

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 620.97:621.331:629.433:629.085

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-6-42-54

## ОБЪЕМЫ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ЭНЕРГИИ ТРАМВАЕВ И ТРОЛЛЕЙБУСОВ

Кацай А.В.<sup>1</sup>, Шаряков В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Кинемак-Энерго», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО «НПП «ЭПРО», г. Санкт-Петербург, Россия

proton764@mail.ru, v\_a\_shar@mail.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. Существенный потенциал увеличения энергоэффективности городского электрифицированного транспорта содержится в возможности повторного полезного применения на выполнение транспортной работы части энергии, затрачиваемой на тягу подвижного состава, рекуперированной при торможении. Экономическое обоснование имеющихся способов утилизации рекуперированной электроэнергии зависит от её объёмов в целом и имеющейся при стандартных технических параметрах и условиях движения подвижного состава избыточной её составляющей, рассеиваемой на тормозных резисторах в виде тепла в атмосферу. Теоретические симуляционные компьютерно-математические модели расчёта рекуперированной энергии пока ещё не принимают во внимание все ключевые параметры реальных процессов в электрической подсистеме горэлектротранспорта. ЦЕЛЬЮ исследования было проведение инструментального измерения потоков энергии для различных групп электропотребляющего оборудования подвижного состава ГЭТ, а также рекуперативной энергии – полезной и избыточной. МЕТОДЫ. Натурные эксперименты, электротехнические расчёты, сравнительный анализ. РЕЗУЛЬТАТЫ. В ходе исследования были проведены инструментальные замеры потребления и рекуперации энергии в реальной работе трамваев и троллейбусов. Кроме того, проведены сравнения с результатами других отечественных и зарубежных измерений. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Получены показатели объёмов энергии рекуперации и их зависимости от типа и характеристик подвижного состава и погодных условий. Выявлены предельные значения доли полной энергии рекуперации от тягового энергопотребления: для трамваев – порядка половины и для троллейбусов – до трети.

**Ключевые слова:** трамвай; троллейбус; тяговое энергопотребление; полезная и избыточная рекуперация; нетяговые нужды; инструментальные измерения.

**Для цитирования:** Кацай А.В., Шаряков В.А. Объёмы рекуперативной энергии трамваев и троллейбусов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 42-54. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-42-54.

## THE VOLUME OF REGENERATIVE ENERGY OF TRAMS AND TROLLEYBUSES

Katsay A.V.<sup>1</sup>, Sharyakov V.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kinemak Llc, Moscow, Russia

<sup>2</sup>NPP EPRO, St. Petersburg, Russia

proton764@mail.ru, v\_a\_shar@mail.ru

**Abstract:** RELEVANCE. A significant potential for increasing the energy efficiency of urban electrified transport is contained in the possibility of re-useful use of part of the energy spent on traction of rolling stock, recovered during braking, for performing transport work. The economic justification of the available methods of utilization of recovered electricity depends on its volume as a whole and the excess component of it available under standard technical parameters and conditions of movement of rolling stock, dissipated on brake resistors in the form of heat into the atmosphere. Theoretical simulation computer-mathematical models for calculating recovered

*energy do not yet take into account all the key parameters of real processes in the electrical subsystem of mountain electric transport. THE PURPOSE of the study was to carry out instrumental measurement of energy flows for various groups of electric power-consuming equipment of the urban electrified transport, as well as regenerative energy – useful and redundant. METHODS. Field experiments, electrical calculations, comparative analysis. RESULTS. In the course of the study, instrumental measurements of energy consumption and recovery in the actual operation of trams and trolleybuses were carried out. In addition, comparisons were made with the results of other domestic and foreign measurements. CONCLUSIONS. Indicators of recovery energy volumes and their dependence on the type and characteristics of rolling stock and weather conditions are obtained. The limiting values of the share of total energy recovery from traction energy consumption are revealed: for trams – about half and for trolleybuses – up to a third.*

**Keywords:** tram; trolleybus; traction energy consumption; useful and excessive recovery; non-traction needs; instrumental measurements.

**For citation:** Katsay A.V., Sharyakov V.A. The volume of regenerative energy of trams and trolleybuses. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (6): 42-54. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-42-54.

### **Введение (Introduction)**

В последние годы на подвижном составе городского электротранспорта (ГЭТ) активно внедряются тяговые транзисторные преобразователи, позволяющие выдавать энергию рекуперативного торможения вагонов обратно в контактную сеть (КС) на повторное выполнение полезной транспортной работы. В силу стохастичности процесса совпадения мощности выдачи рекуперации в сеть и достаточной мощности наличной сетевой нагрузки часть энергии рекуперации становится избыточной и рассеивается на тормозных резисторах. Для решения проблемы полного возврата на повторное выполнение транспортной работы избыточной энергии рекуперации рассматриваются и опробуются буферные накопители энергии бортового и стационарного применения. Для определения экономической эффективности таких устройств требуются надёжные данные об объёмах и структуре распределения полезной и избыточной рекуперации в системе тягового энергоснабжения (СТЭ) ГЭТа. Задачу изучения сезонного аспекта распределения полезной и избыточной рекуперации решают в своих работах ряд отечественных и зарубежных исследователей (Ребров С.А., Щуров Н.И., Ярославцев М.В., Бартломейчик М., Шевлюгин М.В. и др.). Эти работы позволили выявить зависимости и отношения тягового и нетягового энергопотребления и полезной и избыточной рекуперации вагонов в зависимости от внешних условий работы электроподвижного состава (ЭПС). Однако исследование методов определения абсолютных значений тягового энергопотребления, полезной и избыточной рекуперации ещё находится на начальном этапе. Развитие этих методов направлено на прямое измерение энергопотоков тягового привода трамвайных и троллейбусных вагонов.

При детальном инструментальном измерении потоков энергии на борту подвижного состава (тяга, полезная и избыточная рекуперация, нетяговое энергопотребление) у предприятия ГЭТ появляется мощный инструмент детального анализа и составления энергобаланса всей системы энергоснабжения транспортной работы в дополнение к измерениям энергопотоков в точках после выпрямительных агрегатов тяговых подстанций (ТП) и на высоковольтной стороне их. При наличии подробных непрерывных рядов данных по энергопотреблению становится возможным определить не только разделение энергии по всем типам потребления и объёмы полезной и избыточной рекуперации, но и потери в контактной сети и на тяговых подстанциях.

