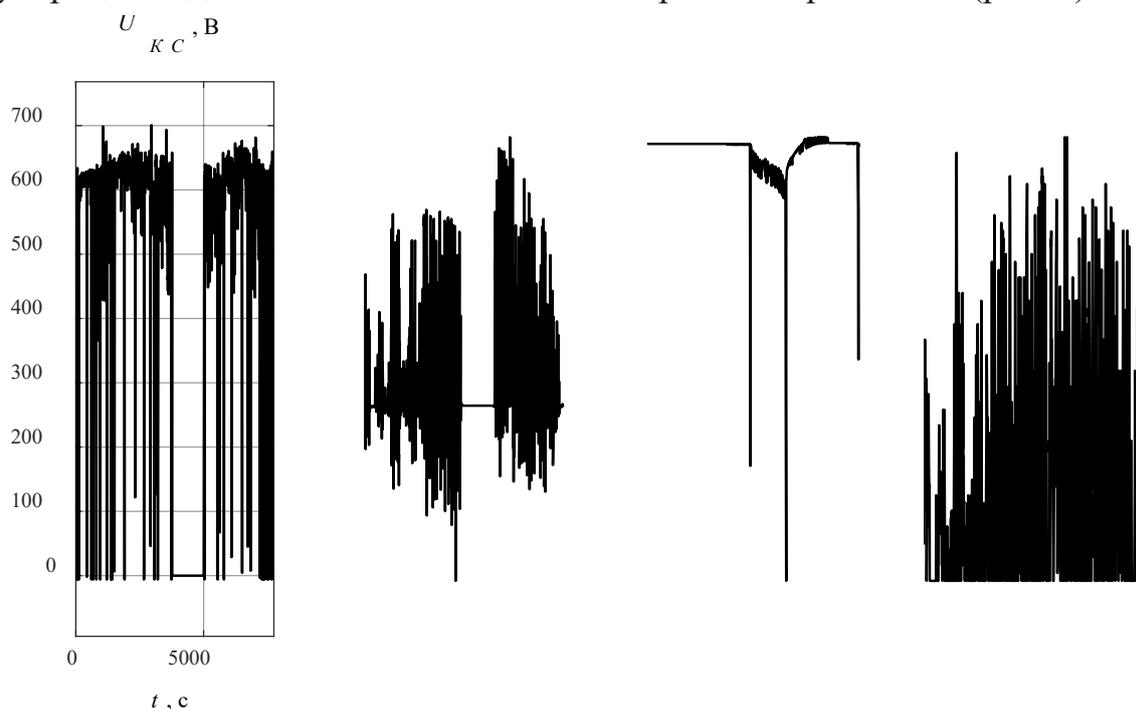


Рис. 3. Графики изменения напряжения КС, потребляемого тока тяговым преобразователем (ТП), напряжения ТАБ и скорости при движении троллейбуса с увеличенным автономным ходом (ИМС) при питании от контактной сети и ТАБ

Как видно из рис. 3, для контактной сети ТУАХ (ИМС) по своему влиянию практически не отличается от обычного ЭПС, однако после режима «автономный ход» увеличивается потребление тока, обусловленное необходимостью заряда ТАБ. Средний ток, потребляемый троллейбусом при движении в режиме тяги при заряде ТАБ, будет:

$$I_{\text{ТягаСред}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T I_{\text{КС}}(t) \cdot dt \approx 70 \text{ А.} \quad (1)$$

Следовательно, в отношении ТУАХ (ИМС) можно сделать те же выводы о негативном влиянии на КС [1–4], что и для современного ЭПС, оснащенного транзисторным тяговым преобразователем, в части неравномерности потребления электроэнергии, завышения напряжения контактной сети, импульсного изменения потребляемого тока и т. д.

В работах, например [1, 3–6], отмечается, что для снижения негативного влияния на контактную сеть на ЭПС можно использовать накопитель электрической энергии, который устанавливается на ЭПС. Положительное отличие ТУАХ (ИМС) от обыкновенного ЭПС заключается в том, что накопитель электрической энергии (НЭЭ) уже установлен для обеспечения автономного хода. Покажем, что данного накопителя достаточно для снижения пульсаций и для ограничения пиков в потребляемом токе.

