

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.01

УДК 620.97, 621.331, 629.433, 629.085

А.В. Кацай¹, М.В. Шевлюгин²¹ООО «Кинемак», Москва, Россия²Российский университет транспорта, Москва, Россия

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ В ГОРОДСКОМ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ

Повышение энергетической эффективности выполнения пассажироперевозок городским электротранспортом является одной из важнейших задач в деятельности служб движения и служб энергохозяйства предприятий ГЭТ. Широкое внедрение тяговых частотных преобразователей на подвижном составе позволило создать условия для повторного применения на выполнение транспортной работы энергии рекуперативного торможения электроподвижного состава (ЭПС). Однако в силу невозможности полной синхронизации рекуперативного торможения и тяговой нагрузки в контактной сети полезное применение находит только часть рекуперативной энергии. Другая – избыточная часть рассеивается на тормозных резисторах вагонов. Применение буферных накопителей энергии различной конструкции и способов установки позволяет более полно использовать избыточную энергию рекуперации. **Цель исследования:** изучение процессов преобразования энергии в ходе работы стационарных и бортовых накопителей энергии различной конструкции в ходе приёма и выдачи энергии избыточной рекуперации тормозящего ЭПС, сравнение эффективности работы указанных накопителей энергии в ходе проведённых в России испытаний в городском электротранспорте. **Методы:** структурный анализ электрических схем накопителей энергии, сравнительный количественный анализ энергетических процессов работы буферных накопителей энергии различных типов. **Результаты:** рассмотрены процессы преобразования энергии в ходе торможения подвижного состава ГЭТ с рекуперацией в электрическую энергию для вагонов с различными типами систем управления тягой, а также с применением бортовых и стационарных накопителей энергии различных типов. Проведён расчёт объёмов возвращённой на полезную транспортную работу энергии рекуперативного торможения ЭПС для схем со стационарными и бортовыми, маховичными, суперконденсаторными и емкостными накопителями энергии на основании фактических данных их испытаний. В результате анализа выявлено, что сохранение межпоездных перетоков полезной рекуперативной электроэнергии, образующейся в ходе торможения подвижного состава, обеспечивает более полный возврат энергии, чем в случае ликвидации таких перетоков с применением бортовых накопителей. Также установлено, что максимальный объём возврата рекуперированной энергии обеспечивают стационарные накопители, а полный чистый возврат энергии рекуперации бортовыми суперконденсаторными накопителями с запретом межпоездного обмена рекуперативной энергией меньше, чем межпоездные перетоки полезной рекуперации у вагонов, не оснащённых никакими буферными накопителями. **Практическая значимость:** результаты исследований использованы для проведения расчётов эффективности экономии энергии на выполнение транспортной работы в ходе проведения испытаний в контактной сети трамвая стационарного накопителя энергии типа НКЭ-3Г. Также полученные в ходе исследования выводы могут быть использованы на предприятиях ГЭТ для планирования задач по применению буферных накопителей энергии для снижения энергопотребления на выполнение транспортной работы.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, рекуперация, преобразования энергии, накопитель энергии, система управления тягой, контактная сеть, энергопотребление на тягу, КПД, тяговая подстанция, подвижной состав.

A.V. Katsay¹, M.V. Shevlyugin²

¹ООО "Kinemak", Moscow, Russian Federation

²Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

ENERGY RECOVERY TRANSFORMATIONS IN URBAN ELECTRIC TRANSPORT

Improving the energy efficiency of passenger transportation by urban electric transport is one of the most important tasks in the activities of traffic services and energy services of GET enterprises. The widespread introduction of traction frequency converters on rolling stock made it possible to create conditions for the reuse of regenerative braking energy of electric rolling stock (EPS) for the performance of transport work. However, due to the impossibility of full synchronization of regenerative braking and traction load in the contact network, only part of the regenerative energy finds useful use. The other – excess – part is dissipated on the brake resistors of the wagons. The use of buffer energy storage devices of various designs and installation methods allows for more complete use of excess energy recovery. **The purpose of the study:** to study the processes of energy conversion during the operation of stationary and on-board energy storage devices of various designs during the reception and delivery of energy from excessive recovery of braking EPS, to compare the efficiency of these energy storage devices during tests conducted in Russia in urban electric transport. **Methods:** structural analysis of electrical circuits of energy storage devices, comparative quantitative analysis of energy processes of operation of buffer energy storage devices of various types. **Results:** the processes of energy conversion during braking of rolling stock with recuperation into electrical energy for wagons with various types of traction control systems, as well as with the use of on-board and stationary energy storage devices of various types are considered. The calculation of the volumes of energy of regenerative braking of EPS returned to useful transport work for circuits with stationary and on-board, flywheel, supercapacitor and capacitive energy storage devices based on the actual data of their tests is carried out. As a result of the analysis, it was revealed that the preservation of inter-train flows of useful regenerative electricity generated during braking of rolling stock provides a more complete return of energy than in the case of elimination of such flows using onboard storage devices. It is also established that the maximum return of recovered energy is provided by stationary storage devices, and the total net return of recovery energy by onboard supercapacitor storage devices with the prohibition of inter-train exchange of regenerative energy is less than the inter-train flows of useful recovery in wagons not equipped with any buffer storage devices. **Practical significance:** the results of the research were used to calculate the efficiency of energy saving for performing transport work during tests in the tram contact network of a stationary energy storage device of the NKE-3G type. Also, the conclusions obtained in the course of the study can be used at GET enterprises to plan tasks for the use of buffer energy storage devices to reduce energy consumption for transport work.

Keywords: Regenerative braking, recovery, energy conversion, energy storage, traction control system, contact network, traction power consumption, efficiency, traction substation, rolling stock.

Введение

Современный подвижной состав городского электротранспорта в ходе рекуперативного торможения может возвращать часть энергии, затраченной на тягу, в виде электроэнергии на повторное полезное применение в контактной сети. В ходе такого возврата механической энергии движущегося вагона происходят её многочисленные превращения, которые зависят как от состава тягового оборудования вагонов,

так и от ситуации в контактной сети. Пуском этих процессов служит переход движения вагона после разгона и выбега в торможение. Первичным значением отсчёта для этих преобразований служит механическая энергия движущегося вагона в момент начала торможения. Различия в объёмах полезно утилизированной рекуперативной энергии обусловлены различным составом и конфигурацией силового электрооборудования системы энергоснабжения транспортной работы, позволяющего оборачивать энергию, выделяемую вагоном при торможении. Задачей настоящего исследования является определение последовательностей преобразования энергии рекуперативного торможения электроподвижного состава с применением различных типов накопителей энергии (НЭ) и сравнение их эффективности.

