

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2023.1.03

УДК 620.97, 621.331, 629.433, 629.085

**А.В. Кацай<sup>1</sup>, М.В. Шевлюгин<sup>2</sup>**<sup>1</sup>ООО «Кинемак», Москва, Россия<sup>2</sup>Российский университет транспорта, Москва, Россия

## **СТРУКТУРА ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ С НАЗЕМНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ**

Применение наземных буферных накопителей энергии в контактной сети электротранспорта приводит к изменению структуры и объёмов потоков энергии от источников к потребляющему электрооборудованию. **Целью работы** ставилось исследование изменения потоков энергии при установке таких накопителей. **Методы:** для решения данной задачи в системе питания транспортной работы трамвая были исследованы потоки рекуперативной энергии подвижного состава путём непосредственного измерения потоков энергии от источников – тяговой подстанции и рекуперировавших вагонов, а также объёмы потребления энергии на тягу подвижным составом и перенаправленной энергии избыточной рекуперации стационарного накопителя энергии маховикового типа. **Результаты:** в ходе исследований было выявлено наличие внутрифидерных и межфидерных перетоков полезной рекуперации. Поскольку одинаковый объём транспортной работы подвижного состава электротранспорта требует одинаковых объёмов потребления энергии, то для подтверждения полученных результатов было проведено сравнение этих потоков для участков электропитания транспортной работы двух тяговых подстанций с равным пробегом вагонов, но с разной интенсивностью движения подвижного состава. В ходе этого сравнения было установлено наличие зависимости распределения потоков рекуперации в контактной сети по межфидерным и внутрифидерным каналам от интенсивности движения подвижного состава и количества изолированных участков питания у тяговой подстанции. Был выведен способ определения объёма внутрифидерных перетоков энергии рекуперации на основании измеренных показателей объёмов питания от тяговой подстанции, межфидерных перетоков энергии рекуперации, пробега вагонов по участкам данной подстанции и полного энергопотребления всей маршрутной системы трамвая за исследуемый период. Также было проведено исследование изменения объёмов и направленности потоков рекуперации при работе в контактной сети тяговой подстанции наземного накопителя энергии маховикового типа НКЭ-3Г. В результате установлено, что подключение стационарного накопителя помимо увеличения полезной рекуперации энергии в контактную сеть также приводит к изменению структуры её перетоков. **Практическая значимость:** установлены базовые закономерности в способах определения соотношений объёмов энергии рекуперации с объёмом энергопотребления вагонов на тягу на участках исследуемой тяговой подстанции с накопителем энергии к таковому соотношению на участках этой же подстанции без накопителя, а также на контрольной подстанции с равным пробегом подвижного состава. При прочих одинаковых условиях транспортной работы наземный накопитель позволяет увеличить объём полезного использования энергии рекуперации практически на треть.

**Ключевые слова:** рекуперативное торможение, межфидерные и внутрифидерные перетоки рекуперативной энергии, полезная и избыточная энергии рекуперации, стационарный накопитель, контактная сеть, тяговая подстанция, подвижной состав, тяговая нагрузка, нетяговая нагрузка, перенаправление избыточной рекуперации.

A.V. Katsay<sup>1</sup>, M.V. Shevlyugin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО "Kinemak", Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

## STRUCTURE OF ENERGY RECOVERY FLOWS IN THE CONTACT NETWORK OF A TRACTION SUBSTATION WITH A WAYSIDE STORAGE

The use of ground-based buffer energy storage devices in the contact network of electric transport leads to a change in the structure and volume of energy flows from sources to consuming electrical equipment. The aim of the work was to study the changes in energy flows during the installation of such storage devices. **Methods:** to solve this problem in the tram transport operation power supply system, the flows of regenerative energy of rolling stock were studied by directly measuring the energy flows from sources – traction substation and recuperating wagons, as well as the volumes of energy consumption for traction by rolling stock and the redirected energy of excessive recovery of a stationary flywheel-type energy storage. **Results:** in the course of research, the presence of intra- and inter-feeder flows of useful recovery was revealed. since the same amount of transport work of electric transport rolling stock requires the same amount of energy consumption, to confirm the results obtained, a comparison of these flows was carried out for the power supply sections of transport work of two traction substations with equal mileage of wagons, but with different intensity of movement of rolling stock. In the course of this comparison, it was established that the distribution of recovery flows in the contact network along the inter-feeder and intra-feeder channels depends on the intensity of movement of rolling stock and the number of isolated power sections at the traction substation. A method was derived for determining the volume of intra-feeder flows of recovery energy based on the measured indicators of the volumes of power supply from the traction substation, inter-feeder flows of recovery energy, the mileage of wagons along the sections of this substation and the total energy consumption of the entire tram route system during the study period. There was also a study of changes in the volume and direction of recovery flows during operation in the contact network of the traction substation of the ground-based flywheel energy storage unit NKE-3G. As a result, it was found that the connection of a stationary storage device, in addition to increasing the useful energy recovery in the contact network, also leads to a change in the structure of its flows. **Practical significance:** the basic regularities have been established in the methods of determining the ratios of the recovery energy volumes with the amount of energy consumption of wagons for traction in the sections of the traction substation under study with an energy storage device to that ratio in the sections of the same substation without a storage device, as well as at a control substation with an equal mileage of rolling stock. With other similar conditions of transport operation, the ground storage allows you to increase the amount of useful use of recovery energy by almost a third.

**Keywords:** regenerative braking, inter-feeder and intra-feeder flows of regenerative energy, useful and excess recovery energy, stationary storage, contact network, traction substation, rolling stock, traction load, non-traction load, redirection of excess recovery.

### Введение

В ходе рекуперативного торможения электроподвижного состава городского электротранспорта (ЭПС ГЭТ) рекуперированная энергия направляется на подключенную сетевую нагрузку, имеющую достаточную для приёма этой энергии мощность потребления, т.е. превращается в полезную рекуперацию [1]. В зависимости от расположения этой нагрузки в контактной сети (КС), а также от имеющихся точек

учёта с установленными счётчиками возможно достижение одной из важнейших задач для служб энергообеспечения пассажироперевозок в городском электротранспорте – инструментальное измерение объёмов этой энергии рекуперации, позволяющее определять снижение оплачиваемого от тяговой подстанции энергопотребления и установление потенциала увеличения этого эффекта за счёт дополнительного вовлечения избыточной части энергии рекуперации в выполнение транспортной работы. Однако полное оснащение измерительными приборами всего энергопотребляющего оборудования вряд ли возможно и, как правило, нецелесообразно, поскольку существенно увеличивает вторичные непроизводительные затраты предприятия. При отсутствии части необходимых для такого учёта счётчиков возможно расчётное определение недостающих данных по полезной [2] и избыточной части энергии рекуперации на основе составления баланса энергии в замкнутой системе. Целью исследования являлось определение объёмов и направлений перетоков полезной рекуперации, в том числе потребляемой на различных фидерах исследуемой ТП, и проведение сравнения характера этих перетоков при внедрении стационарного накопителя энергии. В ходе исследования производились учёт и статистическая обработка показателей установленных счётчиков энергии, сравнение показателей потоков энергии в сетях исследуемой и контрольной тяговых подстанций с сопоставимыми объёмами пробега ЭПС и энергопотребления от выпрямителей ТП, а также проводилась эксплуатация в КС исследуемой ТП наземного буферного накопителя энергии НКЭ-3Г маховикового типа. На основании совместного применения методов составления энергетического баланса в КС горэлектротранспорта и практических измерений объёмов прямой и обратной (рекуперативной) энергии на источниках и потребляющем оборудовании в ней, в том числе при применении стационарных буферных накопителей энергии, была выявлена сложная структура перетоков энергии рекуперации в КС по изолированным участкам питания подстанции, различение которых ранее не проводилось [3]. Показатели объёмов полезной рекуперации, регистрируемые бортовыми счётчиками, позволили, совместно с данными выдачи энергии в сеть от выпрямительных агрегатов тяговых подстанций (ТП), определить полный объём потребления энергии в КС на выполнение полезной транспортной работы, а также распределение объёмов этого потребления по изолированным участкам

питания тяговой подстанции. Установлено, что регистрируемые фидерными счётчиками обратные перетоки энергии рекуперации составляют часть энергии межпоездных перетоков. Другая часть этой энергии потребляется внутри того участка питания, где происходит рекуперативное торможение вагона. Кроме того, при отсутствии инструментального учёта энергии избыточной рекуперации (направляемой на бортовые тормозные резисторы при отсутствии в КС нагрузки достаточной мощности) вышеприведённые статистические данные за длительные периоды наблюдений позволили определить потенциал возможного повторного задействования избыточной рекуперации на выполнение полезной транспортной работы в ГЭТ.

### **Внутрифидерные и межфидерные перетоки полезной рекуперации в сети питания тяговой подстанции**

В современных трамвайных и троллейбусных системах в точках оперативного учёта энергии чаще всего устанавливают двунаправленные счётчики, позволяющие определять как прямые потоки энергии, так и обратные, вызванные рекуперативным торможением ЭПС. Эти счётчики, как правило, устанавливают на каждом фидере тяговой подстанции, а также на входе тяговых инверторов вагонов (рис. 1).