Необходимую энергию для разгона ЭПС можно определить по следующим формулам:

$$\begin{cases} E_{\text{ПОТ}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{ЭПС}} \cdot V_{\text{max}}^2 / \eta_{\text{ЭПС}}, \\ E_{\text{ПОТ}} = \int U_{\text{КС}}(t) \cdot I_{\text{КС}}(t) \cdot dt \end{cases}, \quad (2)$$

где $m_{\text{ЭПС}}$ — масса ЭПС;

V_{max} — максимальная скорость ЭПС, до которой произошел разгон в текущем цикле;

$\eta_{\text{ЭПС}}$ — КПД тяговой системы ЭПС;

$U_{\text{КС}}$ — напряжение контактной сети;

$I_{\text{КС}}$ — ток контактной сети, потребляемый при разгоне ЭПС.

Из рис. 4 следует, что на один цикл разгона затрачивается 0,8 кВтч энергии, что при номинальной емкости ТАБ 32 кВт · ч составляет около 3 % запасенной энергии.

На рис. 5 показаны графики изменения напряжения ТАБ, степени заряда ТАБ (SOC) при разгоне ТУАХ.

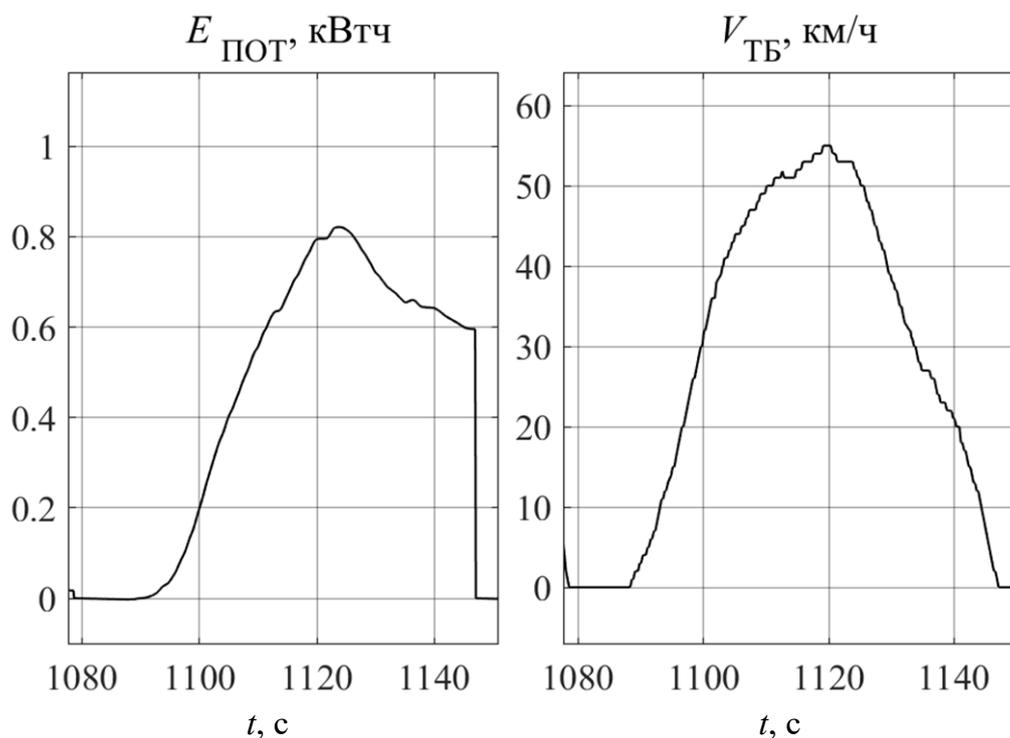


Рис. 4. График изменения потребляемой энергии и скорости при разгоне троллейбуса

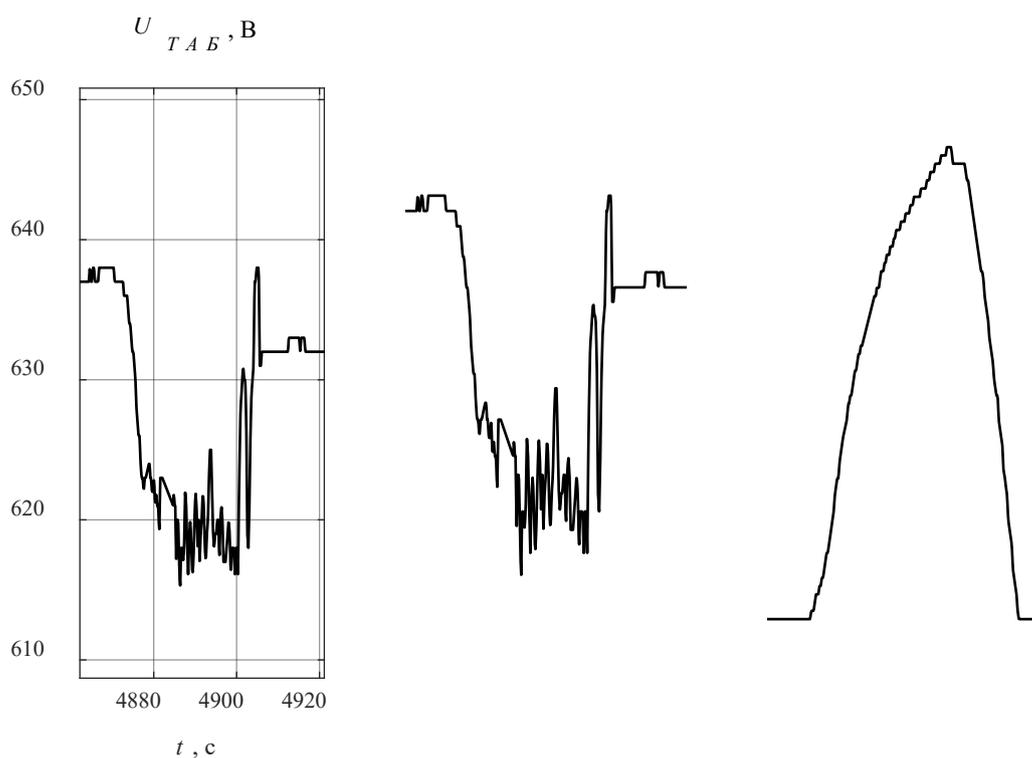


Рис. 5. Графики изменения напряжения ТАБ, степени заряда ТАБ и скорости при движении троллейбуса с увеличенным автономным ходом (ИМС) при питании от контактной сети и ТАБ

