

УДК 620.97:621.331:629.433:629.085

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-2-37-44

Сравнение параметров работы маховичного накопителя энергии в контактной сети трамвая в холодные и тёплые сезоны транспортной работы

А.В. Кацай, А.А. Бизяев, В.А. Козаревич

Отражены результаты статистических и натурных исследований зависимости режимов потребления энергии на тяговую и нетяговую нагрузку в контактной сети (КС) наземного городского электротранспорта в тёплый и холодный сезоны и вызванных ими изменений режимов работы стационарного буферного накопителя энергии НКЭ-3ГТ. Показано, что уменьшение, главным образом, в тёплый период нетяговой нагрузки приводит к перераспределению объёмов избыточной и полезной энергии рекуперативного торможения электроподвижного состава в сторону первой и, тем самым, к увеличению перетоков избыточной энергии рекуперации через буферный накопитель.

Ключевые слова: тяговая и нетяговая нагрузки, рекуперативное торможение, избыточная рекуперация, накопитель энергии НКЭ-3ГТ, температурная зависимость энергопотребления, контактная сеть, городской электротранспорт.

Для цитирования: Кацай А.В., Бизяев А.А., Козаревич В.А. Сравнение параметров работы маховичного накопителя энергии в контактной сети трамвая в холодные и тёплые сезоны транспортной работы // Вестник МЭИ. 2023. № 2. С. 37—44. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-2-37-44.

Comparison of the Flywheel Energy Storage Performance in the Tram Overhead Contact System in the Cold and Warm Transport Operation Seasons

A.V. Katsai, A.A. Bizyaev, V.A. Kozarevich

The article discusses the results of statistical and field studies of the energy consumption modes by the traction and non-traction loads in the overhead contact system (OCS) of the on-ground urban electric transport vehicles in the warm and hot seasons and the associated changes in the operation modes of an NKE-3GT stationary buffer energy storage. It is shown that the reduction of non-traction load, which takes place mainly in the warm season, entails a redistribution in the amounts of surplus and useful energy of electric rolling stock regenerative braking toward surplus energy and, hence, a growth in the surplus regeneration energy flows through the buffer energy storage.

Key words: traction and non-traction loads, regenerative braking, surplus energy recovery, NKE-3GT energy storage, energy consumption temperature dependence, overhead contact system, urban electric transport.

For citation: Katsai A.V., Bizyaev A.A., Kozarevich V.A. Comparison of the Flywheel Energy Storage Performance in the Tram Overhead Contact System in the Cold and Warm Transport Operation Seasons. Bulletin of MPEI. 2023;2:37—44. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-2-37-44.

Введение

Развитие систем тягового энергоснабжения электроподвижного состава городского электротранспорта (ГЭТ), в частности, широкое внедрение транзисторно-инверторных систем управления тягой (ТрСУ) взамен реостатно-контакторных систем управления (РКСУ), привело к появлению реальной возможности повторного использования энергии рекуперативного торможения электроподвижного состава (ЭПС) путём выдачи её в контактную сеть (КС) для использования синхронно подключённой к сети нагрузкой (тяговой и нетяговой). Однако, таким образом, не вся энергия рекуперативного торможения, вырабатываемая тяговыми электродвигателями, идет на повторную полезную работу. При отсутствии синхронно подключённой к КС нагрузки энергия рекуперации направляется на

тормозные резисторы рекуперирующего вагона для недопущения перенапряжения в сети. Сигналом для сброса избыточной энергии рекуперации служит повышение напряжения на выходе тягового инвертора в ходе рекуперативного торможения до уровня порога срабатывания замещающего реостатного торможения на подвижном составе (отсечки тормозного прерывателя тягового инвертора). Как правило, производители оборудования устанавливают этот показатель на уровне ~720 В. В исследуемой системе инверторы имели именно такое значение порога срабатывания.

С целью обеспечения более полного использования рекуперативной энергии на полезную работу разрабатываются буферные накопители энергии, которые могли бы запасать и временно хранить избыточную энергию рекуперативного торможения ЭПС и выдавать

её в КС при появлении в ней потребляющего оборудования [1 — 3].

