



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК 621.332

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-38-52



О СРАВНЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В. Л. Незевак

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
Омск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматриваются энергетические параметры систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока. Целью исследования является оценка энергетических параметров систем накопления электроэнергии при их размещении в границах межподстанционной зоны системы тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ.

Материалы и методы. В исследовании использованы методы имитационного моделирования, статистики и обработки результатов эксперимента. Оценка параметров системы накопления выполнена на основе тяговых расчетов для электроподвижного состава переменного тока применительно к межподстанционной зоне одного из участков Среднесибирского хода с системой тягового электроснабжения переменного тока. Расчеты по определению энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения выполнены для двух вариантов: при отсутствии и при наличии системы накопления электроэнергии. При расчете взаимодействия электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения моделирование работы системы накопления электроэнергии выполнено для источника напряжения, подключенного к шинам поста секционирования.

Результаты. На основе имитационного моделирования получены графики активной и реактивной мощности по плечам межподстанционной зоны в условиях работы активного поста секционирования для расчета параметров систем накопления электроэнергии. Рассчитан график ожидаемой степени заряженности, оценена глубина разряда для номинальной энергоемкости и представлена требуемая зарядная характеристика, обеспечивающая восстановление степени заряженности системы накопления до начального уровня.

Обсуждение и заключение. Дана сравнительная оценка параметров систем накопления для систем тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ и переменного тока напряжением 25 кВ. Проведенное исследование показало возможность снижения номинальных параметров систем накопления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система тягового электроснабжения, переменный ток, система накопления электроэнергии, стабилизация напряжения, пост секционирования, энергоемкость, график степени заряженности

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00002, <https://rscf.ru/project/22-29-00002/>.

Для цитирования: Незевак В. Л. О сравнении энергетических параметров систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 38–52. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-38-52>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 621.332

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-38-52



COMPARISON OF ENERGY PARAMETERS OF ELECTRIC STORAGE SYSTEMS FOR DC AND AC TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS

Vladislav L. Nezevak

Omsk State Transport University (OmGUPS),
Omsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article discusses the energy parameters of electric power storage systems for DC and AC traction power supply systems. The purpose of the research is to evaluate the energy parameters of electric power storage systems located within the inter-substation zone boundaries of the AC traction power supply system at the 25 kV voltage.

Materials and methods. The author used the methods of modeling, statistics and the experimental results processing. Moreover, the paper presented the parameter estimation of the energy accumulation system on the basis of the traction calculations for the AC rolling stock. In addition, the author made two variants of calculations — in the presence and the absence of the electric storage system. The researcher also made the simulation of the electric storage system for the voltage source connected to the sectioning post busbars.

Results. Using the simulation modeling, the author presents active and reactive power graphs of the inter-substation zone boundaries in the active sectioning post operation conditions. Therefore, the article demonstrates the graph of the expected charge, the discharge depth calculations for the nominal energy capacity and the required charging features, which guarantee the charge restoration of the accumulation system to the initial level.

Discussion and conclusion. The author offers the comparative assessment of the electric storage systems for the traction power supply with the DC voltage of 3 kV and the AC voltage of 25 kV. The research demonstrates the reducing potential of the nominal accumulation parameters.

KEYWORDS: traction power supply system, AC, electric storage system, voltage stabilization, sectioning post, energy capacity, graph of the expected charge

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-00002, <https://rscf.ru/project/22-29-00002/>.

For citation: Nezevak V.L. Comparison of energy parameters of electric storage systems for DC and AC traction power supply systems. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):38–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-38-52>.

Введение. Проблематика повышения надежности и эффективности работы электроэнергетических систем относится главным образом к вопросам использования систем накопления электроэнергии. В настоящее время в мире актуальными являются направления исследований по применению систем накопления в сетях с распределенной генерацией [1, 2], в том числе постоянного тока [3], а также в транспортных комплексах [4].

Использование систем накопления в тяговой энергетике железнодорожного транспорта позволяет решить ряд задач по стабилизации напряжения, выравниванию графика электрической нагрузки, повышению эффективности применения рекуперативного торможения [5, 6] и др. Решение указанных задач актуально как для системы тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ, так и для системы тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ.

Основными эффектами применения систем накопления в системе тягового электроснабжения постоянного тока являются повышение нагрузочной способности в части увеличения минимального уровня напряжения на токоприемнике, снижение загрузки преобразователей и силовых трансформаторов, повышение эффективности применения рекуперативного торможения и энергии рекуперации в границах межподстанционных зон, как это показано в [7]. Указанные эффекты могут быть получены и в системе тягового электроснабжения переменного тока с учетом ее специфики — влиянием реактивной мощности на энергетические показатели, более высоким уровнем электротяговой нагрузки в границах межподстанционных зон, большим парком электроваз, не оснащенных системами рекуперативного торможения, например серии ВЛ80С.

Одним из направлений повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения переменного тока является применение регулируемых устройств, например статических генераторов реактивной мощности (СГРМ), статических компенсаторов (СТК) и др. В связи с этим следует рассматривать задачу согласованной работы систем накопления с указанными устройствами для решения ряда задач (стабилизации напряжения, повышения качества электроэнергии и др.). Необходимо отметить, что проводимые исследования [8–10] не в полной мере рассматривают вопросы стабилизации напряжения на межподстанционных участках, где наблюдается минимальное напряжение на токоприемнике. Появление серий локомотивов с асинхронным тяговым приводом способствует повышению коэффициента мощности тяговой нагрузки, что позволяет в перспективе снизить потребляемую тяговой нагрузкой

реактивную мощность и уменьшить эффективность работы устройств компенсации реактивной мощности. Так, для электровазов серии 2ЭС7 заявленный коэффициент мощности выше значения 0,95 (при нагрузке выше 25 % продолжительного режима) [11, 12], что обусловлено появлением современных полупроводниковых приборов (MOSFET, IGCT, IGBT, GTO и др.), используемых при производстве выпрямительных и инверторных преобразователей различного вида [13]. Применение четырехквadrантных преобразователей на основе современной полупроводниковой базы позволяет существенно снизить потребление реактивной мощности и несинусоидальность напряжения [14].

Одним из вариантов усиления системы тягового электроснабжения является применение систем накопления на линейных устройствах, таких как посты секционирования [15–17]. В качестве ожидаемых эффектов применения систем накопления на постах секционирования следует отметить:

- повышение нагрузочной способности системы тягового электроснабжения;
- снижение потерь энергии, мощности и напряжения в контактной сети;
- повышение качества электроэнергии.

С целью оценки основных параметров систем накопления электроэнергии, предназначенных для работы в системе тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ, рассматриваются энергетические показатели до и после преобразования поста секционирования в активный. Оценка параметров выполняется для задачи поддержания напряжения на шинах поста секционирования с целью повышения пропускной способности на участке железной дороги. В связи с этим в настоящей статье акцент сделан на определении параметров системы накопления для активной мощности тяговой нагрузки.

Влияющие факторы. Исследования условий работы систем накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока позволяют выделить основные факторы, оказывающие влияние на энергетические параметры.

1. Места размещения в системе тягового электроснабжения. Места размещения систем накопления в тяговом электроснабжении определяются в зависимости от решаемых задач. Для задач по стабилизации напряжения в контактной сети рассматриваются варианты размещения систем накопления на линейных пунктах (постах секционирования и пунктах параллельного соединения контактной сети). За счет приближения ординаты размещения систем накопления к ординатам с наименьшим уровнем напряжения на токоприемнике электроподвижного состава решается задача стабилизации напряжения,

а значение компенсации напряжения зависит от электротяговой нагрузки. При решении задач по снижению загрузки силового оборудования подстанции и регулированию внешней характеристики подстанции рассматривается размещение систем накопления на тяговых подстанциях.

Альтернативный способ размещения систем накопления — на борту электроподвижного состава. Такое размещение является наиболее технически эффективным [18, 19], но и более затратным, как это показано в [20]. В случае относительно высокой интенсивности движения суммарная энергоемкость систем накопления для систем тягового электроснабжения оказывается существенно ниже, чем для бортовых систем электроподвижного состава.

2. Профиль пути. Профили пути на электрифицированных участках оказывают существенное влияние на режимы вождения поездов и напряжения в системе тягового электроснабжения, тяговое электропотребление и уровень технических потерь [21, 22], а также условия работы систем накопления. Эффективность применения систем накопления выше на участках с горным профилем пути (3-го и 4-го типов) в условиях преобладания грузового движения за счет интенсивного применения рекуперативного торможения. В условиях преобладания пассажирского движения системы накопления оказываются эффективны и на равнинных профилях пути за счет частых торможений, обусловленных необходимостью остановок у посадочных пассажирских платформ.