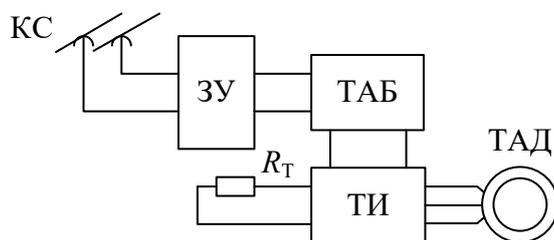


Рис. 6. Функциональная схема силовой части тягового привода ТУАХ со сниженным влиянием на КС: ЗУ — зарядное устройство для ТАБ; ТАБ — тяговая аккумуляторная батарея; ТИ — тяговый инвертор; ТАД — тяговый асинхронный двигатель.

Как видно из рис. 5, при разгоне мгновенно происходит снижение SOC на 10–15 % с последующим восстановлением 7–10 %, поэтому средний разряд соответствует 3 %.

Циклы разряд-заряд длительностью менее одной минуты не учитываются при расчете числа жизненных циклов ТАБ.

Для снижения неравномерности нагрузки и максимальных токов у троллейбусов с увеличенным автономным ходом (ИМС) необходима перекомпоновка силовой части тягового привода, как показана на рис. 6.

При такой реализации образуются три независимых потока энергии во время движения и стоянки троллейбуса (рис. 7), которые включают в себя:

Тяговую аккумуляторную батарею, тяговый инвертор и тяговый двигатель. Здесь в качестве источника энергии выступает ТАБ, при разгоне троллейбуса энергия передается в ТАД.