В настоящее время практически все отечественные производители трамваев (ПК ТС, Синара, УКВЗ, Ростех, Белкоммунмаш и др.) и троллейбусов (ПК ТС, Синара, УТТЗ, Транс-Альфа, Камаз, МАЗ и др.) участвуют в той или иной мере в крупных проектах модернизации парка ЭПС и тяговой инфраструктуры, в т.ч. в концессионных программах. Управляющие компании электротранспортных предприятий сталкиваются с проблемой снижения затрат энергии на транспортную работу. Тотальный инструментальный учёт энергозатрат при помощи устройств энергоучёта на ЭПС и на ТП позволит легко реализовать эффективный способ контроля энергопотребления подвижным составом ГЭТ.

Настоящее исследование направлено на разработку методов измерений указанных энергопотоков на борту трамваев и троллейбусов, а также на определение закономерных

соотношений между тяговым потреблением и рекуперативными потоками различной направленности на современном подвижном составе ГЭТ.

*Материалы и методы (Materials and methods)*

**Способы измерения энергии тяги и рекуперации на ЭПС**

*Математическое моделирование*

Одним из наиболее распространённых способов исследования баланса энергии в СТЭ ГЭТа, в том числе определения объёмов тяги и полезной и избыточной рекуперации, является математическое моделирование электрических процессов при выполнении транспортной перевозочной работы. Современные методы математического моделирования могут строиться как с использованием некоторых первичных данных (пробег, бортовое энергопотребление и др.) [1], так и опираются на чисто аналитические предположения при более глубоких математических описаниях моделей подвижного состава (технические характеристики энергооборудования тяги и нетягового потребления, профили пути, описания сил сопротивления движению вагонов и др.) [2]. Результатами таких расчётов на симулятивных программно-математических моделях реальных электротранспортных систем являются данные электрических параметров тяги и рекуперации поездов, которые могут быть сравнены с показателями натурных измерений. Так, например, исследователи отмечают в отношении легкорельсового транспорта, что «из-за короткого расстояния между станциями городского железнодорожного транспорта и частых торможений электроэнергия, вырабатываемая рекуперативным торможением, очень значительна и может даже достигать более 40% от потребления энергии на тягу» [3].

В некоторых исследованиях было показано, что применение рекуперативного торможения в городских железнодорожных системах потенциально может снизить их чистое потребление энергии на 10-45%, в зависимости от характеристик каждой системы [4]. При этом исследователи зачастую не указывают какое именно потребление энергии поездами имеется в виду – только тяговое или полное, с учётом питания устройств собственных нужд.

Стабильно воспроизводимые на маршрутных линиях состав поездов и графики движения обеспечивают устойчивое воспроизводство показателей тяги и рекуперации, разумеется, с учётом сезонного фактора, активно влияющего на абсолютные показатели. Например, исследователи из Румынии отмечают в отношении того же легкорельсового транспорта, что «согласно фактическим эксплуатационным данным, только 15-19% электроэнергии рекуперативного торможения может быть эффективно использовано» [5]. При этом «остальная электрическая энергия в конечном итоге преобразуется в тепло за счет сопротивления торможению» [6]. Для описания математических моделей в основном применяются два подхода: учитывающие детерминированные факторы и статистические расчеты. Однако чисто математические методы установления энергобаланса ЭПС с определением количественных показателей только с учетом детерминированных факторов, получаемых при моделировании, «не отражает реальной картины режимов движения и электропотребления в условиях эксплуатации и приводит к идеализации режимов движения» [7]. Статистические методы исследования энергопотоков для реальной транспортной работы в ГЭТ также «...не в полной мере учитывают многие факторы, от которых существенно зависит энергопотребление на ЭПС» [7].

*Инструментальное измерение тягового энергопотребления и рекуперации*

Для инструментального измерения тяговой и рекуперативной энергии в трамваях и троллейбусах широко применяются двунаправленные счётчики и датчики тока и напряжения. Обычно счётчики устанавливаются в точках между токовводом от КС и присоединением тяговой и нетяговой нагрузки: «счётчик электроэнергии должен быть включен таким образом, чтобы он учитывал все расходы на единицу подвижного состава<sup>1</sup>». В таком случае происходит измерение входной энергии на тягу и собственные нетяговые нужды поездов, а также на выдаваемую в КС часть энергии рекуперации – полезную, за вычетом избыточной рекуперации, направляемой на тормозные резисторы, а также питания полезной рекуперацией собственных нужд нетягового оборудования самого рекуперирующего вагона, т.к. последняя потребляется до точки подключения счётчика, т.е. им не учитывается.

---

<sup>1</sup> Методические указания по планированию, учету расхода электрической энергии трамвайным и троллейбусным транспортом и рекомендации по экономии электроэнергии Р0365-96. Утвержден в Минжилкомхоз РСФСР (29.12.1985).

Такая структура измерений не позволяет в чистом виде определять отдельно тяговое и нетяговое энергопотребление вагона и полный объём полезной и всю избыточную рекуперацию.

Решением проблемы адекватности измерений затрат энергии на тягу, вспомогательные нужды и выдачи рекуперации является использование на ПС систем архивации данных, получаемых от установленного электроизмерительного оборудования. В настоящее время наличие таких систем является обязательным пунктом в технических заданиях на поставку ЭПС. К данным, которые должны быть переданы в систему архивации, должны относиться:

- напряжение контактной сети (измеренное счетчиком электрической энергии на токоприемнике и на входе преобразователей питания тяговых двигателей, вспомогательных двигателей, преобразователей напряжения);
- ток, потребляемый ЭПС (измеренный шунтом счетчика электрической энергии)
- ток, потребляемый тяговыми преобразователями;
- выходной ток бортовой сети.

Т. е. в таком случае появляется возможность полностью регистрировать и контролировать энергопотоки в тяговой и нетяговой подсистемах электрооборудования вагона. Архивы могут переписываться на компьютеры служб движения и энергохозяйства предприятий ГЭТ и обрабатываться при помощи стандартных программ матобработки.

