

УДК 620.97

Дополнительный расход и экономия оплачиваемой энергии тяговых подстанций при использовании бортовых и стационарных накопителей

А. В. Кацай

ООО "Кинемак", г. Москва, Россия;

e-mail: proton764@mail.ru

Информация о статье

Реферат

Поступила в редакцию 02.10.2023;

получена после доработки 31.10.2023;

принята к публикации 02.11.2023

Ключевые слова:

контактная сеть, энергодбаланс, тяговое и нетяговое энергопотребление, накопители энергии, затраты на энергоснабжение, полезная и избыточная рекуперация, транспортная работа

В системах тягового энергоснабжения горэлектротранспорта без накопителей значительная часть энергии рекуперации повторно полезно утилизируется на нагрузку в процессе межпоездных перетоков по контактной сети. Избыточная часть рекуперации рассеивается теплом на тормозных резисторах. Применение бортовых накопителей позволяет перенаправить на них с тягового привода вагона всю энергию рекуперации. Обрато на тяговый привод из накопителя выдается остаток в объеме не более двух третей поступившей энергии рекуперации, за исключением внутренних потерь, так как из-за омического сопротивления действительный КПД накопителя любого типа не превышает 64 %. Бортовой накопитель потребляет значительный объем оплачиваемой энергии от тяговой подстанции на перевозку его вагоном, компенсацию саморазряда и т. д. Суммарный баланс возврата на тягу энергии рекуперации и потерь от дополнительного энергопотребления у бортовых накопителей отрицательный. При работе стационарных накопителей в контактной сети полностью сохраняются полезные перетоки рекуперации. Избыточная часть рекуперации перенаправляется в контактную сеть, где одна ее часть питает маломощную нетяговую нагрузку в ходе зарядки накопителя, а другая поступает на накопитель, заряжая его. После непродолжительного хранения в накопителе остаток избыточной рекуперации выдается в сеть на появившуюся в ней нагрузку. У стационарного накопителя отсутствуют энергзатраты на перевозку, а потребление оплачиваемой энергии на собственные нужды и компенсацию саморазряда существенно меньше, чем у бортового, в силу большего коэффициента загрузки. Стационарный накопитель имеет положительный баланс энергии рекуперации, что позволяет дополнительно экономить оплачиваемую энергию от тяговой подстанции в объеме до 10 % относительно такого потребления при перетоках полезной рекуперации без использования накопителей.

Для цитирования

Кацай А. В. Дополнительный расход и экономия оплачиваемой энергии тяговых подстанций при использовании бортовых и стационарных накопителей. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 374–383. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-374-383>.

The additional consumption and savings of paid energy of traction substations when using on-board and stationary storage devices

Alexander V. Katsay

Kinemak LLC, Moscow, Russia;

e-mail: proton764@mail.ru

Article info

Abstract

Received 02.10.2023;

received in revised 31.10.2023;

accepted 02.11.2023

Key words:

contact network, energy balance, traction and non-traction energy consumption, energy storage, energy supply costs, useful and excessive recovery, transport work

In traction power supply systems for city electric transport without storage devices, a significant part of the recovery energy is usefully reused for the load in the process of inter-train flows along the contact network. The excess part of the recuperation is dissipated by heat in the braking resistors. The use of on-board storage devices makes it possible to redirect all recovery energy from the car's traction drive to them. The remaining amount of no more than two-thirds of the received recuperation energy is supplied back to the traction drive from the storage device, excluding internal losses, since due to ohmic resistance, the actual efficiency of any type of storage device does not exceed 64 %. The on-board storage device consumes a significant amount of paid energy from the traction substation for its transportation by car, compensation for self-discharge, etc. The total balance of recovery energy returned to traction and losses from additional energy consumption for on-board storage devices is negative. When stationary storage devices operate in the contact network, useful recuperation flows are completely preserved. The excess part of the recovery is redirected to the contact network, where one part of it powers a low-power non-traction load while charging the storage device, and the other goes to the storage device, charging it. After a short period of storage in the storage device, the remainder of the excess recovery is released into the network for the load that appears in it. A stationary storage device has no energy consumption for transportation, and the consumption of paid energy for its own needs and compensation for self-discharge is significantly less than that of an on-board storage device due to its higher load factor. The stationary storage device has a positive balance of recovery energy which allows additional savings of paid energy from the traction substation in the amount of up to 10 % relative to such consumption during useful recovery flows without the use of storage devices.

For citation

Katsay, A. V. 2023. The additional consumption and savings of paid energy of traction substations when using on-board and stationary storage devices. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 374–383. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-374-383>.

Введение

Затраты электротранспортного предприятия на оплату покупаемой у энергопоставщиков электроэнергии могут составлять до 30 % от всех расходов (Мукин, 2019). Уменьшение доли оплаты энергии является одним из важнейших направлений деятельности по улучшению экономического положения горэлектротранспорта (ГЭТ). Снижение удельного энергопотребления подвижного состава (ПС), а также наземных стационарных инженерных систем (электрооборудования тяговых подстанций, контактной сети, остановочных павильонов, депо, диспетчерских и т. д.) способствует достижению этой цели за счет повышения энергоэффективности штатного электрооборудования. Результативным способом снижения оплачиваемого энергопотребления при заданном объеме транспортной работы является более полное задействование на повторное использование энергии рекуперативного торможения поездов. Ключевым средством при решении данной проблемы выступают накопители энергии (НЭ).

В ходе исследования рассмотрен баланс энергопотребления в системе тягового энергоснабжения подвижного состава горэлектротранспорта с рекуперацией энергии линейного движения при работе бортовых и стационарных накопителей.

Теоретические и экспериментальные основы исследования

В настоящем исследовании в качестве эмпирической базы для изучения эффективности способов повторного использования рекуперативной энергии на выполнение полезной транспортной работы использовались данные мониторинга работы трамвайных систем в гг. Санкт-Петербурге, Коломне, Челябинске, а также троллейбусной системы в г. Сухуми. Кроме того, нами использовались открытые данные исследований систем тягового энергоснабжения коллег в троллейбусных системах гг. Новосибирска и Гдыня (Польша) и бортовых накопителей в трамваях г. Санкт-Петербурга.

В качестве теоретической базы исследования применены основы составления энергетического баланса в системах тягового энергоснабжения постоянного тока. Математический аппарат включал методы математической статистики. Экспериментальная часть исследования заключалась в проведении длительной эксплуатации стационарного буферного накопителя энергии для ГЭТ маховикового типа НКЭ-3Г в 2020–2022 гг. в трамвайных системах гг. Коломны и Санкт-Петербурга.