1. Механическая энергия торможения

В момент t_0 перехода в торможение вагон движется линейно с определённой скоростью ($v_{\text{торм}}$), и при этом его колёса и ротор тягового электродвигателя (наряду с валом трансмиссии, передающим момент от вала электродвигателя к валу колёс, и наоборот) вращаются с угловой скоростью (ω), определяемой линейной скоростью. Суммарная масса подвижного состава ($m_{\text{пс}}$) складывается из массы тары, массы груза и пассажиров, а момент инерции вращающихся частей складывается из моментов инерции вала двигателя и вала трансмиссии. Для упрощения расчётов предполагаем, что поезд движется по прямолинейному горизонтальному участку пути, а воздушное сопротивление движению и силы трения во всех движущихся парах металл-металл в вагоне выносим за скобки рассмотрения. Рекуперативное (электрическое) торможение вагона возможно до момента снижения скорости подвижного состава до $v_{\text{мех}} = 5...7$ км/ч [2]. На этой линейной скорости вагона скорость вращения ротора тяговых электродвигателей снижается до точки срыва генераторного режима (примерно 250–300 об/мин в зависимости от типа электродвигателя и уровня намагничивания ротора), после чего вагон тормозит механическими тормозами. В силу этого преобразование механической энергии движущегося ЭПС в электрическую возможно в интервале скоростей от скорости начала торможения $v_{\text{торм}}$ до скорости замещения электрического торможения

механическим $v_{\text{мех}}$. Количество механической энергии, которое потенциально может быть преобразовано в электрическую тяговыми электромашинами в процессе торможения, рассчитывается по выражению:

$$E_{\text{мех}}^{\text{рек}} = (1 + \gamma) \frac{m_{\text{пс}} (v_{\text{торм}}^2 - v_{\text{мех}}^2)}{2},$$

где γ – коэффициент инерции вращающихся масс подвижного состава.

Потери в трансмиссии достаточно малы, и в общем случае КПД трансмиссии составляет порядка 0,99.

Далее при сравнении различных систем оборота энергии торможения вагона будем подразумевать, что рассматриваются одинаковые по массе и другим техническим характеристикам вагоны в одинаковых условиях, отличающиеся только составом оборудования системы тяги.

2. Электроподвижной состав с реостатно-контакторной системой управления тягой

В вагоне с реостатно-контакторной системой управления тягой (РКСУ) энергия линейного механического движения вагона и энергия вращающихся масс вагона, главным образом – колёс ($E_{\text{мех}}^{\text{рек}}$), в обратном тяговом электродвигателе, работающем в режиме генерации, преобразуются в электрическую энергию ($E_{\text{эл}}^{\text{рек}}$), которая подаётся на входные клеммы электродвигателя. КПД тяговой электромашины постоянного тока равен порядка 0,85 (рис. 1).



Рис. 1. Этапы преобразования рекуперативной энергии в системе с ЭПС с реостатно-контакторной системой тяги

У вагонов с РКСУ, на которых установлены тяговые электромашины постоянного тока, эта энергия по электрической схеме, собранной для процесса торможения, подаётся на пуско-тормозные резисторы и рассеивается теплом в атмосфере, полностью являясь избыточной для повторного использования ($E_{\text{изб}}^{\text{рек}}$). Другими словами, ва-

гон с РКСУ, имеющий потенциал возврата на полезную работу механической энергии в ходе торможения, так и оставляет в себе этот потенциал нереализованным, несмотря на преобразование тяговым двигателем механической энергии в электрическую, т.е. для таких вагонов $E_{изб}^{рек} = E_{эл}^{рек}$.

3. Электроподвижной состав с транзисторно-инверторными системами управления тягой

У подвижного состава, тяговые электродвигатели которого оснащены силовыми частотными транзисторно-инверторными системами управления (ТИСУ), имеется возможность преобразования энергии с клемм тягового электродвигателя ($E_{эл}^{рек}$) в энергию постоянного тока $E_{тису}^{рек}$ с требуемыми контактной сетью параметрами (напряжение не ниже мгновенного напряжения КС). КПД тягового преобразователя довольно высок и в среднем равен порядка 0,95. В случае наличия в КС нагрузки с мощностью, сопоставимой с мощностью рекуперирующего тягового двигателя, преобразованная инвертором энергия $E_{тису}^{рек}$, полученная с тяговой электромашины $E_{эл}^{рек}$, уходит в КС на эту нагрузку, становясь полезной энергией рекуперации ($E_{полезн}^{рек}$). При отсутствии такой нагрузки энергия $E_{тису}^{рек}$ рассеивается на тормозных резисторах, становясь избыточной $E_{изб}^{рек}$. Совокупно за рассматриваемый период объём энергии, выходящей при рекуперации из тягового привода, рассчитывается по формуле:

$$E_{тису}^{рек} = E_{полезн}^{рек} + E_{изб}^{рек} \quad (1)$$

При этом $E_{изб}^{рек} < E_{изб}^{рек}$.

Полезная энергия рекуперации $E_{полезн}^{рек}$ по межпоездному обмену через контактную сеть расходуется рекуперирующим вагоном частично для себя на энергоснабжение своих нетяговых нужд, а также для других вагонов на изолированных участках КС данной подстанции, на их тяговые и нетяговые нужды. Кроме того, полезная энергия рекуперации также может питать стационарную электрическую нагрузку, питаемую от КС (светофоры, обогрев стрелок, системы информирования пассажиров и освещение на остановочных павильонах,

системы контроля путей и т.д.). Избыточная часть преобразованной тяговым преобразователем энергии рекуперации $E_{изб}^{рек}$ в таких вагонах остаётся в них нереализованной на повторное использование – рассеивается на тормозных резисторах.

По данным долгосрочных наблюдений объёмов потребления энергии на тягу трамваев, оборудованных тяговыми частотными преобразователями и двунаправленными счётчиками энергии, доля возврата затраченной на тягу электроэнергии в КС, образуемой при торможении вагонов ($E_{полезн}^{рек}$), составляет, в зависимости от сезона года, от 25 до 33 % от потребления на тягу (рис. 2).

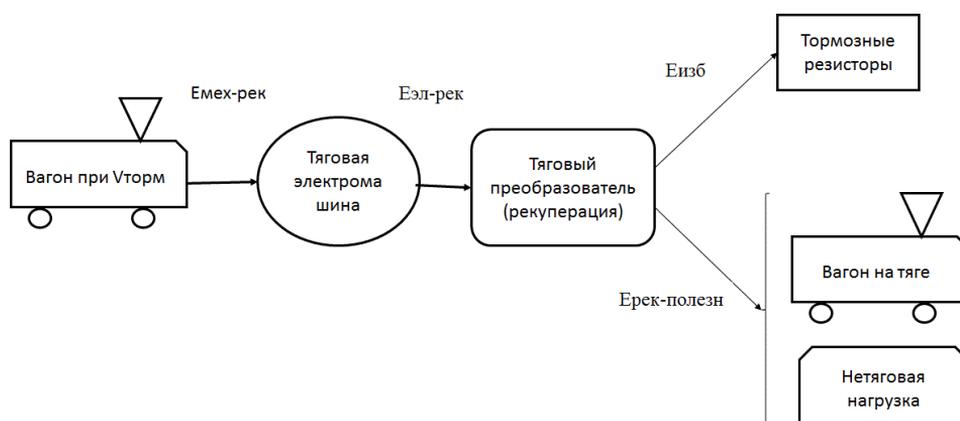


Рис. 2. Этапы преобразования рекуперативной энергии в системе с ЭПС с транзисторно-инверторной системой тяги

В среднем по году (например, за 2021 г.) в рассматриваемой системе это значение составило 27,23 % от тягового энергопотребления. Этот показатель хорошо коррелирует с теоретическими расчётами исследователей [5, 8–10].