В ходе настоящего исследования определялись объёмы тягового и нетягового энергопотребления и рекуперативной энергии (полезной и избыточной) трамвайных и троллейбусных вагонов с фиксацией измеренных показателей энергопотребления и рекуперации в вышеупомянутых точках. Обобщённая схема размещения электрооборудования на современном подвижном составе и направления энергопотоков, регистрируемых бортовыми датчиками тока и напряжения, показаны на рисунке 1.

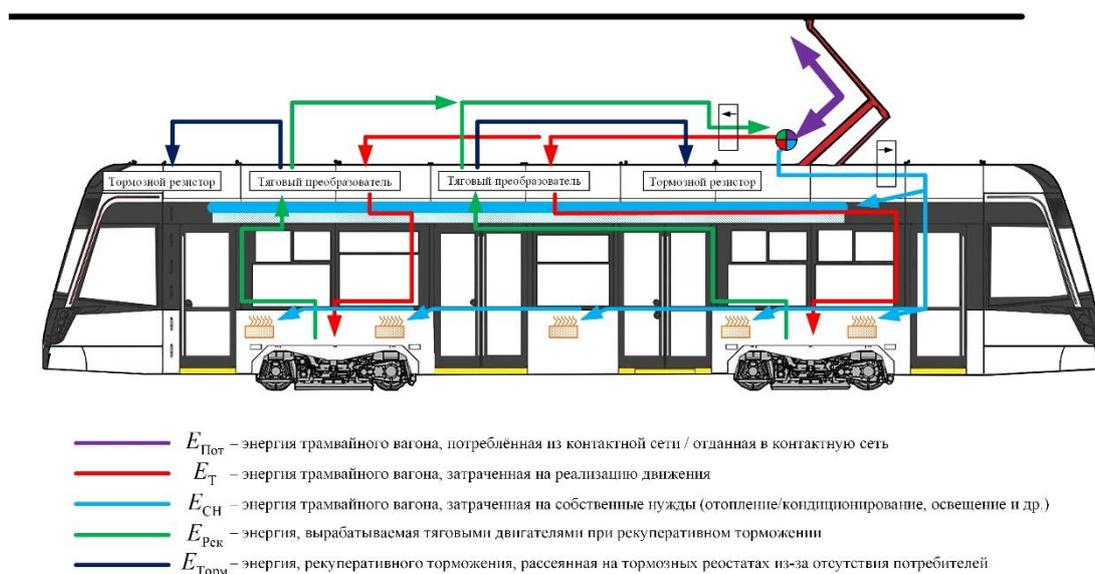


Рис. 1. Схема распределения регистрируемых тяговых и нетяговых энергопотоков трамвайного вагона с интегрированным преобразователем

Fig. 1. Distribution scheme of registered traction and non-traction energy flows of a tramcar with an integrated converter

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 2 на обобщённой принципиальной электрической схеме современной единицы подвижного состава показаны основные элементы цепи: тяговый преобразователь, преобразователь питания собственных нужд вагона, а также основные энергопринимающие устройства собственных нужд: отопители, воздушный компрессор, иные бортовые потребители (питающиеся от преобразователя собственных нужд). Также на схеме показаны места размещения датчиков тока и напряжения, контролирующих питание перечисленных устройств. Размещение датчиков тока и напряжения по приведённой схеме позволяет полностью контролировать энергопотоки в бортовой цепи и обеспечивает достаточный объём первичной информации с подвижного состава для расчёта полного энергобаланса системы тягового энергоснабжения городского электротранспорта. У более ранних моделей подвижного состава некоторые точки учёта могут отсутствовать.