Результаты и обсуждение

Источники энергии и потребляющее оборудование в системе тягового энергоснабжения

Первичным источником энергии в ГЭТ является тяговая подстанция (ТП). В перечень потребителей энергии от контактной сети (КС) входят системы тяги подвижного состава (тяговые электродвигатели и частотные приводы), а также нетяговое оборудование вагонов (освещение; отопление; компрессоры; вспомогательные электродвигатели; система управления; информирования и т. д.) и стационарной инфраструктуры (системы обогрева стрелок; освещение путей и остановочных павильонов; сигнализация и информационные системы и т. п.). В вагонах с реостатно-контакторной системой тяги (РКСУ) предусмотрена возможность рекуперативного торможения, когда механическая энергия линейного замедления вагона превращается в электрическую в тяговых двигателях. Однако данные вагоны не имеют возможности выдавать эту энергию в контактную сеть для передачи ее другим вагонам, потребляющим в это время энергию из сети, а направляют ее на свои бортовые тормозные резисторы, где она рассеивается теплом в атмосферу.

Внедрение на подвижном составе частотных приводов, управляющих тяговыми двигателями, обеспечило снижение энергопотребления за счет более плавного регулирования хода, а также уменьшения пусковых токов при разгоне. Транзисторные частотные приводы обеспечивают требуемые контактной сетью параметры энергии рекуперации, которая образуется при электродинамическом торможении вагонов. Выдача энергии в КС возможна только при одновременном с торможением данного поезда наличии других вагонов, потребляющих энергию с суммарной мощностью потребляющего оборудования, равной или большей, чем мощность рекуперировавших двигателей. Рекуперировавшие приводы вагонов, выдающие полезную часть энергии рекуперации в КС, являются вторичными (производными от первичных) источниками энергии.

Благодаря тяговым частотным приводам современная КС располагает двумя источниками энергии: ТП и рекуперировавшими вагонами. В КС имеются два типа нагрузки – тяговая и нетяговая. Эти пары источников и нагрузки обеспечивают баланс энергии в системе тягового энергоснабжения (СТЭ) как в каждое мгновение, так и за выделенный период (например, за сутки, месяц, год).

Энергия рекуперации при одновременном наличии в КС потребителя приблизительно равной мощности направляется в сеть с выхода частного преобразователя и поступает на потребляющее оборудование (тяговое и нетяговое). В процессе перетекания энергии рекуперации по контактной сети [т. н. межпоездной обмен полезной рекуперацией (МПО)] в этот контур перетока энергия от тяговой подстанции не попадает, так как напряжение в этой зоне выше, чем формируемое в ней напряжение от ТП. Таким образом, энергия полезной рекуперации замещает потребление энергии от первичного оплачиваемого энергоисточника, снижая объемы финансовых затрат транспортного предприятия на энергоресурсы для выполнения транспортной работы (в тяговой и нетяговой ее частях). Та часть энергии рекуперации, которая при отсутствии в КС энергопотребителя достаточной для ее потребления мощности рассеивается на бортовых тормозных

резисторах, называется избыточной рекуперацией и в замещении оплачиваемой энергии от тяговой подстанции не принимает участия.

Следует отметить, что энергия рекуперации является бесплатной по нескольким основаниям. Главное из них – эта электрическая энергия образовалась из механической энергии движения вагона, которая, в свою очередь, образовалась из превращения электроэнергии, поступившей от источников, в том числе от оплачиваемого источника – ТП, в механическую энергию линейного движения. Другими словами, электроэнергия от ТП уже оплачена энергопоставщику в момент поступления в КС, а ее повторное использование уже от вторичного энергоисточника – рекуперировавшего вагона – не требует оплаты, так как она уже принадлежит транспортному предприятию. Процесс превращения при рекуперации механической энергии движения вагона в электрическую не вызывает дополнительного износа элементов и узлов системы тяги вагона, так как при отсутствии возможности выдачи этой рекуперированной энергии у вагонов с РКСУ электродинамическое торможение является базовым способом торможения, в его системе тяги происходят те же процессы, что и у вагонов с транзисторной системой управления тягой (ТрСУ), только в первом случае рекуперированная энергия направляется не в КС, а на тормозные резисторы. Энергия полезной рекуперации не имеет никаких дополнительных амортизационных затрат, как и при электродинамическом торможении с выдачей энергии на тормозные резисторы. В силу этого полезная энергия рекуперации имеет изначально нулевую себестоимость как по эксплуатационной, так и по капитальной составляющим.

Соотношение энергопотоков в системе тягового электроснабжения

Рассмотрим отдельно стороны энергобаланса – источники и нагрузку. Исследователи (Спиридонов и др., 2018; Namacek et al., 2014) определили объемы составляющих баланса от обоих источников энергии в системе тягового электроснабжения и отметили снижение за счет бесплатной полезной рекуперативной энергии потребления оплачиваемой энергии от ТП до 18–40 %. Исходя из результатов годового мониторинга КС трамвая в Санкт-Петербурге (2021 г.), нами установлено, что по выпрямленной стороне от ТП в КС поступило энергии $E_{ТП}$ ~82,7 % от общего объема потребленной нагрузкой электроэнергии, а от рекуперировавших вагонов выдано $E_{рек. полезн}$ ~17,3 %. Полезная рекуперация, которая направляется на сетевую нагрузку по контактной сети, существенно уменьшила потребление оплачиваемой энергии от выпрямительного агрегата подстанции. Энергия от этих источников измерялась счетчиками, расположенными на фидерах ТП и на входе в тяговые частотные преобразователи всех вагонов.

Следует учитывать, что часть энергии от первичного и вторичных источников рассеивалась теплом в контактных проводах. Согласно отечественным отраслевым нормативным документам, КПД контактно-кабельной сети $\eta_{ккс}$ в среднем составляет 93 %¹. Это значение для КС подтверждается и зарубежными исследователями. Так, по данным длительных измерений в КС польских троллейбусных систем, омические потери в ней не превышают 10 % (Bartłomiejczyk et al., 2016), т. е. до потребляющего оборудования (вагонов и стационарной нагрузки, подключенной к КС) дошло 93 % от объема энергии, выданной обоими источниками. В ходе проведенного нами исследования с помощью бортовых счетчиков определено, что на тягу было израсходовано 49,34 % от энергии $E_{тяги}$, выданной в КС обоими источниками. Данный показатель позволяет точно определить объем потребления нетяговой (бортовой и стационарной) нагрузкой электроэнергии $E_{нетяги}$ из КС, которая составила 50,66 %. В это значение также включены потери энергии при передаче по контактно-кабельной сети. Таким образом, в рассматриваемой типовой для РФ трамвайной системе в целом за год тяговое и нетяговое потребление было примерно равным. Также был определен объем полезной рекуперации вагонов $E_{рек. полезн}$, который составил 27,7 % от тягового энергопотребления вагонов.