Тяговый двигатель, тяговый инвертор и тяговую аккумуляторную батарею. Источником выступает ТАД, при торможении передающий через ТИ энергию в ТАБ.

Контактную сеть, зарядное устройство и тяговую аккумуляторную батарею. Задача зарядного устройства восполнить затраченную на разгон энергию тяговой батареи. Величина тока заряда будет определяться допустимым током ТАБ.

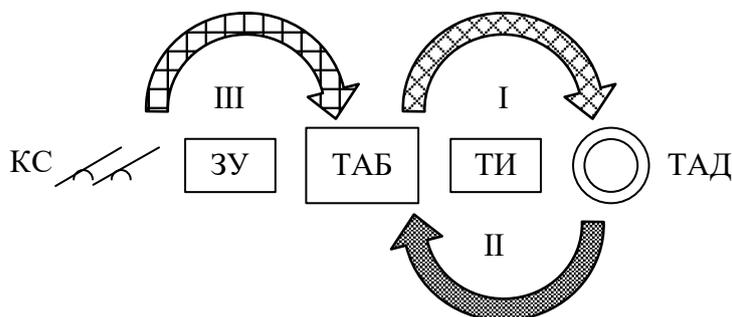


Рис. 7. Потоки энергии при движении ТУАХ при реализации предложенной функциональной схемы

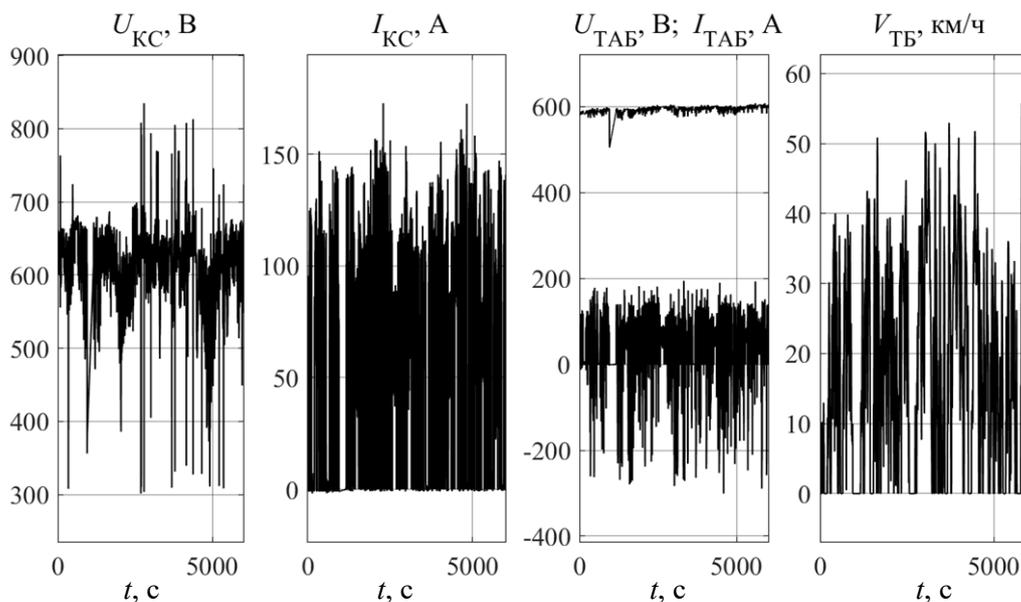


Рис. 8. Графики изменения напряжения и тока КС, напряжения и тока ТАБ, скорости при движении троллейбуса с реализованной функциональной схемой

На рис. 8 показаны графики изменения напряжения и тока КС, напряжения и тока ТАБ, скорости при движении троллейбуса с реализованной функциональной схемой рис. 6.

Как видно из полученных графиков (рис. 8), на интервале движения более 5000 с (более часа) происходил дозаряд ТАБ, но при этом ток, потребляемый из КС, не превышал 170–180 А.

На рис. 9 показан интервал, на котором троллейбус разгоняется и останавливается. Как видно из графиков, во время разгона и стоянки происходит заряд ТАБ. При торможении для заряда ТАБ используется рекуперативная энергия, на этом этапе энергия от контактной сети не используется.