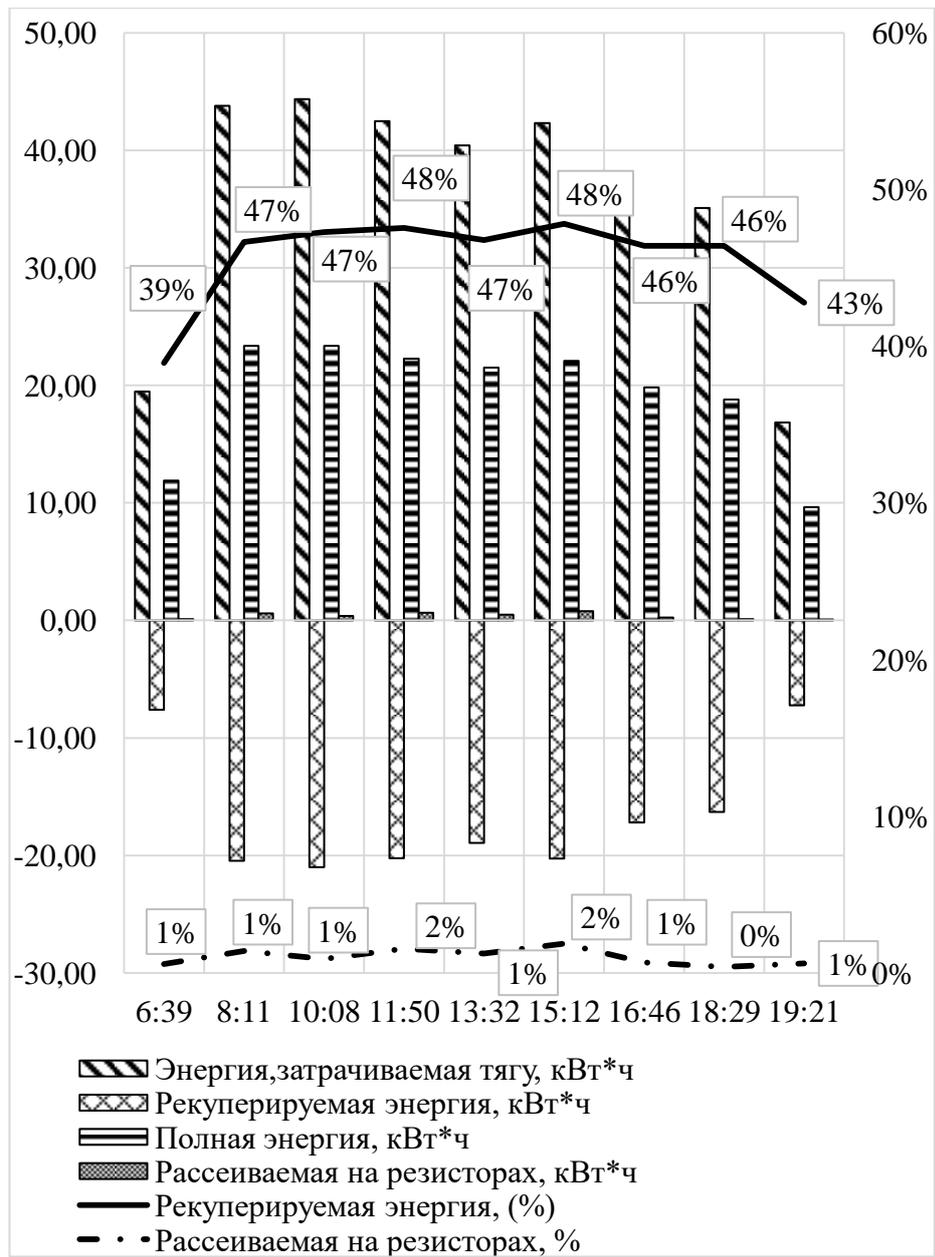


Рис. 3. График изменения энергии между остановками Fig. 3. Graph of energy changes between stops

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В таблице 2 представлены сводные показатели за отдельные периоды измерений в трамвае указанной модели энергии на тягу, полезной и избыточной рекуперации.

Таблица 2

Итоговая таблица затрат энергии по участкам движения на маршруте

№ п/п	Время по архиву	Относительное время, с	Энергия					
			$E_T$ , кВт*ч	$E_{рек}$ , кВт*ч (%)	$E_{торм}$ , кВт*ч (%)	$E_T - E_{рек}$ , кВт*ч		
1	6:39	4 740	19.50	-7.59	39%	0.11	1%	11.91
2	8:11	10 260	43.80	-20.43	47%	0.62	1%	23.36
3	10:08	17 280	44.36	-20.98	47%	0.40	1%	23.39
4	11:50	23 400	42.50	-20.21	48%	0.66	2%	22.29
5	13:32	29 520	40.43	-18.91	47%	0.50	1%	21.52
6	15:12	35 520	42.34	-20.25	48%	0.79	2%	22.09
7	16:46	41 160	37.03	-17.19	46%	0.25	1%	19.85
8	18:29	47 340	35.11	-16.29	46%	0.13	0%	18.82
9	19:21	50 460	16.87	-7.22	43%	0.10	1%	9.65
Итого			321.95	-149.07	46%	3.57	1%	172.88

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Суммарно по всем наблюдениям за вагонами модели 71-631-02.02 в зимний день с указанной температурой объём полезной рекуперации  $E_{рек}$  находился в диапазоне 46-50% от потребления энергии на тягу  $E_T$ , а избыточная рекуперация  $E_{торм}$  находилась в диапазоне 0,34-1,11% от тягового энергопотребления. Эти цифры долей видов рекуперации означают, что практически вся энергия рекуперации направляется в контактную сеть по межпоездным перетокам на потребляющую полезную нагрузку – тяговую и нетяговую. В т.ч. и на нетяговую нагрузку самого рекуперирующего вагона.

#### Трамвай 71-931М «Витязь-М»

Также проводились измерения на тяговом приводе трамвая модели 71-931М «Витязь-М» в тёплый сезон (+16/+15°C). На рассеивание на резисторах избыточной рекуперации в этих условиях уходит порядка 18,5% от тягового потребления, а полезные межпоездные перетоки составили 32,29% от тяги. Результаты измерений показали, что доля рекуперации суммарно полезной и избыточной от потребления на тягу в этот тёплый день составила порядка 51% (табл. 3), что практически равно среднему показателю вагонов модели 71-631-02.02 на других маршрутах и в другой сезон. При этом рассеиваемая на резисторе избыточная рекуперация  $E_{торм}$  составила более трети от общего объёма рекуперации.

Таблица 3

Показатели рекуперации вагона модели 71-931М «Витязь-М»

$E_{рек}/E_T$	$E_{торм}/E_T$	$E_{рек}/(E_{рек}+E_{торм})$	$E_{торм}/(E_{рек}+E_{торм})$	Температура (день/вечер), °C
0.322908	0.184978	0.635789	0.3642111	+16/+15

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

#### Трамвай Stadler B85600M

Измерения тягового потребления и рекуперации всего парка вагонов модели Stadler B85600M проводились ежедневно весь 2022 г. Для приведения к одинаковому значению внешних условий с данными вышеуказанных измерений электрических параметров моделей 71-631-02.02 и 71-931М были выбраны дни со схожими показателями температуры воздуха. На основе полученных данных по всем маршрутам движения вагонов такой модели были сформированы усреднённые показатели по тяге и рекуперации - как среднее суммы работы всех таких вагонов на линии (41 вагоно-смена за день). При этом усреднённое по всем вагонам отношение рекуперации к тяге за зимний день с температурой +2/+2°C имело значение 30,015%. Значение отношения избыточной рекуперации  $E_{торм}$  к затратам на тягу  $E_T$ , исходя из ранее измеренных показателей максимальной по году полезной рекуперации для таких вагонов, составило порядка 17,61 процентов. Значение полного объёма рекуперации ( $E_{рек} + E_{торм}$ ) практически совпадает с данными по вагону типа 71-631 такого же класса (табл. 4).

Для сравнения с показателями работы вагона модели 71-931М были выбраны данные за тёплый день 13.09.2022 г. с температурой +16/+15 °C. Доля полезной рекуперации от тяги составила 22,43 %, а отношение избыточной рекуперации к тяге – 25,58%.

Суммарно полезная и избыточная рекуперация ( $E_{рек} + E_{торм}$ ) составили для этого типа вагонов на имеющихся четырёх маршрутах движения в эти дни порядка 48% от тягового энергопотребления.