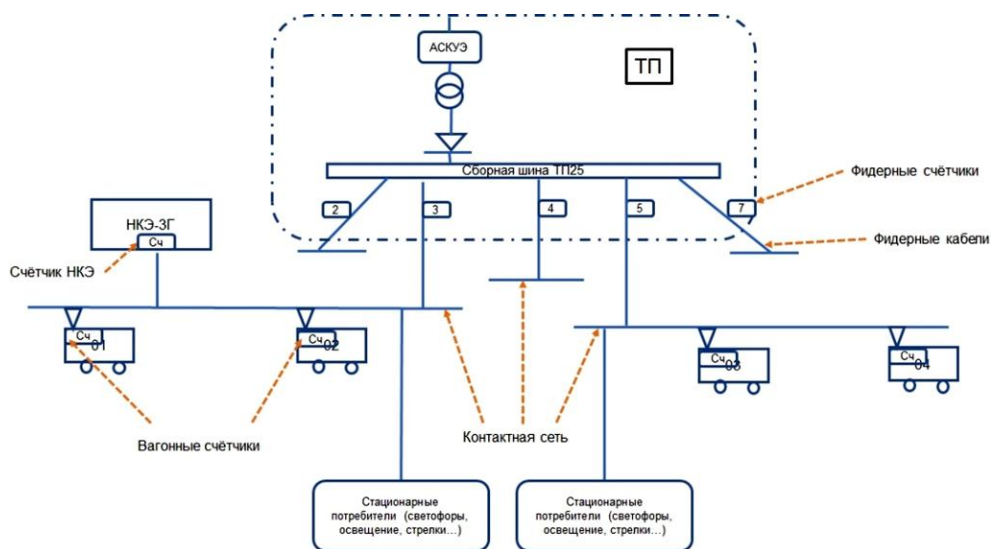


Рис. 1. Установка счётчиков в сети тягового электроснабжения исследуемой тяговой подстанции (бортовые счётчики на ЭПС, фидерные счётчики на ТП, счётчик накопителя)

При наличии в КС наземного буферного накопителя, например маховикового типа НКЭ-ЗГ, такой же счётчик устанавливается на входе этого устройства.

В ходе торможения вагона при наличии в КС нагрузки, мгновенная мощность которой близка к значению мощности рекуперации, вся рекуперативная энергия направляется в контактную сеть, откуда она потребляется указанной нагрузкой. Эта часть энергии рекуперации называется полезной ( $E_{\text{полезн}}^{\text{рек}}$ ), так как она утилизируется на выполнение полезной транспортной работы. Напряжение рекуперации превышает напряжение тяговой подстанции, формируемое в точке присоединения приёмника энергии, поэтому питания от ТП в них нет. Приёмниками этой энергии выступают [4]:

- нетяговые устройства самого рекуперирующего вагона, так как они находятся в цепи рекуперации наиболее близко к рекуперирующему тяговому приводу;
- тяговые приводы других вагонов, которые в этот период времени идут на тяге;
- нетяговые бортовые устройства других вагонов, находящихся в зоне повышенного рекуперативного напряжения;
- нетяговая стационарная нагрузка контактной сети (светофоры, обогреватели стрелок, системы освещения остановочных павильонов и др.).

Вся выданная в КС приводом тормозящего вагона рекуперативная энергия  $E_{\text{полезн}}^{\text{рек}}$  фиксируется бортовым счётчиком, установленным на выходе его тягового инвертора как обратная энергия. Если вся нагрузка, принимающая полезную энергию рекуперации вагона, находится на одном фидере с тормозящим вагоном, то эта энергия рекуперации не переходит на другие фидеры, т.е. потребляется внутри фидера, в силу чего её перетоки называются внутрифидерными ( $E_{\text{вф}}$ ). Нетяговая нагрузка рекуперирующего в сеть вагона питается по внутривагонной цепи и учитывается в составе внутрифидерных перетоков. Перетоки рекуперации внутри фидера не могут фиксироваться фидерными счётчиками, которые установлены на выходе сборной шины тяговой подстанции, так как эта энергия до фидерных счётчиков не доходит. Часть полезной рекуперативной энергии, которая поступает в другие вагоны, фиксируется их бортовыми счётчиками как прямое потребление в общем объёме по-

ступающей из КС энергии и не может быть инструментально отделена от той, которая поступает от тяговой подстанции.

В случае если на фидере, на котором рекуперировал вагон, нагрузка недостаточна для приёма энергии рекуперации, то часть полезной энергии рекуперации перетекает на другие фидеры, где такая нагрузка имеется. Эти перетоки энергии полезной рекуперации называются межфидерными ( $E_{\text{мф}}$ ), и их объём всегда меньше, чем вся полезная рекуперация, на объём внутрифидерных перетоков. Фидерные счётчики определяют её как обратную энергию, которая может выдаваться в КС только рекуперировавшими вагонами. Полный объём полезной энергии рекуперации  $E_{\text{полезн}}^{\text{рек}}$  определяется суммой межфидерных и внутрифидерных перетоков по формуле:

$$E_{\text{полезн}}^{\text{рек}} = E_{\text{мф}} + E_{\text{вф}}. \quad (1)$$

В рассматриваемой трамвайной системе объём полезной энергии рекуперации вагонов согласно показателям бортовых счётчиков составил за 2021 г. порядка 1,674 млн кВтч, или около 20 % от потреблённой вагонами на тягу энергии.

При этом объём межфидерных перетоков полезной энергии рекуперации, согласно показателям фидерных счётчиков, составил почти 600 тыс. кВтч, или до 36 % от всей полезной рекуперации вагонов. Остальные её 64 %, или более 1 млн кВтч, было потреблено сетевой нагрузкой на тех же фидерах, где происходило рекуперативное торможение с выдачей полезной рекуперации в КС, т.е. по внутрифидерным перетокам.

Объём внутрифидерных перетоков полезной рекуперации в системе электроснабжения транспортной работы за период (например, за день, месяц) рассчитывается напрямую по формуле (1), так как значения  $E_{\text{полезн}}^{\text{рек}}$  и  $E_{\text{мф}}$  известны по счётчикам.

Как уже выше было изложено, полезные перетоки энергии рекуперации возможны лишь при одновременности наличия достаточной по мощности нагрузки в КС в ходе рекуперативного торможения. Наибольшее влияние на размещение в сети и мощность нагрузки оказывают следующие факторы: расписание движения вагонов по маршрутам и температура окружающей среды. Последний фактор заметно влияет на значение тяговой нагрузки – при снижении температуры увеличива-

ется расход энергии на тягу вагона, а также сильно – на нетяговую нагрузку, так как в холодный период года длительно работает самая мощная нетяговая система – отопление салона вагона и кабины водителя, мощность которой у одного трамвая может достигать 40 кВт и более [5]. Например, в троллейбусной системе города Гдыня (Польша) нетяговое энергопотребление в зимнее время превышает 30 % от общего потребления системы [6]. В исследуемой нами трамвайной системе в Санкт-Петербурге в целом по году объём нетягового энергопотребления составляет порядка 50 % от общего потребления. Разница в долях нетягового энергопотребления в этих двух случаях объясняется меньшей мощностью нетяговой нагрузки относительно тяговой в этих системах, а также режимом работы нетяговых систем, что обусловлено главным образом более мягким климатом и более длинным световым днём в Гдыне, чем в Санкт-Петербурге.

Влияние погодных факторов также ощутимо отражается на соотношении внутрифидерных и межфидерных перетоков по месяцам года [7]. На рис. 2 изображены помесячные значения межфидерных и внутрифидерных перетоков энергии в сети всей трамвайной системы за 2021 г.

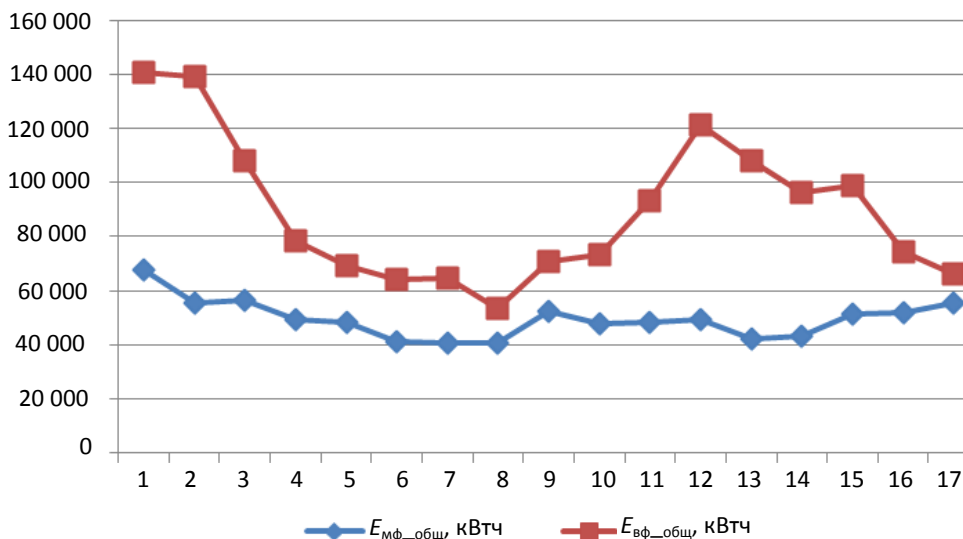


Рис. 2. Помесячные объёмы межфидерных  $E_{mf}$  и внутрифидерных  $E_{vf}$  перетоков полезной рекуперации во всей исследуемой системе трамвая за 17 месяцев с января 2021 г., кВтч

Значение внутрифидерных перетоков рассчитывалось, исходя из известного по счётчикам вагонов полного объёма полезной энергии рекуперации вагонов, а также из измеренного значения межфидерных перетоков рекуперации на всех фидерах всех тяговых подстанций системы. В сравнении с холодными месяцами года летом значения и доли внутрифидерных перетоков полезной рекуперации резко падают относительно межфидерной рекуперации. Этот факт означает, что летом наличие достаточной по мощности полезной нагрузки на одном фидере с тормозящим вагоном – явление более редкое. Требуемая мощность нагрузки для приёма рекуперативной энергии собирается чаще всего с нескольких фидеров тяговой подстанции.