Таким образом, происходит ограничение потребляемого тока, так как ТАБ выступает основным источником питания для тягового преобразователя. Также видно, что во время разгона троллейбуса ТАБ разряжается — уменьшается напряжение ТАБ — $U_{ТАБ}$. При торможении происходит заряд ТАБ — $U_{ТАБ}$ растет.

Средний ток, потребляемый из сети, будет:

$$I_{ТягаСред} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T I_{КС}(t) \cdot dt \approx 50 \text{ А.} \quad (3)$$

На рис. 10 показаны гистограммы распределения потребляемого тока из КС для традиционной схемы ТУАХ и предложенной (рис. 6), из которых видно, что использование предложенной силовой части тягового электропривода значительно уменьшает разброс в потребляемом из КС токе.

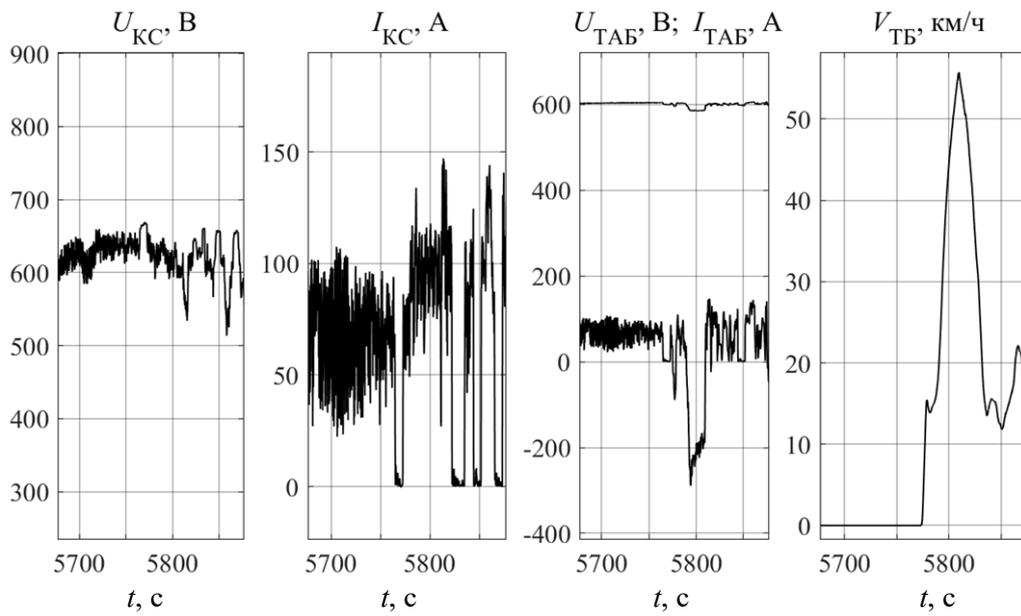


Рис. 9. Графики изменения напряжения и тока КС, напряжения и тока ТАБ, скорости при движении троллейбуса с реализованной функциональной схемой (300 с)