#### Сводные данные по трамваям

По измеренным показателям тяги и рекуперации трамвайных вагонов одного класса проводился, с учётом пробега, анализ соотношения потреблённой на тягу ЭПС энергии и видов энергии рекуперации. Энергия на тягу принималась за 100%. От этого объёма рассчитывались доли полезной и избыточной рекуперации. Температура в день измерений в утренние и вечерние часы определялась по данным портала gismeteo.ru. Результаты сопоставления полученных данных представлены в таблице 4.

Таблица 4

Сводные данные по полезной и избыточной рекуперации трамваев

Модель ПС	$E_{рек}/E_T$ , %	$E_{торм}/E_T$ , %	$(E_{рек} + E_{торм})/E_T$ , %	Температура день/вечер, °C
71-631-02.02	45,9	2,31	48,21	+ 2/+2
Stadler B85600M **	30,02	17,61	47,63	+2/+2
Stadler B85600M **	22,43	25,58	48	+16/+15
71-931 М «Витязь-М»	33	18	51	+16/+15

\*\*Для вагонов модели Stadler B85600M рассчитывались средние показатели тяги, полезной и избыточной рекуперации по всему парку, выходявшему на линии в эти дни

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полный объём рекуперации (сумма полезной и избыточной) у трамваев с тремя моторными тележками составляет примерно половину от затрат на тягу. Разница в удельных на 1 км пробега показателях избыточной энергии рекуперации у поездов одного класса при одинаковых погодных условиях (например, зимой – 2-17 процентов от тягового энергопотребления) задаётся только вероятностью сбора в период рекуперативного торможения одних вагонов достаточной по мощности для приёма рекуперации сетевой нагрузки других вагонов (тяговой и нетяговой).

### Троллейбус

Помимо трамваев измерения энергии рекуперации проводились также у троллейбусов типов ЗИУ-9 (модернизированного на инверторную тягу) и ПКТС-6281.00 «Адмирал». Полученные при измерениях данные сравнивались с аналогичными показателями других моделей троллейбусов (технические характеристики сравниваемых моделей см. в таблице 5). Указанные измерения также проводились в различные сезоны.

Таблица 5

Параметры сравниваемых троллейбусов			
Марка	Длина, м	Снаряжённая масса, т	Температура, °С
ПКТС-6281.00 «Адмирал»	12,375	11,47	+4/+2
Solaris Trollino 12S**	12	11,6	+11/+21
ЗИУ-9	11,888	10,05	от 0 до +6
МТБ-82**	10,365	9,25	н/д

\*\*Величины данных показателей были взяты из литературы [9-12]

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Троллейбус ПКТС-6281.00 «Адмирал»

Энергопотребление вагона регистрировалось в зимний период 29 января и первой половине 30 января 2024 г. при среднесуточной температуре окружающего воздуха в эти дни +4 и +2°С соответственно. Пробег за указанный период составил 251,16 км.

На рисунке 4 представлен типовой фрагмент графиков основных регистрируемых параметров исследуемого троллейбуса для одного межстаночного перегона: напряжение КС, токи тягового преобразователя (тяга и полезные перетоки рекуперации в контактную сеть), пробег, поступающие на тормозные резисторы токи избыточной рекуперации.

Сводные показатели за рассматриваемый период приведены в таблице 6.

Таблица 6

Значения потребления энергии и видов рекуперации троллейбуса ПКТС-6281.00 «Адмирал» в период измерений

	$E_T$	$E_{CH}$	$E_{дек}$	$E_{торм}$
Абсолютное, кВтч	399	128	-74	-40
Удельные значения на пробег в 1 км, кВтч/км	1.59	0.51	-0.30	-0.16
Доля от ( $E_T + E_{CH}$ ) **	0.76	0.24	-0.14	-0.08

\*\*( $E_T + E_{CH}$ ) — полное энергопотребление ЭПС — сумма тягового и нетягового

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Суммарное удельное потребление энергии из контактной сети на тягу и нетяговые нужды в межсезонье составляет ~2,1 кВтч/км, при тяговом энергопотреблении в 1,59 кВтч/км. За этот же период удельная выданная в КС полезная энергия рекуперации составляет -0,3 кВтч/км, а направленная на тормозные резисторы удельная энергия избыточной рекуперации -0,16 кВтч/км или 46,67% от полезной рекуперации. Полный объём рекуперации (сумма полезной и избыточной) составил 28,93% от потреблённой на тягу вагона энергии или 21,9% от полного энергопотребления. Близкие значения были получены польскими исследователями при анализе энергобаланса троллейбусов модели Solaris trollino 12S в г. Гдыне (Польша) в 2014 г., где доля полного объёма энергии рекуперации (полезной и избыточной) от полного потребления троллейбусами (измеренного на токосъёмнике вагона) составила тогда, в среднем, 24% [9].

Нетяговые нужды формируются работой отопителей салона и кабины водителя, освещения, компрессора, комплексом оборудования управления, информационной системой, зарядкой аккумуляторов собственных нужд и др. Доля нетягового энергопотребления троллейбуса «Адмирал» за время измерений в указанные осенние дни составила 24%. В непииковое время доля нетягового энергопотребления вырастает относительно периодов пикового движения вагонов. Доля межпоездных перетоков

полезной энергии рекуперации за всё время составила 14% от полного энергопотребления, а в часы пик доходила до 17,6%. Этот факт подтверждает, что при более интенсивном движении ЭПС увеличивается вероятность наличия в КС достаточной мощности нагрузки для приёма энергии рекуперации.