Из рис. 2 видно, что в тёплые месяцы года во всей системе питания трамвайного движения внутрифидерные перетоки рекуперации резко падают и могут приближаться к значениям межфидерных перетоков. Это означает, что вероятность событий одновременности достаточной нагрузки и рекуперирующего трамвая на одном фидере существенно вырастает именно в зимние месяцы. С точки зрения транспортных потерь энергии полезной рекуперации (потерь на непроизводительный нагрев проводов и фидерных кабелей) наиболее эффективной является внутрифидерная утилизация полезной рекуперации, поскольку плечо перетоков при этом минимально.

На участках тяговых подстанций с более высокой интенсивностью движения подвижного состава объёмы межфидерных перетоков энергии полезной рекуперации могут быть существенно ниже, чем объёмы внутрифидерного потребления этой энергии. Так, в целом по исследуемой трамвайной системе за 17 месяцев наблюдений внутрифидерные перетоки  $E_{вф}$  составили 64,4 % от общего объёма полезной рекуперации, тогда как межфидерные перетоки полезной рекуперации  $E_{мф}$  – 35,4 % (см. рис. 2).

Как видно из вышеприведённого графика, суммарные по системе объёмы межфидерных перетоков меняются по году незначительно, тогда как внутрифидерная рекуперация растёт существенно от тёплых к холодным месяцам – практически вдвое. Этот факт отражает зависимость внутрифидерного потребления полезной рекуперации от наличия достаточной по мощности нагрузки. Корреляция объёмов внутрифидерной рекуперации с наружной температурой – сильная отрица-



тельная  $-0,85$ , тогда как корреляция межфидерной рекуперации с температурой  $-0,46$  – слабая отрицательная.

В холодный период немного вырастает тяговая нагрузка на выполнение одинаковой транспортной работы, а нетяговая нагрузка при этом вырастает весьма существенно [8]. Это обуславливает возникновение большей вероятности в холодную погоду наличия на «рекуперирующем» фидере достаточной мощности нагрузки для приёма энергии рекуперации. Такой сезонно вариативной нагрузкой выступают системы собственных нужд вагонов для обеспечения полезной работы по пассажироперевозкам – отопления и освещения [9]. Коэффициент корреляции за весь срок выполнения наблюдений между изменением нетяговой нагрузки и внутрифидерной рекуперацией практически функциональный:  $+0,97$ .

### Избыточная энергия рекуперации

При отсутствии в КС тяговой подстанции достаточного объёма нагрузки (тяговой и нетяговой) на выходе частотного привода тормозящего вагона повышается напряжение [10]. Достигнув уровня уставки тормозного прерывателя, обычно она устанавливается производителем инверторов на значение  $720$  В, которое является предельным по ГОСТ 6962-75 [11] для контактной сети горэлектротранспорта, инвертор переключает цепь выдачи рекуперативной энергии на тормозные резисторы, расположенные на борту вагона, где эта энергия рассеивается теплом в атмосферу. Эта часть энергии рекуперации называется избыточной ( $E_{\text{избыт}}^{\text{рек}}$ ), поскольку никакая полезная сетевая нагрузка ею не питается и также не учитывается в составе внутрифидерных перетоков.

Счётчики энергии на тормозные резисторы вагонов обычно не устанавливаются. Однако в некоторых моделях применяемых в российском подвижном составе частотных тяговых преобразователей имеются средства промышленного учёта энергии (датчики тока и напряжения), показатели которых позволяют инверторам фиксировать объёмы избыточной рекуперации. Полный объём рекуперативной энергии подвижного состава ГЭТ ( $E_{\text{полная}}^{\text{рек}}$ ) за период складывается из полезной и избыточной рекуперации:

$$E_{\text{полная}}^{\text{рек}} = E_{\text{полезн}}^{\text{рек}} + E_{\text{избыт}}^{\text{рек}} = E_{\text{мф}} + E_{\text{вф}} + E_{\text{избыт}}^{\text{рек}}. \quad (2)$$

В случаях наличия возможности промышленного учёта на вагонах избыточной рекуперации все показатели в (2) становятся известными. При отсутствии инструментальной возможности учёта объём избыточной рекуперации  $E_{\text{избыт}}^{\text{рек}}$  может быть определён следующим способом. Как показывают долгосрочные наблюдения (см. рис. 2), наибольший объём полезной рекуперации энергии торможения вагонов производится в зимний период. При этом ежедневный объём транспортной работы, определяемый расписанием движения вагонов, в течение года практически не изменялся. Наиболее удобно определять абсолютный объём избыточной рекуперации на основании удельных показателей разных видов рекуперации в расчёте на один километр пробега вагонов (кВтч/км). Удельные показатели полезной рекуперации определяются, например, за календарные месяцы или дни. Для исключения влияния неравномерности пробега вагонов в различные месяцы, которые отличаются количеством дней, рассчитываются удельные значения ( $Q$ ) полезной и избыточной рекуперации по формуле:

$$Q_{\text{полезн}}^{\text{рек}} = \frac{E_{\text{полезн}}^{\text{рек}}}{L}, \quad (3)$$

$$Q_{\text{избыт}}^{\text{рек}} = \frac{E_{\text{избыт}}^{\text{рек}}}{L}, \quad (4)$$

где  $L$  – суммарный пробег вагонов в системе транспортного движения за рассматриваемый период.

Из показателей удельной полезной рекуперации за год выбирается месяц с максимальным значением  $Q_{\text{избыт}}^{\text{рек}}$ . В 2021 г. таким месяцем был февраль, когда на 1 км пробега вагоны в среднем выдавали в контактную сеть полезной рекуперации в объёме 1,323 кВтч (рис. 3).

В тёплые периоды года энергия рекуперации переводится в значительной части из разряда полезной в избыточную, т.е. чаще и в большем объёме направляется на тормозные резисторы. Разница между максимальным по году месячным значением удельной полезной рекуперации и фактическими помесечными значениями этого показателя показывает удельный на 1 км пробега объём рекуперации в этот месяц, который перешёл в разряд избыточной  $Q_{\text{избыт}}^{\text{рек}}$  из полезной  $Q_{\text{полезн}}^{\text{рек}}$ :

$$Q_{\text{избыт}}^{\text{рек}} = Q_{\text{полезн-макс}}^{\text{рек}} + Q_{\text{полезн-факт}}^{\text{рек}}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{полезн-макс}}^{\text{рек}}$  – максимальное по году удельное на 1 км значение полезной рекуперации вагонов,  $Q_{\text{полезн-факт}}^{\text{рек}}$  – фактическое за период удельное на 1 км значение полезной рекуперации вагонов.

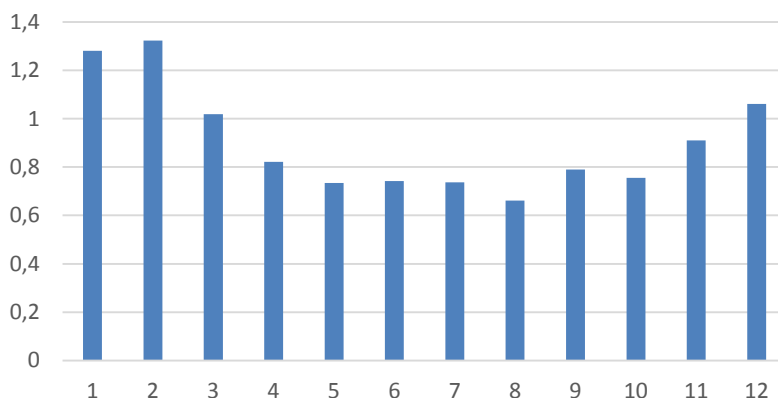


Рис. 3. Помесячные значения удельных показателей полезной рекуперации вагонов  $Q_{\text{полезн}}^{\text{рек}}$  в рассматриваемой системе за 2021 год, кВтч/км

Для расчёта фактического значения избыточной энергии рекуперации за период ( $E_{\text{избыт}}^{\text{рек}}$ ) достаточно перемножить удельную избыточную рекуперацию по рассматриваемому месяцу и фактический пробег вагонов за этот месяц:

$$E_{\text{избыт}}^{\text{рек}} = Q_{\text{избыт}}^{\text{рек}} \cdot L. \quad (6)$$

Так, в рассматриваемой системе был определён объём избыточной энергии рекуперации, который по 2021 году составил значение порядка 770 тыс. кВтч, или 46 % от объёма полезной энергии рекуперации (9,2 % от потребления вагонами на тягу).