Исследование и измерения процессов в системе тягового электроснабжения трамвая в течение года позволили определить и объем избыточной энергии рекуперации, которая в отсутствие при рекуперативном торможении вагонов достаточной сетевой нагрузки была рассеяна на тормозных резисторах. В годовом выражении избыточная рекуперация $E_{рек. изб}$ составила около 23 % от энергии, потребленной на тягу, т. е. незначительно меньше полезно потребленной по межпоездным перетокам части рекуперации.

Избыточная энергия рекуперации в настоящее время (без использования накопителей) поступает на бортовые тормозные реостаты. Именно эта энергия $E_{реостат}$ является тем потенциалом, который позволит снизить оплачиваемое энергопотребление от тяговой подстанции.

Формула баланса энергии на сетевой нагрузке в КС ГЭТ, исходя из вышеописанных источников и нагрузки, описывается следующим уравнением:

$$(E_{ТП} + E_{рек. полезн})\eta_{ккс} + E_{рек. изб} = E_{тяги} + E_{нетяги} + E_{реостат} \quad (1)$$

Максимальное значение, до которого может быть дополнительно снижено оплачиваемое энергопотребление от ТП, может быть получено только за счет более полного задействования рекуперированной энергии вагонами, т. е. за счет $E_{рек. изб}$, которую необходимо с помощью имеющихся технических средств

¹ 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. URL: <https://docs.cntd.ru/document/499017626>.

перевести в категорию полезной рекуперации $E_{\text{рек. полезн}}$. При этом потребление энергии тормозными резисторами $E_{\text{рестат}}$ снизится до минимального значения.

Способы полного задействования энергии рекуперации

Единственной для ГЭТ возможностью максимизировать использование всей электроэнергии ($E_{\text{рек. полезн}} + E_{\text{рек. изб}}$), получаемой при рекуперативном торможении, является применение буферных накопителей энергии; имеются только две схемы применения буферных накопителей в СТЭ ГЭТ: на борту вагонов и стационарно.

Бортовые накопители энергии. Наиболее распространенная схема размещения бортовых накопителей (БН) в электрической цепи описана в работе (Jandura et al., 2017). В настоящее время в качестве бортовых буферных накопителей рекуперативной энергии применяются главным образом суперконденсаторные системы. Указанная схема потребовала уточнений при учете дополнительных каналов потребления энергии бортовыми накопителями на собственные нужды (система управления, климат-контроль), а также на компенсацию саморазряда суперконденсаторных накопительных элементов (рис. 1). В эту схему вошло и указание на дополнительное потребление энергии на тягу вагона, масса тары которого увеличена за счет размещения на борту накопителя энергии массой 1 т и более.

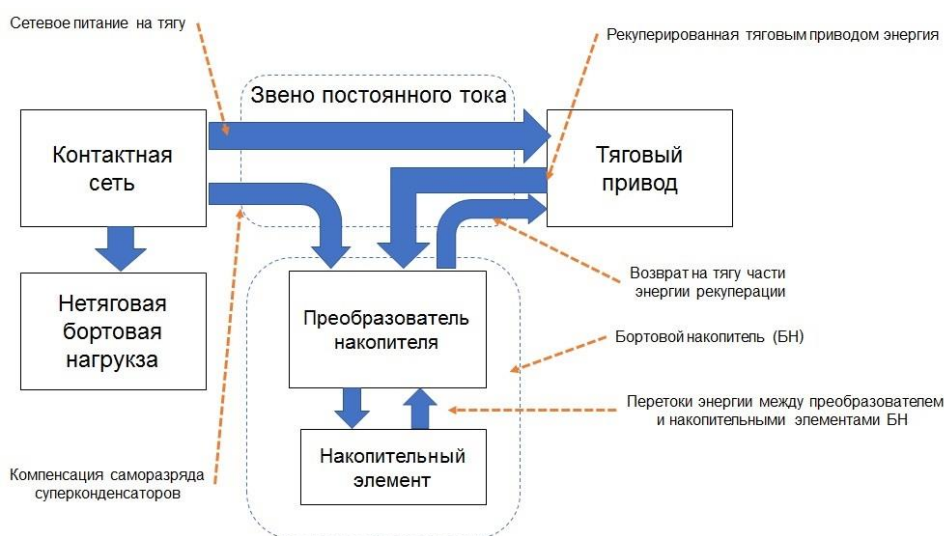


Рис. 1. Схема тяговой цепи ПС с бортовым накопителем. Стрелками показаны направления энергопотоков
Fig. 1. Diagram of the traction chain of a rolling stock with an on-board drive.
The arrows show the directions of energy flows

Для полного использования энергии рекуперации в СТЭ требуется установка бортовых накопителей на каждую единицу подвижного состава. Цикл работы БН следующий. При рекуперативном торможении тяговый привод на звене постоянного тока (ЗПТ) повышает напряжение. При этом по срабатыванию верхней уставки напряжения на прием энергии рекуперации включается БН, который имеет мощность потребления, равную или большую мощности тягового привода вагона в режиме рекуперации. Это означает, что рекуперативные токи в КС не выходят и отсутствуют потери энергии в КС, равные, как выше было указано, 7 %. Причем в бортовой накопитель попадают не только избыточная рекуперация $E_{\text{рек. изб}}$, но и вся потенциально полезная рекуперация $E_{\text{рек. полезн}}$, которая без накопителя шла бы на сетевую нагрузку по КС. После приема рекуперированной энергии и процесса короткого хранения (в период стоянки вагона) производится выдача ее из накопителя на тяговый привод вагона для его разгона. Сигналом для выдачи служит падение напряжения на ЗПТ в ходе разгона ниже значения нижней уставки по напряжению накопителя. Практически вся энергия, выдаваемая БН, поступает на тяговый привод, а ЗПТ тягового инвертора становится точкой токораздела с потоками энергии от ТП в периоды перетоков рекуперированной энергии, так как нетяговая нагрузка вагона (включая собственные нужды самого БН) питается от КС (мощность тяги на разгоне забирает всю энергию из БН, поскольку мощность и объем энергии разгона поезда всегда превышают эти значения, которые может выдать БН). К нетяговой нагрузке ПС относятся также и собственные нужды преобразователя накопителя и самих накопительных элементов (вентиляция, управление). Поскольку вся энергия, выдаваемая БН, поступает в тяговый привод своего же вагона, то выдача рекуперативной энергии в КС в такой схеме отсутствует.