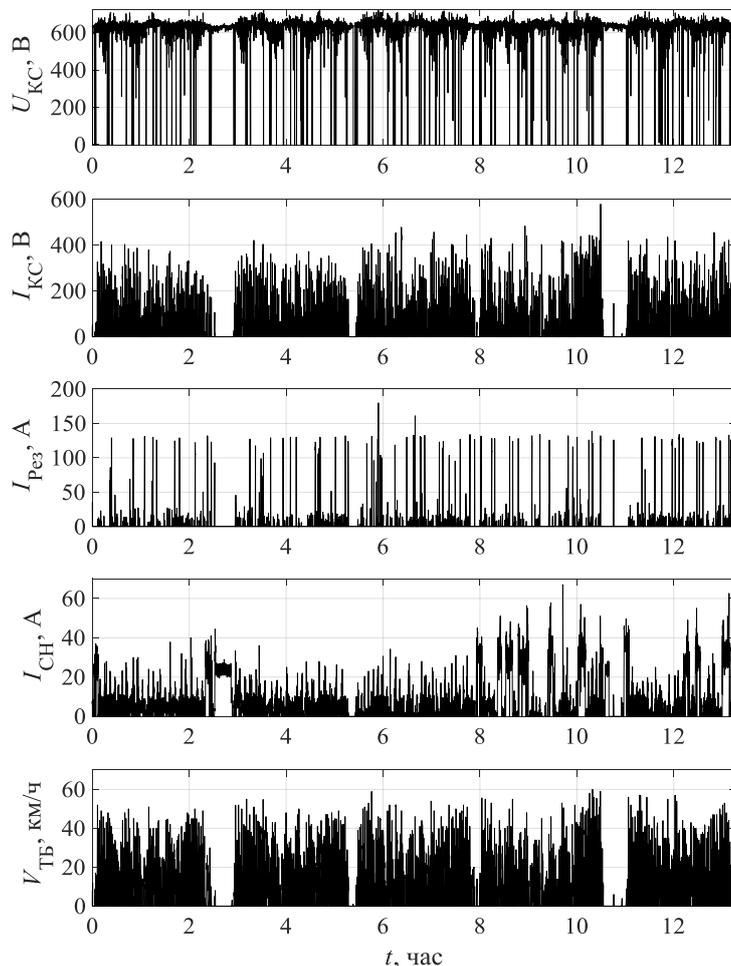


Рис. 4. Типовой график основных показателей при пробеге троллейбуса с двумя циклами «разгон-торможение». Ряд 1 – напряжение КС, Ряд 2 – токи тягового преобразователя (тяга + полезная рекуперация), Ряд 3 – ток тормозного резистора (избыточная рекуперация), А, Ряд 4 – ток высоковольтных не тяговых потребителей, Ряд 5 – скорость, км/ч

Fig. 4. A typical graph of the main indicators for running a trolleybus with two acceleration-braking cycles. Row 1 is the voltage of the CS, Row 2 is the currents of the traction converter (thrust + useful recovery), Row 3 is the current of the braking resistor (excessive recovery), A, Row 4 is the current of high-voltage non-traction consumers, Row 5 is the speed, km/h

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

#### Модель Solaris Trollino 12S

В ходе измерений польскими исследователями рекуперативных показателей троллейбуса Solaris Trollino 12S был сделан вывод, что на значение полезной составляющей энергии рекуперации во время фазы торможения наибольшее влияние оказывают факторы: общая масса транспортного средства, интенсивность фазы торможения и начальная скорость фазы торможения.

При прохождении элементарного городского цикла для троллейбуса Solaris Trollino 12S, восстанавливаемая при торможении рекуперация составила 12,9 – 20% от общей энергии потребления вагона [10].

Также в ходе указанных исследований было установлено, аналогично и нашим выводам, что уровень энергопотребления одинаков для конкретного маршрута, если условия эксплуатации поддерживаются одинаковыми и одинаков состав ЭПС [11].

#### Троллейбус МТБ-82

Ранее для одной из самых массовых марок троллейбусов МТБ-82 с реостатно-контакторной системой управления тягой был определён объём энергии рекуперации. Этот

тип троллейбуса имел ограниченную возможность рекуперативного торможения с возможностью выдачи рекуперации в КС при подключении тягового электродвигателя на последней ходовой позиции. Была определена доля полной энергии рекуперации до скорости 22 км/час, на которой поддерживаются минимальные обороты перед срывом рекуперации у тягового двигателя типа ДК-202: «...от скорости 50 км/час рекуперация энергии составляет 28,5%, а при торможении от скорости 40 км/час рекуперация энергии составляет 22,6% от энергии, затраченной на пуск троллейбуса в ход (с учётом потери энергии на нагрев пускового реостата)...» [12]. При этом для данного троллейбуса среднегодовой полный удельный расход энергии на тягу и нетяговые нужды на 1 км пути составлял 1,8 кВтч/км [12].

*Модель ЗИУ-9*

В октябре-ноябре 2012 г. в Санкт-Петербурге проводились измерения полезного объёма рекуперации (без учёта избыточной) на модернизированном на транзисторное управление тягой типовом троллейбусе модели ЗИУ-9. Показания определялись датчиками тока и напряжения тягового привода. Доля полезной энергии рекуперации от тягового энергопотребления достигла 20,9%, что превышает аналогичный показатель у троллейбуса ПКТС-6281.00 «Адмирал» в примерно таких же погодных условиях (18,87%). Однако, поскольку указанные измерения проводились на разных маршрутах движения, то сопоставление долей полезной рекуперации от тяги будет не совсем корректным, поскольку на маршрутах могли существенно отличаться дорожные условия (скорости начала торможения, наличие в КС полезной нагрузки).

Также в г. Новосибирске для троллейбусов ЗИУ-9, оснащённых тиристорной системой управления тягой, полный объём энергии рекуперации (полезной и избыточной) был определён в объёме до 32% от потребления на тягу [7].

В таблице 7 сведены показатели по полному потреблению энергии исследованными моделями троллейбусов, а также тяги, нетягового питания и полного объёма рекуперации.