При этом полный объём энергии рекуперации – полезной и избыточной ($E_{тису}^{рек}$), по данным некоторых исследователей [14], может составлять до половины и более от потребления энергии вагонами на тягу ($E_{тяги}$). В случае верности этой оценки доли полного объёма превращённой тяговой системой механической энергии рекуперативного торможения вагонов в электроэнергию, подходящую по параметрам к требованиям КС, доля избыточной рекуперации ($E_{изб}^{рек}$) составляет в среднем по году до 23 % от энергопотребления на тягу. По оценкам

в работе [8], этот показатель в сетях метрополитена может составлять до 14,91 % от потребления на тягу; отличие этого показателя в метрополитене может определяться особенностями состава оборудования поездов и расписанием их движения, отличных от наземного ГЭТ.

В ходе упомянутых длительных измерений потребляемой энергии в нескольких системах энергоснабжения транспортной работы трамваев, полностью оснащённых системами ТИСУ, доля потреблённой на тягу энергии ($E_{\text{тяги}}$) составила примерно 2/3 от полной выдачи тяговой подстанцией выпрямленной энергии в КС ($E_{\text{ТП}}$). Таким образом, по году объём полезной рекуперации составляет порядка 18 % от выданной тяговой подстанцией выпрямленной энергии, а объём избыточной рекуперации – порядка 15 %. Полный потенциал энергии рекуперации вагонов (полезной и избыточной) в системе энергоснабжения транспортной работы ГЭТ с вагонами, оснащёнными ТИСУ, составляет до трети от всей выдачи тяговой подстанции.

4. Электроподвижной состав с ТИСУ и бортовым накопителем с запретом межпоездного обмена рекуперативной энергией

В последние годы в связи с достижениями в разработках суперконденсаторных буферных накопителей энергии многие производители подвижного состава испытывают вагоны с установленными на них такими системами. Бортовой накопитель (БН) имеет в составе тягового оборудования блок суперконденсаторов с системой контроля параметров и собственный преобразователь энергии. БН включён в схему тяги таким образом, что при торможении вагона он аккумулирует всю энергию рекуперативного торможения, выходящую из тягового преобразователя. При этом выдача энергии из преобразователя в контактную сеть на межпоездной обмен полезной рекуперацией (МПО) – для других вагонов и для собственных нетяговых нужд – невозможна. Инвертор бортового накопителя преобразует энергию со звена постоянного тока тягового преобразователя $E_{\text{тису}}^{\text{рек}}$ в нужные для зарядки суперконденсаторов параметры, и эта энергия запасается в виде напряжения между заряженными слоями суперконденсаторов. При начале разгона вагона инвертор БН открывается, преобразуя запасённую в суперконденсаторах энергию и выдавая её на звено постоянного тока тягового преобразователя для

энергоснабжения им тягового электродвигателя, замещая тем самым часть потребления энергии на тягу из контактной сети. Иными словами, при достаточной ёмкости суперконденсаторов для приёма всей энергии рекуперации последняя не делится на полезную и избыточную с точки зрения КС, а полностью возвращается вагону для себя только на свои тяговые нужды после опосредствованного хранения в суперконденсаторах и двойного преобразования – при их зарядке и при разрядке ($E_{\text{возвр}}^{\text{нэ}}$).

Брутто-объём возвращённой на полезную работу энергии рекуперативного торможения вагона есть сумма полезной энергии рекуперации, выданная по межпоездным перетокам по КС и выданной буферным накопителем энергии на потребителя без учёта косвенных затрат энергии на его функционирование:

$$E_{\text{возвр-брутто}}^{\text{нэ}} = E_{\text{полезн}}^{\text{рек}} + E_{\text{возвр}}^{\text{нэ}} \cdot \quad (2)$$

В соответствии с этой формулой для вагонов с РКСУ оба показателя – нулевые; для вагонов с ТИСУ и без накопителей нулевым является второе слагаемое; для вагонов с бортовым накопителем нулевым является первое слагаемое; а для систем со стационарным накопителем – оба слагаемых ненулевые (рис. 3).

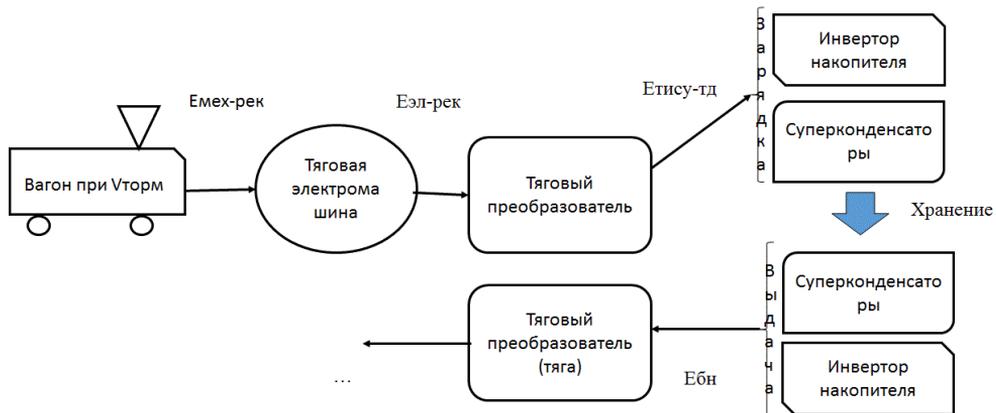


Рис. 3. Этапы преобразования рекуперативной энергии в системе с ЭПС с ТИСУ и бортовым накопителем энергии без возможности межпоездного обмена рекуперацией

Полный нетто-объём возвращённой энергии рекуперации вагона на полезную транспортную работу ($E_{\text{возвр-нетто}}^{\text{рек}}$) включает межпоездные перетоки рекуперации ($E_{\text{полезн}}^{\text{рек}}$) и чистый опосредствованный возврат

накопителями ($E_{\text{возвр-чист}}^{\text{НЭ}}$), учитывающий затраты энергии на собственные нужды накопителя и затраты на его перевозку:

$$E_{\text{возвр-нетто}}^{\text{рек}} = E_{\text{полезн}}^{\text{рек}} + E_{\text{возвр-чист}}^{\text{НЭ}}. \quad (3)$$

Для электротранспортных систем с бортовыми накопителями энергии любых типов показатель $E_{\text{полезн}}^{\text{рек}}$ равен нулю.

По данным производителей суперконденсаторных бортовых накопителей [11], действительный КПД цикла запасание/выдача (т.е. без учёта косвенных затрат энергии $E_{\text{косв-затр}}^{\text{НЭ}}$, складывающихся из затрат на собственные нужды бортового накопителя $E_{\text{собств-нужд}}^{\text{НЭ}}$ и его перевозку вагоном в ходе выполнения транспортной работы $E_{\text{перевоз}}^{\text{НЭ}}$) составляет порядка 0,684. По нашим расчётам фактический КПД (т.е. с учётом указанных сопутствующих затрат энергии) таких систем равен порядка 0,59.