Возвращаться в вид электрической энергии может только энергия, потребляемая на осуществление тяги вагонов, поскольку тяговые двигатели являются обратимыми устройствами и могут как превращать электрическую энергию в механическую, так и наоборот — превращать механическую энергию линейного движения вагона в электрическую, а тяговые частотные преобразователи способны приводить эту рекуперированную в электричество энергию к требуемым контактной сетью параметрам.

Уже давно отмечено, что удельное энергопотребление на тягу меняется в различные сезоны года. Один из важнейших параметров, влияющих на это, — температура окружающей среды, вызывающая или обуславливающая изменение удельных потерь на сопротивление движению вагона. Также она приводит к необходимости подключения к сети или отключения нетяговой нагрузки (отопления, вентиляции, освещения и др.). Поскольку нетяговая нагрузка в КС потребляет энергию существенно дольше и равномернее, чем тяговая, то ее наличие или отсутствие ведет к тому, что изменяются соотношения внутри рекуперированной энергии между её полезной и избыточной долями. Поскольку избыточная энергия рекуперации, в основном, и определяет экономический эффект от работы буферных накопителей энергии, то изменение её удельных значений на 1 км транспортной работы вызывает изменения в эффективности накопителей. Задача исследования заключается в установлении характера зависимости показателей работы буферного накопителя в различные сезоны года с использованием методов натурального эксперимента и статистического анализа показателей транспортной работы предприятий ГЭТ.

В период проведения исследований объёмы энергопотребления на выполнение транспортной работы вагонов типа Stadler B85600M фиксировали фидерными счётчиками постоянного тока и входным трёхфазным счётчиком тяговой подстанции, а также бортовыми датчиками тока вагонов, установленными на входе тяговых инверторов. Объём нетягового энергопотребления определяли как разницу между суммой значений прямых токов всех фидерных счётчиков ТП и суммой показателей тягового потребления вагонов на участках этой подстанции. Для упрощения расчётов все транспортные потери энергии в контактной сети отнесены к категории нетягового энергопотребления.

Буферный накопитель энергии НКЭ-3ГТ

Для применения в качестве буферного накопителя энергии избыточной рекуперации в контактных сетях городского электротранспорта был разработан маховичный агрегат НКЭ-3ГТ (рис. 1) [4, 5]. Параметры накопителя: принимаемая мощность — до 180 кВт, выдаваемая мощность — до 110 кВт, энергоёмкость



Рис. 1. Накопитель энергии НКЭ-3ГТ контейнерного исполнения

в одиночном полном цикле — до 2 кВт·ч, рабочий диапазон напряжения питания устройства от КС постоянного тока — 400...800 В. Система управления работой агрегата — автоматическая по параметрам подключаемой сети. Входной счётчик постоянного тока типа СКВТ-Ф610 фиксирует входную и выходную энергии.

В 2020 — 2022 гг. проведены длительные испытания буферного накопителя энергии НКЭ-3ГТ в контактной сети трамвайных систем Коломны и других городов России. Нарботка агрегата составила около 6 тысяч часов функционирования за 12 месяцев суммарной непрерывной работы. Накопитель эксплуатировали в холодные и тёплые сезоны, характеризующиеся соответствующим изменением тяговой и нетяговой нагрузок в контактной сети, которые вызывали у него изменения режимов функционирования и объёмов выработки. Работа накопительного аппарата позволила выявить статистические зависимости объёмов полезной и избыточной рекупераций, образующихся как следствие тягового энергопотребления в ходе рекуперативного торможения электроподвижного состава.

Накопительный агрегат НКЭ-3Г (рис. 2) подключали параллельно к контактной сети трамвайного движения на участках питания тяговых подстанций (ТП).

Накопитель автоматически включался ежедневно утром после начала движения вагонов по маршруту, а отключался в период завершения их движения. Продолжительность работы агрегата составила 16...17 часов в сутки.

Алгоритм управления агрегатом следующий. При появлении в контактной сети избыточной энергии рекуперативного торможения вагонов, которая при отсутствии буферного накопителя рассеивалась на тормозных резисторах, повышался уровень напряжения,



Рис. 2. Накопитель энергии НКЭ-3Г в контейнере подключен к КС вблизи ТП и линии движения трамваев. Коломна, 2020 г.