Таблица 7

Результаты измерений энергетических показателей троллейбусов

Модель троллейбуса	Темп., °C	$Q_T$ , кВтч/км	$E_T / (E_T + E_{CH})$ , %	$E_{CH} / (E_T + E_{CH})$ , %	$(E_{рек} + E_{торм}) / (E_T + E_{CH})$ , %	$(E_{рек} + E_{торм}) / E_T$ , %
ПКТС-6281.00 «Адмирал»	+4+2	2,1	76	24	22,88	28,93
Solaris Trollino 12S	+11+21	2,1	87,1	12,9	22**	25,26**
МТБ-82	н/д	1,8	93	7	28,5	30,65
ЗИУ-9 (модерн)	0+6	1,162	н/д	н/д	<32***	20,9**

\*\*У троллейбусов Solaris Trollino 12S и ЗИУ-9 (СПб) измерялся только объём полезной рекуперации, избыточная рекуперация не учитывалась

\*\*\*Отношение полного объёма энергии рекуперации к тяговому энергопотреблению ЗИУ-9 получено новосибирскими исследователями [7]

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

У троллейбусов одного класса по основным техническим характеристикам (Solaris Trollino 12S и ПКТС-6281.00 «Адмирал») при сравнимых условиях эксплуатации практически совпали значения показателя полного удельного энергопотребления вагонов (тяга и нетяговые нужды, кВтч/км). Поскольку измерения у троллейбуса «Адмирал» производились в более холодный период, то у него от полного энергопотребления доля тягового была ниже, а нетягового – выше, чем у зарубежного аналога для более тёплого сезона. При прочих равных условиях удельное полное энергопотребление у троллейбуса «Адмирал» будет ниже, чем у Solaris Trollino 12S.

Доля полного объёма рекуперированной энергии (полезной и избыточной) от тягового энергопотребления у трамвая выше в 1,5-2 раза, чем у троллейбуса, что может объясняться меньшей массой троллейбусов и их меньшей скоростью начала торможения, определяемой в значительной мере дорожной обстановкой. Последняя в меньшей степени влияет на движение трамваев.

В межсезонье доля нетягового энергопотребления двухосного троллейбуса может достигать четверти от полного энергопотребления (см. табл. 7), а в холодный период нетяговое энергопотребление может превышать тяговое [14]. У более энергооснащённых трёхсекционных трамваев по году доля нетягового энергопотребления может достигать

40%, при этом в холодные сезоны нетяговое энергопотребление может значительно превышать тяговое [15].

#### **Выводы (Conclusions)**

Общий объём рекуперации (полезной и избыточной) зависит, главным образом, от скорости начала торможения вагона и его массы, определяющих механическую энергию транспортных средств, которая преобразуется в работающих в режиме генерации тяговых двигателях в электрическую. При этом распределение рекуперации на полезную и избыточную части зависит, в основном, от наличия в КС достаточной по мощности для её приёма полезной нагрузки, складывающейся из потребления на тягу и нетяговые нужды вагонов. Также следует учитывать, что тяговое энергопотребление превышает значение рекуперации в одном цикле движения ПС, а у вагонов с большей массой затраты энергии на тягу превышают таковую у менее массивных транспортных средств.

В условиях городского движения полный объём электрической энергии рекуперации (полезной и избыточной) у трамваев может достигать половины от тягового энергопотребления, а у троллейбусов – четверти-трети. В исследовании зафиксирована разница в показателях доли электроэнергии рекуперации от тяговой у трамваев и троллейбусов, которая есть проявление зависимости их от объёмов преобразуемой механической энергии и от генеративных характеристик тяговых электромашин.

Подвижной состав различных производителей, но с близкими основными техническими характеристиками, при схожих условиях функционирования показывает сопоставимые показатели тягового и нетягового энергопотребления и полного объёма энергии рекуперации.

Лучшие показатели отношения полной энергии рекуперации (суммы полезной и избыточной) к полному потреблению (на тягу и собственные нужды) наблюдаются у троллейбусов с реостатно-контакторной системой управления тягой и возможностью выдачи рекуперации в КС типа МТБ-82. Этот факт (ср. таблицы 7 и 5) обусловлен меньшим значением у них снаряжённой массы тары вагона, слабой мощностью потребления собственных нужд и наличием потерь при преобразовании механической и электрической энергии только в тяговой электромашине (отсутствует тяговый преобразователь). Однако рекуперация механической энергии в электрическую при торможении в вагонах с РКСУ может происходить только до линейной скорости порядка 22 км/час, т.е. без тягового преобразователя имеется «недобор» рекуперации.

В холодные сезоны и на участках интенсивного движения ЭПС практически вся энергия рекуперации полезно утилизируется по контактной сети на повторное потребление сетевой тяговой и нетяговой нагрузкой. В таких условиях на участках интенсивного движения подвижного состава при низких наружных температурах применение буферных накопителей энергии является бесполезным. Этот вывод технически подтверждается на практике использования накопительных устройств, в особенности с учётом того, что потери энергии рекуперации при её транспортировке по медным проводам контактной сети в 4-5 раз меньше, чем потери этой же энергии при четырёхкратных преобразованиях в накопительных элементах и их преобразователях в одном цикле работы.

Получаемые в ходе непосредственного инструментального замера потребляемой и рекуперированной энергии на подвижном составе удельные значения этих показателей (в расчёте на 1 км пробега или на 1 тоннокилометр) могут использоваться в качестве фактической базы для построения симуляционных математических моделей расчёта систем тягового энергоснабжения в ГЭТ. При этом для корректного математического моделирования необходимо учитывать массо-габаритные характеристики подвижного состава, погодные условия, графики движения, пробег и некоторые другие факторы.

#### **Литература**

1. Capasso A., Ceraolo M., Lamedica R., Lutzemberger G., Ruvio A. Modelling and Simulation of Tramway Transportation Systems. In: Journal of Advanced Transportation. Vol. 2019. Article ID 4076865, 8 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4076865>.
2. Hubka L., Školník P. Tram Simulation Model for Energy Balance Analyses. In: 2017 21st International Conference on Process Control (PC) / June 6–9, 2017, Štrbské Pleso, Slovakia.
3. Odijk M.A. A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables. Transportation Research. Part B: Methodological. Vol. 30, № 6, 1996. Pp. 455–464.
4. González-Gil A., Palacin R., Batty P. Energy Conversion and Management. In: Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. Vol. 75, November 2013, Pp. 374–388. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.039>.

