

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

В. А. Шаряков, В. В. Никитин,
А. М. Евстафьев, П. Г. Колпахчьян

Подвижной состав городского электрического транспорта является одним из крупных потребителей электрической энергии в городском хозяйстве. Специфика этого потребителя заключается в резкой неравномерности потребления тока, что сказывается на колебаниях напряжения контактной сети, увеличении потерь энергии в системах энергообеспечения, включая тяговую сеть и силовое оборудование подстанций, и сокращении срока службы оборудования. Рекуперация энергии хоть и является принципиально мощным инструментом энергосбережения, но оказывается не всегда эффективной и приводит к увеличению токовой нагрузки и повышению напряжения в контактной сети. В настоящей статье рассматривается способ снижения потребления энергии подвижным составом городского электрического транспорта и уменьшения неравномерности энергопотребления за счет применения бортового емкостного накопителя на основе суперконденсаторных модулей. Представлены результаты моделирования процессов в системе автоматического ограничения потребляемого тока и результаты опытных поездок моторного вагона по маршруту в реальных условиях. Показано, что применение бортового емкостного накопителя энергии может не только обеспечить существенное сокращение тока, потребляемого из сети в режиме тяги и отдаваемого в сеть в режиме электрического торможения, но и дает возможность автономного хода трамвайного вагона по маршруту со штатными остановками.

Ключевые слова: городской электрический транспорт, бортовые накопители электрической энергии, потребление электрической энергии.

Введение

Согласно статистическим данным [1] потребление энергии на обеспечение пассажирских перевозок трамвайным и троллейбусным подвижным составом в России в 2022 году достигло $1,4 \times 10^9$ кВт·ч. Городской электрический транспорт является одним из основных потребителей энергии в городском хозяйстве, и проблема снижения энергопотребления подвижным составом является актуальной. Одним из способов снижения потребления энергии на тягу городским электротранспортом является использование на подвижном составе бортовых накопителей энергии [2 – 4]. Практические выгоды, которые дает их использование в составе тягового электропривода подвижного состава, весьма существенны: возможность аккумулировать и хранить энергию рекуперации на подвижном составе, что сокращает потери рекуперированной энергии; снижение потребления энергии из контактной сети, позволяющее сократить потери энергии в контактной сети и оборудовании тяговых подстанций; снижение неравномерности потребления энергии от системы тягового электроснабжения, что снижает пиковые нагрузки на оборудование, которые могут приводить к сокращению срока его службы.

В статье рассматривается задача снижения объема и неравномерности потребления энергии из тяговой сети городского электротранспорта за счет использования бортового емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) на основе суперконденсаторов на трамвайном вагоне. Методы решения задачи – имитационное моделирование и экспериментальное исследование.

Моделирование энергопотребления трамвайным вагоном с бортовыми емкостными накопителями энергии

Функциональная схема тягового электропривода трамвайного вагона с бортовым емкостным накопителем энергии (ЕНЭ) представлена на рис. 1. На рисунке обозначены: L_1, L_2 – сетевые дроссели; $L_{зру1}, L_{зру2}$ – дроссели зарядно-разрядных устройств; C_1, C_2 – бортовые емкостные накопители энергии; ТП1, ТП2 – тяговые преобразователи; ЗРУ1, ЗРУ2 – зарядно-разрядные устройства (транзисторные преобразователи); М1 – М4 – тяговые двигатели.

Система управления тяговым приводом с бортовым ЕНЭ должна обеспечивать снижение тока, потребляемого из сети:

$$I_{кc} = I_{тп} + I_{зру} \text{ или } I_{кc} = \gamma I_{тп}, \quad 0 < \gamma < 1,$$

где $I_{кc}, I_{тп}, I_{зру}$ – токи контактной сети, тягового преобразователя и зарядно-разрядного устройства бортового ЕНЭ.