превышающий среднее значение напряжения, формируемого тяговой подстанцией в режиме холостого хода в точке присоединения накопителя. Устройство управления агрегата переводило в этот момент накопитель в режим запасания энергии. По завершении торможения вагона процесс выработки энергии рекуперации прекращался, сетевое напряжение опускалось до среднего значения для данной точки сети, и накопитель переходил в режим хранения энергии (выбега) в виде механической энергии вращения ротора. При появлении в сети нагрузки уровень напряжения в ней падал ниже среднего значения и накопитель, фиксируя это, выдавал запасённую ранее энергию в контактную сеть, замещая тем самым питание нагрузки от тяговой подстанции. При отсутствии в сети потребляющей нагрузки и избыточной рекуперации накопитель пребывал в режиме выбега, не выдавая и не принимая энергию. Верхняя и нижняя уставки накопителя на приём и выдачу энергии формировались следующим образом. За период времени 120 с высчитывали среднее значение напряжения в КС. К этому значению для верхней уставки прибавляли размер верхней дельты напряжения в 20 В, для нижней уставки от этого значения вычитали размер нижней дельты напряжения в 10 В. Значения дельт подбирали в ходе наладки агрегата. Диапазон напряжения сети между значениями верхней и нижней уставок определял зону режима холостого хода (выбега) накопителя.

Сезонные зависимости объёмов избыточной рекуперации в контактной сети

Наибольший объём избыточной рекуперации наблюдается в сетях, на участках которых ходит подвижной состав, каждая единица которого оснащена тяговыми инверторными преобразователями. Выяснилась следующая закономерность: если весь подвижной состав транспортного предприятия имеет тяговые инверторные преобразователи, то наибольший объём избыточной рекуперации имеется на участках тех подстанций, объём сетевого потребления энергии которых максимален за одинаковый период времени (месяц, год).

Сезонные изменения потребления тяговых подстанций сильно варьируются по году, снижаясь в тёплые периоды и увеличиваясь в холодное время года. Эти изменения обусловлены как уменьшением удельного на 1 км энергопотребления вагонами на тяговые нужды, так и снижением нетяговой нагрузки, основные потребители из которой — отопительные системы вагонов, освещение салона и наружное, подогрев стрелочных механизмов и др.

В период проведения испытаний накопителя энергии наступившие положительные температуры окружающей среды привели к значительному снижению нетягового потребления энергии подвижным составом и стационарной инфраструктурой в сравнении с холодным периодом года. Доля тягового энергопотребления в общем энергопотреблении задействованной в исследованиях тяговой подстанции в апреле, в сравнении с февралём, выросла, а доля нетягового потребления — снизилась. При этом уменьшился абсолютный объём энергопотребления в КС как на тягу, так и на нетяговые нужды, но — неравномерно.

В холодные месяцы удельные объёмы на 1 км пробега полезной энергии рекуперации вагонов, направляемой в контактную сеть на подключённую к ней нагрузку, имеют максимальные по году значения. Этот факт объясняется тем, что мощность и продолжительность наличия в КС нетяговой нагрузки максимальны и обеспечивают приём значительной части от всей энергии рекуперативного торможения. При снижении уровня мощности и продолжительности нетяговой нагрузки, главным образом систем отопления салонов, абсолютные и удельные показатели полезной рекуперации снижаются (рис. 3). По месяцам доля полезной рекуперации от потребления энергии на тягу варьируется от 21% — в тёплый сезон до 34% — в холодный.

Непосредственный источник электрической энергии рекуперации — механическая энергия движения вагона, которая, в свою очередь, образуется от потребления электроэнергии из контактной сети его системой тяги. Полезная рекуперация определяется наличием достаточной нагрузки в КС во время рекуперативного торможения вагона, сопоставимой по мощности с мощностью генерирующих тяговых электродвигателей рекуперативно тормозящего вагона. Межпоездной обмен рекуперацией, в основном, происходит на тяговую нагрузку или на тягу и нетяговые нужды одновременно. Однако в периоды максимального потребления энергии на нетяговую нагрузку, когда ее мощность сопоставима с мощностью рекуперации тормозящего вагона, межпоездной обмен энергией рекуперации может идти и только на такую нетяговую нагрузку, т. е. в холодный период года, когда работает система отопления. Когда в отсутствии тягового потребления в КС нетяговая нагрузка недостаточна (гораздо меньше по мощности, чем мощность рекуперации), энергия рекуперации направляется на тормозные резисторы, т. е. превращается в избыточную энергию рекуперации.