5. Adinolfi A., Lamedica R., Modesto C., Prudenzi A., Vimercati S. Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 13, № 4, 1998. Pp. 1536–1542.
6. Zheng Y., Ma Z., Liu N., Jin W. Study on Energy-Saving Optimization of Urban Rail Transit Train Timetable under Regenerative Braking. Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2022. Article ID 5590736, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2022/5590736>.
7. Штанг А. А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: диссертация ... кандидата технических наук: НГТУ. Новосибирск. 2006. — 233 с.
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. Энергетика и электротехника. №2, 2023. С. 37-44.
9. Possibilities of energy demand reduction in trolleybus transportation. Faculty of Electrical Engineering and Communication Brno University of Technology, Department of Power Electrical and Electronic Engineering. Brno. 2014. 91 p.
10. Siemionek E., Dziubiński M., Adamiec M., Kołodziej S. Analiza i symulacja zużycia energii przez trolejbus. In: Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. 2017. Vol. 10. Pp. 1315-1318.
11. Siemionek E. Analysis of trolleybus energy consumption. In: Adv. Sci. Technol. Res. J. 2013; №7(18). Pp. 81-84. DOI: <https://doi.org/10.5604/20804075.1051261>.
12. Ребров С.А. Расход электроэнергии на движение троллейбусов. — Киев: книжная фабрика "Октябрь" Министерства культуры УССР, 1958. — 100 с.
13. Построение системы увеличенного автономного хода с ограничением потребляемого тока из контактной сети / В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, К. В. Шаряков, В. А. Лебедева // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 4. – С. 146-157. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-4-146-157. – EDN DUIX1.
14. Ярославцев М. В. Влияние потребления собственных нужд на возврат энергии в тяговую сеть троллейбуса при рекуперативном торможении // Наука. Технологии. Инновации : Сборник научных трудов в 9 частях, Новосибирск, 05–09 декабря 2016 года / под ред. Е.Г. Гуровой. Том Часть 5. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016. – С. 255-256. – EDN XGPAFF.
15. Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Утилизация избыточной рекуперации в контактной сети электротранспорта при зарядке стационарного накопителя // Электрические системы и комплексы. 2023. №1(58).С. 10-20.

#### Авторы публикации

**Кацай Александр Владимирович** – канд. филос. наук, генеральный директор ООО «Кинемак-Энерго», г. Москва, Россия. E-mail: [proton764@mail.ru](mailto:proton764@mail.ru).

**Шаряков Владимир Анатольевич** – исполнительный директор ООО «Научно-производственное предприятие «ЭПРО» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ПГУПС), г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: [v\\_a\\_shar@mail.ru](mailto:v_a_shar@mail.ru).

#### References

1. Capasso A., Ceraolo M., Lamedica R., Lutzemberger G., Ruvio A. Modelling and Simulation of Tramway Transportation Systems. In: Journal of Advanced Transportation. Vol. 2019. Article ID 4076865, 8 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4076865>.
2. Hubka L., Školník P. Tram Simulation Model for Energy Balance Analyses. In: 2017 21st International Conference on Process Control (PC) / June 6–9, 2017, Štrbské Pleso, Slovakia.
3. Odijk M.A. A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables. Transportation Research. Part B: Methodological. Vol. 30, № 6, 1996. Pp. 455–464.
4. González-Gil A., Palacin R., Batty P. Energy Conversion and Management. In: Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. Vol. 75, November 2013, Pp. 374-388. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.039>.
5. Adinolfi A., Lamedica R., Modesto C., Prudenzi A., Vimercati S. Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 13, № 4, 1998. Pp. 1536–1542.
6. Zheng Y., Ma Z., Liu N., Jin W. Study on Energy-Saving Optimization of Urban Rail Transit Train Timetable under Regenerative Braking. Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2022. Article ID 5590736, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2022/5590736>.

7. Shtang A. A. Povyshenie effektivnosti elektrotransportnykh sistem na osnove ispol'zovaniya nakopitelei energii: spetsial'nost' 05.09.03 «Elektrotekhnicheskie kompleksy i sistemy»: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: NGTU. Novosibirsk. 2006. — 233 s.

8. Katsay A.V., Bizyaev A.A., Kozarevich V.A. Sravnenie parametrov raboty makhovichnogo nakopitelya v kontaktnoi seti tramvaya v kholodnye i teplye sezony transportnoi raboty. Vestnik MEI. Energetika i elektrotehnika. №2, 2023. S. 37-44.

9. Possibilities of energy demand reduction in trolleybus transportation. Faculty of Electrical Engineering and Communication Brno University of Technology, Department of Power Electrical and Electronic Engineering. Brno. 2014. 91 p.

10. Siemionek E., Dziubiński M., Adamiec M., Kołodziej S. Analiza i symulacja zużycia energii przez trolejbus. In: Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. 2017. Vol. 10. Pp. 1315-1318.

11. Siemionek E. Analysis of trolleybus energy consumption. In: Adv. Sci. Technol. Res. J. 2013; №7(18). Pp. 81-84. DOI: <https://doi.org/10.5604/20804075.1051261>.

12. Rebrov S.A. Raskhod elektroenergii na dvizhenie trolleibusov. — Kiev: knizhnaya fabrika "Oktyabr" Ministerstva kul'tury USSR, 1958. — 100 s.

13. Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Sharyakov K. V., Lebedeva V. A. Postroenie sistemy uvelichenogo avtonomnogo khoda s ogranicheniem potrebyaemogo toka iz kontaktnoi seti. Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy. — 2023. — № 4. — S. 146-157. — DOI 10.20295/2223-9987-2023-4-146-157. — EDN DUIIXI.

14. Yaroslavtsev M. V. The influence of self-consumption on the return of energy to the traction network of a trolleybus during regenerative braking. Nauka. Technologies. Innovations : A collection of scientific papers in 9 parts, Novosibirsk, 05-09 December 2016 / edited by E.G. Gurova. Volume Part 5. — Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2016. — pp. 255-256. — EDN XGPAPF.

15. Katsay A.V., Shevlyugin M. V. Utilization of excess recovery in the contact network of electric vehicles when charging a stationary storage device. Electrical systems and complexes. 2023. No.1(58).pp. 10-20.

#### **Authors of the publication**

*Alexander V. Katsay* – Kinemak-Energo LLC, Moscow, Russia. E-mail: proton764@mail.ru.

*Vladimir A. Sharyakov* – NPP EPRO, St. Petersburg, Russia. E-mail: v\_a\_shar@mail.ru.

*Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы*

**Получено** **04.09.2024 г.**

**Отредактировано** **13.09.2024 г.**

**Принято** **10.10.2024 г.**