С учётом косвенных затрат энергии на функционирование накопителя нетто-объём возвращённой энергии рекуперации вагона на полезную транспортную работу будет описан формулой:

$$E_{\text{возвр-чист}}^{\text{НЭ}} = E_{\text{возвр}}^{\text{НЭ}} - E_{\text{косв-затр}}^{\text{НЭ}} = E_{\text{возвр}}^{\text{НЭ}} - E_{\text{собств-нужд}}^{\text{НЭ}} - E_{\text{перевоз}}^{\text{НЭ}}. \quad (4)$$

Здесь следует отметить, что для стационарных накопителей энергии, в отличие от таковых бортового исполнения, затраты на перевозку – нулевые.

Для полной полезной утилизации избыточной энергии рекуперативного торможения вагонов, движущихся по маршрутам, требуется установка таких накопителей на все единицы ЭПС.

5. Электроподвижной состав с ТИСУ и стационарным накопителем

Структура этапов преобразования энергии рекуперативного торможения вагонов при работе стационарных накопителей энергии (СН) в КС тяговой подстанции, по участкам которой ходит подвижной состав с системами ТИСУ, представляет собой комбинацию режимов работы, описанных для второго и третьего случаев. Особенность этой комбинации задаётся системой управления СН, которая позволяет принимать только избыточную энергию рекуперативного торможения

вагонов $E_{\text{изб}}^{\text{рек}}$, а полезная рекуперация $E_{\text{полезн}}^{\text{рек}}$ остаётся вне зон активной работы таких накопителей, т.е. сохраняется в том виде, как она обменивается по межпоездным перетокам рекуперации в системах энергообеспечения транспортной работы вагонов с ТИСУ без буферных накопителей. В случае, если при рекуперации одного трамвая в сети имеется сопоставимая по мощности нагрузка, то энергия рекуперации этого вагона $E_{\text{полезн}}^{\text{рек}}$ уходит по межпоездным перетокам на потребляющий вагон; при этом напряжение в КС не вырастает выше верхней уставки стационарного накопителя. При отсутствии такого полезного потребителя в КС напряжение на клеммах тягового преобразователя тормозящего вагона вырастает, поднимая его и в КС. Наличие в сети избыточной рекуперации распознаётся стационарным накопителем по превышению мгновенного значения напряжения выше уровня верхней уставки, выставляемой от среднего значения напряжения ТП на холостом ходу в точке цепи, куда присоединён стационарный накопитель. По достижении значения верхней уставки накопителя последний переходит в режим приёма энергии.

Управляемые накопители энергии, например, маховичного типа НКЭ-3Г, имеющие в составе оборудования частотный преобразователь и мотор-генератор (МГ), преобразуют получаемую энергию избыточной рекуперации ($E_{\text{изб}}^{\text{рек}}$), поступающую по КС от тормозящего вагона, вначале при помощи преобразователя в форму электроэнергии, соответствующую требованиям питания МГ, а затем в электромашине в механическую энергию вращения вала, раскручивающего маховик.

Возникновение условий в сети для выдачи ранее запасённой энергии рекуперации, без стационарного накопителя оставшейся бы избыточной, определяется системой управления СН по снижению мгновенного значения напряжения в сети ниже нижней уставки, также выставляемой от уровня среднего напряжения ТП на холостом ходу в точке присоединения стационарного накопителя.

Система управления накопителя переводит мотор-генератор в генераторный режим, при этом механическая энергия вращения маховика преобразуется в электроэнергию, которая выдаётся на клеммы обмотки статора электромашины. После этого преобразователь накопи-

теля преобразует эту трёхфазную энергию в энергию постоянного тока ($E_{\text{возвр}}^{\text{НЭ}}$) и выдаёт её в КС на потребление появившейся сетевой нагрузкой (рис. 4).

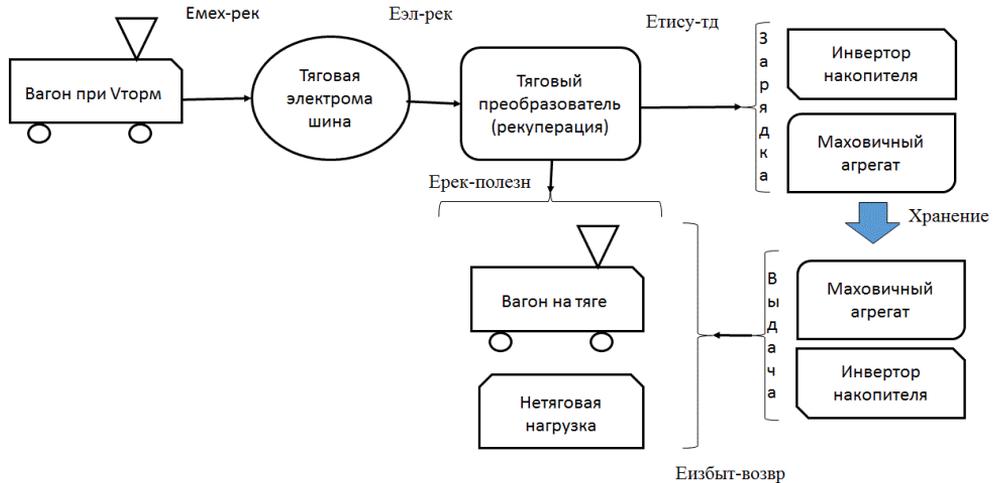


Рис. 4. Этапы преобразования рекуперативной энергии в системе с ЭПС и стационарными управляемыми маховичными накопителями

Преобразование энергии в стационарном неуправляемом накопителе энергии, например, типа ЕНЭ, испытывавшемся в московском метрополитене, исключает этап преобразования в инверторе, так как в его конструкции он отсутствует (рис. 5).

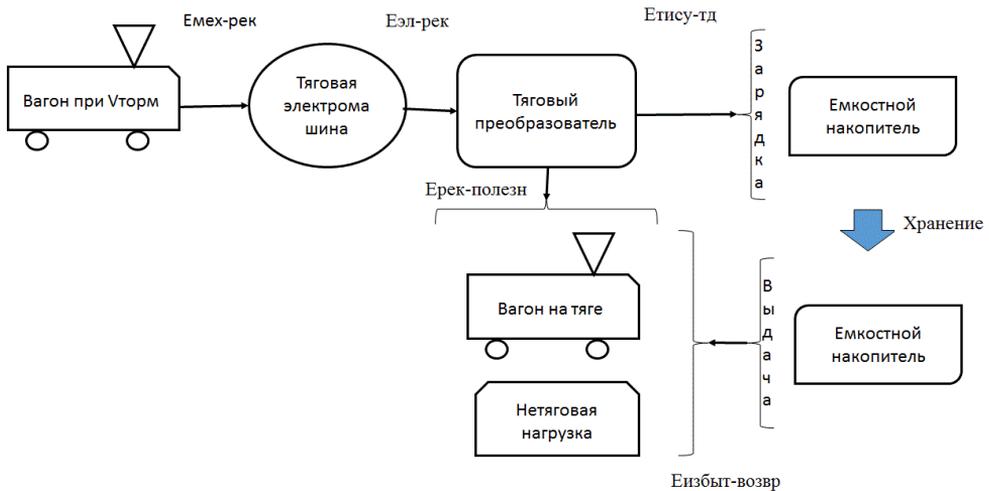


Рис. 5. Этапы преобразования рекуперативной энергии в системе с ЭПС и неуправляемыми стационарными емкостными накопителями