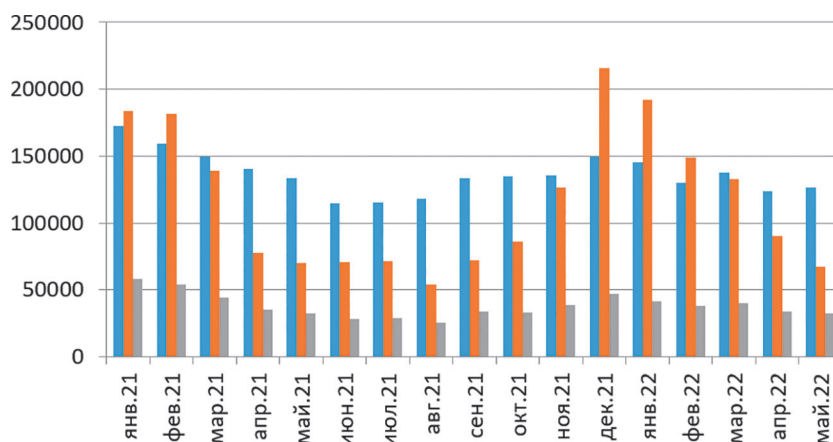


Рис. 3. Изменение объёмов тягового (■), нетягового (■) энергопотребления и полезной рекуперации (■) на участках исследуемой ТП

Перераспределение в разные сезоны долей тяговой и нетяговой нагрузок в КС вызывает изменение объёмов полезной и избыточной рекуперации вагонов. Так, в феврале 2022 г. удельный объём полезной рекуперации на 1 км движения вагона составил 0,956, в апреле — 0,808, а в мае — 0,755 кВт·ч/км. Снижение удельного показателя полезного отпуска рекуперированной энергии в КС в тёплый сезон связано со снижением нетягового потребления энергии подвижным составом и стационарными потребителями. Так, в феврале на нетяговые нужды удельный расход электроэнергии в расчёте на 1 км пробега составил 2,798 кВт·ч/км, а в апреле — 1,411 кВт·ч на 1 км или почти вдвое меньше. Поскольку снижается мощность нетяговой нагрузки (реже включаются отопители салонов, дольше длится световой день и т. д.), то в сети падает вероятность совпадения периодов рекуперативного торможения и наличия нагрузки, достаточной для потребления энергии рекуперации. Зависимость удельной тяговой нагрузки от климатических условий выражена существенно слабее, чем таковая нетяговой нагрузки.

Коэффициент корреляции помесечных значений потребления энергии на тягу E_t со среднемесячным значением температуры за 17-месячный период наблюдений составил $-0,821$ (табл. 1). За этот же период коэффициент корреляции помесечных значений потребления энергии на нетяговые нужды $E_{нт}$ со среднемесячным значением температуры показал $-0,887$. Большое отрицательное значение коэффициента кор-

Таблица 1

Коэффициенты корреляции объёмов энергии со среднемесячной температурой воздуха за 17 месяцев наблюдений

Энергия	Корреляция
E_t с температурой	$-0,821$
$E_{нт}$ с температурой	$-0,887$
$E_{рек.п}$ с температурой	$-0,868$

реляции нетяговой нагрузки с наружной температурой свидетельствует о практически однозначной обратной зависимости. Физический смысл отрицательного значения коэффициента данной корреляции заключается в том, что чем ниже температура воздуха, тем больше идет энергии на соответствующие нужды.

Снижение нетягового энергопотребления в сети при сохранении объёмов пробега вагонов вызывает перераспределение потоков энергии рекуперации: снижается значение полезной рекуперации $E_{рек.п}$, а высвободившийся её объём направляется на тормозные резисторы вагонов, т. е. увеличивает долю избыточной энергии рекуперации. Например (см. рис. 3), на участках одной ТП пробег в январе 2021 г. составил 45491 км, а в мае того же года — 45287 км, т. е. практически был одинаков (упал менее чем на 0,5%). При этом объём полезной рекуперации на участках этой ТП в январе составил 58397, а в мае — 32263 кВт·ч, уменьшился на 45% (почти вдвое). Снижение нетягового энергопотребления за этот период составило 62%.