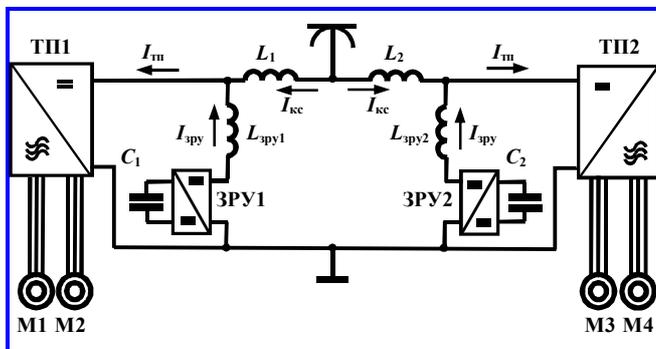


Рис. 1. Функциональная схема тягового электропривода трамвайного вагона с бортовым емкостным накопителем энергии

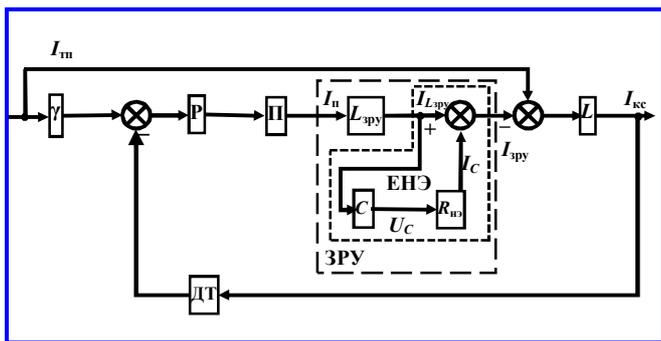


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического ограничения тока, потребляемого из контактной сети

Структурная схема системы автоматического ограничения тока, потребляемого из контактной сети, представлена на рис. 2 (Р – регулятор; П – транзисторный преобразователь зарядно-разрядного устройства; ДТ – датчик тока).

Определим передаточные функции элементов системы. Напряжение в цепи дросселя:

$$u_L = ri_L + L \frac{di_L}{dt},$$

где r, L – активное сопротивление и индуктивность дросселя.

Передаточная функция дросселя:

$$W_L(p) = \frac{1}{T_L p + 1},$$

где T_L – постоянная времени дросселя.

В соответствии со структурной схемой системы автоматического ограничения тока (см. рис. 2) ток зарядно-разрядного преобразователя в операторной форме может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned} I_{зпу}(p) &= I_{L.зпу}(p) + I_{L.зпу}(p)W_{нэ}(p)R_{нэ} = \\ &= I_{L.зпу}(p)(1 + W_{нэ}(p)R_{нэ}), \end{aligned}$$

где $R_{нэ}$ – сопротивление цепи накопителя энергии, учитывающее сопротивление проводов и внутренние потери в конденсаторе.

Напряжение на емкостном накопителе энергии:

$$u_C = U_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C dt + R_{нэ} i_C,$$

где $U_C(0)$ – начальное напряжение на конденсаторе емкостного накопителя.

В операторной форме, принимая начальное напряжение на конденсаторе ЕНЭ равным нулю, получим:

$$U_C(p) = \left(R_{нэ} + \frac{1}{Cp} \right) I_C(p).$$

Тогда передаточную функцию ЕНЭ можно представить в виде:

$$W_{нэ}(p) = \frac{U_C(p)}{I_C(p)} = \frac{CR_{нэ}p + 1}{Cp}.$$

Введя постоянную времени ЕНЭ, передаточную функцию ЕНЭ можно записать в виде:

$$W_{нэ}(p) = \frac{R_{нэ}T_{нэ}p + 1}{T_{нэ}p}.$$

Тогда ток зарядно-разрядного преобразователя в операторной форме можно представить в виде:

$$I_{зпу}(p) = \frac{2R_{нэ}T_{нэ}p + 1}{T_{нэ}R_{нэ}p} I_{L.зпу}(p).$$

Передаточная функция датчика тока:

$$W_{дт}(p) = \frac{K_{дт}}{T_{дт}p + 1},$$

где $K_{дт}$ – коэффициент передачи датчика тока; $T_{дт}$ – постоянная времени датчика тока.

Передаточная функция транзисторного преобразователя:

$$W_{тп}(p) = \frac{K_{тп}}{T_{тп}p + 1},$$

где $K_{тп}$ – коэффициент передачи преобразователя; $T_{тп}$ – постоянная времени преобразователя.