В электрической цепи КС со стационарным накопителем энергия рекуперации вагона распределяется следующим образом. Часть её напрямую уходит от рекуперирующего вагона по межпоездным перетокам на полезную нагрузку для других вагонов и энергопотребляющей стационарной инфраструктуры, и одновременно часть потребляется им для себя на свою нетяговую нагрузку. Избыточная часть энергии рекуперации, имеющаяся при отсутствии в сети сопоставимой по мощности нагрузки, перетекает от рекуперирующего вагона по КС в буферный накопитель, который её опосредует перед выдачей на нагрузку, которая появится после этого. В том числе такой новой нагрузкой может быть и тот вагон, от которого стационарный накопитель принял энергию избыточной рекуперации и который через некоторое время перешёл в категорию потребителя энергии (на тягу и нетяговые нужды). Таким образом, энергия рекуперации тормозящего вагона в сети с наличием стационарного накопителя выдаётся этим вагоном частично непосредственно для себя (на свои нетяговые нужды при межпоездных перетоках), частично непосредственно для других вагонов и стационарной инфраструктуры (межпоездные перетоки) и частично при опосредствовании стационарным накопителем для себя (тяга и нетяговые нужды) и для других сетевых потребителей.

Полный нетто-объём возврата энергии рекуперации ($E_{\text{возвр-нетто}}^{\text{рек}}$) в этом случае, согласно формуле (3), состоит из суммы межпоездных перетоков ($E_{\text{полезн}}^{\text{рек}}$) при непосредственной утилизации полезной рекуперации тормозящих вагонов и опосредствованной стационарным накопителем полезной утилизации избыточной энергии рекуперации ($E_{\text{возвр-чист}}^{\text{нз}}$). Оба значения при этом – ненулевые, т.е. стационарный накопитель сохраняет для повторной полезной работы прямые межпоездные перетоки полезной рекуперации и, опосредствованно, с помощью промежуточного хранения, – избыточную энергию рекуперации. Суммарно – всю рекуперирруемую тяговыми преобразователями вагонов при торможении энергию, за вычетом потерь и затрат на собственные нужды накопителей.

Для полной полезной утилизации избыточной энергии рекуперативного торможения вагонов, движущихся по маршрутам, требуется установка по одному стационарному накопителю на каждую тяговую подстанцию системы, тогда как в случае применения бортовых накопителей они должны быть установлены на всех единицах подвижного

состава. Количество ЭПС в любом предприятии ГЭТ в несколько раз превышает количество питающих контактную сеть тяговых подстанций. Другими словами, для полной утилизации избыточной рекуперации вагонов потребуется в несколько раз больше бортовых накопителей энергии, чем стационарных, при практически одинаковых характеристиках у тех и других.

6. Электроподвижной состав с ТИСУ и бортовым накопителем с возможностью межпоездного обмена рекуперативной энергией

Ещё один вариант бортового накопителя энергии на основе суперконденсаторных сборок был теоретически исследован и практически испытан на борту трамвая [14]. Особенностью этого накопителя являлось то, что он был установлен на замену тормозных резисторов, присоединён к звену постоянного тока и допускал возможность межпоездного обмена полезной энергией рекуперации при наличии нагрузки в контактной сети и запасал только избыточную энергию рекуперативного торможения. При этом его энергоёмкость была сопоставима с энергоёмкостью суперконденсаторного накопителя, который принимал всю энергию рекуперации вагона при торможении. Это было сделано из-за того, что он должен принимать в единичном цикле избыточной рекуперации всю эту энергию, когда в сети нет нагрузки за всё время единичного торможения вагона. Другими словами, масса этого накопителя была практически аналогичной с СКН без возможности МПО, и расходы энергии на перевозку такого накопителя с возможностью МПО равнялись расходам на перевозку первого. Испытания проходили в Санкт-Петербурге. Схема потоков рекуперативной энергии для бортового управляемого СКН с возможностью МПО практически совпадает со схемой на рис. 2 с тем отличием, что накопитель с возможностью МПО позволяет выдавать в сеть полезный объём рекуперированной энергии. При работе такого устройства часть энергии рекуперации идёт на сетевую нагрузку по межпоездному обмену непосредственно, а часть – опосредствованно бортовым накопителем на свою систему тяги после хранения при начале разгона вагона. Коэффициент полезного действия такого бортового накопителя с возможностью МПО рекуперацией равен КПД бортового СКН с запретом МПО. Для полной полезной утилизации

избыточной энергии рекуперативного торможения вагонов, движущихся по маршрутам, требуется установка бортовых накопителей на все единицы ЭПС.

7. Расчёт нетто-объёмов возврата энергии рекуперации на полезную работу

Для определения нетто-объёмов возврата на полезную работу энергии рекуперативного торможения ЭПС по (3) проведём расчёт по вышеописанным конфигурациям оборудования в сети энергоснабжения ГЭТ с учётом фактических показателей разных типов накопителей энергии, испытанных в России. Зададим единые условия для каждого сценария: отсутствие накопителей в КС, наличие бортовых накопителей – с запретом и разрешением на МПО, наличие стационарного накопителя (два варианта – маховичный типа НКЭ-3Г и емкостной на основе электрохимических конденсаторов типа ЕНЭ). В качестве единицы подвижного состава рассмотрим вагон типа 71-631, оснащённый транзисторной системой управления тяги (ТИСУ), который ходит по изолированным участкам тяговой подстанции. За рабочий день пробег вагона составляет 200 км. Масса тары вагона, согласно каталогу производителя [13], составляет 36 т. Массу пассажиров во внимание не принимаем. Согласно отраслевой методике [12], удельный расход на тягу этого вагона составляет 85 кВт·ч/1000 тн·км, т.е. нормативный расход электроэнергии на тягу для него составляет 612 кВт·ч в сутки. Бортовой накопитель энергии имеет массу 1 т; с учётом такого прибавления к массе тары для этого вагона суточный расход энергии на тягу составляет 629 кВт·ч. Погодные условия и дорожная обстановка одинаковы для всех четырёх рассматриваемых случаев.

Среднегодовая доля полезной энергии рекуперации от потребления на тягу, как указано выше, составляет 27,23 % от тягового энергопотребления. Согласно данным литературных источников [14, 16], средняя доля полного объёма рекуперированной энергии ($E_{\text{тису}}^{\text{рек}}$) от тягового потребления находится в диапазоне 42–63 %. Для удобства расчётов примем для типовых режимов движения ГЭТ значение этого показателя в объёме половины от тяги. Следовательно, система ТИСУ такого вагона преобразует при рекуперативном торможении механическую энергию в электроэнергию, по параметрам годную к выдаче в КС, и объём рекуперированной тяговым преобразователем энергии равен половине энергии, израсходованной на тягу.