Другим подтверждением устойчивой зависимости от температуры направления энергии рекуперации на полезную работу в КС или на тормозные резисторы служит показатель приёма избыточной рекуперации буферным накопителем энергии НКЭ-3Г, установленным на участке питания КС одной из тяговых подстанций. Объём избыточной рекуперации, принятой в накопитель энергии, составил 3154 кВт·ч в феврале и 6030 кВт·ч — в апреле, т. е. при росте дневной температуры на $8...10^\circ\text{C}$ с переходом через уровень 0°C объём доступной для накопителя избыточной рекуперации вагонов на участках ТП увеличился практически вдвое. Таким образом, оба способа фиксации зависимости объёмов избыточной рекуперации от внешних условий (расчётный и практический) показывают, что при повышении температуры объём полезной рекуперации единицы ЭПС ГЭТ снижается, а увеличивается объём избыточной рекуперации. Показатели работы трамвайной системы в феврале и апреле 2022 г. приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели работы трамвайной системы

Показатели	Февраль 2022 г.	Апрель 2022 г.
Дни	28	30
Среднемесячная температура, °С	-4,5	+5,4
Общее потребление ТП, кВт·ч	981668	781249
Потребление на тягу, кВт·ч	475642	465214
Пробег вагонов, км	145734	156089
Удельное потребление, кВт·ч/км	6,062	4,391
Удельная тяга, кВт·ч/км	3,264	2,980
Удельная полезная рекуперация, кВт·ч/км	0,956	0,808

Из показателей, представленных в двух последних строках табл. 2, следует, что доля полезной рекуперации от потреблённой на тягу энергии в феврале составила 29,29%, а в апреле она снизилась до 27,11%. В мае это соотношение было равно 25,6%. За период работы накопителя энергии на участках питания одной тяговой подстанции коэффициент корреляции между объёмами принятой им избыточной энергии рекуперации тормозящих вагонов и наружной температуры показал +0,787, что означает прямую сильную зависимость этих показателей.

Эффективность работы буферного накопителя в разные сезоны

Объёмы приёма накопителем избыточной энергии рекуперации напрямую зависят от наличия этой энергии в КС тяговой подстанции [6 — 9]. Рассмотрим изменение объёмов избыточной рекуперации в сети одной тяговой подстанции в холодный (февраль) и тёплый (апрель) месяцы, при этом ежедневный пробег вагонов по участкам такой тяговой подстанции менялся незначительно зимой и весной (расписание движения — неизменно).

Для анализа зависимостей электрических процессов в накопителе и контактной сети проводили изме-

рения тока накопителя и напряжения в КС в точке присоединения его на одном из участков питания тяговой подстанции. Следует отметить, что приём накопителем избыточной энергии рекуперации вагонов происходил как от тех единиц ЭПС, которые движутся на этом же изолированном участке КС (внутрифидерные перетоки рекуперации), к которому первый присоединён, так и от тех, которые двигались по другим изолированным участкам данной ТП, связанным через сборную шину подстанции (межфидерные перетоки). Напомним, что наличие межфидерных перетоков энергии рекуперации фиксировалось в качестве обратных токов двуправленными счётчиками энергии, установленными на каждом фидере ТП.

Среднемесячная температура в феврале 2022 г. (рис. 4) составила -4,5 °С, в апреле — +5,4 °С. Измерения проводили 23 февраля 2022 г. с 22:06 до 23:06 ч при температуре от -2 (днём) до -4 (ночью) °С и 22 апреля 2022 г. с 13:06 до 13:40 ч при температуре +8 °С. Разница температур в указанные дни измерений — 10°. Повышение наружной температуры снизило интенсивность работы основного элемента нетяговой нагрузки — отопителей салонов трамваев.

Сравнение продолжительности работы накопительного агрегата в разных режимах (выдача и прием