3. Преобладание видов движения. Особенности эксплуатации систем накопления на участках с преобладанием грузового движения заключаются в достаточно продолжительных режимах тяги и рекуперативного торможения, что повышает требования к номинальной мощности и энергоемкости. При преобладании пассажирского движения (например, в условиях Московского центрального кольца) особенности эксплуатации заключаются в существенном изменении частоты циклов разгон-торможение, что приводит к уменьшению продолжительности режимов и позволяет снизить мощность и энергоемкость систем накопления при эксплуатации в данных условиях [23].

4. Количество главных путей участка. Количество главных путей на электрифицированных участках оказывает влияние на номинальные параметры систем накопления. Эффективность передачи энергии в условиях двух- и многопутных участков выше, чем для однопутных [24–26]. В связи с этим для повышения нагрузочной способности системы тягового электроснабжения на однопутных участках, особенно с преобладанием грузового движения, требуются большие номинальные параметры систем накопления.

5. Применение рекуперативного торможения. Применение рекуперативного торможения на электроподвижном составе приводит к повышению нагрузочной способности системы тягового электроснабжения и облегчению условий работы систем накопления в зависимости от интенсивности рекуперации [27, 28]. В случае отсутствия рекуперативного торможения на участке расчет параметров систем накопления выполняется с учетом заряда от смежных тяговых подстанций по контактной сети или по специальным линиям, что приводит к увеличению загрузки силового оборудования и снижает уровень напряжения в контактной сети. В связи с этим на участках с отсутствием рекуперативного торможения эффективность работы систем накопления ниже, чем на участках с его применением.

6. Специальное применение. Системы накопления применяются также и в нетяговой энергетике, особенно на участках, где можно использовать возможности рекуперативного торможения. Одним из примеров такого применения является техническое решение для системы собственных нужд тяговой подстанции. Предварительные расчеты показывают техническую эффективность данного мероприятия, основанную на возможности отказа от постоянного подключения системы собственных нужд к шинам переменного тока подстанции и реализации электроснабжения от системы накопления, подключенной к шинам постоянного тока подстанции, принимающей мощность рекуперации [29]. Возможно применение систем в качестве передвижных комплексов для решения вопросов усиления системы тягового электроснабжения в вынужденных режимах работы и при проведении работ по капитальному ремонту пути и контактной сети.

7. Применение различных видов накопителей. В общем случае в качестве накопителей могут применяться различные виды электрохимических, электрических, кинетических, гравитационных и других устройств. Однако при выборе вида накопителей и топологии систем накопления следует учитывать особенности их работы с проектируемой нагрузкой. Основные из них сводятся к тому, что, во-первых, необходимо выбирать активную топологию систем накопления и отказаться от пассивной ввиду ее низкой эффективности, а, во-вторых, применение относительно дешевых электрохимических накопителей приводит к необходимости увеличения номинальной энергоемкости системы с целью ограничения глубины разряда и продления ее срока службы. Для применения в системах тягового электроснабжения перспективными представляются гибридные системы накопления с активной топологией, построенные на управляемых преобразователях и двух видах накопителей, например

Таблица 1

Условия работы и параметры систем накопления для участков железных дорог

Table 1

Operating conditions and accumulation system parameters for railway sections

Условия работы и параметры	Октябрьская	Свердловская			Московская	Западно-Сибирская	
Место размещения	ПС	ПС	ПС	ТП	ПС	ПС	ТП
Кол-во путей	2	1	2	2	2	2	1
Вид движения	Грузовое	Грузовое	Грузовое	Грузовое	Пассажирское	Грузовое	Грузовое
Показатель нагрузочной способности системы тягового электроснабжения	$U_{\min}$	$U_{\min}$	$U_{\min}$	$I_{\max}$	$W_{\text{рек}}$	$U_{\min}$	$W_{\text{сн}}$
P_n , МВт	1,5	1,8	1,5	9,0	2,7	2,5	1,7
W_n , МВт·ч	1,6	2,3	1,6	3,0	1,3	1,3	1,7

Примечания: ПС — пост секционирования; ТП — тяговая подстанция; P_n — номинальная мощность; W_n — номинальная энергоемкость; $U_{\min}$ — минимальное напряжение на токоприемнике; $W_{\text{рек}}$ — объем энергии рекуперации; $W_{\text{сн}}$ — объем энергии на собственные нужды; $I_{\max}$ — максимальный ток силового оборудования.

Notes: ПС — sectioning post; ТП — traction substation; P_n — rated power; W_n — rated energy intensity; $U_{\min}$ — minimum voltage on the current collector; $W_{\text{рек}}$ — volume of recuperation energy; $W_{\text{сн}}$ — amount of energy for own demands; $I_{\max}$ — maximum current of the power equipment.

электрохимического и электрического (суперконденсатора, не чувствительного к глубине разряда) [30, 31].

8. *Результаты, полученные для сети железных дорог России.* Исследования по оценке технико-экономической эффективности систем накопления для системы электроснабжения постоянного тока, выполненные для различных участков железных дорог (Московской, Октябрьской, Свердловской, Западно-Сибирской), показывают, что для решения задач, связанных с повышением пропускной способности, достаточно применения системы накопления в границах лимитирующих межподстанционных зон участка. Номинальные параметры систем накопления определяются рассмотренными выше условиями эксплуатации. Расчетный срок окупаемости таких проектов за счет повышения пропускной способности не превышает трех лет в условиях прогнозируемого роста объемов перевозок [26].

Регулирование зарядной характеристики системы накопления позволяет обеспечить ограничение падения напряжения в контактной сети постоянного тока в пределах до 400 В и поддержание степени заряженности на заданном уровне в рамках цикла работы с электротяговой нагрузкой. Результаты расчетов для графика исполненного движения за отчетные сутки для Свердловской железной дороги при размещении системы на посту секционирования позволяют оценить требуемую номинальную мощность для литийионного накопителя в режиме заряда/разряда на уровне не менее 1,8/3,2 МВт соответственно, энергоемкость — не менее 2,3 МВт·ч [26]. При использовании накопителей другого вида, допускающих глубокий разряд, номинальная мощность существенно снижается до уровня

0,36/3,2 МВт в режиме заряда/разряда соответственно, энергоемкость — до 1,0 МВт·ч.

Характер изменения глубины разряда DoD для однопутных участков аналогичен изменению на двухпутных участках, отличием является рост требуемой номинальной энергоемкости (2,3 МВт·ч), который превышает уровень, требуемый для двухпутных участков, — 1,5 МВт·ч для Октябрьской железной дороги, 1,0 МВт·ч для Свердловской железной дороги [26], 1,3 МВт·ч для Западно-Сибирской железной дороги, 1,2 МВт·ч для Московского центрального кольца Московской железной дороги.

Цикличность режимов заряда/разряда для расчетного пакетного пропуска для системы накопления на однопутном участке железной дороги составляет 1,5 цикла/ч, для исполненного графика движения частота снижается до 0,3 цикла/ч. Для двухпутных участков для условий Московского центрального кольца цикличность составляет менее 0,2 цикла/ч, для условий Октябрьской, Свердловской и Западно-Сибирской железных дорог — около 1...2 циклов/ч [26].

Оценка номинальных значений мощности и энергоемкости систем накопления (табл. 1) приведена для электрохимических накопителей из условия, что токи заряда не превышают уровень $1C_n$, а токи разряда — уровень $2C_n$. Применение других видов накопителей электроэнергии позволяет снизить требования к номинальной энергоемкости систем накопления, применяемых в системе тягового электроснабжения. Условия, для которых получена оценка, соответствуют наиболее тяжелому режиму формирования электротяговой нагрузки: для участков с преобладанием грузового движения — в пакете поездов присутствует поезд

повышенной массы, для пассажирского движения — используется график движения поездов с минимальными интервалами следования.

Снижение уровней электротяговой нагрузки приводит к соответствующему снижению требуемой номинальной мощности и энергоемкости. За исключением задачи регулирования загрузки выпрямительных преобразователей номинальная мощность систем накопления не превышает 2,7 МВт, а номинальная энергоемкость — 2,3 МВт·ч. При регулировании загрузки выпрямительных преобразователей значения номинальной мощности и энергоемкости существенно выше и достигают значений 9,0 МВт и 3,0 МВт·ч соответственно. В большинстве рассмотренных случаев номинальные значения мощности и энергоемкости не превышают уровней 3,0 МВт и 3,0 МВт·ч соответственно.

Постановка задачи. Необходимо оценить энергетические параметры системы накопления электроэнергии для стабилизации напряжения на шинах поста секционирования переменного тока на основе результатов моделирования электротяговой нагрузки. Условия задачи — пакетный пропуск поездов по расчетному графику движения для двух вариантов реализации поста секционирования: пассивного и активного. Решение задачи выполняется для условий горного профиля пути при преобладании грузового движения на двухпутном участке без применения рекуперативного торможения (участок Западно-Сибирской железной дороги).

Описание условий моделирования. Моделирование взаимодействия электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения, содержащей системы накопления электроэнергии, выполняется на основе решения мгновенных схем, позволяющих для заданного графика движения поездов с заданным шагом расчетов получить изменение энергетических показателей.