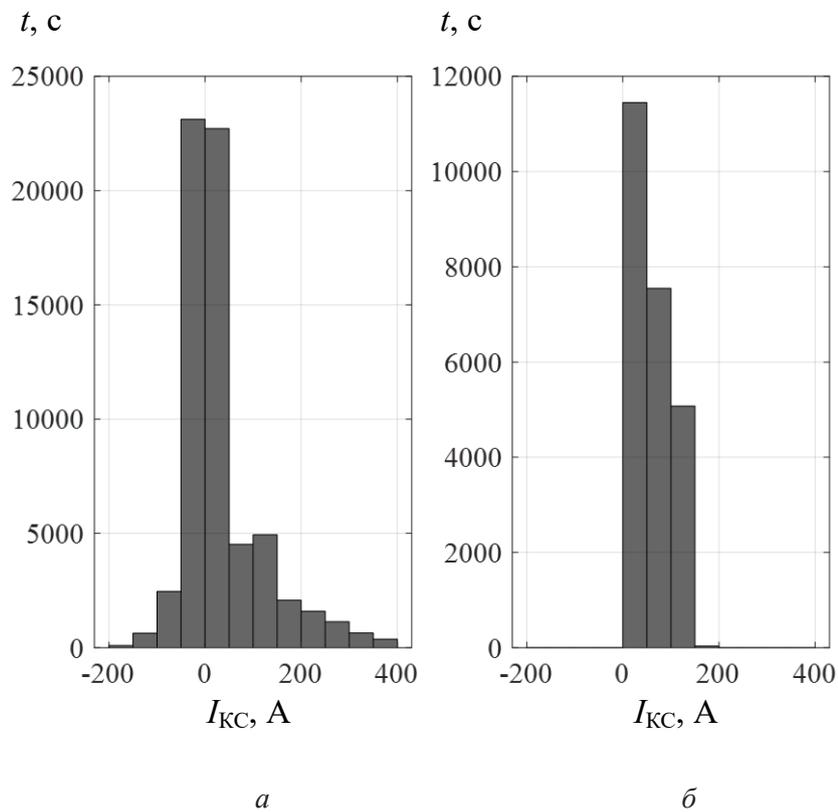


Рис. 10. Гистограммы распределения потребляемых токов из контактной сети: *a* — традиционная схема ТУАХ; *б* — предложенная схема силовой части

Результаты испытаний предложенной силовой схемы показали, что использование ТАБ в качестве постоянного источника энергии на троллейбусе УАХ (ИМС) позволяет сократить пульсации, уменьшить разброс и снизить максимальные значения токов, потребляемых из контактной сети, снижает средние показатели потребляемого из контактной сети тока. Отметим, что практически вся энергия, генерируемая при торможении, запасается в ТАБ, что разгружает контактную сеть от передачи энергии до питающих фидеров и от перераспределения ее между ЭПС, и снижает величины потребляемых токов от тяговой подстанции.

Библиографический список

1. Фролов Д. С. Актуальность троллейбусных технологий в развитии городского электротранспорта / Д. С. Фролов // Научно-практическая конференция МАП ГЭТ, приуроченная к 75-летию Казанского троллейбуса: информационный бюллетень. — 2023. — № 36.
2. Шаряков В. А. Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава / В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, А. В. Агунов и др. // Электротехника. — 2018. — № 10. — С. 55–59.
3. Шаряков В. А. Исследование влияния накопителя электрической энергии на показатели движения и неравномерности энергопотребления электрического подвижного состава / В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, И. Г. Киселев и др. // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2019. — № 5.
4. Шаряков В. А. Об автоматической стабилизации напряжения контактной сети электрического подвижного состава / В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, Д. А. Ковалев и др. // Электротехника. — 2021. — № 4. — С. 36–41.
5. Ткачук А. А. Стабилизация напряжения контактной сети трансформаторно-выпрямительным агрегатом тяговой подстанции постоянного тока 3,3 кВ: автореф. / А. А. Ткачук. — СПб., 2017. — 16 с.
6. Гулиа Н. В. Циклические испытания накопителя кинетической энергии большой мощности и энергоемкости / Н. В. Гулиа, А. В. Кацай. — URL: <http://n-t.ru/tp/ts/ci.htm> (дата обращения: 20.03.2019).

Дата поступления: 16.10.2023

Решение о публикации: 13.11.2023

Контактная информация:

ШАРЯКОВ Владимир Анатольевич — канд. техн. наук, доц.; v_a_shar@mail.ru

ШАРЯКОВА Ольга Леонидовна — канд. техн. наук, доц.; o_l_shar@mail.ru

ШАРЯКОВ Кирилл Владимирович — студент; k.v.shar2005@gmail.com

ЛЕБЕДЕВА Валерия Александровна — инженер; lerochka.lebedeva2017@mail.ru

Construction of a System of Increased Autonomous Travel with Limitation of Current Consumption from the Contact Network

V. A. Sharyakov¹, O. L. Sharyakova², K. V. Sharyakov³, V. A. Lebedeva⁴

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Higher School of Technology and Energy of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (HSE SPbGUPTD),

4, Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russian Federation

³St. Petersburg State Budgetary Professional Educational Institution Academy of Transport Technologies, 63, Salova str., Saint Petersburg, 192102, Russian Federation