Передаточная функция разомкнутой системы:

$$\begin{aligned} W_{рс}(p) &= W_p(p)W_{тп}(p)W_{L.зпу}(p)W_{зпу}(p)W_L(p) = \\ &= W_p(p) \frac{K_{тп}}{T_{тп}p + 1} \frac{1}{T_{L.зпу}p + 1} \frac{2R_{нэ}T_{нэ}p + 1}{T_{нэ}R_{нэ}p} \frac{1}{T_Lp + 1}, \end{aligned}$$

где $W_p(p)$ – передаточная функция регулятора.

Имитационная модель системы автоматического ограничения тока, потребляемого из сети,

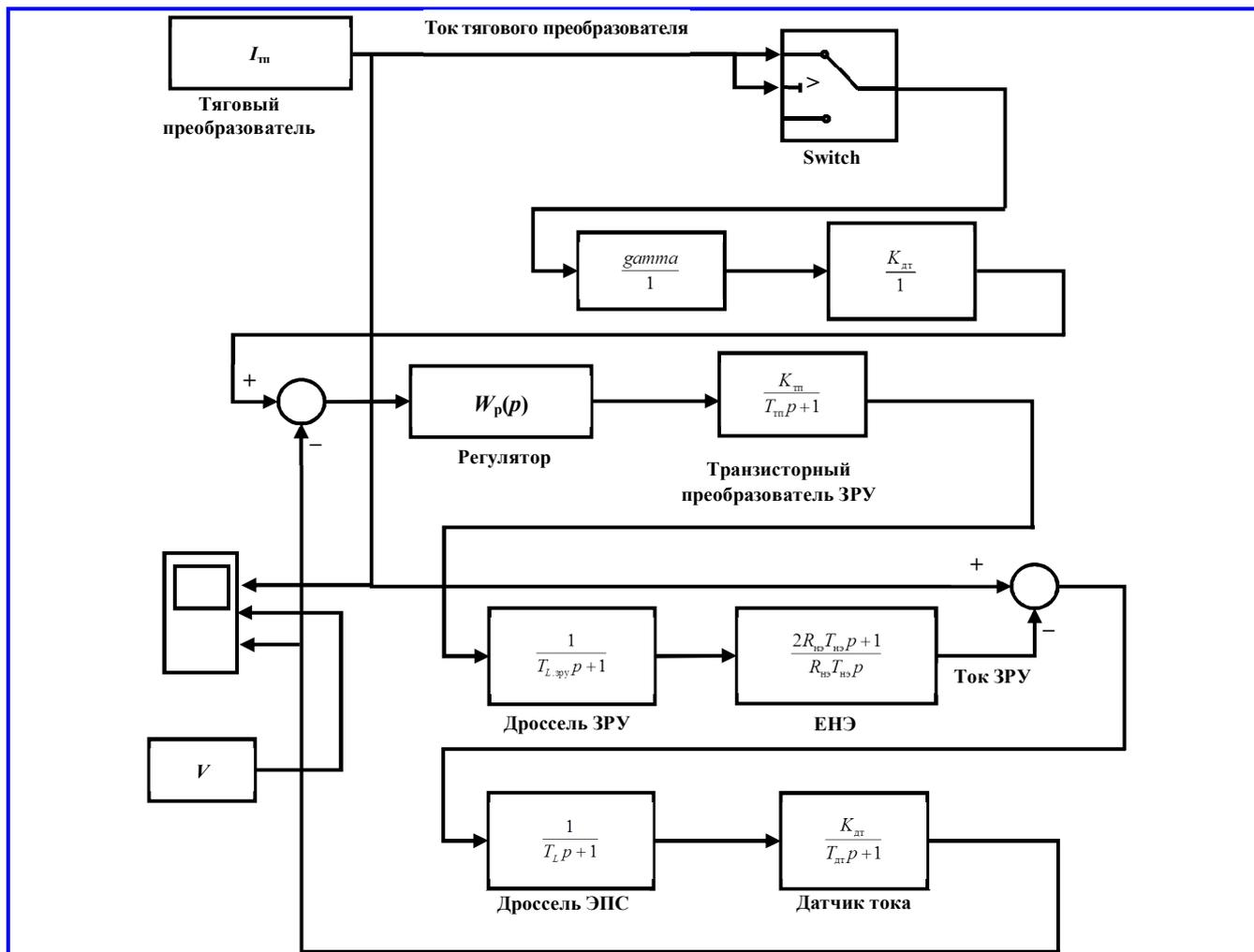


Рис. 3. Имитационная модель системы автоматического ограничения тока, потребляемого из сети