Имитационная модель для системы тягового электроснабжения основана на схемах замещения силового оборудования тяговой подстанции, тяговой сети и электроподвижного состава.

Для расчетов энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения используются матричные методы (решение мгновенных схем с помощью топологических матриц). Наиболее распространенными среди используемых методов решения являются методы контурных токов и узловых потенциалов.

В матрично-топологических расчетах электрических схем используется понятие обобщенной ветви электрической цепи, которая образована двумя параллельными ветвями — э.д.с. ветви, комплексным сопротивлением или проводимостью ветви и источником

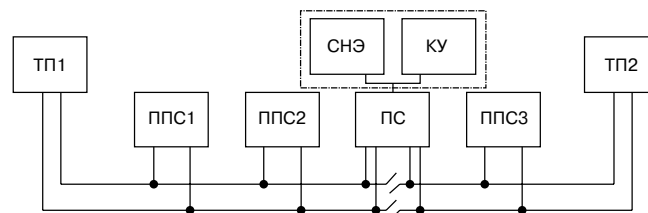


Рис. 1. Структурная схема межподстанционной зоны: ТП1, ТП2 — тяговые подстанции; ППС1–ППС3 — пункты параллельного соединения; ПС — пост секционирования; КУ — компенсирующее устройство; СНЭ — система накопления электроэнергии

Fig. 1. Block diagram of the inter-substation zone: ТП1, ТП2 — traction substations; ППС1–ППС3 — points of parallel connection; ПС — sectioning post; КУ — compensating device; СНЭ — electric storage system

тока. Указанные расчеты применяются в программном комплексе «Комплекс расчетов тягового электроснабжения» ВНИИЖТ [32]. Результаты расчетов энергетических показателей системы тягового электроснабжения получены на основе имитационного моделирования с интервалом дискретизации, равным 30 с. Оценка параметров системы накопления проиллюстрирована на примере одного из эксплуатационных участков с системой тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ, расположенного в границах Западно-Сибирской железной дороги.

Электротяговая нагрузка получена по результатам тяговых расчетов для локомотивов серии ВЛ80^С, которые эксплуатируются на указанном участке. Отсутствие рекуперативного торможения позволяет оценить наиболее тяжелый режим напряжения, в котором рекуперация не оказывает влияния на уровень напряжения. Преобразование пассивного поста секционирования в активный осуществляется путем его подключения к системе внешнего электроснабжения. Это позволяет использовать модель системы накопления с внешней характеристикой, идентичной характеристике тяговой подстанции, и определить максимальные параметры системы при принятии допущений об отсутствии ограничений мощности и энергоемкости.

Структурная схема рассматриваемой межподстанционной зоны приведена на рис. 1.

При проведении моделирования рассматриваются два варианта: вариант, в котором эксплуатируется пассивный пост секционирования с устройством поперечной компенсации, и вариант с активным постом секционирования, подключенным к системе внешнего электроснабжения.

Для определения необходимых параметров системы накопления электроэнергии принимаются допущения, позволяющие существенно упростить расчеты: на начальном этапе расчетов энергоемкость системы не ограничивается; режимы работы системы накопления

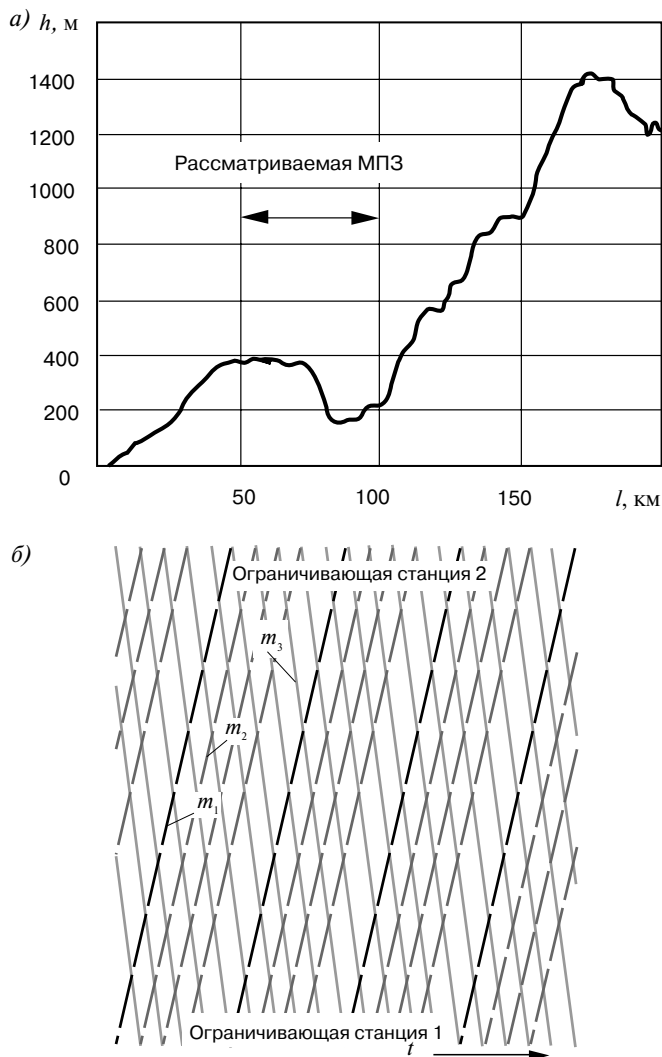


Рис. 2. Приведенный профиль пути (а) и расчетный график движения на рассматриваемом участке (б): h — высота профиля; l — протяженность; МПЗ — межподстанционная зона; m_1 – m_3 — массы поездов; t — время
Fig. 2. Proposed railway track (a) and the estimated traffic graph of the presented section (b): h — profile height; l — length; МПЗ — inter-substation zone; m_1 – m_3 — masses of trains; t — time

моделируются на основе двух расчетов, учитывающих включенное и отключенное состояние системы.

Профиль пути участка железной дороги с границами рассматриваемой межподстанционной зоны и расчетный график движения приведены на рис. 2.

Параметры графика движения, принятые для расчета: пакет состоит из четырех поездов и формируется по схеме «Н–с–с–с» (Н — поезд наибольшей массы $m_1 = 6685$ т; с — поезд средней массы $m_2 = 4190$ т) в одном направлении с интервалом 10 мин; в противоположном направлении — поток поездов с интервалом 12 мин (поезд средней массы $m_3 = 6490$ т). Ука-

занная схема пропуска поездов рассматривается при проверке энергетических показателей системы тягового электроснабжения на участках инфраструктуры, где обращаются поезда повышенной массы, а также для расчета пропускной способности.

На рассматриваемом участке контактная подвеска выполнена из проводов и тросов ПБСМ-70+МФ-100, рельсовая сеть — двухпутный участок с межпутными соединителями, рельсы типа Р65. Тип профиля пути на межподстанционной зоне — II, расчетный уклон составляет 9 ‰. Выбранная межподстанционная зона относится к одной из лимитирующих на участке.

Результаты расчетов. Для оценки энергетических показателей системы тягового электроснабжения тяговые расчеты выполнены для серий локомотивов, обращающихся на рассматриваемом участке (ВЛ80^с). Отсутствие систем рекуперативного торможения на эксплуатируемых сериях электропоездов позволяет рассмотреть наиболее тяжелые условия работы системы тягового электроснабжения при пропуске пакетов поездов в направлении наибольшего электропотребления и потока поездов средней массы во встречном направлении. Результаты тяговых расчетов для четного и нечетного направления для поездов с максимальной и средней массой приведены на рис. 3, где схематично указаны координаты расположения тяговых подстанций ТП1 и ТП2, ограничивающих рассматриваемую межподстанционную зону.