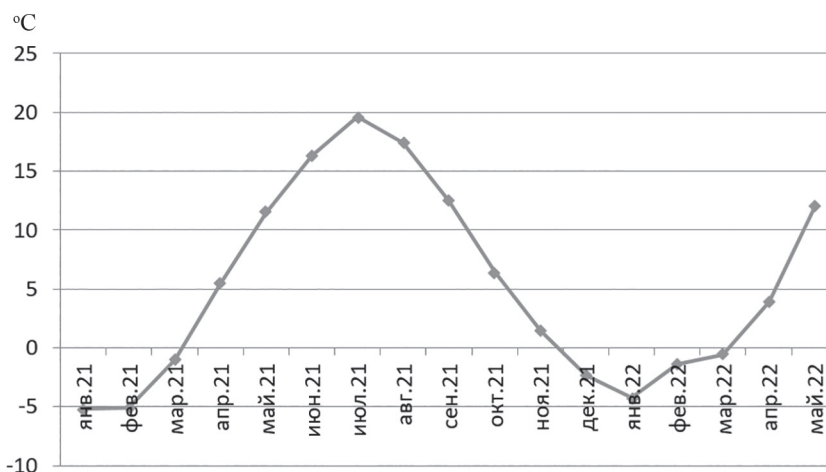


Рис. 4. Среднемесячная наружная температура за период описываемых исследований. Источник: www.weatherarchive.ru

энергии, выбег) продемонстрировало, что со снижением нетяговой нагрузки в сети продолжительность приёма энергии за средний час работы выросла в апреле (в сравнении с февралём) в 1,39 раза, длительность выдачи запасённой энергии в КС на потребителя незначительно снизилась, а продолжительность нейтрального режима (выбег) упала почти на четверть (табл. 3).

Рост, хоть и незначительный, продолжительности активной работы буферного накопительного агрегата (приём и выдача энергии) указывает на то, что в контактной сети снизилась вероятность синхронности периодов рекуперативного торможения вагонов и наличия достаточной нетяговой нагрузки вагонов и стационарной инфраструктуры, т. е. накопителю с потерением приходится работать суммарно по суткам дольше на приём энергии, чем в холодный период.

Увеличение наружной температуры с февраля по апрель и, обусловленное этим изменение электрической ситуации в контактной сети (снижение нетяговой нагрузки, уменьшение максимальных токов в КС, падение объёмов полезной рекуперации), поменяло структуру нагрузочных характеристик накопителя. При этом состав ЭПС и график движения трамваев по маршрутам за этот период не менялся.

Так, дневная продолжительность режима выдачи энергии в КС на потребляющую нагрузку у накопителя $T_{\text{выд}}$ снизилась всего на 2%. Однако количество событий выдачи энергии из накопителя в КС на нагрузку $N_{\text{выд}}$ выросло в 1,89 раза при снижении почти вдвое средней продолжительности таких событий $T_{\text{ср.выд}}$ и увеличении выдаваемых накопителем в сеть токов $I_{\text{ср.выд}}$ более чем вдвое. Последний факт может означать лишь следующее: в тёплый период накопитель энергии в значительной мере выдавал запасённую избыточную энергию рекуперации на появляющуюся тяговую нагрузку, которая как раз характеризуется существенно большей мощностью, чем нетяговая весенняя нагрузка, и малой длительностью периода тяги. В силу этого у накопителя токи выдачи резко выросли.

За период наблюдения суммарная продолжительность запасания накопителем избыточной энергии рекуперации $T_{\text{зап}}$ трамваев увеличилась на 36%. Этот факт подтверждает снижение мощности и продолжительности полезной нагрузки в КС, вызванное, главным образом, снижением нетягового энергопотребления.

Количество событий наличия избыточной рекуперации в КС $N_{\text{зап}}$ увеличилось всего на 6%, однако на

Таблица 3

Доли продолжительности режимов накопительного агрегата за типовой час работы

Режимы работы	Февраль 2022 г.	Апрель 2022 г.
Приём энергии	0,18	0,25
Выдача	0,59	0,58
Выбег	0,23	0,18
Всего	1,00	1,00

28% выросла средняя продолжительность этих событий $T_{\text{ср.зап}}$ и в 1,73 раза — величина токов зарядки накопителя $I_{\text{ср.зап}}$ (табл. 4).

Таким образом, в тёплый период времени в контактной сети ГЭТ резко снижается нетяговая нагрузка, а также уменьшается тяговое энергопотребление на выполнение одной и той же транспортной работы единицей электроподвижного состава. Эти изменения приводят к перераспределению долей энергии рекуперации при торможении вагона между выдаваемой в КС полезной энергией и сбрасываемой на тормозные резисторы избыточной энергией рекуперации в пользу последней. Поскольку накопитель энергии принимает только избыточную энергию рекуперации вагонов, то в тёплый период времени происходит рост объёмов принимаемой накопителем энергии и, соответственно, выдаваемой им после хранения энергии обратно в КС на питание тяговой и нетяговой нагрузок. Это увеличение выработки накопителя в тёплое время может вырастать в 2...3 раза и более в сравнении с объёмами выработки в холодный период года (рис. 5).