Избыточной рекуперации в данном случае также не остается, поскольку производители БН подбирают такую их энергоемкость, которая может забрать всю возможную для вагона ГЭТ энергию рекуперации. Так, значительная часть отечественных и зарубежных исследователей сходится во мнении, что полный

объем рекуперации составляет порядка 40–60 % от потребленной на тягу энергии (*Шаряков и др., 2018; Namacek et al., 2014*).

Например, при удельном энергопотреблении на тягу вагона в 2 кВт·ч на 1 км, если он за сутки проходит путь в 200 км, его полная энергия, затраченная на тягу, составит $E_{\text{тяги}} = 400$ кВт·ч, а нетяговые затраты системы будут равны $E_{\text{нетяги}} = 0,5968E_{\text{тяги}}$; при этом полный объем энергии рекуперации тягового привода составит $E_{\text{рек. полезн}} + E_{\text{рек. изб}} = 0,5E_{\text{тяги}} = 200$ кВт·ч. При этом действительный КПД силового контура БН ($\eta_{\text{бн}}$) за полный цикл работы равен в среднем 64 % (*Чернигов, 2021; Кацай и др., 2022a*), т. е. омические потери энергии рекуперации в силовом контуре БН превышают омические потери полезной рекуперации в КС более чем в пять раз. В текущем примере от накопителя на клеммы тягового привода вернется всего 128 кВт·ч от принятых в ходе рекуперативного торможения 200 кВт·ч.

С учетом действительного КПД накопительных агрегатов уравнение баланса (1) для случая применения БН приобретает вид

$$'E_{\text{ТП}}\eta_{\text{ккс}} + ('E_{\text{рек. полезн}} + 'E_{\text{рек. изб}})\eta_{\text{бн}} = 'E_{\text{тяги}} + 'E_{\text{нетяги}}, \quad (2)$$

где штрихи перед показателями означают, что изменились потоки энергии от источников и к нагрузке в сравнении с системами ГЭТ без накопителей энергии. Здесь необходимо учитывать следующие особенности, отличающие условия работы вагонов с БН от условий работы этих же вагонов, но без бортовых накопителей:

- 1) $\eta_{\text{ккс}} = 0,93$;
- 2) $\eta_{\text{бн}} = 0,64$;
- 3) $'E_{\text{тяги}} = 1,07 'E_{\text{тяги}}$ [расход на тягу в сравнении с таковым в системе без накопителей вырастет на 7 % за счет увеличения массы тары вагона на вес накопительного устройства и его оснастки (*Кацай и др., 2023a*)];
- 4) $'E_{\text{нетяги}} = 0,8587 E_{\text{тяги}}$ [в системах с бортовыми накопителями нетяговое энергопотребление увеличивается в сравнении с таковым у систем без накопителей энергии за счет собственных нужд бортового накопителя: вентиляция; система управления; компенсация просадок напряжения накопительных элементов (*Кацай и др., 2023a*)].

Помимо омических потерь бортовые накопители вызывают дополнительное потребление оплачиваемой энергии от тяговой подстанции:

– на тягу вагона, так как из-за размещения многотонного накопителя на борту масса тары вагона увеличивается и, соответственно, увеличиваются затраты энергии на тягу. Для вагона массой тары 20 т размещение БН массой 2 т означает дополнительное увеличение энергозатрат на тягу на 10 %. В день на указанные цели дополнительно затрачивается (при стандартном пути вагона в сутки, равном 200 км) до 40–50 кВт·ч. Поскольку данная энергия поступает из КС, то необходимо учесть еще и 7 % омических потерь в КС, которые произошли при транспортировке этой энергии, т. е. еще на более чем 3 кВт·ч;

– нужды нетягового характера по удовлетворению собственных нужд БН (системы управления, вентиляции). Мощность потребления этих систем незначительна (порядка 3 кВт), однако она потребляется из сети в течение всего времени работы вагона на линии (порядка 18 ч в сутки). За сутки на данные цели может расходоваться около 50 кВт·ч. Поскольку указанная энергия поступает из КС, то необходимо учесть еще и 7 % омических потерь в КС, которые произошли при транспортировке этой энергии, т. е. еще порядка 3 кВт·ч;

– новый для ПС вид энергопотребления – поддержание и восполнение заряда суперконденсаторов в периоды конечной фазы разгона и выбега вагона (т. е. после того как накопитель выдал весь рабочий запас энергии при разгоне, происходит потребление накопителем из КС, чтобы поддержать заряд суперконденсатора на технологически минимально допустимом уровне). За сутки работы (18 ч) у вагона может быть до 500–600 циклов, моментом которых является выбег. По предварительным оценкам разработчиков бортовых накопителей, мощность восполнения заряда БН из КС составляет до 35 кВт, а продолжительность каждого восполнения – десятки секунд. За сутки на эти цели вагоном из КС может потребляться до 50 кВт·ч электроэнергии. Поскольку данная энергия поступает из КС, то необходимо учесть еще и 7 % омических потерь в КС, которые произошли при транспортировке этой энергии, т. е. дополнительно еще более 3 кВт·ч.

Суммарно дополнительное потребление оплачиваемой сетевой энергии на входе в токосъемник вагона при использовании бортовых накопителей составит за рассматриваемый день более 190 кВт·ч, тогда как возврат им рекуперированной энергии на тягу – только 128 кВт·ч. С учетом омических потерь энергии в самом накопителе суммарно потери энергии и дополнительное энергопотребление бортового накопителя практически равны полному объему энергии рекуперации, выданной тяговым приводом вагона на накопитель (200 кВт·ч). Отрицательный баланс энергии на токосъемнике вагона с бортовым накопителем составляет 62 кВт·ч в день. Если бы на вагон не установили бортовой накопитель, то он мог бы выдавать в КС полезную энергию рекуперации в объеме 110,8 кВт·ч. Таким образом, применение бортового накопителя снижает энергоэффективность вагона до того уровня, когда отсутствует повторное использование энергии рекуперации (т. е. при деградации технологии тяги с заменой частотного привода ТрСУ обратно на систему РКСУ). С работой БН оплачиваемое энергопотребление от тяговой подстанции $'E_{\text{ТП}}$ увеличивается на 23,36 % в сравнении с системой, где отсутствуют бортовые накопители (*Кацай и др., 2023a*). Применение БН приводит к росту затрат транспортного предприятия за счет увеличения оплачиваемого энергопотребления от ТП.