Увеличение объёмов избыточной рекуперации в тёплый сезон года подтверждается работой стационарного накопителя энергии НКЭ-3Г (рис. 4). Алгоритм работы накопителя позволяет принимать энергию из КС только при повышенном напряжении относительно значения напряжения холостого хода тяговой подстанции. Верхняя уставка напряжения устройства управления накопителем выставляется с положительной дельтой относительно последнего. А превышение напряжения в сети в период выполнения транспортной работы в течение дня относительно значения холостого хода ТП возможно только при избыточ-

ной рекуперации вагона. В холодный период объём принятой накопителем НКЭ-3Г за месяц работы (декабрь 2021 г.) энергии составлял ~2500 кВтч, а с учётом параллельного потребления перенаправленной при зарядке НКЭ энергии избыточной рекуперации сетевой нетяговой нагрузкой («эффект КБК», [12]) полный объём избыточной энергии рекуперации, перенаправленной на полезную транспортную работу, составил порядка 4000 кВтч.



Рис. 4. Контейнер с накопителем энергии НКЭ-3Г во время работы в КС трамвая (а); внешний вид накопителя (б)

В тёплый месяц (апрель 2022 г.) непосредственное потребление сетевой нагрузкой избыточной энергии рекуперации в ходе зарядки накопителя составило более 4000 кВтч, а приём энергии самим накопителем – более 6000 кВтч, т.е. полный объём перенаправленной с тормозных резисторов избыточной рекуперации в этот месяц превысил 10 000 кВтч. Значение дельты по напряжению от уровня холостого хода ТП у установки накопителя на приём избыточной рекуперации при этом не менялось. Помесячная избыточная рекуперация в КС исследуемой ТП за период декабрь-апрель увеличилась в 2,5 раза. Зависимость объёма избыточной рекуперации от наружной температуры отмечают также исследователи стационарных емкостных накопителей в КС Московского метрополитена на участке наземной тяговой подстанции [13].

Полный объём рекуперативной энергии исследуемой трамвайной системы  $E_{\text{полная}}^{\text{рек}}$  в соответствии с (2) составил в 2021 г. 2,445 млн кВтч,

из которой на долю полезной рекуперации пришлось 68,5 %. Рассчитанный по (2) полный объём рекуперации в рассматриваемой системе составляет порядка 30 % от потребления энергии на тяговые нужды вагонов, что хорошо согласуется с оценкой доли рекуперативной энергии от тягового потребления ведущими исследователями этого вопроса [7; 14–17], из которых на избыточную рекуперацию приходится около трети.

Также следует заметить, что вышеприведённая оценка объёмов избыточной рекуперации является скорее нижней её границей, поскольку максимальный за 2021 год месячный показатель удельной полезной рекуперации (в феврале) не исключает того, что в этот месяц не вся энергия рекуперации стала полезной, что часть её так и осталась избыточной, рассеянной теплом на тормозных резисторах.

### **Перенаправленная при работе наземного накопителя избыточная энергия рекуперации**

Установка стационарного накопителя не только повышает объём полезной энергии рекуперации [3, 18], но и изменяет соотношения внутрифидерных и межфидерных перетоков на участках питания данной подстанции. Сравним потоки энергии в КС исследуемой ТП за май 2021 г., когда стационарный накопитель ещё не работал, с маем 2022 г., когда накопитель НКЭ-3Г работал.

Так, в мае 2021 г., когда исследуемая тяговая подстанция не была оснащена стационарным буферным накопителем, при среднемесячной температуре +11,5 °С пробег вагонов по участкам питания составил 45 287 км, а потребление энергии от выпрямительного агрегата составило 171 652 кВтч. В мае 2022 г. при работающем стационарном буферном накопителе при среднемесячной температуре +12 °С пробег вагонов по участкам питания составил 45 413 км (увеличение менее 1 %), а потребление энергии от выпрямительного агрегата составило 163 526 кВтч (меньше на 5 %). В указанные месяцы отопление вагонов, казалось бы, не должно было работать. В то же время ежедневный график дневных температур за эти периоды показывает, что количество дней с температурой ниже +12 °С, когда включалась система отопления вагонов, в мае 2021 г. было заметно меньше (рис. 5), а среднемесячное значение не отражает особенностей каждодневных колебаний температуры.

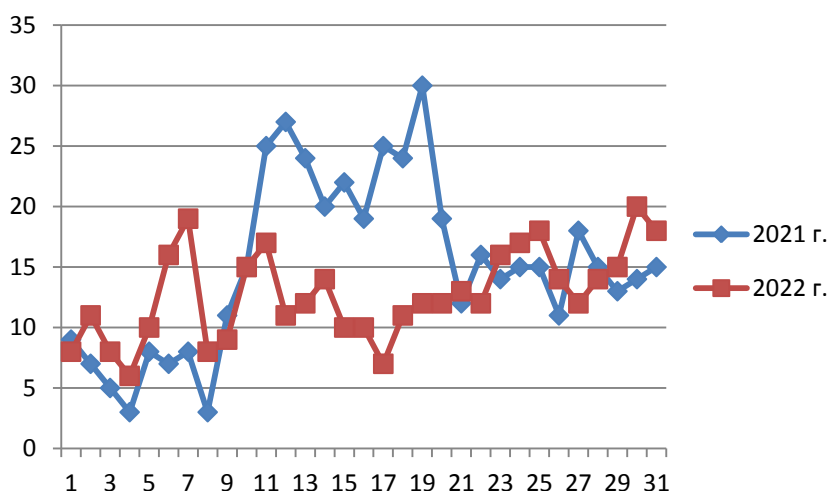


Рис. 5. Графики температуры в полдень в Санкт-Петербурге в мае 2021 и 2022 г., °С (данные взяты с портала ГИСМетео (Gismeteo.ru, [19, 20]). По оси абсцисс указаны порядковые номера дней мая месяца)

В то же самое время межфидерная рекуперация на исследуемой ТП в 2022 г. увеличилась, в сравнении с 2021 г. на 17 %. Удельные показатели потребления энергии на 1 км пробега ЭПС по участкам данной ТП от выпрямительного агрегата  $Q_{ТП}$  и от межфидерных перетоков рекуперации  $Q_{мф}$  представлены в табл. 1.

Таблица 1

Удельные показатели энергопотребления на 1 км пробега ЭПС по фидерам исследуемой ТП от выпрямительного агрегата и от межфидерных перетоков рекуперации в 2021 и 2022 гг., кВтч/км

Энергопотребление	2021, май	2022, май
$Q_{ТП}$ , кВтч/км	3,79	3,60
$Q_{мф}$ кВтч/км	0,64	0,75

На рис. 6 отражены данные измерений энергии на фидерах исследуемой тяговой подстанции за сравниваемые два месяца разных годов. При установке наземного буферного накопителя при практически равной транспортной работе в мае 2022 г. проявилось увеличение объёмов межфидерных перетоков рекуперации на каждом фидере при одновременном суммарном общем снижении потребления от выпрямительного агрегата подстанции.

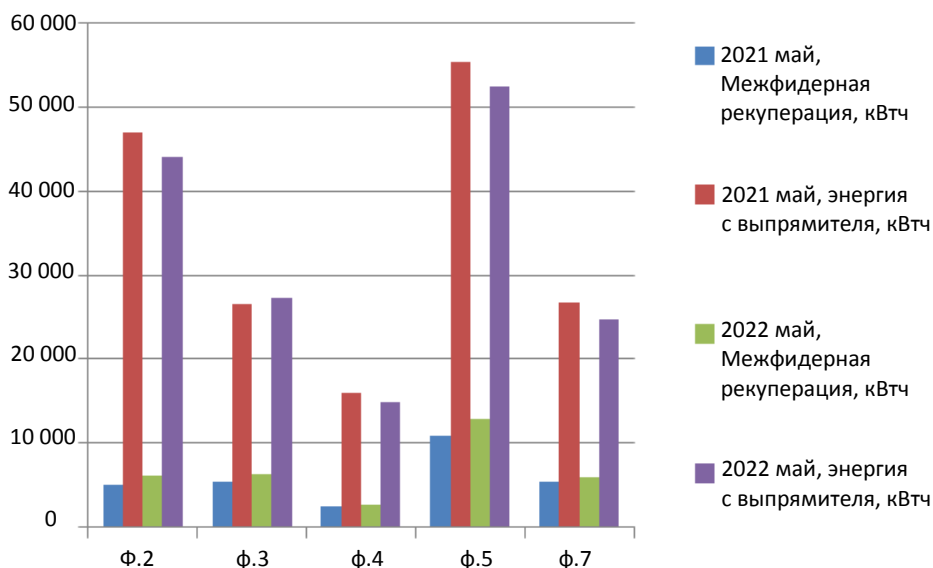


Рис. 6. Потоки энергии по всем фидерам ТП от выпрямительного агрегата и межфидерные перетоки энергии рекуперации

Из рис. 6 видно, что при немного большем пробеге в 2022 г. межфидерная рекуперация на всех фидерах ТП увеличилась, хотя среднемесячная температура практически не изменилась.

Для фидеров без накопителя это означает, что избыточная рекуперация, которая была в 2021 г., в 2022 г. перенаправлялась на накопитель энергии, установленный на фидере № 3.

При перетоках этой перенаправленной избыточной рекуперации на накопитель часть её непосредственно потреблялась нетяговой нагрузкой как на самих рекуперирующих фидерах, так и на остальных (эффект КБК [11]).