Приведённая зависимость показывает, что экономический эффект от применения буферного накопителя энергии в КС данной подстанции с наличием в ней рекуперативного торможения вагонов напрямую зависит от соотношения тяговой и нетяговой нагрузок потребляющего оборудования вагонов и стационарной инфраструктуры контактной сети.

Выводы

Установлено обратное влияние изменения температуры окружающей среды на объёмы и удельные значения потребления энергии на тяговые и нетяговые нужды систем ГЭТ.

Таблица 4

Параметры работы накопителя энергии НКЭ-3Г в КС трамвая

Период	$T_{\text{выд}}$ в день, ч	$T_{\text{зап}}$ в день, ч	$N_{\text{выд}}$ в день	$N_{\text{зап}}$ в день	$T_{\text{ср.выд}}$, с	$T_{\text{ср.зап}}$, с	$I_{\text{ср.выд}}$, А	$I_{\text{ср.зап}}$, А
Февраль 2022 г.	10,00	3,12	4533	3487	7,94	3,22	-11,68	33,67
Апрель 2022 г.	9,780	4,24	8577	3706	4,10	4,12	-24,17	58,10
Изменение февраль/апрель	0,980	1,36	1,89	1,06	0,52	1,28	2,070	1,730

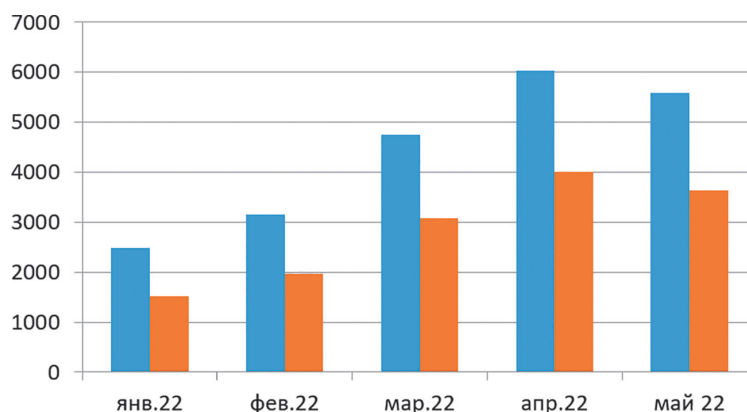


Рис. 5. Динамика объёмов приёма (■) и выдачи (■) избыточной энергии рекуперации накопителем энергии НКЭ-3Г по месяцам

Выявлена обратная зависимость между изменением потребления энергии на нетяговые нужды и объёмом избыточной энергии рекуперации в КС ГЭТ: повышение первого ведёт к снижению второго, и наоборот.

Сезонные изменения объёмов избыточной энергии рекуперации вагонов определяют изменения объёмов приёма и выдачи ее и рекуперации ЭПС стационарным буферным накопителем энергии в КС.

В холодные сезоны интенсивность и продолжительность работы стационарного буферного на-

копителя энергии в КС ГЭТ существенно ниже, чем в тёплые.

Технические характеристики разработанных стационарных буферных маховичных накопителей энергии типа НКЭ-3Г соответствуют резко переменным режимам электрических процессов в КС, что позволяет использовать их для повышения эффективности систем энергоснабжения транспортной работы наземного электрифицированного транспорта.

Литература

- Идиятуллин Р.Г., Бакиров А.Р., Баженов Н.Г. Исследование законов распределения удельного расхода электроэнергии на тягу трамваев // Проблемы энергетики. 2005. № 7—8. С. 33—38.
- Идиятуллин Р.Г., Бакиров А.Р., Гусманов Р.М., Лунгин И.А. Энергосбережение в городском электрическом транспорте // Научно-технический калейдоскоп. 2001. № 4. С. 44—51.
- Шевлюгин М.В. Ресурс- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: автореф. дисс. ... доктора техн. наук. М.: Изд-во Московского гос. ун-та путей сообщения, 2009.
- Джента Д. Накопление кинетической энергии. М.: Мир, 1988.
- Гулия Н.В. Накопители энергии. М.: Наука, 1980.
- Павелчик М. Повышение эффективности электрической тяги при помощи накопителей энергии: автореферат дисс. ... доктора техн. наук. М.: Изд-во Московского гос. ун-та путей сообщения, 2000.
- Тарута П.В. Повышение эффективности использования энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения постоянного тока: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Омск: Изд-во Омского гос. ун-та путей сообщения, 2004.
- Черемисин В.Т., Незевак В. Л., Вильгельм А.С., Квашук В.А. Влияние рекуперативного торможения на