Режимы работы системы накопления. Результаты моделирования показывают, что при реализации расчетной схемы пропуска поездов напряжение на шинах поста секционирования при наличии устройства компенсации снижается ниже уровня 21 кВ и достигает 19 кВ. Проведенные измерения напряжения на посту секционирования (с помощью измерительно-вычислительного комплекса «Омск») показали, что уровень минимального напряжения на шинах поста в условиях эксплуатации (более легких условий формирования электротяговой нагрузки по сравнению с расчетными) достигает значений 21,5 кВ при отсутствии средств компенсации и уровня 23,0 кВ при работе регулируемого устройства компенсации типа СГРМ с максимальной мощностью до 6,7 Мвар [33, 34]. Регулируемые устройства компенсации реактивной мощности, получившие распространение на сети железных дорог, относятся к типу СГРМ или СТК, отличающихся способом регулирования. Если в первом типе устройств регулирование осуществляется за счет изменения тока в ветви с реактором, то во втором — за счет регулирования тока в ветви, содержащей батарею конденсаторов. Основным преимуществом указанных устройств является плавное

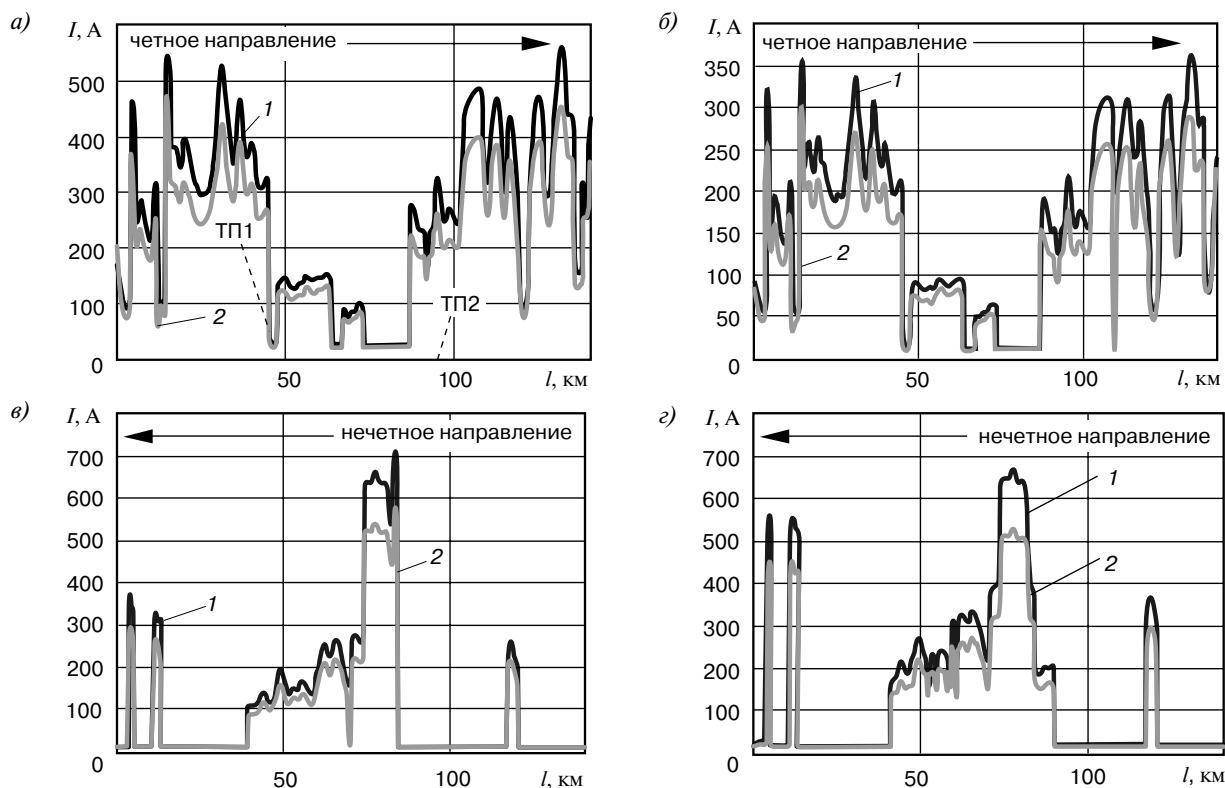


Рис. 3. Расчетные графики потребляемого тока I для поездов «Н» и «с» в четном (а, б) и нечетном (в, г) направлении соответственно: 1 — полный ток; 2 — активный ток

Fig. 3. Estimated graphs of the I consumed current for “H” and “c” trains in the even (a, b) and odd (c, d) direction, respectively: 1 — total current; 2 — active current

регулирование реактивной мощности и отсутствие явления перекомпенсации.

Результаты моделирования позволяют определить уровень напряжения на шинах поста секционирования в двух состояниях — активном и пассивном (рис. 4).

По результатам моделирования активная мощность поста секционирования изменяется в диапазоне от 9,7 до 15,0 МВт (рис. 5), реактивная — от 7,6 до 14,6 Мвар.

Наблюдаемые области значений полного тока по плечам питания и суммарного тока активного поста секционирования на диаграмме в полярных координатах показывают, что фазовые углы тока относительно напряжения преимущественно находятся в диапазоне от -30 до -60° (рис. 6).

Повышение коэффициента мощности системы накопления за счет управления преобразователями позволяет снизить требования к номинальной мощности и энергоемкости, а компенсацию реактивной мощности выполнить с помощью регулируемых устройств. Это, в свою очередь, позволяет снизить стоимость оборудования активного поста секционирования за счет более низкой стоимости средств компенсации и, кроме этого, решать задачи оптимальной работы двух устройств по

регулированию напряжения на шинах поста секционирования и повышению качества электроэнергии.

Оценка уровня компенсации реактивной мощности.

Результаты эксплуатации современных устройств поперечной компенсации реактивной мощности (6–8 Мвар) [33–35] показывают компенсацию напряжения в контактной сети около 2 кВ. Для поста секционирования мощность устройств компенсации определяется исходя из входных сопротивлений и требуемого значения компенсации падения напряжения в контактной сети [35–37].

Использование устройств компенсации совместно с системами накопления позволяет снизить требования к мощности и энергоемкости систем. В рассматриваемом случае при пакетном пропуске поездов потребляемая на посту секционирования реактивная мощность находится в диапазоне от 8 до 12 Мвар. Активная потребляемая мощность системы накопления для заданных условий формирования электротяговой нагрузки находится в диапазоне от 10 до 14 МВт. Перевод пассивного поста секционирования в активный совместно с компенсацией реактивной мощности позволяет компенсировать падение напряжения в контактной сети на 5 кВ (с 19 до 24 кВ).

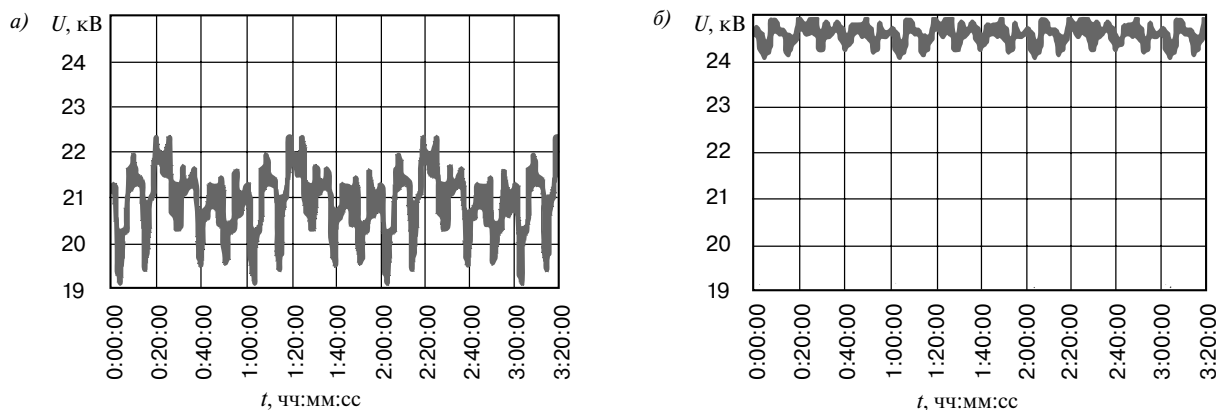
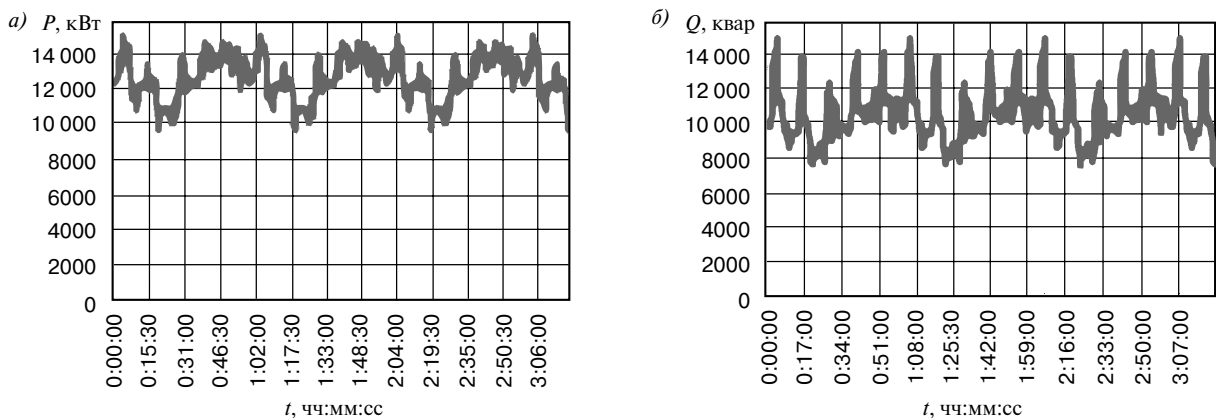
Рис. 4. График напряжения U на шинах поста секционирования:*a* — при пассивном режиме; *b* — при активном режимеFig. 4. Graph of the U voltage on the buses of the sectioning post:*a* — in the passive mode; *b* — in active mode

Рис. 5. Мощность активного поста секционирования:

a — активная P ; *b* — реактивная Q

Fig. 5. Power of the active sectioning post:

a — P active; *b* — Q reactive

Применение результатов расчетов для определения графика степени заряженности. Расчеты основаны на имитационном моделировании для двух вариантов работы поста секционирования. Расчет показателей системы накопления электроэнергии выполняется в три этапа. На начальном этапе выполняются расчеты для первого (для условий пассивного поста секционирования) и второго (для условий активного поста секционирования) вариантов. Второй вариант используется при расчетах, соответствующих смене состояния поста секционирования с пассивного на активное. На следующем этапе формируется синтезированный вариант расчетов, который позволяет определить энергетические показатели работы системы тягового электроснабжения. На третьем этапе для расчета показателей работы системы накопления на основе синтезированного варианта определяется степень заряженности, учитывающая предысторию режимов работы.