Для фидера № 3 увеличение межфидерных перетоков означает, что помимо перетоков полезной рекуперации ещё и добавляется в этом направлении выдаваемая накопителем энергия на нагрузку (тяговую и нетяговую) на других фидерах.

Сравним показатели работы двух ТП – исследуемой и контрольной, пробег ЭПС по участкам питания которых был практически равным (рис. 7), так же, как и потребление сетевой энергии от выпрямительных агрегатов (рис. 8).

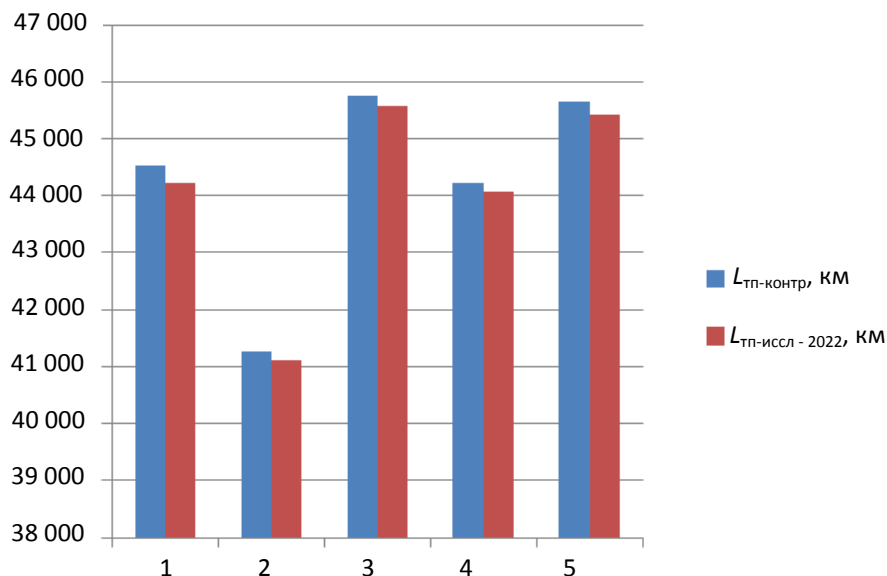


Рис. 7. Сравнение пробега ЭПС по участкам питания мсследуемой и контрольной тяговых подстанций с близким энергопотреблением от выпрямителей ТП за январь-май 2022 г., км (по оси абсцисс указан порядковый номер месяца года)

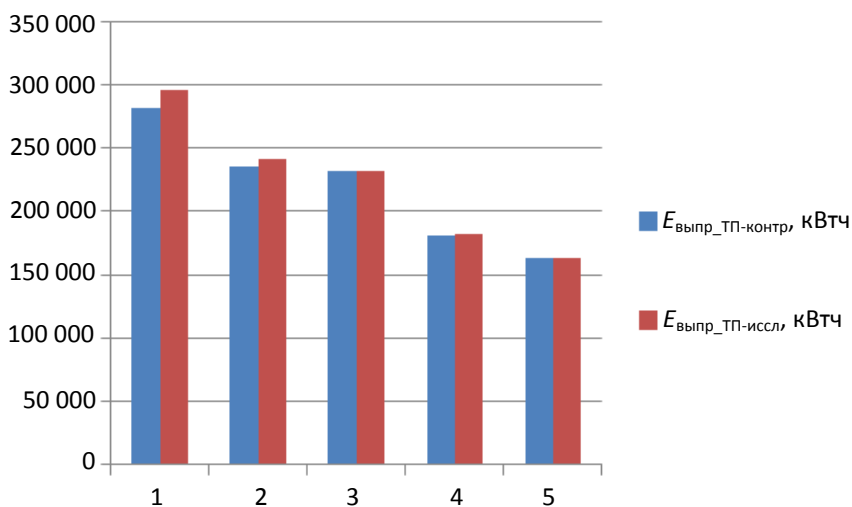


Рис. 8. Потребление энергии от выпрямительных агрегатов на выполнение транспортной работы на контрольной и исследуемой ТП (по оси абсцисс указан порядковый номер месяца года)

Более подробный перечень основных характеристик транспортной работы сравниваемых подстанций представлен в табл. 2.



Таблица 2

Параметры транспортной работы исследуемой  
и контрольной ТП в мае 2022 г.

	ТП исследуемая	ТП контрольная
Длина участков КС, км	5,25	2,34
Остановочные пункты, шт.	11	5
Межостановочные дистанции, шт.	10	4
Кол-во изолированных участков питания ТП (фидеры), шт.	5	3
Кол-во рейсов по участкам, шт.	15410	22886
Пробег вагонов по участкам, $L$ , км	45413	45647
Потребление от выпрямителя ТП, $E_{ТП}$ , кВтч	163525	163352
Межфидерные перетоки рекуперации, $E_{мф}$ , кВтч	34091	15991

На участках двух сравниваемых тяговых подстанций (экспериментальной и контрольной) пробег вагонов трамвая практически идентичен как в данный месяц, так и в другие месяцы (разница – менее 1 %). При этом длина КС исследуемой ТП составляет 5250 м, а длина КС контрольной ТП – 2340 м, т.е. при более чем вдвое меньшей длине сети на контрольной ТП интенсивность движения в полтора раза выше, чем на участках исследуемой ТП (четыре маршрута работают на самом напряжённом участке контрольной подстанции и по три – на двух других против трёх маршрутов на самом напряжённом участке исследуемой подстанции и по одному на четырёх остальных участках). Количество межостановочных перегонов: 10 на исследуемой ТП, 4 – на контрольной.

Потребление энергии от выпрямителей этих тяговых подстанций практически одинаково (разница – менее 1 %). При этом на исследуемой тяговой подстанции межфидерные перетоки энергии рекуперации в 2,13 раза больше, чем на фидерах контрольной ТП без накопителя. Показатели удельной межфидерной рекуперации для двух сравниваемых ТП представлены на рис. 9.

Вывод из сопоставления этих данных таков, что при более интенсивном движении подвижного состава на фидерах ТП межфидерные перетоки полезной энергии рекуперации меньше, чем на фидерах ТП с менее интенсивным движением ЭПС. Физическое основание такой

разницы в объёмах межфидерных перетоков на участках более интенсивного движения подвижного состава заключается в том, что на таких участках вероятность наличия достаточной по мощности нагрузки для приёма избыточной энергии рекуперации в ходе торможения вагона на этом же фидерном участке гораздо выше [21].

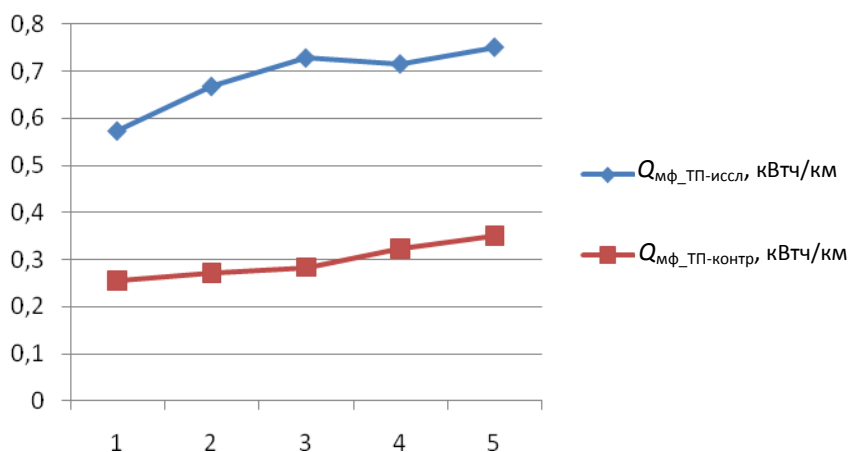


Рис. 9. Удельные значения межфидерных потоков полезной рекуперации за первые пять месяцев 2022 г. на исследуемой и контрольной ТП, кВтч/км (по оси абсцисс указан порядковый номер месяца года)

Ситуации такого совпадения соразмерности мощности источника энергии и нагрузки на одном фидере для участков питания подстанции, которая имеет более длинные участки, но с меньшей интенсивностью движения ЭПС при равенстве транспортной работы, встречаются гораздо реже. Поэтому на последних для приёма полезной энергии рекуперации требуемая мощность нагрузки чаще собирается с нескольких фидеров, так как на «своём» фидере рекуперирующий вагон не находит достаточной по мощности нагрузки.

Как видно из рис. 9, перетоки рекуперации между фидерами различны (в расчёте на 1 км пробега ЭПС) на подстанциях, на которых интенсивность движения ЭПС различна, хотя пробег ЭПС практически равный.

Также показательно сопоставление удельных значений межфидерных перетоков рекуперации на одной и той же исследуемой ТП с одинаковым пробегом вагонов за январь–май 2021 и 2022 гг.

(рис. 10). Разница за эти периоды состоит в том, что в 2021 г. эта ТП работала без стационарного накопителя, а в 2022 г. – с ним.

Разница в пробегах ЭПС по участкам питания этой ТП минимальна, что отражено на рис. 11.