для исследования процессов в тяговом приводе с бортовым ЕНЭ представлена на рис. 3. Блок «Тяговый преобразователь» передает в модель данные о токах тяговых преобразователей, полученные в результате обработки архива записи параметров реальной поездки трамвайного вагона.

На рис. 4, а, б, представлены изменения тока тяговых преобразователей (штриховая линия) и тока, потребляемого из сети (сплошная линия), а также скорости движения моторного вагона, полученные по результатам имитационного моделирования. Из рисунка видно, что применение емкостного накопителя позволяет существенно ограничить ток, потребляемый из контактной сети, в режиме тяги и исключить ток сети в режиме рекуперативного торможения. Гистограммы распределения тока тяговых преобразователей и тока, потребляемого из сети, представлены на рис. 5, а и б соответственно. Очевидно, что применение бортового ЕНЭ позволяет уменьшить разброс значений тока контактной сети и снизить неравномерность энергопотребления подвижным составом.

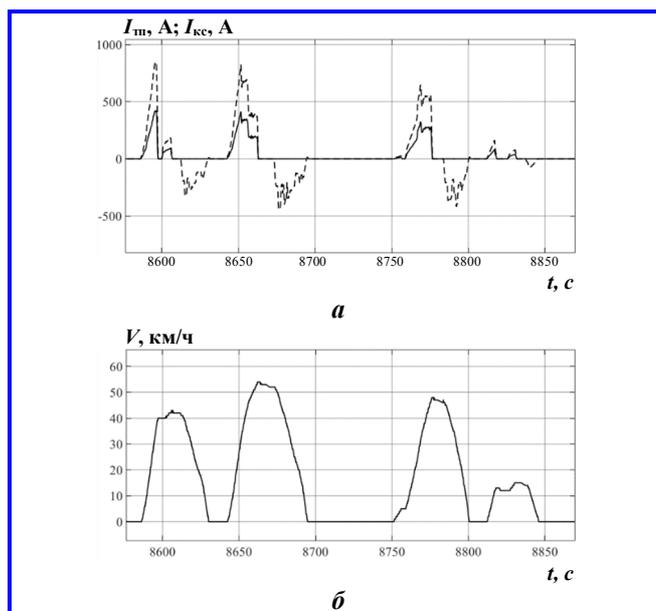


Рис. 4. Изменение тока тягового преобразователя (штриховая линия), тока сети (сплошная линия) (а) и скорости при движении моторного вагона (б)

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования по снижению тока тяговой сети с помощью бортовых ЕНЭ проводились на трамвайном вагоне модели ЛМ-68М2 бортовой номер 7546. На тяговый привод первой тележки был установлен накопитель энергии, который представлял собой установку из семи конденсаторных модулей типа МЛСК-56-150 производства «ТЭЭМП», включенных последовательно [5, 6]. Энергоемкость ЕНЭ 4,17 МДж. Тяговый привод второй тележки вагона работал по штатному варианту – без накопителя энергии. Испытания проводились в режиме движения вагона по маршруту с остановками на остановочных пунктах.

На рис. 6 даны фрагменты графиков изменения напряжения на фильтре (а), тока, потребляемого из сети (б), и скорости вагона (в) на одном цикле движения разгон-торможение. Результаты экспериментального исследования подтверждают существенное снижение тока, потребляемого из сети в режиме тяги, и отсутствие тока, отдаваемого в сеть, в режиме электрического торможения. Это уменьшает токовую нагрузку на контактную сеть и неравномерность ее нагрузки.