Изменение состояния поста секционирования, соответствующее режиму работы системы накопления, выполняется при снижении уровня напряжения на шинах ниже 21 кВ. При снижении напряжения ниже указанного уровня выполняется имитация работы активного поста секционирования, для чего используются результаты расчетов для второго варианта. При повышении напряжения выше уровня 21 кВ вновь используются результаты расчетов для первого варианта и т. д.

В обоих вариантах вычисления степени заряженности используются результаты расчетов по мгновенным схемам на промежутке времени более 3 ч с шагом 30 с. На основании расчетов строится график степени заряженности системы накопления исходя из текущих значений тока, напряжения и КПД системы на уровне 0,9. При пропуске пакета поездов с поездом повышенной массы для рассматриваемого участка создаются условия для преобладания разряда в графике степени заряженности. При реализации зарядной

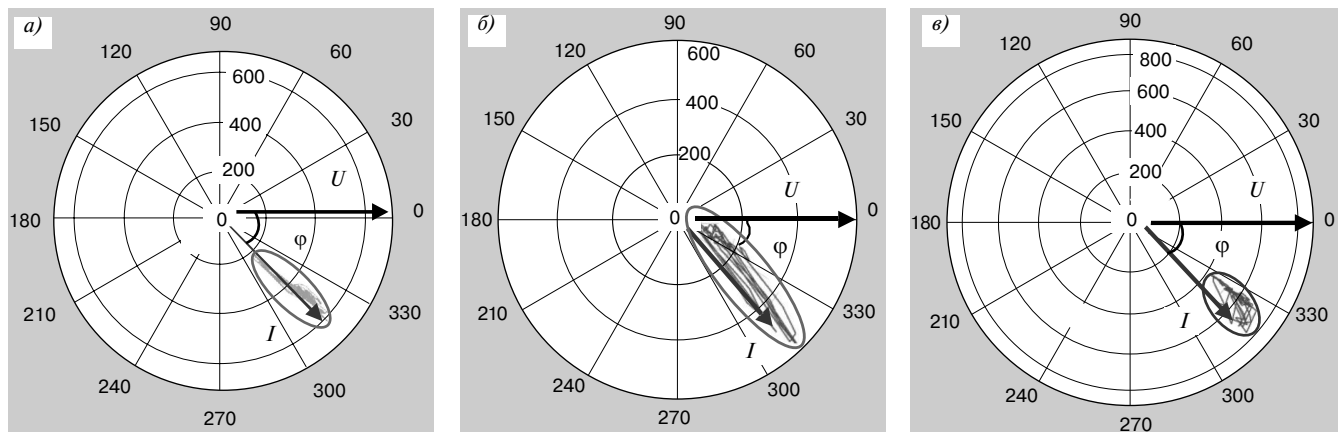


Рис. 6. Фазовые диаграммы тока для активного поста секционирования:

а — левого плеча; б — правого плеча; в — обоих плеч

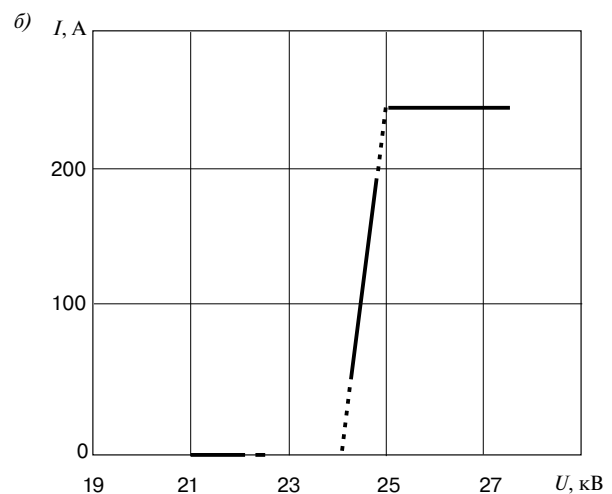
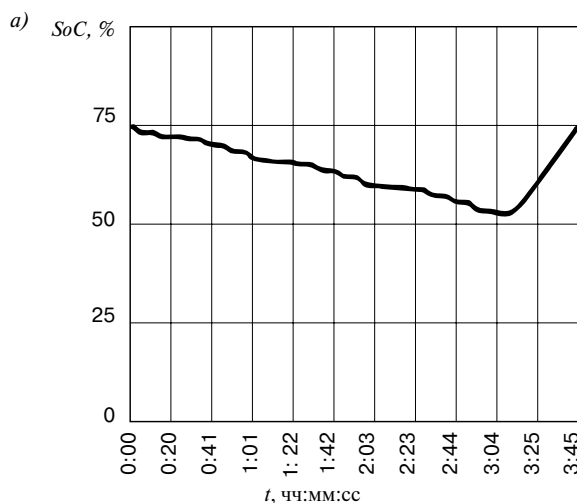
Fig. 6. Phase diagrams of the current for the active sectioning post:

а — left shoulder; б — right shoulder; в — both shoulders

характеристики для компенсации разряда обеспечивается заряд суммарным током на уровне 250 А при превышении уровня напряжения на шинах свыше 25 кВ (рис. 7), а в диапазоне от 24 до 25 кВ ток изменяется от 0 до 250 А по линейной характеристике.

Увеличение номинальной энергоемкости позволяет снизить глубину разряда для рассматриваемых условий формирования электротяговой нагрузки, и при возможности глубокого разряда номинальная энергоемкость системы составляет 1,0 МВт·ч. В случае ограничения глубины разряда до 30 % (для электрохимических видов накопителей) номинальная энергоемкость системы увеличивается до уровня 12,0 МВт·ч (рис. 8).

Обсуждение результатов. Выполненные расчеты позволяют сравнить полученные для постов секционирования результаты на участках постоянного и переменного тока. Для условий Октябрьской, Свердловской, Московской и Западно-Сибирской железных дорог (табл. 1) номинальная мощность системы накопления с электрохимическими источниками не превышает 2,7 МВт (мощность разряда определяется кратностью 2), для участков переменного тока (Западно-Сибирская железная дорога) — 6,3 МВт, а с учетом обеспечения номинальной разрядной мощности на уровне 15 МВт и кратности разряда, равной 2, мощность должна быть увеличена до 7,5 МВт (табл. 2). Требуемая номинальная энергоемкость

Рис. 7. График степени заряженности SoC для расчетной тяговой нагрузки (а) и зарядная характеристика системы накопления $I = f(U)$ на посту секционирования (б)Fig. 7. Graph of the SoC expected charge for the calculated traction load (а) and the $I = f(U)$ charging feature of the accumulation system at the sectioning post (б)

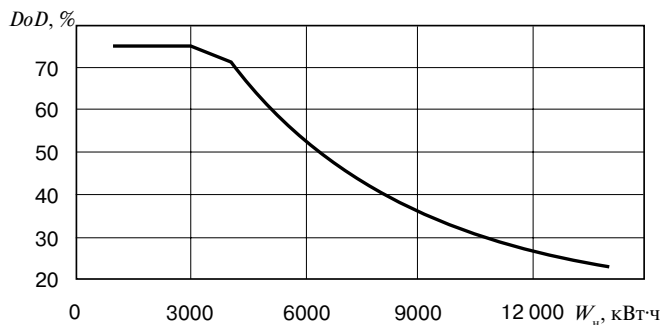


Рис. 8. Зависимость глубины разряда DoD от номинальной энергоемкости W_n
Fig. 8. Dependence of the DoD depth of discharge on the W_n nominal energy capacity

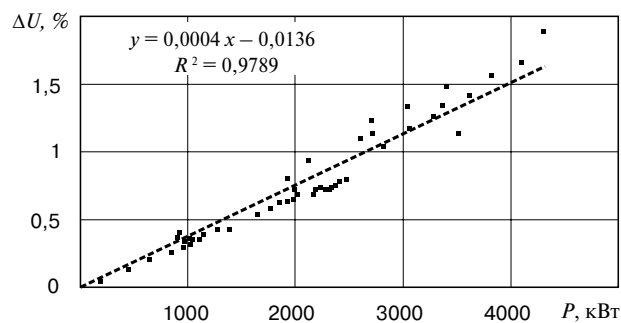


Рис. 9. Зависимость приращения напряжения ΔU от активной мощности P
Fig. 9. Dependence of the ΔU voltage increment on the P active power

для участков постоянного тока составляет 2,3 МВт·ч (табл. 1), для участка переменного тока — 12,0 МВт·ч (табл. 2).