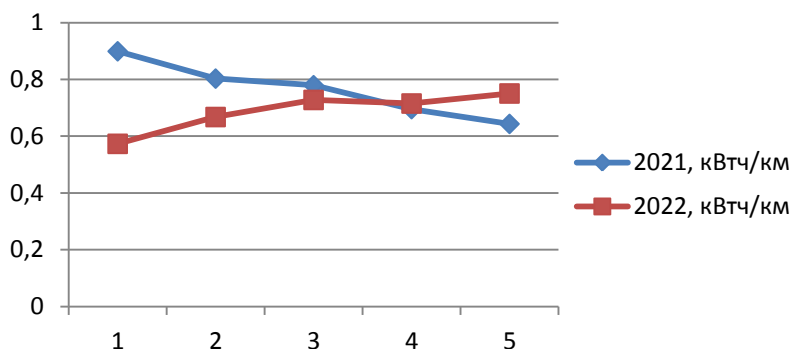


Рис. 10. Удельные показатели межфидерных перетоков рекуперации  $Q_{mf}$  на исследуемой ТП за январь-май 2021 и 2022 гг. на 1 км пробега, кВтч/км (по оси абсцисс указан порядковый номер месяца года)

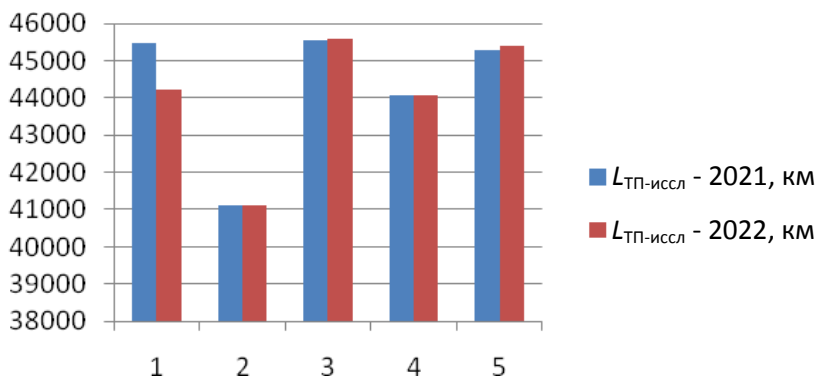


Рис. 11. Пробег вагонов  $L$  по участкам питания исследуемой ТП в 2021 и 2022 гг. ежемесячно в январе-мае км (по оси абсцисс указан порядковый номер месяца года)

На исследуемой ТП при практически одинаковом ежемесячном пробеге за рассматриваемые месяцы этих годов общие тенденции изменения межфидерной рекуперации разнонаправленны. В год работы без накопителя (2021) значения удельного показателя межфидерных перетоков рекуперации с января по май линейно снижающиеся. В 2022 г. при работе накопителя эта тенденция линейно повышаю-

щаяся. Поскольку изменения в объеме транспортной работы и в погодных условиях ежемесячно незначительные, то изменение тенденции удельных межфидерных перетоков рекуперации можно объяснить только одним фактором – работой в 2022 г. стационарного накопителя на одном из фидеров питания этой ТП. В тёплые месяцы мощность нагрузки на всех фидерах снижается. При отсутствии наземного накопителя, который при рекуперативном торможении вагона в условиях недостатка сетевой полезной нагрузки работает в режиме управляемой дополнительной нагрузки, часть энергии рекуперации, которая в холодный период выдавалась в КС, переходит в разряд избыточной и утилизируется на бортовых тормозных резисторах. Этот процесс приводит к снижению объемов межфидерных перетоков. В аналогичных условиях при работе стационарного накопителя в сети появляется достаточная для приёма рекуперированной энергии нагрузка, т.е. на накопитель с других фидеров перетекает рекуперативная энергия, которая без него была бы избыточной. Объем межфидерных перетоков при равной транспортной работе увеличивается, что отражено в графике за 2022 г. (рис. 10).

Полное потребление энергии в КС ТП складывается из энергии, получаемой от выпрямителя ТП, из полезной и избыточной энергии рекуперации [12; 22–23]:

$$E_{\text{полн}}^{\text{ТП}} = E_{\text{выпр}}^{\text{ТП}} + E_{\text{полезн}}^{\text{рек}} + E_{\text{избыт}}^{\text{рек}} = E_{\text{выпр}}^{\text{ТП}} + E_{\text{мф}} + E_{\text{вф}} + E_{\text{избыт}}^{\text{рек}}. \quad (7)$$

Полный объем полезно потребляемой энергии на выполнение транспортной работы выводится из (7) за вычетом избыточной рекуперации:

$$E_{\text{полн-тр}}^{\text{ТП}} = E_{\text{выпр}}^{\text{ТП}} + E_{\text{полезн}}^{\text{рек}} = E_{\text{выпр}}^{\text{ТП}} + E_{\text{мф}} + E_{\text{вф}}. \quad (8)$$

Сравним удельные межфидерные перетоки рекуперации на исследуемой ТП с удельным показателем полного объема полезной рекуперации всей системы за первые пять месяцев 2021 и 2022 гг. – до установки накопителя и после. В 2021 г. в эти месяцы изменение удельной межфидерной рекуперации на исследуемой ТП повторяет изменения удельных значений всей полезной рекуперации.

После установки накопителя в 2022 г. тенденция изменяется на противоположную: при снижении удельного значения полной рекуперации вагонов увеличиваются межфидерные перетоки рекуперации на

участках исследуемой ТП и наоборот. Следовательно, установка накопителя изменяет характер взаимной зависимости межфидерных перетоков рекуперации и общего объёма рекуперированной энергии (см. далее на рис. 13). Так, корреляция этих показателей за январь–май 2021 г. составляет +0,91 – положительная, практически функциональная. За январь–май 2022 г. корреляция становится отрицательной средней –0,68. При этом за весь период наблюдений в 17 месяцев корреляция между удельным значением полной рекуперации и удельными межфидерными перетоками составляет +0,74 – положительная средняя.

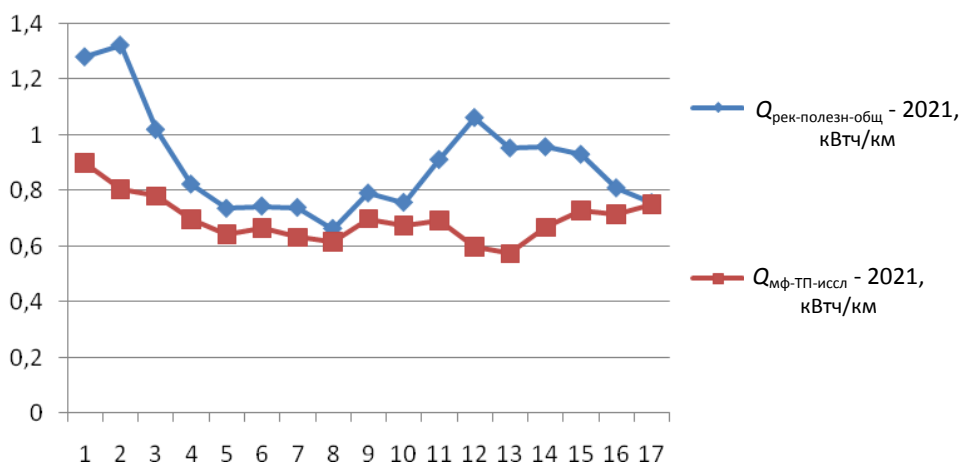


Рис. 12. Удельные показатели на 1 км пробега полезной рекуперации всей системы  $Q_{ползн}^{рек-общ}$  и межфидерных перетоков  $Q_{мф}^{ТП-общ}$   $Q_{мф}^{ТП-иссл}$  на исследуемой ТП, кВтч/км (по оси абсцисс указаны месяцы от начала исследований в янв. 2021 г.)

Значит, для ТП с высоким удельным показателем межфидерной рекуперации и большим числом фидеров установка стационарного накопителя приводит к изменению характера зависимости между общим объёмом полезной рекуперации и межфидерных перетоков на обратную. Другими словами, на участках ТП со стационарным накопителем энергии при увеличении общего объёма полезной рекуперации при той же транспортной работе (за счёт перевода избыточной рекуперации на повторное полезное использование) удельный показатель межфидерной рекуперации снижается (увеличивается внутрифидерное потребление рекуперации) и наоборот.

## **Определение объёмов внутрифидерных перетоков при работе стационарного накопителя**

Для упрощения дальнейших выведений соотношений разных составляющих рекуперированной энергии рассмотрим исследуемую и контрольную ТП, на которых общие объёмы пробега вагонов на участках этих ТП практически не отличаются (см. рис. 7).