На рис. 7 приведен график изменения тока ЕНЭ в ходе движения по участку. Максимальный ток, потребляемый от ЕНЭ, составил 215 А, максимальный ток заряда ЕНЭ – 191 А. Средний ток, потребляемый от ЕНЭ, – 14 А.

Экспериментальные исследования выполнялись также для случая движения трамвайного вагона автономным ходом при работе только одной тележки, без питания от контактной сети, за счет энергии, запасенной в ЕНЭ. Результаты эксперимента даны на рис. 8. За время движения пройден путь более 950 м, напряжение ЕНЭ снизилось с $U_{нач} = 704,4$ В до $U_{кон} = 29,5$ В. Таким образом, бортовой ЕНЭ энергоемкостью 4,17 МДж способен в режиме заряд-разряд обеспечить автономный ход трамвайного вагона с остановками на расстояние почти 1 км; на это было израсходовано 13,1 МДж энергии.

На рис. 9 представлены графики изменения энергии, затрачиваемой на тягу, и скорости трамвайного вагона на всем маршруте движения (рис. 9, а) и фрагмент, соответствующий одному циклу движения разгон-торможение (рис. 9, б). Данные эксперимента указывают, что применение бортового ЕНЭ дает возможность экономии до 25 – 30 % энергии на каждом цикле движения.

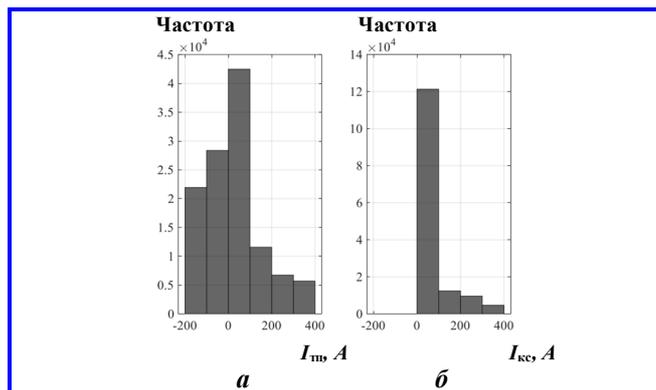


Рис. 5. Гистограммы распределения тока тяговых преобразователей (а) и тока, потребляемого из сети (б) при движении моторного вагона

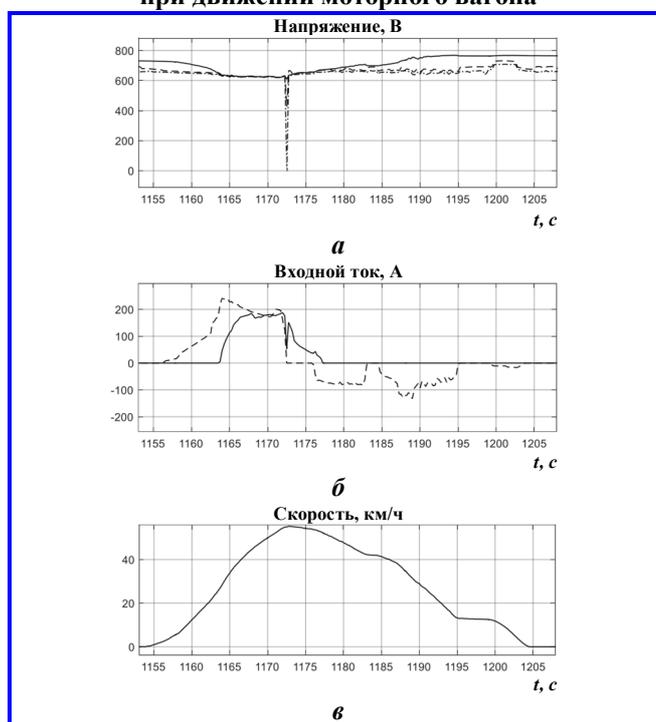


Рис. 6. Графики изменения напряжения на фильтре (а), тока тягового привода, потребляемого из сети (б), и скорости вагона (в) на одном цикле движения разгон-торможение. Сплошная линия – первая тележка (с емкостным накопителем энергии); штриховая линия – вторая тележка (без емкостного накопителя энергии); штрихпунктирная линия – напряжение контактной сети