При линейной интерполяции результатов соответствующий коэффициент функции $I = f(U)$ будет определяться по формуле

$$k = \frac{U_{\text{ш}}^{\text{вар}2} - U_{\text{ш}}^{\text{вар}1}}{I_{\text{ПС}}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ш}}^{\text{вар}1}$, $U_{\text{ш}}^{\text{вар}2}$ — напряжения на шинах поста секционирования, В, рассчитанные для первого и второго вариантов соответственно; $I_{\text{ПС}}$ — активный ток поста секционирования, А.

Таблица 2

Параметры и условия работы системы накопления для участков переменного тока

Table 2

Parameters and operating conditions of the accumulation system for AC sections

Условия работы и параметры	Западно-Сибирская ж. д.
Место размещения	ПС
Кол-во путей	2
Вид движения	Грузовое
Показатель нагрузочной способности системы тягового электро-снабжения	U_{min}
$P_{\text{нз}} / P_{\text{нр}}$, МВт	7,5/15,0
$W_{\text{н min}} / W_{\text{н max}}$, МВт·ч	1,0/12,0

Примечания: $P_{\text{нз}}$, $P_{\text{нр}}$ — номинальная мощность заряда и разряда соответственно; $W_{\text{н min}}$, $W_{\text{н max}}$ — минимальный и максимальный уровень номинальной энергоемкости соответственно.

Notes: $P_{\text{нз}}$, $P_{\text{нр}}$ — rated power of charge and discharge, respectively; $W_{\text{н min}}$, $W_{\text{н max}}$ — minimum and maximum levels of the nominal energy intensity, respectively.

Задав минимальный уровень напряжения на шинах поста секционирования, определяем требуемую активную мощность поста по уравнению линейной интерполяции:

$$P_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{min}}(U_{\text{min}} - U_i)}{k}, \quad (2)$$

где U_{min} , U_i — минимальное напряжение и текущее напряжение на шинах поста секционирования ниже минимального соответственно.

Построенный по результатам расчетов график изменения напряжения в зависимости от мощности поста секционирования позволяет оценить градиент приращения напряжения, который составил около 0,4 кВ/МВт (рис. 9).

Представленный эффект повышения напряжения на шинах поста секционирования получен для условий одновременной компенсации на них реактивной мощности.

Результаты оценки энергетических параметров системы накопления для решения задачи стабилизации уровня напряжения на шинах поста секционирования переменного тока, где одним из ключевых показателей нагрузочной способности системы тягового электро-снабжения выступает минимальное напряжение U_{min} (табл. 2), показывают их большие значения по сравнению со значениями, полученными при решении аналогичной задачи для участков постоянного тока, что обусловлено спецификой системы тягового электро-снабжения переменного тока.

Для адекватного сравнения следует использовать удельные характеристики, например удельную мощность и энергоемкость систем накопления на единицу протяженности межподстанционной зоны. Для системы тягового электроснабжения постоянного тока удельные значения мощности и энергоемкости для средней протяженности межподстанционной зоны

около 15 км составят 0,2 МВт/км и 0,2 МВт·ч/км соответственно, а для системы тягового электроснабжения переменного тока при средней протяженности межподстанционной зоны около 50 км — 0,15 МВт/км и 0,24 МВт·ч/км соответственно. Сравнение усредненных значений показывает меньшую удельную мощность и большую удельную энергоемкость для систем накопления на участках переменного тока. Оценка погонной мощности и энергоемкости получена для межподстанционной зоны, профиль пути которой относится к II типу, на участке с преобладанием грузового движения и обращения поездов повышенной массы.

Таким образом, для постов секционирования на участке переменного тока мощность систем накопления в режимах заряда/разряда в абсолютном выражении превышает аналогичную на участке постоянного тока более чем в два раза, а энергоемкость — более чем в пять раз (при ограничении глубины разряда до 30 %). В удельном выражении параметры систем накопления для сравниваемых условий сопоставимы.

Заключение. Выполненные для двух вариантов системы тягового электроснабжения расчеты для определения энергетических показателей позволяют синтезировать график нагрузки и напряжения на посту секционирования и на его основе оценить номинальные параметры и условия работы систем накопления в зависимости от выбранных пороговых напряжений и зарядной характеристики, учитывающей падение напряжения в контактной сети.

Использование систем накопления электроэнергии на постах секционирования совместно с устройствами поперечной компенсации делает возможным снижение номинальных параметров данных систем. Результаты оценки абсолютных и удельных значений мощности и энергоемкости показывают, что системы накопления в границах межподстанционных зон на участках переменного тока, профиль пути которых относится к типу II, в условиях преобладания грузового движения и высокой интенсивности перевозок являются более мощными и энергоемкими. В то же время при сравнении удельных значений мощности и энергоемкости к протяженности межподстанционных зон параметры систем накопления на участках переменного и постоянного тока сопоставимы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. A Load Flow Analysis for AC/DC Hybrid Distribution Network Incorporated with Distributed Energy Resources for Different Grid Scenarios / O. Khan [et al.] // *Energies*. 2018. Vol. 11, issue 2. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/en11020367>.
2. Wind power fluctuation compensation by variable speed pumped storage plant in a grid integrated system: Frequency spectrum analysis / Minxiao Han [et al.] // *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2019. Vol. 7, issue 2. P. 381–395. <https://doi.org/10.17775/cseejpes.2018.00580>.
3. Service restoration strategy of AC/DC hybrid distribution networks / Lou Chengwei [et al.] // *The Journal of Engineering*. 2019. Jan. P. 1–6. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8508>.
4. Optimal Sizing and Energy Management of Microgrids with Vehicle-to-Grid Technology: A Critical Review and Future Trends / O. Ouramdane [et al.] // *Energies*. 2021. Vol. 14 (14). P. 1–45. <https://doi.org/10.3390/en1414166>.
5. Increasing Power Supply Reliability for Auxiliaries of Subway Traction Substations Using Energy Storage Devices / M. V. Shevlyugin [et al.] // *Russian Electrical Engineering*. 2020. Vol. 91, no. 9. P. 552–556. <https://doi.org/10.3103/S1068371220090114>.
6. Modeling Onboard Energy Storage Systems for Hybrid Traction Drives / O. S. Valinsky [et al.] // *Russian Electrical Engineering*. 2020. Vol. 91, no. 10. P. 604–608. <https://doi.org/10.3103/S1068371220100119>.
7. Не́зевак В.Л. Расчет параметров и показателей работы системы накопления электроэнергии на участках с рекуперативным торможением электроподвижного состава // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2021. № 1 (81). С. 149–160. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_1_149.
8. Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers / An Luo [et al.] // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011. Vol. 26 (10). P. 2844–2856. <https://doi.org/10.1109/tpel.2011.2128888>.
9. Electric railway smart microgrid system with integration of multiple energy systems and power-quality improvement / Chen Feng [et al.] // *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 199. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107459>.
10. An Energy Storage System for Recycling Regenerative Braking Energy in High-Speed Railway / Junyu Chen [et al.] // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020. March. P. 1–10. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2020.2980018>.
11. Грузовой электровоз 2ЭС7 «Уральские локомотивы» [Электронный ресурс]. URL: <https://ulkm.ru/produkcija/gruzovoj-elektrovoz-2es7> (дата обращения: 15.11.2021).
12. Новый магистральный электровоз 2ЭС7 для тяжеловесного движения // *Мир транспорта*. 2017. № 1 (68). С. 75.
13. IGCT — появление новой технологии для сверхмощных экономически эффективных преобразователей / Р. К. Steimer [и др.] // *Электротехника*. 1999. № 4. С. 10–18.
14. Крюков А. В., Черепанов А. В., Шафиков А. Р. Моделирование несинусоидальных режимов в системах электроснабжения железных дорог при движении локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2018. № 4 (60). С. 99–108. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.4\(60\).99-108](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.4(60).99-108).
15. Юдина Н. Ю., Брусенцова О. Ю., Пупынин В. Н. Усиление системы тягового электроснабжения участков железных дорог, электрифицированных на постоянном токе 3,3 кВ, путем перевода на переменный ток 25 кВ с реализацией схемы распределенного питания // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2015. № 2. С. 42–45.
16. Патент № 47152 Российская Федерация, МПК H02P 13/06, H01F 29/02. Трансформаторный агрегат с регулированием напряжения для электрифицированных железных дорог переменного тока: № 2005114442/22: заявл. 11.05.2005; опубл. 10.08.2005 / Аржанников Б. А., Пышкин А. А., Григорьев В. Ф. 12 с.
17. Установки поперечной емкостной компенсации с фильтрацией и демпфированием высших гармоник в тяговых сетях переменного тока / Л. А. Герман [и др.] // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2014. № 1. С. 47–54.
18. Штанг А. А., Ярославцев М. В. Контактно-аккумуляторный маневровый электровоз с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2016. № 1. С. 13–16.

19. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Никитин В.В. Применение накопителей энергии для повышения энергетической эффективности тягового подвижного состава // *Электротехника*. 2018. № 10. С. 21–25.
20. Незевак В.Л. Сравнение вариантов применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе // *Транспорт: наука, техника, управление*. Научный информационный сборник. 2020. № 9. С. 17–23. <https://doi.org/10.36535/023619142020094>.
21. Шапшал А.С., Зак В.В., Некрасов Е.В. Определение расхода электроэнергии на тягу грузовых поездов в условиях сложного профиля пути // *Инновации, перспективы развития локомотиво- и вагоностроения: сб. тр. молодых ученых, докторантов и аспирантов; под ред. И.С. Морозкина*. Ростов н/Д: Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2008. С. 28–32.
22. Гвоздик Е.А. Исследование влияния профиля пути на расход энергии в метрополитене // *Вопросы развития мировых научных процессов: Междунар. научн.-практ. конф. (Кемерово, 15 марта 2019 г.)*. Кемерово: Западно-Сибирский научный центр, 2019. С. 55–57.
23. Ушаков С.Ю., Вильгельм А.С., Никифоров М.М. Оценка эффективности использования электроэнергии на тягу поездов в границах полигона Московского Центрального кольца // *Вестник транспорта Поволжья*. 2019. № 5 (77). С. 40–49.
24. Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Ushakov S.Y. Assessment of Train Traction Electric Energy Losses // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok, 3–4 October 2018. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 8602528. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602528>.
25. Tretyakov E.A., Cheremisin V.T., Golovnev G.E. Re-configuration of intelligent electrical distribution networks of railways // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Vol. 760: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019)*, Moscow, 12–15 November 2019. Moscow: IOP Publishing Ltd, 2020. P. 012059. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/760/1/012059>.
26. Незевак В.Л. Условия работы системы накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении постоянного тока однопутных участков железных дорог // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2021. Т. 80, № 4. С. 216–224. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-216-224>.
27. Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электроснабжения постоянного тока / Б.А. Аржанников [и др.] // *Электротехника*. 2016. № 9. С. 51–57.
28. Влияние интервала движения на вероятность межпоездного обмена энергией рекуперации в метрополитене / К.И. Куликов [и др.] // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. 2017. № 2 (35). С. 53–60. <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2017-2-53-60>.
29. Модель совмещенной тяговой подстанции метрополитена с учетом тяговой нагрузки и потребителей собственных нужд / Л.М. Клячко [и др.] // *Электротехника*. 2021. № 9. С. 22–25.
30. Erhan K., Özdemir E. Prototype production and comparative analysis of high-speed flywheel energy storage systems during regenerative braking in hybrid and electric vehicles // *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 43. P. 103237. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103237>.
31. Battery degradation minimization oriented energy management strategy for plug-in hybrid electric bus with multi-energy storage system / Jiuyu Du [et al.] // *Energy*. 2018. Vol. 165. P. 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.084>.
32. Марский В.Е. Определение пропускной способности железнодорожных участков по устройствам тягового электроснабжения // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2014. № 1. С. 40–46.
33. Черемисин В.Т., Никонов А.В. Оценка энергоэффективности статического генератора реактивной мощности // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2016. № 2 (62). С. 128–134.
34. Черемисин В.Т., Никонов А.В. Сравнение энергетических показателей регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности в условиях эксплуатации на постах секционирования // *Транспорт Урала*. 2018. № 1 (56). С. 30–34.
35. Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка на посту секционирования контактной сети / Л.А. Герман [и др.] // *Интеллектуальная электротехника*. 2021. № 3 (15). С. 23–36. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_3_23.
36. Кондратьев Ю.В., Тарасенко А.В. Выбор мощности и места размещения устройств поперечной компенсации реактивной мощности // *Известия Транссиба*. 2015. № 2 (22). С. 79–87.
37. Герман Л.А. Эффективность регулируемых малоступенчатых фильтрокомпенсирующих установок в тяговой сети переменного тока // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2018. Т. 77, № 5. С. 288–294. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-288-294>.

REFERENCES

1. Khan O., Jamali S.Z., Noh Ch., et al. A Load Flow Analysis for AC/DC Hybrid Distribution Network Incorporated with Distributed Energy Resources for Different Grid Scenarios. *Energies*. 2018;11(2):1–15. <https://doi.org/10.3390/en11020367>.
2. Han M., Bitew G.T., Mekonnen S.A., Yan W. Wind power fluctuation compensation by variable speed pumped storage plant in a grid integrated system: Frequency spectrum analysis. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2019;7(2):381–395. <https://doi.org/10.17775/cseejpes.2018.00580>.
3. Lou Chengwei, Zhang Lu, Zhang Xiaohui et al. Service restoration strategy of AC/DC hybrid distribution networks. *The Journal of Engineering*. 2019;(Jan.):1–6. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8508>.
4. Ouramdane O., Elbouchikhi E., Amirat Ya., Sedgh Gooya E. Optimal Sizing and Energy Management of Microgrids with Vehicle-to-Grid Technology: A Critical Review and Future Trends. *Energies*. 2021;14(14):1–45. <https://doi.org/10.3390/en14144166>.
5. Shevlyugin M.V., Golitsyna A.E., Belov M.N., Pletnev D.S. Increasing Power Supply Reliability for Auxiliaries of Subway Traction Substations Using Energy Storage Devices. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(9):552–556. <https://doi.org/10.3103/S1068371220090114>.
6. Valinsky O.S., Titova T.S., Nikitin V.V., Evstafev A.M. Modeling Onboard Energy Storage Systems for Hybrid Traction Drives. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(10):604–608. <https://doi.org/10.3103/S1068371220100119>.
7. Nezevak V.L. Raschet parametrov i pokazateley raboty sistemy nakopleniya elektroenergii na uchastkakh s rekuperativnym tormozheniem elektropodvizhnogo sostava [Calculation of parameters and indicators of the operation of the system of accumulation of electricity in areas with regenerative braking of electric rolling stock]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya = Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2021;1(81):149–160. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_1_149. (In Russ.).
8. Luo A., Wu Ch., Shen J., et al. Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011;26(10):2844–2856. <https://doi.org/10.1109/tpel.2011.2128888>.
9. Feng Ch., Gao Zh., Sun Ya., Chen P. Electric railway smart microgrid system with integration of multiple energy systems and power-quality improvement. *Electric Power Systems Research*. 2021;(199):1–13. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2021.107459>.
10. Chen J., Hu H., Wang K., et al. An Energy Storage System for Recycling Regenerative Braking Energy in High-Speed Railway.

IEEE Transactions on Power Delivery. 2020;(March):1–10. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2020.2980018>.

11. Gruzovoy elektrovov 2ES7 “Ural'skie lokomotivy” [Freight electric locomotive 2ES7 “Ural locomotives”]. URL: <https://ulkm.ru/produkciya/gruzovoy-elektrovov-2es7> (access date: 15.11.2021). (In Russ.).

12. Novyy magistral'nyy elektrovov 2ES7 dlya tyazhelovesnogo dvizheniya [New mainline electric locomotive 2ES7 for heavy haul traffic]. *Mir transporta = World of Transport and Transportation*. 2017;1(68):75. (In Russ.).

13. Steimer P. K., Gruning H. E., Werninger J., et al. IGCT — poyavleniye novoy tekhnologii dlya sverkhmoshchnykh ekonomicheskikh effektivnykh preobrazovateley [IGCT — emergence of a new technology for high-power cost-effective converters]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 1999;(4):10–18. (In Russ.).

14. Kryukov A. V., Cherepanov A. V., Shafikov A. R. Modelirovaniye nesinusoidal'nykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog pri dvizhenii lokomotivov s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami [Modeling of non-sinusoidal regimes in railway power supply systems during the operation of locomotives with asynchronous traction motors]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2018;(60):99–108. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.4\(60\).99-108](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.4(60).99-108). (In Russ.).

15. Yudina N. Yu., Brusentsova O. Yu., Pupynin V. N. Usileniye sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastkov zheleznykh dorog, elektrifitsirovannykh na postoyannom toke 3,3 kV, putem perevoda na peremennyy tok 25 kV s realizatsiyey skhemy raspredeleniya pitaniya [Strengthening the traction power supply system for railway sections electrified at 3.3 kV DC by transferring to 25 kV AC with the implementation of a distributed power scheme]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost' = Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry*. 2015;(2):42–45. (In Russ.).