Стационарные накопители энергии. Стационарные накопители энергии (СН) устанавливаются по одной штуке на каждую тяговую подстанцию. Схема электрической цепи со стационарным накопителем энергии существенно отличается от схемы для БН. На рис. 2 приведена схема цепи с подключенным к КС стационарным накопителем типа НКЭ-3Г.

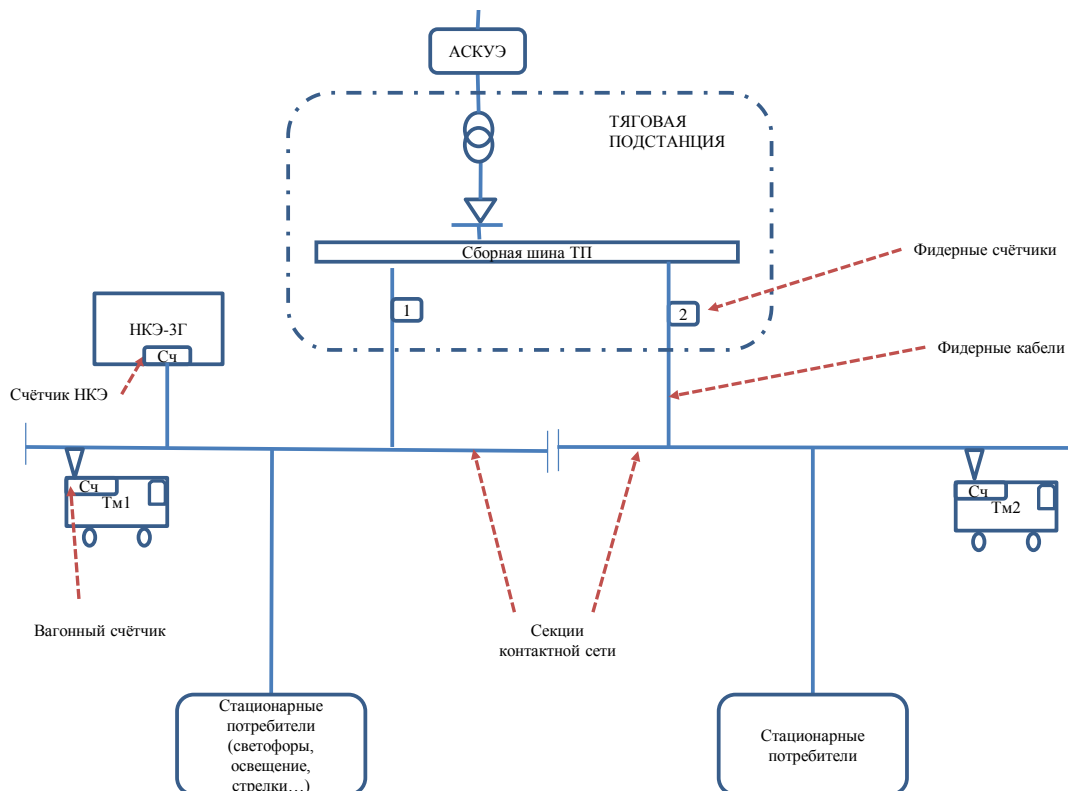


Рис. 2. Схема электрической цепи СТЭ со стационарным накопителем
 Fig. 2. Diagram of the electric circuit of the traction power supply system with a stationary storage device

Для полной утилизации рекуперации на полезное потребление для выполнения транспортной работы ГЭТ стационарных накопителей требуется на порядок меньше, чем бортовых. Режим работы СН следующий. Такой накопитель не участвует в полезных перетоках энергии рекуперации между рекуперирующим и потребляющим поездами, сохраняя их естественный процесс. Доля омических потерь энергии рекуперации при перетоках ее по КС такая же, как при перетоках энергии от тяговых подстанций, т. е. составляет 7 %. Стационарный накопитель подключается на прием избыточной энергии рекуперации при превышении напряжения в КС выше значения его верхней уставки активации (аналогично с принципом работы бортового накопителя). Также выдача ранее запасенной в СН избыточной рекуперации производится при появлении в сети потребляющего оборудования, когда уровень напряжения в КС падает ниже значения нижней уставки агрегата. При этом если в сети установлено в качестве стационарного накопителя суперконденсаторное устройство, то его КПД, как указано выше, не превышает по году значения 64 %. Примерно такой же КПД имеет и маховичный накопитель, например, типа НКЭ-3Г (Кацай и др., 2022а), т. е. стационарный и бортовой накопители с любым типом накопительных элементов имеют собственную характеристику действительной эффективности не выше указанного значения ($\eta_{сн} = \eta_{бн}$). С учетом того что почти все потоки энергии на выполнение транспортной работы для случая применения стационарных накопителей проходят по КС, уравнение баланса энергии в СТЭ принимает вид

$$(\tilde{E}_{ТП} + \tilde{E}_{рек. полезн} + \tilde{E}_{кбк} + \tilde{E}_{сн. выд})\eta_{ккс} = \tilde{E}_{тяги} + \tilde{E}_{нетяги}, \quad (3)$$

где штрихи перед показателями означают, что изменились потоки энергии от источников и к нагрузке в сравнении с системами ГЭТ без накопителей энергии; $\tilde{E}_{кбк}$ – потребление нетяговой сетевой нагрузкой части перенаправленной накопителем энергии избыточной рекуперации в ходе его зарядки; $\tilde{E}_{сн. выд}$ – выданная накопителем ранее запасенная часть энергии избыточной рекуперации, равная энергии его зарядки с учетом КПД накопителя $\tilde{E}_{сн. выд} = \tilde{E}_{сн. заряд}\eta_{сн}$. Вся энергия избыточной рекуперации, которая отражена в формуле (1), в этом случае перенаправлена в КС на сетевую маломощную нагрузку и на зарядку

накопителя
$$\frac{\tilde{E}_{кбк} + \tilde{E}_{сн. заряд}}{\eta_{ккс}} = \tilde{E}_{рек. изб}.$$

Условия работы вагонов со СН отличаются от условий работы этих же вагонов с бортовыми накопителями и имеют следующие особенности:

- 1) $\eta_{\text{ККС}} = 0,93$;
- 2) $\eta_{\text{сн}} = \eta_{\text{бн}} = 0,64$;
- 3) " $E_{\text{тяги}} = E_{\text{тяги}}$ " (в сети со СН масса вагонов и, соответственно, тяговая работа не изменяются в сравнении с вариантом без накопителей);
- 4) " $E_{\text{нетяги}} = 0,6062E_{\text{тяги}}$ " [нетяговое энергопотребление системы со СН увеличивается в сравнении с таковым у систем без накопителей энергии за счет собственных нужд накопителя (вентиляция, система управления, компенсация просадок напряжения накопительных элементов)].