Из рекуперированной тяговым приводом механической энергии движения вагона в электрическую энергию во всех вариантах, кроме вагона с бортовым накопителем, напрямую полезно утилизируемая энергия по межпоездным перетокам по контактной сети ($E_{\text{полезн}}^{\text{рек}}$), составляет порядка 0,2723 от объёма потребления на тягу ($E_{\text{тяги}}$). У вагонов с бортовым накопителем и запретом МПО прямые перетоки рекуперации в КС невозможны. Разница между $E_{\text{тису}}^{\text{рек}}$ и полезной рекуперацией – это избыточная энергия рекуперации ($E_{\text{изб}}^{\text{рек}}$). У вагонов с бортовым накопителем и запретом МПО вся энергия рекуперации вагона ($E_{\text{тису}}^{\text{рек}}$) поступает на накопитель. В стационарные накопители и бортовой накопитель с возможностью МПО запасается только избыточная энергия рекуперации ($E_{\text{изб}}^{\text{рек}}$).

Из накопителей энергии, за вычетом потерь на преобразования в инверторах и потерь в накопительных элементах, ранее поступившая энергия рекуперации вагона возвращается на потребителя ($E_{\text{возвр}}^{\text{нэ}}$): у бортовых накопителей обоих типов – непосредственно на звено постоянного тока тягового привода, у стационарных – в КС, к которой подключены потребители.

Помимо потерь энергии в инверторах и накопительных элементах накопители энергии потребляют токи на собственные нужды. Бортовые накопители перевозятся вместе с тарой вагона, на что также тратится энергия из КС. В ходе испытаний стационарного маховичного накопителя измерялся полный, т.е. с учётом затрат на собственные нужды, КПД, который равен порядка 65 % от всей входной энергии (система имеет один ввод для силовых и управляющих токов по напряжению 600 В). Суточные затраты энергии на собственные нужды для обоих типов бортовых управляемых СКН (с запретом и возможностью МПО) составляют ~34 кВт·ч, для стационарного неуправляемого ЕНЭ – 15 кВт·ч. Затраты энергии на перевозку бортовых накопителей обоих типов рассчитывались по отраслевой методике [12] с учётом удельного тягового энергопотребления для выбранного типа вагона 71-631 и составили 17 кВт·ч в сутки. Чистый эффект по опосредствованному возврату поступившей в накопители энергии рекуперации вагона ($E_{\text{возвр-чист}}^{\text{нэ}}$) учитывает перечисленные затраты (4).

Для оценки эффективности различных схем возврата энергии рекуперации используется единый показатель доли возвращённой энергии рекуперации по всем каналам от энергии, затраченной на тягу:

$$\beta = \frac{E_{\text{возвр-нетто}}^{\text{рек}}}{E_{\text{тяги}}} = \frac{E_{\text{полезн}}^{\text{рек}} + E_{\text{возвр-чист}}^{\text{рек}}}{E_{\text{тяги}}} \quad (5)$$

Результаты расчётов объёмов возврата энергии рекуперации, сделанные на основании фактических данных по проведённым в России испытаниям указанных накопителей энергии четырёх типов, сведены в таблицу.

Расчёт возврата энергии рекуперации на полезную работу за сутки для вагона 71-631 (с ТИСУ)

№ п/п	Этап преобразования	Вагон ТИСУ без НЭ	Бортовой управляемый СКН без МПО	Бортовой управляемый СКН с МПО	Стационарный управляемый НКЭ-3Г	Стационарный неуправляемый ЕНЭ
1	$E_{\text{тяги}}$, кВт·ч	612	629*	629*	612	612
2	$E_{\text{тису}}^{\text{рек}}$ (1), кВт·ч	306	315	315	306	306
3	$E_{\text{полезн}}^{\text{рек}}$, кВт·ч	167	0	167	167	167
4	$E_{\text{изб}}^{\text{рек}}$, кВт·ч	139	315	148	139	139
5	$E_{\text{возвр}}^{\text{нэ}}$, кВт·ч		215	141	91	133
6	$E_{\text{возвр-брутто}}$ (2), кВт·ч	167	215	308	257	300
7	$E_{\text{собст-нужд}}^{\text{нэ}}$, кВт·ч	0	34	34	**	15
8	$E_{\text{перевоз}}^{\text{нэ}}$, кВт·ч	0	17	17	0	0
9	$E_{\text{косьв-затрат}}^{\text{нэ}}$, кВт·ч	0	51	51	**	15
10	$E_{\text{возвр-чист}}^{\text{нэ}}$ (4), кВт·ч	0	164	90	91	118
11	$E_{\text{возвр-нетто}}^{\text{рек}}$ (3), кВт·ч	167	164	257	257	285
12	$E_{\text{ТП}}$, кВт·ч	445	465	372	355	327
13	β (5)	0,27	0,26	0,41	0,42	0,47

*Увеличение потребления на тягу для вагонов с бортовым СКН обусловлено ростом массы тары вагона на массу этого устройства, которое в расчётах принято в размере 1 т.

**Для стационарного накопителя маховичного типа НКЭ-3Г затраты собственных нужд учтены в показателе $E_{\text{возвр}}^{\text{нэ}}$, так как входной двунаправленный счётчик фиксировал сводные данные по питанию силовой цепи и цепи собственных нужд, поскольку обе обеспечивались из единого входного источника – контактной сети ГЭТ.

У четырёх вариантов электрических схем буферных накопителей энергии, испытанных в России, позволяющих возвращать на полезную транспортную работу энергию рекуперативного торможения вагона, эта энергия распределяется по следующим потокам:

- только межпоездные перетоки для вагонов с ТИСУ без накопителя;
- только возврат рекуперации на тягу для своего вагона управляемым бортовым накопителем СКН с запретом межпоездного обмена;
- комбинированная схема возврата энергии рекуперации – по межпоездному обмену полезной энергией рекуперации и возврату на тягу своего привода избыточной энергией рекуперации – для вагона с управляемым бортовым СКН с возможностью МПО;
- комбинированная схема возврата энергии рекуперации со стационарным накопителем; наилучшие показатели выдаёт именно комбинированная схема, позволяющая как производить прямые перетоки полезной рекуперации по КС, так и возвращать избыточную рекуперацию при опосредствующем хранении её в стационарном накопителе.

Согласно полученным данным, на основе фактических показателей работы указанных накопителей энергии определена эффективность возврата рекуперативной энергии для каждой схемы их подключения.

Заключение

Возврат энергии рекуперации вагона в ходе торможения максимален при использовании стационарных накопителей энергии, минимален – при использовании бортовых накопителей энергии.

Возвращённая на транспортную работу энергия рекуперации по прямому межпоездному обмену по контактной сети в системе без накопителей больше, чем в случае применения бортового накопителя, не допускающего межпоездной обмен.

Неуправляемые накопители имеют больший КПД, чем управляемые, в силу отсутствия инверторного преобразователя, однако значительная часть ёмкости у них не используется в работе.

Худшие показатели возврата рекуперации в сети с бортовыми накопителем энергии с отсутствием возможности МПО образуются из-за невозможности сохранения прямых межпоездных перетоков рекуперированной тяговым приводом вагона энергии и из-за энергозатрат на их перевозку.

Полное энергопотребление вагона складывается из питания возвращённой рекуперативной энергией и от тяговой подстанции.