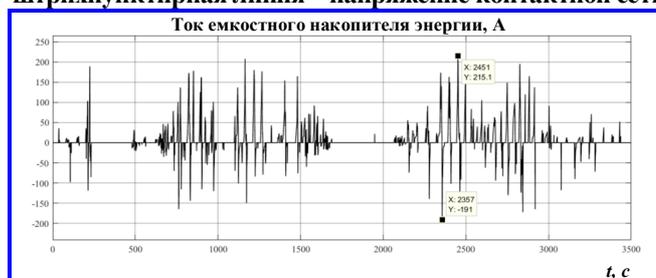


Рис. 7. Характер изменения тока заряда и разряда бортового емкостного накопителя энергии при движении моторного вагона по участку

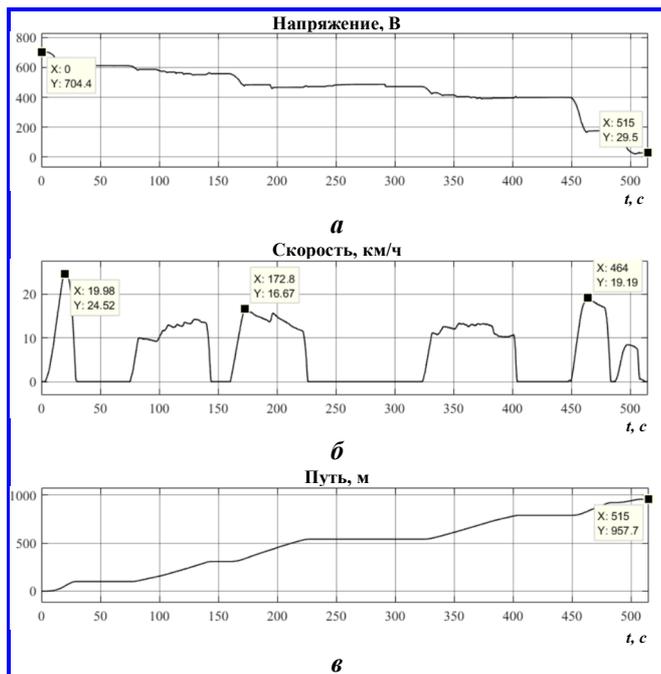


Рис. 8. Изменение напряжения бортового емкостного накопителя энергии (а), скорости движения (б) и пути (в), пройденного моторным вагоном в режиме автономного хода

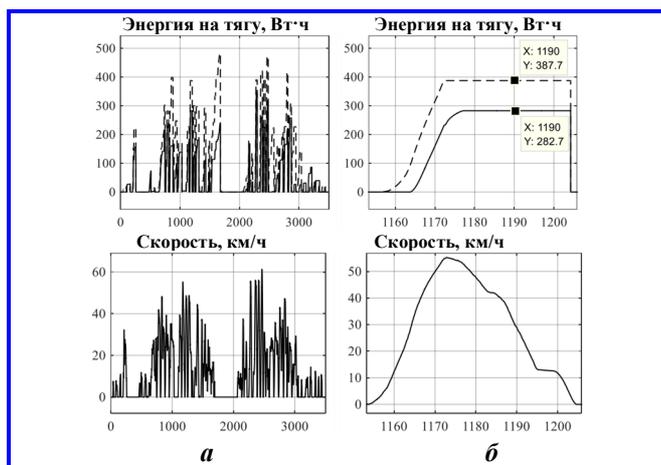


Рис. 9. Изменение энергии, затрачиваемой на тягу, и скорости трамвайного вагона при движении по маршруту (а) и в одном цикле разгон-торможение (б).

Сплошная линия – привод первой тележки (с бортовым емкостным накопителем энергии), штриховая линия – привод второй тележки (без бортового емкостного накопителя энергии)

Поступила в редакцию 28.11.2024

Владимир Анатольевич Шаряков, кандидат технических наук, исполнительный директор, e-mail: v_a_shar@mail.ru. (ООО «НПП «ЭПРО»).

Виктор Валерьевич Никитин, доктор технических наук, доцент, профессор, e-mail: pgups.emks@mail.ru.