16. Arzhannikov B. A., Pyshkin A. A., Grigor'ev V. F. Transformatornyy agregat s regulirovaniyem napryazheniya dlya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka [Transformer assembly with voltage regulation for electrified AC railways]. Patent no. 47152 Rossiyskaya Federatsiya [Russian Federation], MPK H02P 13/06, H01F 29/02, publ. 08.10.2005, 12 p. (In Russ.).

17. German L. A., Serebryakov A. S., Ermolenko D. V., et al. Ustanovki poperechnoy emkostnoy kompensatsii s fil'tratsiyey i dempfirovaniyem vysshikh garmonik v tyagovykh setyakh peremennogo toka [Installations for capacitive shunt compensation with filtration and damping of higher harmonics within the AC traction networks]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2014;(1):47–54. (In Russ.).

18. Shtang A. A., Yaroslavtsev M. V. Kontaktno-akkumulyatornyy manevrovyy elektrovov s nakopitelem energii na osnove litii-ionnykh akkumulyatorov [Contact-battery shunting electric locomotive with an energy storage device based on lithium-ion batteries]. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta = Electronics and electrical equipment of transport*. 2016;(1):13–16. (In Russ.).

19. Titova T. S., Evstaf'ev A. M., Nikitin V. V. Primeneniye nakopiteley energii dlya povysheniya energeticheskoy effektivnosti tyagovogo podvizhnogo sostava [Application of energy storage devices to improve the energy efficiency of traction rolling stock]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2018;(10):21–25. (In Russ.).

20. Nezevak V. L. Sravneniye variantov primeneniya nakopiteley elektroenergii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya i na elektropodvizhnom sostave [Comparison of options for the use of energy storage devices in the traction power supply system and on electric rolling stock]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye. Nauchnyy informatsionnyy sbornik = Transport: science, equipment, management. Scientific Information Collection*. 2020;(9):17–23. <https://doi.org/10.36535/023619142020094>. (In Russ.).

21. Shapshal A. S., Zak V. V., Nekrasov E. V. Opredeleniye raskhoda elektroenergii na tyagu gruzovykh poezdov v usloviyakh slozhnogo pro-

fil'ya puti [Determination of electricity consumption for traction of freight trains in conditions of a complex track profile]. *Innovatsii, perspektivy razvitiya lokomotivo- i vagonostroeniya: sb. tr. molodykh uchenykh, doktorantov i aspirantov; pod red. I. S. Morozkina [Innovations, prospects for the development of locomotive and car building: Coll. of proceedings of young scientists, doctoral students and graduate students; ed. by I. S. Morozkin]*. Rostov-on-Don: Rostovskiy gos. un-t putey soobshcheniya [Rostov state Transport University] Publ.; 2008. P. 28–32. (In Russ.).

22. Gvozdk E. A. Issledovaniye vliyaniya profilya puti na raskhod energii v metropolitene [Study of the influence of the track profile on energy consumption in the subway]. *Voprosy razvitiya mirovykh nauchnykh protsessov: Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. (Kemerovo, 15 marta 2019 g.) [Issues of the development of world scientific processes: International scientific and practical conference (Kemerovo, March 15, 2019)]*. Kemerovo: Zapadno-Sibirskiy nauchnyy tsentr [West Siberian Scientific Center] Publ.; 2019. P. 55–57. (In Russ.).

23. Ushakov S. Yu., Vil'gel'm A. S., Nikiforov M. M. Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya elektroenergii na tyagu poezdov v granitsakh poligona Moskovskogo Tsentral'nogo kol'tsa [Evaluation of the efficiency of using electricity for train traction within the boundaries of the Moscow Central Circle test site]. *Vestnik transporta Povolzh'ya = Bulletin of Transport of the Volga Region*. 2019;5(77):40–49. (In Russ.).

24. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Ushakov S. Y. Assessment of Train Traction Electric Energy Losses. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok, October 3–4, 2018. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2018. P. 8602528. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602528>.

25. Tretyakov E. A., Cheremisin V. T., Golovnev G. E. Reconfiguration of intelligent electrical distribution networks of railways. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Vol. 760: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019), Moscow, November 12–15, 2019. Moscow: IOP Publishing Ltd; 2020. P. 012059. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/760/1/012059>.

26. Nezevak V. L. Usloviya raboty sistemy nakopleniya elektroenergii v tyagovom elektrosnabzhenii postoyannogo toka odnopusnykh uchastkov zheleznykh dorog [Operating conditions of electric energy storage system in DC traction power supply for single-track sections of railways]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2021;80(4):216–224. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-216-224>. (In Russ.).

27. Arzhannikov B. A., Bader M. P., Burkov A. T., et al. Sovershenstvovaniye osnovnykh trebovaniy k sisteme i ustroystvam tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka [Improvement of the main requirements for the system and devices of DC traction power supply]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2016;(9):51–57. (In Russ.).

28. Kulikov K. I., Spiridonov E. A., Ponomarev K. E., Lange-man E. G. Vliyaniye intervala dvizheniya na veroyatnost' mezhpoezdnoy obmena energiyey rekuperatsii v metropolitene [Influence of the interval of movement on the probability of inter-train exchange of recuperation energy in the subway]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii = Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation*. 2017;2(35):53–60. <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2017-2-53-60>. (In Russ.).

29. Klyachko L. M., Shevlyugin M. V., Belov M. N., Golitsyna A. E. Model' sovmeshchennoy tyagovoy podstantsii metropolitena s ucheto tyagovoy nagruzki i potrebiteley sobstvennykh nuzhd [Model of a combined traction substation of the subway, taking into account the traction load and consumers of their own needs]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2021;(9):22–25. (In Russ.).

30. Erhan K., Özdemir E. Prototype production and comparative analysis of high-speed flywheel energy storage systems during regenerative braking in hybrid and electric vehicles. *Journal of Energy Storage*. 2021;(43):103237. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103237>.

31. Du J., Zhang X., Wang T., et al. Battery degradation minimization oriented energy management strategy for plug-in hybrid electric bus with multi-energy storage system. *Energy*. 2018;(165):153–163. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.084>.

32. Marskiy V.E. Opredelenie propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnykh uchastkov po ustroystvam tyagovogo elektrosnabzheniya [Determination of the throughput capacity of railway sections by traction power supply devices]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2014;(1):40–46. (In Russ.).

33. Cheremisin V.T., Nikonov A.V. Otsenka energoeffektivnosti staticheskogo generatora reaktivnoy moshchnosti [Evaluation of the energy efficiency of a static reactive power generator]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya = Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2016;2(62):128–134. (In Russ.).

34. Cheremisin V.T., Nikonov A.V. Sravnenie energeticheskikh pokazateley reguliruemyykh ustroystv poperechnoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v usloviyakh ekspluatatsii na postakh sektionirovaniya [Comparison of energy indicators of adjustable devices for transverse reactive power compensation in operating conditions at sectioning stations]. *Transport Urala = Transport of the Urals*. 2018;1(56):30–34. (In Russ.).

35. German L.A., Goncharenko V.P., Karabanov A.A., Kovtun A.V. Perekluchayemaya fil'trokompensiruyushchaya ustanovka na postu sektionirovaniya kontaktnoy seti [Switchable filter-compensating installation at the sectioning post of the contact network]. *Intellektual'naya elektrotehnika = Smart Electrical Engineering*. 2021;3(15):23–36. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_3_23. (In Russ.).

36. Kondrat'ev Yu.V., Tarasenko A.V. Vybora moshchnosti i mesta razmeshcheniya ustroystv poperechnoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Choice of power and placement of devices for transverse reactive power compensation]. *Izvestiya Transsiba = Proceedings of Transsib*. 2015;2(22):79–87. (In Russ.).

37. German L.A. Effektivnost' reguliruemyykh malostupenchatykh fil'trokompensiruyushchikh ustanovok v tyagovoy seti peremennogo toka

[Efficiency of adjustable few-stage filter compensating installations in AC traction network]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2018;77(5):288–294. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-288-294>. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Владислав Леонидович НЕЗЕВАК,

канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «ОмГУПС», AuthorID: 393961, <https://orcid.org/0000-0002-1205-1994>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladislav L. NEZEVAK,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, FGBOU VO "OmGUPS", AuthorID: 393961, <https://orcid.org/0000-0002-1205-1994>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The author has read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 06.12.2021, первая рецензия получена 08.12.2021, вторая рецензия получена 24.12.2021, принята к публикации 27.12.2021.

The article was submitted 06.12.2021, first review received 08.12.2021, second review received 24.12.2021, accepted for publication 27.12.2021.

ПОДПИСКА

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

Подписной индекс журнала — 70116.

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (495) 602-84-56, e-mail: journal@vniizht.ru. Информация о подписке размещена на сайте журнала www.journal-vniizht.ru.

Подписчики стран ближнего и дальнего зарубежья могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» (Ural-Press, export@ural-press.ru).