Пробег вагонов для исследуемой и контрольной подстанций одинаков, следовательно, и объём транспортной работы одинаков. Поскольку вагоны на всех линиях исследуемой трамвайной системы ходят однотипные и в равных внешних погодных условиях, то удельные объёмы энергии питания тяговой и нетяговой нагрузки каждого так же примерно одинаковы на всех участках движения данной системы. Исходя из этих предположений, полное потребление энергии на участках питания данной ТП находится в прямой зависимости от пробега вагонов по этим участкам. Поскольку нам известны показатели полного потребления энергии на выполнение транспортной работы в системе по показателям счётчиков фидеров ТП и вагонов (см. рис. 1), а также значение полезного пробега вагонов в целом в системе  $L^{\text{общ}}$  и пробега  $L^{\text{ТП}}$  на участках движения каждой ТП, то для каждой ТП вычисляется значение полного потребления энергии:

$$E_{\text{полн}}^{\text{ТП}} = E_{\text{полн}}^{\text{общ}} \cdot K_{\text{пробега}}, \quad (9)$$

где для каждой ТП вычисляется свой коэффициент пробега:

$$K_{\text{пробега}} = \frac{L^{\text{ТП}}}{L^{\text{общ}}}.$$

Также из показателей фидерных счётчиков подстанций нам известны значения энергии с выпрямителей ТП  $E_{\text{выпр}}^{\text{ТП}}$  и межфидерных перетоков рекуперации  $E_{\text{мф}}$ . С учётом этих значений и (9) напрямую находим значение внутрифидерных перетоков энергии рекуперации  $E_{\text{вф}}$  исследуемой и контрольной тяговых подстанций, подставляя соответствующие значения вышеприведённых показателей в формулу (8). Помесячные значения за первые пять месяцев 2022 г.  $E_{\text{мф}}$  и  $E_{\text{вф}}$  контрольной и исследуемой ТП приведены на рис. 13.

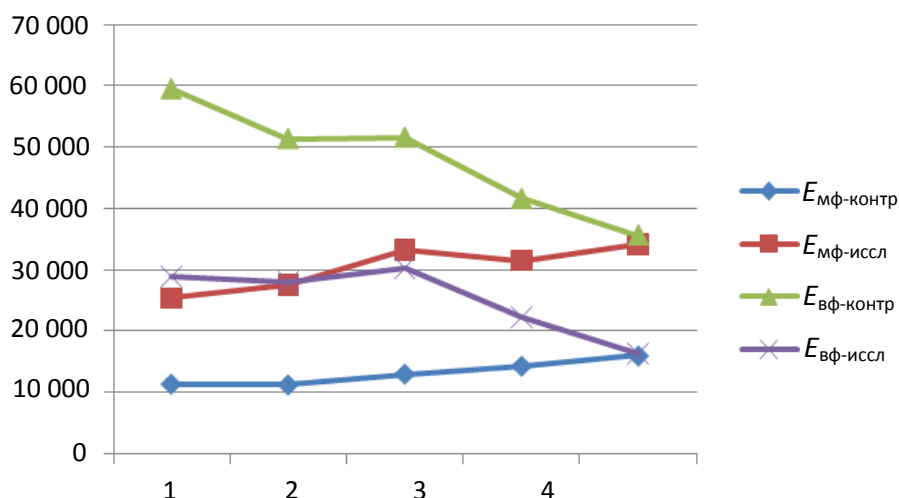


Рис. 13. Помесячные значения внутрифидерных и межфидерных перетоков полезной энергии рекуперации на исследуемой и контрольной тяговых подстанциях в 2022 г., кВтч (по оси абсцисс указаны месяцы от января 2022 г.)

На один участок питания исследуемой ТП в среднем приходится в день 99,42 рейса, а на участок контрольной ТП – 246,09 рейса или в 2,475 раза больше. Именно на эту величину на одном участке питания этой ТП выше вероятность наличия достаточной нагрузки для приёма энергии рекуперации, т.е. выше вероятность как увеличения доли полезной рекуперации в общем объёме рекуперации, так и выше вероятность внутрифидерных перетоков в общем объёме полезной рекуперации. Значение последней имеет прямую зависимость от плотности движения вагонов по участкам питания [24]. Поскольку внутрифидерные перетоки здесь более вероятны, то межфидерные перетоки становятся менее вероятными, так как в большей мере полезная энергия рекуперации потребляется на «своём» рекуперирующем фидере. Это подтверждает статистика измерения межфидерной рекуперации: на исследуемой ТП она в мае 2021 г. превышает объём таковой на фидерах контрольной ТП в 2,06 раза.

В целом, увеличение доли полезной рекуперации в общем объёме рекуперативной энергии (2) также означает, что снижается доля избыточной рекуперации, т.е. рекуперативная энергия в условиях транспортной работы на участках контрольной ТП используется более полно, чем на участках исследуемой ТП в условиях отсутствия там буферного стационарного накопителя.

Поскольку прямое инструментальное определение внутрифидерных перетоков и избыточной рекуперации возможно только с использованием бортовых счётчиков энергии с возможностью геопривязки регистрируемых данных, то в настоящее время это стало возможным при оснащении подвижного состава такими устройствами, выпуск которых в РФ сейчас налажен, например [25].

По результатам расчётов был определён эффект по переводу избыточной энергии рекуперации на фидерах исследуемой ТП на полезное использование для выполнения транспортной работы при помощи наземного накопителя энергии типа НКЭ-3Г. При практически равном пробеге ЭПС по участкам питания исследуемой подстанции в мае 2021 и 2022 гг. доля полезной рекуперации от тягового энергопотребления увеличилась с 24,1 % в 2021 г. до 31,8 % в 2022 г., когда уже работал стационарный накопитель типа НКЭ-3Г. В то же время отношение полезной рекуперации к энергозатратам на тягу на участках контрольной ТП практически не изменилось за эти два рассматриваемых месяца, так как пробег ЭПС и внешние условия практически не изменились, а нового оборудования в виде накопителя энергии на контрольной ТП не было.

Если присоединить стационарный накопитель к сборной шине тяговой подстанции, то математическая модель для расчёта эффективности устройства упрощается, поскольку при такой структуре цепи исключаются внутрифидерные перетоки части перенаправленной рекуперации, идущие на зарядку накопителя по тому фидеру, к которому он был бы подключён.

### **Заключение**

Полный объём потребляемой энергии на участках питания тяговой подстанции складывается из энергии от выпрямительного агрегата ТП и перенаправленной на полезную транспортную работу энергии рекуперации, которая, в свою очередь, поступает на полезную транспортную нагрузку (тяговую и нетяговую) как внутри фидеров с рекуперирующим вагоном, так и по межфидерным перетокам.

Объёмы межфидерных и внутрифидерных перетоков рекуперации зависят от длин изолированных участков питания тяговых подстанций, суммарного пробега и интенсивности движения ЭПС по ним, а также от погодных условий.



На участках движения разных ТП с равным пробегом вагонов, но различной интенсивностью движения (разными длинами участков питания) объёмы внутрифидерных и межфидерных перетоков различны; большая доля межфидерных перетоков полезной рекуперации имеется у ТП с меньшей интенсивностью движения и наоборот.

Установка стационарного накопителя в КС ТП, имеющей высокие значения доли межфидерной рекуперации от всей полезной рекуперации, приводит к увеличению удельных значений этих перетоков ввиду перенаправления избыточной рекуперации на выполнение полезной транспортной работы в направлении накопителя. Эта мобилизация избыточной энергии рекуперации в конечном счёте приводит к снижению на данный объём потребления сетевой энергии от тяговой подстанции. При этом соотношение межфидерных и внутрифидерных потоков рекуперации по сети этой ТП в ситуациях, когда стационарный накопитель не работал на приём и выдачу энергии (т.е. функционировал в режиме выбега) практически не изменяется.

Перенаправленная в КС энергия избыточной рекуперации, которая осуществляется при помощи стационарного накопителя, частью питает в ходе зарядки накопителя сетевую нагрузку малой мощности (эффект КБК), а другой частью заряжает накопитель. После нахождения в накопителе полученная им при зарядке энергия также выдаётся в КС для питания полезной транспортной нагрузки за вычетом потерь в накопителе.

Работа стационарного накопителя энергии маховикового типа НКЭ-3Г на участках питания исследуемой тяговой подстанции позволила на треть увеличить объём полезного использования энергии рекуперации относительно таковых значений аналогичных месяцев предыдущего года, когда накопитель ещё не работал. Таким образом, на этот объём по выпрямленной стороне было скомпенсировано потребление сетевой энергии от тяговой подстанции.

### **Библиографический список**

1. Влияние интервала движения на вероятность межпоездного обмена энергией рекуперации в метрополитене / К.И. Куликов, Е.А. Спиридонов, К.Е. Пономарев, Э.Г. Лангеман // Доклады Академии наук высш. школы Рос. Федерации. – 2017. – № 2(35). – С. 53–60. DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-53-60

2. Куликов К.И., Пономарев К.Е. Разработка программного комплекса для исследования режимов рекуперации энергии в Новосибирском метрополитене // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч. / под ред. Е.Г. Гуровой. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2016. – Ч. 5. – С. 213–214.

3. 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. 21–26. DOI: 10.15587/2312-8372.2014.33726

4. Bartłomiejczyk M., Kołacz R. The reduction of auxiliaries power demand: The challenge for electromobility in public transportation // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 252. – 119776.

5. 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 Дальневост. гос. ун-та путей сообщ., 2018. – С. 235–243.

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

7. 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.

8. Кацай А.В., Бизяев А.А., Козаревич В.А. Сравнение параметров работы маховичного накопителя в контактной сети трамвая в холодные и тёплые сезоны транспортной работы // Вестник МЭИ. – 2023. – № 2. – С. 37–44.

9. Ярославцев М.В. Влияние потребления собственных нужд на возврат энергии в тяговую сеть троллейбуса при рекуперативном торможении // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч. / под ред. Е.Г. Гуровой. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2016. – Ч. 5. – С. 255–256.