Из формулы (3) видно, что стационарный накопитель имеет существенно меньшее абсолютное значение омических потерь при обеспечении использования всей энергии рекуперации вагонов на повторное полезное применение для транспортной работы в сравнении с бортовыми накопителями, что отражено в выражении (2), поскольку $\eta_{\text{ККС}} \gg \eta_{\text{бн}}$. Этот факт объясняется конфигурацией электрической цепи при эксплуатации стационарных накопителей, отличающейся от конфигурации цепи при использовании бортовых накопителей:

– СН сохраняет все перетоки полезной рекуперации от тормозящих вагонов к потребляющим, при которых омические потери в КС составляют всего 7 %;

– появляется эффект, когда в ходе зарядки накопителя часть энергии избыточной рекуперации, которая при зарядке стационарного накопителя перетекает к нему по КС от избыточно рекуперирующего тормозящего вагона, непосредственно потребляется полезной сетевой нагрузкой (нетяговой бортовой и стационарной, а также тяговой малой мощности). Такой эффект получил название "эффект КБК²" (Кацай и др., 2022б). Поскольку эта часть избыточной рекуперации не попадает в накопитель, хотя и появляется в сети благодаря ему, то от нее теряется только энергия в КС, т. е. имеют место лишь омические потери в сети (7 %), а не омические потери в накопителе (36 %). Такой эффект невозможен при работе бортовых накопителей, так как вся рекуперация циркулирует между тяговым приводом вагона и бортовым накопителем (рис. 1), в котором омические потери составляют 36 %;

– оставшаяся часть избыточной рекуперации принимается в СН, хранится там незначительное время (до появления в КС потребляющего оборудования), после чего выдается накопителем в сеть. Если бортовой накопитель принимает 100 % рекуперации ПС, то стационарный накопитель не участвует в перетоках полезной рекуперации (68,5 % от полного объема рекуперации), позволяет сетевой нагрузке потреблять непосредственно часть избыточной рекуперации ("эффект КБК" составляет 14,7 % от всего объема рекуперации), и оставшийся объем от полного значения рекуперации (16,74 %) накопитель опосредствует своей работой (принимает, хранит и затем выдает в сеть на появившуюся нагрузку). Омические потери бесплатной рекуперации в накопителе ($\eta_{\text{сн}} = 0,64$) распространяются только на эту последнюю часть;

– СН находится на земле, поэтому отсутствуют затраты энергии на его перевозку (тягу) (в отличие от бортовых накопителей, которые перевозятся вагоном как дополнительный балласт к массе тары);

– собственное потребление энергии стационарным накопителем (такое же, как и потребление бортового накопителя на его собственные нужды) лишь частично удовлетворяется оплачиваемой энергией от тяговой подстанции (пропорционально его коэффициенту загрузки). Остальная часть электропотребления на собственные нужды СН удовлетворяется за счет избыточной энергии рекуперации вагонов в периоды, когда накопитель принимает или выдает избыточную энергию рекуперации (бесплатную). В это время напряжение на клеммах накопителя формируется в процессе оборота избыточной рекуперации и всегда выше, чем формируемое в этой точке цепи напряжение от ТП.

Как показала длительная эксплуатация стационарного накопителя типа НКЭ-3Г в КС трамвая (Кацай и др., 2023б), снижение потребления оплачиваемой энергии от ТП в сравнении с вариантом отсутствия накопителей энергии (когда только часть полной рекуперации становится полезной – перетекает по КС к потребляющим вагонам), составляет 10 %.

Затраты на обслуживание одного стационарного накопителя суперконденсаторного типа такие же, как и для аналогичного одного бортового накопителя. Если применяется в качестве СН маховичный накопитель, обладающий более простой конструкцией накопительного элемента, то его обслуживание для транспортного предприятия обойдется значительно дешевле (все остальные подсистемы его аналогичны таковым у суперконденсаторных устройств: силовой преобразователь, система вентиляции, система контроля и управления). Срок службы маховичной системы вдвое превышает срок службы суперконденсаторов.

Следует упомянуть также и о необходимости затрат сетевой энергии на поддержание минимального уровня заряда накопительных элементов СН. Разработчики и исследователи БН отмечают, что в среднем за рабочий день бортовой накопитель производит 400 циклов зарядки/разрядки (именно столько торможений с рекуперацией делает одна единица ПС за день). Некоторые исследователи указывают, что этот показатель

² Эффект КБК – процесс электропитания полезной сетевой нагрузки, перенаправленной избыточной энергией рекуперации подвижного состава в ходе зарядки стационарного накопителя (эффект Кацай – Бизьева – Козаревича).

составляет 500–600 циклов³. А у стационарных накопителей количество циклов зарядки/разрядки достигает 4 000 и более за день (Баранов и др., 2014; Кацай и др., 2022a). Сравнение суммарной длительности процессов зарядки и разрядки у стационарных и бортовых накопителей показывает, что и время активной работы их различается в сутки примерно на такой же порядок. Это означает, что бортовой накопитель большую часть времени перевозится подвижным составом как обычный балластный груз и не совершает полезной работы. Стационарный же накопитель имеет коэффициент загрузки, близкий к единице ($> 0,75$). Этот показатель также означает, что время выбега у стационарного накопителя (когда он не принимает и не выдает энергию избыточной рекуперации) в несколько раз меньше, чем у бортового накопителя в периоды между выдачей всей запасенной энергии на разгон своего вагона и приемом им энергии рекуперативного торможения (т. е. на выбеге вагона и на стоянке). При этом нужно учесть, что бортовой накопитель после разгона вагона всегда "пуст", т. е. отдал весь рабочий объем энергии, и в нем осталось такое ее количество на момент прекращения выдачи, которое является предельно минимальным для нормальной работы данного устройства. Затем саморазряд суперконденсаторного бортового накопителя идет естественным образом, и для восполнения потерь из КС для поддержания минимально технологически допустимого уровня заряда накопителя потребляется оплачиваемая энергия от ТП (как было описано выше). Период выбега у бортового накопителя длится между этапами выдачи энергии и ее приема при выданной всей ранее запасенной энергии, а также в периоды стоянки вагона после приема энергии рекуперации, т. е. при заполненном объеме.