Из разных типов управляемых накопителей минимальное потребление от тяговой подстанции обеспечивает стационарный маховичный накопитель энергии типа НКЭ-3Г.

Для обеспечения полной утилизации энергии избыточной рекуперации вагонов бортовых накопителей на весь парк предприятия ГЭТ требуется столько, сколько имеется единиц подвижного состава. Стационарные накопители необходимы в количестве, равном числу тяговых подстанций.

Библиографический список

1. Бирюков В.В. Энергосбережение на электрическом транспорте: монография. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. – 244 с.

2. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги: учеб. для вузов ж.-д. трансп. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.

3. Ефремов И.С., Косарев Г.В. Теория и расчет электрооборудования подвижного состава городского электрического транспорта: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 1976. – 480 с.

4. Мятеж А.В., Ярославцев М.В., Забелина Д.Д. Исследование сезонных изменений потребления электрической энергии троллейбусом // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 1–2. – С. 282–286.

5. Ярославцев М.В. Определение оптимальной энергоёмкости бортового буферного накопителя энергии // Студент и научно-технический прогресс: материалы 51-й Междунар. науч. студ. конф.; Новосибирск, 12–18 апреля 2013 г. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 2013. – С. 46.

6. Ярославцев М.В., Щуров Н.И. Сезонные колебания потребления электрической энергии троллейбусом // Наука. Технологии. Инновации: материалы всерос. науч. конф. молод. ученых: в 10 ч.; Новосибирск, 21–24 ноября 2013 года. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2013. – Ч. 6. – С. 187–191.

7. Исследования энергообменных процессов при штатных условиях эксплуатации подвижного состава метрополитена с системами рекуперации / А.А. Сулим, С.А. Мужичук, П.А. Хозя [и др.] // Наука та

прогресс транспорту. – 2017. – № 5(71). – С. 28–47. DOI: 10.15802/stp2017/112934

8. Сулим А.А. Расчет электроэнергии рекуперации электрифицированного городского транспорта при установке накопителя на тяговой подстанции // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2014. – Вып. 4. – Ч. 4. – С. 30–41.

9. Мазнев А.С., Степанская О.А., Шатнев О.И. Системы рекуперации энергии торможения электроподвижного состава на городском транспорте Санкт-Петербурга // Известия ПГУПС. – 2017. – Вып. 1. – С. 63–72.

10. Щуров Н.И., Щеглов К.В., Штанг А.А. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2008. – Вып. 1 (51). – С. 99–104.

11. Чернигов В.М. Электрооборудование трамвайного вагона с емкостным накопителем. – URL: http://mapget.ru/wpcontent/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf (дата обращения: 22.07.2022).

12. Методические рекомендации по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования. Приложение к распоряжению Минтранса России от 18 апреля 2013 г. № НА-37-р. // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

13. URL: <https://www.ukvz.ru/produktsiya/seriynye-modeli/71-631-71-631-02/> (дата обращения: 15.08.2022).

14. Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава / В.А. Шаряков, О.Л. Шарякова, А.В. Агунов, А.В. Третьяков // Электротехника. – 2018. – № 10. – С. 55–59.

15. Bartłomiejczyk M., Połom M. Multiaspect measurement analysis of breaking energy recovery // Energy Conversion and Management. – 2016. – Vol. 127. – P. 35–42.

16. Energy recovery effectiveness in trolleybus transport / S. Namacek [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2014. – 112. – P. 1–11.

17. Khodaparastan M., Mohamed A. Flywheel vs. Supercapacitor as wayside energy storage for electric rail transit systems // Inventions. – 2019. – 4(4). – P. 62.

18. Показатели работы стационарного накопителя энергии на тяговых подстанциях московского метрополитена / Л.А. Баранов, В.А. Гре-

чишников, А.В. Ершов, М.Д. Родионов, М.В. Шевлюгин // *Электротехника*. – 2014. – № 8. – С. 18–22.

19. Шевлюгин М.В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: спец. 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2009. – 48 с.

20. A review on flywheel energy storage technology in fifty years / Dai Xingjian, Wei Kunpeng, Zhang Xiaozhang, Jiang Xinjian, Zhang Kai // *Energy Storage Science and Technology*. – 2018. – 7(05). – P. 765–782.

21. Verification of the reliability of a superconducting flywheel energy storage system and its application to the railway system / T. Yamashita, M. Ogata, H. Matsue [et al.] // *Quarterly Report of RTRI*. – 2017. – 58(4). – P. 303–310.

22. D'Ovidio G., Ometto A., Villante C. A novel optimal power control for a city transit hybrid bus equipped with a partitioned hydrogen fuel cell stack // *Energies*. – 2020. – 13(11). – 2682.

23. Незевак В.Л., Черемисин В.Т. Перспективы применения накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока // *Бюллетень результатов научных исследований / Петербург. гос. ун-т путей сообщения*. – СПб., 2015. – № 1 (14). – С. 76–83.

24. Черемисин В.Т., Вильгельм А.С., Незевак В.Л. Оценка технологических потерь в тяговой сети в условиях применения электроподвижным составом рекуперативного торможения // *Вестник Ростов. гос. ун-та путей сообщения*. – Ростов-н/Д, 2014. – № 2 (54). – С. 106–111.

25. Саблин О.И. Повышение эффективности рекуперации энергии в системе электротранспорта при ограниченном тяговом электропотреблении // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2014. – Т. 6, № 1 (20). – С. 21–25.

References

1. Biriukov V.V. *Energoberezhenie na elektricheskom transporte [Energy saving in electric transport]*. Irkutsk: Irkutskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2009, 244 p.

2. Rozenfel'd V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N. Teoriia elektricheskoi tiagi [Theory of electric traction]. 3rd ed. Moscow: Transport, 1995, 294 p.

3. Efremov I.S., Kosarev G.V. Teoriia i raschet elektrooborudovaniia podvizhnogo sostava gorodskogo elektricheskogo transporta [Theory and calculation of electrical equipment of rolling stock of urban electric transport]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1976, 480 p.

4. Miatezh A.V., Iaroslavtsev M.V., Zabelina D.D. Issledovanie sezonnykh izmenenii potrebleniia elektricheskoi energii trolleibusom [Investigation of seasonal changes in electric energy consumption by trolleybus]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2014, no. 1-2, pp. 282-286.

5. Iaroslavtsev M.V. Opredelenie optimal'noi energoemkosti bortovogo bufernogo nakopitelia energii [Determination of the optimal energy intensity of an onboard buffer energy storage device]. *Student i nauchno-tehnicheskii progress. Materialy 51-i Mezhdunarodnoi nauchnoi studencheskoi konferentsii, Novosibirsk, 12-18 April 2013*. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi universitet, 2013, 46 p.

6. Iaroslavtsev M.V., Shchurov N.I. Sezonnnye kolebaniia potrebleniia elektricheskoi energii trolleibusom [Seasonal fluctuations in electric energy consumption by trolleybus]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii. Materialy vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh*, Novosibirsk, 21-24 November 2013. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2013, part 6, pp. 187-191.