10. Лонзингер П.В. Рекуперирющие силовые преобразовательные установки, применяемые в целях электроснабжения электрифицированного транспорта // Инновационные научные исследования в со-

временном мире: сб. тр. по материалам XI Всерос. конкурса науч.-исслед. работ: в 2 ч. – Уфа: Вестник науки, 2023. – Ч. 1. – С. 105–113.

11. ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

12. Кацай А.В., Бизяев А.А., Козаревич В.А. Эффект питания полезной сетевой нагрузки избыточной энергией рекуперации в ходе зарядки стационарного накопителя // Энергетические системы. – 2022. – Т. 7, № 4. – С. 80–86.

13. Показатели работы стационарного накопителя энергии на тяговых подстанциях Московского метрополитена / Л.А. Баранов, В.А. Гречишников, А.В. Ершов, М.Д. Родионов, М.В. Шевлюгин // Электротехника. – 2014. – № 8. – С. 18–22.

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. 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.

16. Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy / A. González-Gil [et al.] // Energy Conversion and Management. – 2013. – Vol. 75. – P. 374–388.

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

18. Штанг А.А., Спиридонов Е.А., Ярославцев М.В. Применение накопителей энергии в системах электроснабжения городского электрического транспорта // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 3-4(40-41). – С. 68–70.

19. Гисметео [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gismeteo.ru/diary/4079/2021/5/> (дата обращения: 09.02.2023).

20. Гисметео [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gismeteo.ru/diary/4079/2022/5/> (дата обращения: 09.02.2023).

21. Ито Ж., Ито Т. Система тягового электроснабжения постоянного тока для участков обращения электропоездов с рекуперативным торможением // Железные дороги мира. – 1997. – № 4.

22. 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.

23. Щуров Н.И., Щеглов К.В., Штанг А.А. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – Вып. 1 (51). – С. 99–104.

24. Кучмурукова А.В. Исследование эффективности рекуперативного торможения на городском электрическом транспорте // Дни науки НГТУ-2018: материалы науч. студ. конф. (итоги науч. работы студ. за 2017–2018 гг.); Новосибирск 01 января 2017 г. – 31 декабря 2018 г. / под ред. Е.А. Хайленко. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2018. – С. 108–111.

25. Каталог электросчётчиков ООО «НПК ЛЭМЗ» [Электронный ресурс]. – URL: <http://lemznkpspb.ru/elektroschetniki/skvt-f610> (дата обращения: 09.02.2023).

## References

1. Kulikov K.I., Spiridonov E.A., Ponomarev K.E., Langeman E.G. Vliianie intervala dvizheniia na veroiatnost' mezhpoezdnogo obmena energiei rekuperatsii v metropolitene [The influence of the interval of movement on the probability of inter-train exchange of energy recovery in the subway]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii*, 2017, no. 2 (35), pp. 53-60. DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-53-60

2. Kulikov K.I., Ponomarev K.E. Razrabotka programmogo kompleksa dlia issledovaniia rezhimov rekuperatsii energii v Novosibirskom metropolitene [Development of a software package for the study of energy recovery modes in the Novosibirsk metro]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii. Sbornik nauchnykh trudov*. Ed. E.G. Гурова. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016, part 5, pp. 213-214.

3. Sablin O.I. Povyslenie 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. 21-26. DOI: 10.15587/2312-8372.2014.33726

4. Bartłomiejczyk M., Kołacz R. The reduction of auxiliaries power demand: The challenge for electromobility in public transportation. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 252, 119776.

5. Spiridonov E.A. Iaroslavtsev M.V., Khailenko E.A. Otsenka vliianiia kharakteristik trolleibusa na effektivnost' rekuperativnogo tormozheniia [Evaluation of the influence of trolleybus characteristics on the efficiency of regenerative braking]. *Elektroprivod na transporte i v promyshlennosti. Trudy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Khabarovsk, 20-21 September 2018*. Khabarovsk: Dal'nevostochnyi gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniia, 2018, pp. 235-243.

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

7. 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.

8. Katsai A.V., Biziaev A.A., Kozarevich V.A. Sravnenie parametrov raboty makhovichnogo nakopitel'ia v kontaktnoi seti tramvaia v kholodnye i tepleye sezony transportnoi raboty [Comparison of the parameters of the fly-wheel drive operation in the tram contact network during cold and warm seasons of transport work]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2023, no. 2, pp. 37-44.

9. Iaroslavtsev M.V. Vliianie potrebleniia sobstvennykh nuzhd na vozvrat energii v tiagovuiu set' trolleibusa pri rekuperativnom tormozhenii [The influence of self-consumption on the return of energy to the traction network of a trolleybus during regenerative braking]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii. Sbornik nauchnykh trudov*. Ed. E.G. Gurova. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016, part 5, pp. 255-256.

10. Lonzing P.V. Rekuperiruiushchie silovye preobrazovatel'nye ustanovki, primeniaemye v tseliakh elektroobzabzheniia elektrifitsirovannogo transporta [Recuperating power converter units used for power supply of electrified transport]. *Innovatsionnye nauchnye issledovaniia v sovremennom*

*mire. Sbornik trudov po materialam XI Vserossiiskogo konkursa nauchno-issledovatel'skikh rabot. Ufa: Vestnik nauki, 2023, part 1, pp. 105-113.*

11. GOST 6962-75. Transport elektrifitsirovannyi s pitaniem ot kontaknoi seti. Riad napriazhenii [Electrified transport powered by a contact network. A range of voltages]. Dostup iz spravocno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

12. Katsai A.V., Biziaev A.A., Kozarevich V.A. Effekt pitaniia poleznoi setevoi nagruzki izbytochnoi energiei rekuperatsii v khode zariadki statsionarnogo nakopitel'ia [The effect of powering the network payload with excess energy recovery during charging of a stationary storage device]. *Energeticheskie sistemy*, 2022, vol. 7, no. 4, pp. 80-86.

13. Baranov L.A., Grechishnikov V.A., Ershov A.V., Rodionov M.D., Shevliugin M.V. Pokazateli raboty statsionarnogo nakopitel'ia energii na tiagovykh podstantsiiakh Moskovskogo metropolitena [Performance indicators of stationary energy storage at traction substations of the Moscow metro]. *Elektrotekhnika*, 2014, no. 8, pp. 18-22.

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. Sulim A.A. Raschet elektroenergii rekuperatsii elektrifitsirovannogo gorodskogo transporta pri ustanovke nakopitel'ia 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.

16. González-Gil A. et al. Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 75, pp. 374-388.

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

18. Shtang A.A., Spiridonov E.A., Iaroslavtsev M.V. Primenenie nakopitelei energii v sistemakh elektrosnabzheniia gorodskogo elektricheskogo transporta [Application of energy storage devices in power supply systems of urban electric transport]. *Transport Rossiiskoi Federatsii*, 2012, no. 3-4(40-41), pp. 68-70.

19. Gismeteo [Gismeteo], available at: <https://www.gismeteo.ru/diary/4079/2021/5/> (accessed 09 February 2023).

20. Gismeteo [Gismeteo], available at: <https://www.gismeteo.ru/diary/4079/2022/5/> (accessed 09 February 2023).

21. Ito Zh., Ito T. Sistema tiagovogo elektrosnabzheniia postoiannogo toka dlia uchastkov obrashcheniia elektropoezdov s rekuperativnym tormozheniem [DC traction power supply system for electric train circulation sites with regenerative braking]. *Zheleznye dorogi mira*, 1997, no. 4.

22. 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 St. Petersburg]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia*, 2017, iss. 1, pp. 63-72.

23. 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 Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, iss. 1 (51), pp. 99-104.

24. Kuchmurukova A.V. Issledovanie effektivnosti rekuperativnogo tormozheniia na gorodskom elektricheskom transporte [Investigation of the effectiveness of regenerative braking on urban electric transport]. *Dni nauki NGTU-2018. Materialy nauchnoi studencheskoi konferentsii (itogi nauchnoi raboty studentov za 2017-2018)*, Novosibirsk 01 January 2017 - 31 December 2018. Ed. E.A. Khailenko. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2018, pp. 108-111.

25. Katalog elektroschetchikov ООО “NPK LEMZ” [Catalog of electric meters of LLC "NPK LEMZ"], available at: <http://lemznpkspb.ru/elektroschetchiki/skvt-f610> (accessed 09 February 2023).

### 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](mailto:proton764@mail.ru)).

**Шевлюгин Максим Валерьевич** (Москва, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ) (127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, e-mail: [mx\\_sh@mail.ru](mailto:mx_sh@mail.ru)).

### **About the authors**

**Alexander V. Katsay** (Moscow, Russian Federation) – Candidate of Philosophical Sciences, General Director of Kinemak LLC (11520113, Moscow, 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 (МИИТ) (127994, GSP-4, Moscow, Obraztsova str., 9, p. 9, e-mail: mx\_sh@mail.ru ).

Поступила: 10.02.2023. Одобрена: 18.03.2023. Принята к публикации: 01.04.2023.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

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

**Вклад авторов.** Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Кацай, А.В. Структура потоков энергии рекуперации в контактной сети тяговой подстанции с наземным накопителем / А.В. Кацай, М.В. Шевлюгин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 45. – С. 48–79. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.1.03

Please cite this article in English as:

Katsay A.V., Shevlyugin M.V. Structure of energy recovery flows in the contact network of a traction substation with a wayside storage. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2023, no. 45, pp. 48-79. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.1.03