Между тем у стационарного накопителя прекращение выдачи или приема энергии, т. е. режим выбега, возникает только при одновременном отсутствии в сети избыточной рекуперации и любого вида нагрузки – как тяговой, так и нетяговой. Прекращение выдачи или приема происходит существенно реже, поскольку энергию из накопителя потребляют оба вида нагрузки. Нетяговая нагрузка у подвижного состава и у стационарных устройств сети потребляет энергию всегда, и стационарный накопитель выдает ранее запасенную энергию на них малыми токами. А тяговая нагрузка при работе стационарного накопителя может электроснабжаться как от одновременно рекуперирующих вагонов, так и от накопителя. Количество же событий наличия избыточной рекуперации, как было показано выше, в КС на порядок больше, чем во внутренней цепи подвижного состава между тяговым приводом и бортовым накопителем.

Сводные данные, позволяющие сравнить изменение потребления энергии в СТЭ (в том числе оплачиваемой от ТП) в случаях работы ГЭТ без накопителей, с бортовыми и стационарными накопителями, приведены на рис. 3.

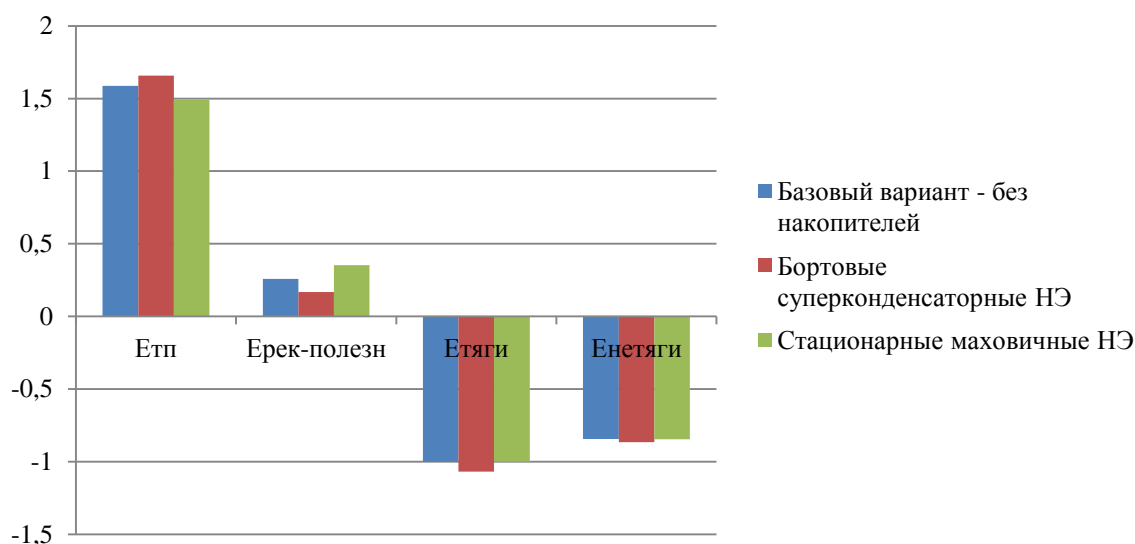


Рис. 3. Баланс источников и нагрузки для рассматриваемых вариантов трамвайной системы (без накопителей, с бортовыми и стационарными накопителями) по статьям: нагрузка (тяговая и нетяговая), источники энергии (тяговая подстанция и повторно использованная рекуперация).

По оси ординат – пропорция от тягового энергопотребления в сети без накопителей ($E_{тяги}$)
 Fig. 3. Balance of sources and load for the tram system options under consideration (without storage devices, with onboard and stationary storage devices) according to the points: load (traction and non-traction), energy sources (traction substation and reused recovery). On the ordinate axis – the proportion of traction power consumption in a network without storage devices ($E_{тяги}$)

³ Компания "ТЭЭМП". ENERGY RECYCLER // Отраслевой информационный сборник: российский общественный транспорт 2022 + материалы участников выставок Российской недели общественного транспорта. М., 2022. С. 164.

Из рис. 3 видно, что применение бортового накопителя существенно увеличивает в системе тяговое и нетяговое энергопотребление, при этом объем повторно использованной на транспортную работу энергии рекуперации заметно снижается в сравнении с системой без накопителей, а в сравнении с работой стационарных накопителей – снижается значительно. Применение стационарных накопителей не влияет на тяговое энергопотребление вагонов, немного увеличивает нетяговое энергопотребление стационарной инфраструктуры и способствует полному использованию энергии рекуперации вагонов. В итоге в сравнении с системами без накопителей энергии применение БН приводит к увеличению потребления оплачиваемой энергии от ТП более чем на 23 %, а стационарных накопителей – к снижению потребления оплачиваемой энергии от ТП на 10 %.

Заключение

Для предприятия ГЭТ стационарных накопителей для обработки всей энергии рекуперации требуется в 10 раз меньше, чем бортовых накопителей.

Применение БН приводит к увеличению потребления оплачиваемой энергии от тяговой подстанции примерно на 23,36 %.

Применение стационарных накопителей приводит к снижению потребления оплачиваемой энергии от тяговых подстанций примерно на 10 %.

Применение бортовых накопителей энергии нерентабельно как по причине увеличения объемов потребления оплачиваемой энергии в СТЭ, так и в силу сверхвысоких капитальных и эксплуатационных затрат.