Андрей Михайлович Евстафьев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, e-mail: evstam@mail.ru.

Павел Григорьевич Колпахчян, доктор технических наук, доцент, профессор, e-mail: kolpahchyan@mail.ru.

(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)).

Заключение

Применение бортовых накопителей энергии на подвижном составе городского электрического транспорта является эффективным инструментом сокращения потребления энергии на тягу. Применение бортового ЕНЭ на основе суперконденсаторных модулей позволяет сократить потребление энергии из тяговой сети на 25 – 30 % в каждом типовом цикле движения, а также уменьшить неравномерность потребления тягового тока и сократить токовую нагрузку на контактную сеть. При испытаниях бортовой ЕНЭ энергоемкостью 4,17 МДж обеспечивал автономный ход трамвайного вагона с остановками (при работе ЕНЭ в режиме заряд-разряд) на расстояние около 1 км, при этом расход энергии составил 13,1 МДж без ее потребления из контактной сети.

Литература

1. Российский статистический ежегодник. 2023 : статистический сборник / Росстат. – Москва, 2023 – 701 с.
2. Построение системы увеличенного автономного хода с ограничением потребляемого тока из контактной сети / В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, К. В. Шаряков [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 4. – С. 146–157.
3. Евстафьев, А. М. Энергосберегающие технологии на тяговом подвижном составе / А. М. Евстафьев, Т. С. Титова. – Санкт-Петербург : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. – 165 с.
4. Совершенствование тягового подвижного состава на основе современных технологий энергосбережения / А. М. Евстафьев, Д. Е. Киришин, В. В. Никитин [и др.] // Электротехника. – 2021. – № 2. – С. 2–6.
5. Lifshitz, M. V. Supercapacitor energy-accumulation system in conjunction with a traction converter for the accumulation of braking energy and its return during the acceleration of rail transport / M. V. Lifshitz. – DOI : 10.34660/INF.2022.46.51.024 // Proceedings of the International Conference «Process Management and Scientific Developments», Birmingham, United Kingdom, January 12. – 2022. – P. 182–191.
6. Шаряков, В. А. Использование бортовых накопителей энергии на городском рельсовом транспорте / В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, К. В. Марков // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2022. – № 4-5. – С. 44–48.

REDUCING ENERGY CONSUMPTION BY ROLLING STOCK OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT

**V. A. Sharyakov, V. V. Nikitin,
A. M. Evstafiev, P. G. Kolpakhchyan**

The rolling stock of urban electric transport is one of the major consumers of electric energy in the urban economy. The specificity of this consumer is a sharp unevenness of current consumption, which affects the voltage fluctuations of the contact network, an increase in energy losses in power supply systems, including the traction network and power equipment of substations, and a reduction in the service life of equipment. Although energy recovery is a fundamentally powerful tool for energy saving, it is not always effective and leads to an increase in the current load and an increase in voltage in the contact network. This article considers a method for reducing energy consumption by the rolling stock of urban electric transport and reducing the unevenness of energy consumption due to the use of an on-board capacitive storage device based on supercapacitor modules. The results of modeling processes in the system of automatic limitation of consumed current and the results of experimental trips of a motor car along the route in real conditions are presented. It is shown that the use of an on-board capacitive energy storage device can not only provide a significant reduction in the current consumed from the network in traction mode and supplied to the network in electric braking mode, but also enables autonomous operation of a tram car along a route with regular stops.

Key words: urban electric transport, on-board electric energy storage devices, electric energy consumption.

*Vladimir Anatolyevich Sharyakov, candidate of technical sciences, executive director, e-mail: v_a_shar@mail.ru.
(LLC «SPE «EPRO»).*

Victor Valeryevich Nikitin, doctor of technical sciences, associate professor, professor, e-mail: pgups.emks@mail.ru.

Andrey Mihaylovich Evstafiev, doctor of technical sciences, professor, head of department, e-mail: evstam@mail.ru.

*Pavel Grigoryevich Kolpakhchyan, doctor of technical sciences, associate professor, professor,
e-mail: kolpahchyan@mail.ru.*

(Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University).