7. Sulim A.A., Muzhichuk S.A., Khozia P.A. et al. Issledovaniia energoobmennyykh protsessov pri shtatnykh usloviiakh ekspluatatsii podvizhnogo sostava metropolitena s sistemami rekuperatsii [Studies of energy exchange processes under normal operating conditions of metro rolling stock with recovery systems]. *Nauka ta progress transportu*, 2017, no. 5(71), pp. 28-47. DOI 10.15802/stp2017/112934

8. Sulim A.A. Raschet elektroenergii rekuperatsii elektrifitsirovannogo gorodskogo transporta pri ustanovke nakopitelia na tiagovoi podstantsii [Calculation of electricity recovery of electrified urban transport when installing a storage device at a traction substation]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG. Energetika*, 2014, iss. 4, part 4, pp. 30-41.

9. Maznev A.S., Stepanskaia O.A., Shatnev O.I. Sistemy rekuperatsii energii tormozheniia elektropodvizhnogo sostava na gorodskom transporte

Sankt-Peterburga [Systems of energy recovery of braking of electric rolling stock on urban transport of Saint Petersburg]. *Izvestiia Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*, 2017, iss. 1, pp. 63-72.

10. Shchurov N.I., Shcheglov K.V., Shtang A.A. Primenenie nakopitelei energii v sistemakh elektricheskoi tiagi [Application of energy storage devices in electric traction systems]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*, 2008, iss. 1 (51), pp. 99-104.

11. Chernigov V.M. Elektrooborudovanie tramvainogo vagona s emkostnym nakopitelem [Electrical equipment of a tram car with a capacitive storage device], available at: http://mapget.ru/wpcontent/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf (accessed 22 July 2022).

12. Metodicheskie rekomendatsii po raschetu ekonomicheski obosnovannoi stoimosti perevozki passazhirov i bagazha v gorodskom i prigorodnom soobshchenii avtomobil'nyim i gorodskim nazemnym elektricheskim transportom obshchego pol'zovaniia. Prilozhenie k rasporyazheniiu Mintransa Rossii ot 18 apreliia 2013 g. № NA-37-r. [Methodological recommendations for calculating the economically reasonable cost of transporting passengers and luggage in urban and suburban traffic by road and urban ground electric public transport. Appendix to the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. NA-37-r dated April 18, 2013]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

13. URL: <https://www.ukvz.ru/produktsiya/seriynye-modeli/71-631-71-631-02/> (accessed 15 August 2022).

14. Shariakov V.A., Shariakova O.L., Agunov A.V., Tret'iakov A.V. Vozmozhnosti ratsional'nogo ispol'zovaniia energii tormozheniia elektricheskogo podvizhnogo sostava [Possibilities of rational use of braking energy of electric rolling stock]. *Elektrotekhnika*, 2018, no. 10, pp. 55-59.

15. Bartłomiejczyk M., Połom M. Multiaspect measurement analysis of breaking energy recovery. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 127, pp. 35-42.

16. Hamacek S. et al. Energy recovery effectiveness in trolleybus transport. *Electric Power Systems Research*, 2014, 112, pp. 1-11.

17. Khodaparastan M., Mohamed A. Flywheel vs. Supercapacitor as wayside energy storage for electric rail transit systems. *Inventions*, 2019, 4(4), 62 p.

18. Baranov L.A., Grechishnikov V.A., Ershov A.V., Rodionov M.D., Shevliugin M.V. Pokazateli raboty stantsionarnogo nakopitelia energii na tiagovykh podstantsiiakh moskovskogo metropolitena [Performance indicators of a stationary energy storage device at traction substations of the Moscow metro]. *Elektrotehnika*, 2014, no. 8, pp. 18-22.

19. Shevliugin M.V. Resurso- i energosberegaiushchie tekhnologii na zhelezodorozhnom transporte i metropolitenakh, realizuemye s ispol'zovaniem nakopitelei energii: spets. 05.14.02 "Elektricheskie stantsii i elektroenergeticheskie sistemy" [Resurso- i energosberegaiushchie tekhnologii na zhelezodorozhnom transporte i metropolitenakh, realizuemye s ispol'zovaniem nakopitelei energii: spetsial'nost' 05.14.02 "Elektricheskie stantsii i elektroenergeticheskie sistemy"]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Moscow, 2009, 48 p.

20. Dai Xingjian, Wei Kunpeng, Zhang Xiaozhang, Jiang Xinjian, Zhang Kai. A review on flywheel energy storage technology in fifty years. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7(05), pp. 765-782.

21. Yamashita T., Ogata M., Matsue H. et al. Verification of the reliability of a superconducting flywheel energy storage system and its application to the railway system. *Quarterly Report of RTRI*, 2017, 58(4), pp. 303-310.

22. D'Ovidio G., Ometto A., Villante C. A novel optimal power control for a city transit hybrid bus equipped with a partitioned hydrogen fuel cell stack. *Energies*, 2020, 13(11), 2682.

23. Nezevak V.L., Cheremisin V.T. Perspektivy primeneniia nakopitelei elektricheskoi energii v sisteme tiagovogo elektrosnabzheniia postoiannogo toka [Prospects for the use of electric energy storage devices in a DC traction power supply system]. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy*. Saint Petersburg: Peterburgskii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniia, 2015, no. 1 (14), pp. 76-83.

24. Cheremisin V.T., Vil'gel'm A.S., Nezevak V.L. Otsenka tekhnologicheskikh poter' v tiagovoi seti v usloviakh primeneniia elektropodvizhnym sostavom rekuperativnogo tormozheniia [Evaluation of technological losses in the traction network under conditions of application of regenerative braking by electric rolling stock]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*. Rostov-n/D, 2014, no. 2 (54), pp. 106-111.

25. Sablin O.I. Povyshenie effektivnosti rekuperatsii energii v sisteme elektrotransporta pri ogranichenom tiagovom elektropotreblenii

[Improving the efficiency of energy recovery in the electric transport system with limited traction power consumption]. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva*, 2014, vol. 6, no. 1 (20). pp. 21-25.

Сведения об авторах

Кацай Александр Владимирович (Москва, Россия) – кандидат философских наук, генеральный директор ООО «Кинемак» (115201, Москва, Каширский проезд, 13. e-mail: proton764@mail.ru).

Шевлюгин Максим Валерьевич (Москва, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ) (127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, e-mail: mx_sh@mail.ru).

About the authors

Alexander V. Katsay (Moscow, Russian Federation) – Candidate of Philosophical Sciences, General Director of Kinemak LLC (115201, Moscow, 13, Kashirsky Proezd, e-mail: proton764@mail.ru).

Maxim V. Shevlyugin (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Electric Power Engineering of Transport" RUT (MIIT) (127994, Moscow, 9, Obraztsova str., p. 9, e-mail: mx_sh@mail.ru).

Поступила: 27.08.2022. Одобрена: 03.10.2022. Принята к публикации: 22.12.2022.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Кацай, А.В. Преобразование энергии рекуперации в городском электро-транспорте / А.В. Кацай, М.В. Шевлюгин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 43. – С. 5–28. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.01

Please cite this article in English as:

Katsay A.V., Shevlyugin M.V. Energy recovery transformations in urban electric transport. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 43, pp. 5-28. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.01