References

- Idiyatullin R.G., Bakirov A.R., Bazhenov N.G. Issledovanie Zakonov Raspredeleniya Udel'nogo Ras-khoda Elektroenergii na Tyagu Tramvaev. Problemy Ener-getiki. 2005;7—8:33—38. (in Russian).
- Idiyatullin R.G., Bakirov A.R., Gusmanov R.M., Lungin I.A. Energoberezhenie v Gorodskom Elektri-cheskom Transporte. Nauchno-tekhnicheskii Kaleydoskop. 2001;4:44—51. (in Russian).
- Shevlyugin M.V. Resurso- i Energoberegayushchie Tekhnologii na Zheleznodorozhnom Transporte i Metropolitenakh, Realizuemye s Ispol'zovaniem Nakopiteley Energii: Avtoref. Diss. ... Doktora Tekhn. Nauk. M.: Izd-vo Moskovskogo Gos. Un-ta Putey Soobshcheniya, 2009. (in Russian).
- Dzhenta D. Nakoplenie Kineticheskoy Energii. M.: Mir, 1988. (in Russian).
- Gulia N.V. Nakopiteli Energii. M.: Nauka, 1980. (in Russian).
- Pavelchik M. Povyshenie Effektivnosti Elektricheskoy Tyagi pri Pomoshchi Nakopiteley Energii: Avtoreferat Diss. ... Doktora Tekhn. Nauk. M.: Izd-vo Moskovskogo Gos. Un-ta Putey Soobshcheniya, 2000. (in Russian).
- Taruta P.V. Povyshenie Effektivnosti Ispol'zovaniya Energii Rekuperatsii v Sisteme Tyagovogo Elektro-snabzheniya Postoyannogo Toka: Avtoref. Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. Omsk: Izd-vo Omskogo Gos. Un-ta Putey Soobshcheniya, 2004. (in Russian).
- Cheremisin V.T., Nezevak V. L., Vil'gel'm A.S., Kvashchuk V.A. Vliyanie rekuperativnogo Tormozheniya

систему тягового электроснабжения // Локомотив. 2013. № 8. С. 7—10.

9. Никифоров М.М., Вильгельм А.С., Гутников В.И. Влияние параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на эффективность использования энергии рекуперации // Известия Транссиба. 2017. № 1(29). С. 74—83.

na Sistemu Tyagovogo Elektrosnabzheniya. Lokomotiv. 2013;8:7—10. (in Russian).

9. Nikiforov M.M., Vil'gel'm A.S., Gutnikov V.I. Vliyanie Parametrov i Rezhimov Raboty Sistemy Tyagovogo Elektrosnabzheniya na Effektivnost' Ispol'zovaniya Energii Rekuperatsii. Izvestiya Transsiba. 2017;1(29): 74—83. (in Russian).

Сведения об авторах:

Кацай Александр Владимирович — кандидат философских наук, генеральный директор ООО «Кинемак», г. Москва, e-mail: proton@kinemak.ru

Бизяев Александр Алексеевич — главный конструктор ООО «Кинемак», г. Москва, e-mail: proton@kinemak.ru

Козаревич Владимир Анатольевич — главный энергетик ООО «Кинемак», г. Москва, e-mail: proton@kinemak.ru

Information about authors:

Katsai Aleksandr V. — Ph.D. (Philosophy), General Director of LLC «Kinemak», Moscow, e-mail: proton@kinemak.ru

Bizyaev Aleksandr A. — Chief Designer of LLC «Kinemak», Moscow, e-mail: proton@kinemak.ru

Kozarevich Vladimir A. — Chief Power Engineer of LLC «Kinemak», Moscow, e-mail: proton@kinemak.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 19.07.2022

The article received to the editor: 19.07.2022

Статья принята к публикации: 16.12.2022

The article has been accepted for publication: 16.12.2022