В качестве стационарных накопителей могут использоваться накопительные агрегаты суперконденсаторного и маховичного типов. Остается неисследованным вопрос достаточности ресурса суперконденсаторов при стационарном использовании, поскольку в год в КС ТП стационарный накопитель любого типа производит до 1,5 млн циклов зарядки/разрядки. Бортовой накопитель большую часть времени своего подключения не работает, поскольку он в течение года осуществляет (сообразно с количеством циклов разгона/торможения) не более 150 тысяч циклов зарядки/разрядки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Баранов Л. А., Гречишников В. А., Ершов А. В., Родионов М. Д. [и др.]. Показатели работы стационарного накопителя энергии на тяговых подстанциях московского метрополитена // *Электротехника*. 2014. № 8. С. 18–21. EDN: SGHUSZ.
- Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Коэффициенты полезного действия накопителя энергии в контактной сети горэлектротранспорта // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. 2022а. Т. 30, № 4(76). С. 127–141. DOI <https://doi.org/10.14498/tech.2022.4.9>. EDN: AMJPCB.
- Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Экономия энергии в контактной сети электротранспорта при работе стационарного накопителя // *Практическая силовая электроника*. 2023б. № 1(89). С. 42–52. EDN: OYNQUC.
- Кацай А. В., Бизяев А. А., Козаревич В. А. Эффект питания полезной сетевой нагрузки избыточной энергией рекуперации в ходе зарядки стационарного накопителя // *Энергетические системы*. 2022б. Т. 7, № 4. С. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.34031/es.2022.4.008>.
- Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Влияние буферных накопителей бортового и стационарного типа на энергопотребление тяговых подстанций в горэлектротранспорте // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2023а. Вып. 4. С. 542–560. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-542-560. EDN: XOJPAO.
- Мукин С. Рост цен на электроэнергию, высокая стоимость ремонта и обновление оборудования. Администрация города рассказала, почему хочет повышать цену проезда на трамвае. URL: <https://ulpressa.ru/2019/03/11/рост-цен-на-электроэнергию-высокая-ст/>.
- Спиридонов Е. А., Ярославцев М. В., Хайленко Е. А. Оценка влияния характеристик троллейбуса на эффективность рекуперативного торможения // *Электропривод на транспорте и в промышленности* : тр. II Всерос. науч.-практ. конф., Хабаровск, 20–21 сентября 2018 г. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2018. С. 235–243. EDN: YTZVBZ.
- Чернигов В. М. Электрооборудование трамвайного вагона с емкостным накопителем. URL : http://mapget.ru/wpcontent/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf.
- Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Агунов А. В., Третьяков А. В. Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава // *Электротехника*. 2018. № 10. С. 55–59. EDN: MAGDHV.
- Bartłomiejczyk M., Hołyszko P., Filipek P. Measurement and analysis of transmission losses in the supply system of electrified transport // *Journal of Ecological Engineering*. 2016. Vol. 17, Iss. 5. P. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/65447>.

- Hamacek Š., Bartłomiejczyk M., Hrbáč R., Mišák S. [et al.]. Energy recovery effectiveness in trolleybus transport // *Electric Power Systems Research*. 2014. Vol. 112. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.03.001>.
- Jandura P., Kubín J., Hubka L. Electric energy monitoring for applying an energy storage systems in trolleybus DC traction // *IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*. Donostia, Spain, 2017. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ecmsm.2017.7945904>.

References

- Baranov, L. A., Grechishnikov, V. A., Ershov, A. V., Rodionov, M. D. et al. 2014. Performance indicators of stationary energy storage device at traction substations of the Moscow Metro. *Elektrotehnika*, 8, pp. 18–21. EDN: SGHUSZ. (In Russ.)
- Katsai, A. V., Shevlyugin, M. V. 2022a. Efficiency coefficients of an energy storage device in the contact network of the city electric transport. *Vestnik of Samara State Technical University (Technical Sciences Series)*, 30(4(76)), pp. 127–141. DOI <https://doi.org/10.14498/tech.2022.4.9>. EDN: AMJPCB. (In Russ.)
- Katsai, A. V., Shevlyugin, M. V. 2023b. Energy saving in the contact network of electric transport during the operation of a stationary storage device. *Prakticheskaya Silovaya Elektronika*, 1(89), pp. 42–52. EDN: OYHQUC. (In Russ.)
- Katsai, A. V., Bizyaev, A. A., Kozarevich, V. A. 2022b. The effect of feeding the payload with excess recovery energy during charging of a stationary storage device. *Energy Systems*, 7(4), pp. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.34031/es.2022.4.008>. (In Russ.)
- Katsai, A. V., Shevlyugin, M. V. 2023a. The influence of buffer accumulators of on-board and stationary type on the energy consumption of traction substations in city electrical transport. *Izvestiya Tula State University*, 4, pp. 542–560. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-542-560. EDN: XOJPAO. (In Russ.)
- Mukin, S. The rise in electricity prices, the high cost of repairing and updating equipment. The city administration told why it wants to raise the price of a tram ride. URL: <https://ulpressa.ru/2019/03/11/пост-цен-на-электроэнергию-высокая-ст/> (Accessed 9.09.2023). (In Russ.)
- Spiridonov, E. A., Yaroslavtsev, M. V., Khailenko, E. A. 2018. Assessment of the influence of trolleybus characteristics on the efficiency of regenerative braking. In Proceedings of the II All-Russian scientific and practical conf. *Electric drive in transport and industry*, Khabarovsk, 20–21 September, 2018. Khabarovsk, pp. 235–243. EDN: YTZVBZ. (In Russ.)
- Chernigov, V. M. Electrical equipment of a tram car with a capacitive storage device. URL: http://mapget.ru/wpcontent/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf (Accessed: 07/22/2022). (In Russ.)
- Sharyakov, V. A., Sharyakova, O. L., Agunov, A. V., Tretyakov, A. V. 2018. Possibilities of rational use of braking energy of electric rolling stock. *Elektrotehnika*, 10, pp. 55–59. EDN: MAGDHV. (In Russ.)
- Bartłomiejczyk, M., Hołyszko, P., Filipek, P. 2016. Measurement and analysis of transmission losses in the supply system of electrified transport. *Journal of Ecological Engineering*, 17(5), pp. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/65447>.
- Hamacek Š., Bartłomiejczyk M., Hrbáč R., Mišák S. et al. 2014. Energy recovery effectiveness in trolleybus transport. *Electric Power Systems Research*, 112, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.03.001>.
- Jandura, P., Kubín, J., Hubka, L. 2017. Electric energy monitoring for applying an energy storage systems in trolleybus DC traction. *IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*. Donostia, Spain, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ecmsm.2017.7945904>.

Сведения об авторе

Кацай Александр Владимирович – ул. Южнопортовая, 40, стр. 3, г. Москва, Россия, 115088;
ООО "Кинемак", канд. филос. наук, генеральный директор;
e-mail: proton764@mail.ru

Alexander V. Katsay – 40/3 Yuzhnoportovaya Str., Moscow, Russia, 115088;
Kinemak LLC, Cand. Sci. (Philosophy), General Director;
e-mail: proton764@mail.ru