⁴LLC "Scientific and Production Enterprise "EPRO", 18 Litera M, dor. Saltykovskaya, 195253, St. Petersburg, Russian Federation

For citation: Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Sharyakov K. V., Lebedeva V. A. Construction of a System of Increased Autonomous Travel with Limitation of Current Consumption from the Contact Network. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 146-157. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-146-157

Summary

Purpose: To show the need to limit the currents consumed from the contact network and to justify the possibility of such a restriction using a lithium-ion traction battery as an additional source of electrical energy. To consider the possibility of limiting the impact on the contact network by reducing the current consumption on trolleybuses with increased autonomous travel when using a lithium-ion traction battery. **Methods:** The use of known analytical expressions, and the results of rides obtained during the operation of battery-assisted trolleybuses with increased autonomous travel on city lines and the results of test rides of a trolleybus with increased autonomous travel, in which the scheme of the power part of the traction drive uses a traction battery as an additional source of energy. **Results:** It is shown that the scheme of the power part of the traction drive proposed in the work allows limiting the current consumed from the contact network, it is additionally revealed that with such implementation, when braking the trolleybus, there is no increase in voltage in the contact network. **Practical significance:** It is shown that the proposed scheme of the power part of the traction drive makes it possible to limit the impact on the contact network by reducing the current consumed and, as a consequence, reducing voltage ripples in the contact network.

Keywords: Current consumption limitation, electric rolling stock, urban electric transport, electric bus, traction electric drive, regenerative braking, energy storage, uneven energy consumption, traction battery, lithium-ion battery.

References

1. Frolov D. S. Aktual'nost' trolleybusnykh tekhnologiy v razvitii gorodskogo elektrotransporta [Relevance of trolleybus technologies in the development of urban electric transport]. *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya MAP GET, priurochennaya k 75-letiyu Kazanskogo trolleybusa: informatsionnyy byulleten'* [Scientific and practical conference of the MAP GET, dedicated to the 75th anniversary of the Kazan trolleybus: information bulletin]. 2023, Iss. 36. (In Russian)

2. Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Agunov A. V. et al. Vozmozhnosti ratsional'nogo ispol'zovaniya energii tormozheniya elektricheskogo podvizhnogo sostava [Possibilities of rational use of braking energy of electric rolling stock]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2018, Iss. 10, pp. 55–59. (In Russian)

3. Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Kiselev I. G. et al. Issledovanie vliyaniya nakopitelya elektricheskoy energii na pokazateli dvizheniya i neravnomernosti energopotrebleniya elektricheskogo podvizhnogo sostava [Study of the influence of an electrical energy storage device on the movement indicators and uneven energy consumption of electric rolling stock]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2019, Iss. 5. (In Russian)

4. Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Kovalev D. A. Ob avtomaticheskoy stabilizatsii napryazheniya kontaktnoy seti elektricheskogo podvizhnogo sostava [About automatic stabilization of the voltage of the contact network of electric rolling stock]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2021, Iss. 4, pp. 36–41. (In Russian)

5. Tkachuk A. A. *Stabilizatsiya napryazheniya kontaktnoy seti transformatorno-vypryamitel'nyim agregatom tyagovoy podstantsii postoyannogo toka 3,3 kV: avtoref.* [Voltage stabilization of the contact network with a transformer-rectifier unit for a 3.3 kV DC traction substation: abstract of thesis]. St. Petersburg, 2017, 16 p. (In Russian)

6. Gulia N. V., Katsay A. V. *Tsiklicheskie ispytaniya nakopitelya kineticheskoy energii bol'shoy moshchnosti i energoemkosti* [Cyclic testing of a kinetic energy storage device of high power and energy intensity]. Available at: <http://n-t.ru/tp/ts/ci.htm> (accessed: March 20, 2019).

Received: October 16, 2023

Accepted: November 13, 2023

Author's information:

Vladimir A. SHARYAKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; v_a_shar@mail.ru

Olga L. SHARYAKOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; o_l_shar@mail.ru

Kirill V. SHARYAKOV — Student; k.v.shar2005@gmail.com

Valeria A. LEBEDEVA — Engineer; lerochka.lebedeva2017@mail.ru