Условия работы системы накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении постоянного тока однопутных участков железных дорог

В. Л. НЕЗЕВАК

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО «ОмГУПС»), Омск, 644046, Россия

Аннотация. Рассматриваются вопросы применения системы накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении постоянного тока однопутного участка. Приведен обзор основных направлений отечественных и зарубежных исследований в области применения этих систем для повышения пропускной способности и энергетической эффективности систем электроснабжения. Моделирование работы системы накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении основано на расчете графиков нагрузки в границах межподстанционных зон, формируемых в зависимости от условий пропуска поездов и тяговой нагрузки на участке железной дороги. Рассмотрены основные положения метода выбора мест размещения и определения параметров системы накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении. На примере одной из межподстанционных зон Свердловской железной дороги показано влияние мощности активного поста секционирования на повышение минимального уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава. Приведены графики степени заряженности и соответствующие им частотные распределения, позволяющие оценить условия работы системы накопления электроэнергии в зависимости от условий формирования тяговой нагрузки, а также графики нагрузки системы накопления электроэнергии и соответствующие им зарядные характеристики для условий работы на посту секционирования. На примере рассматриваемого участка показана зависимость глубины разряда системы накопления электроэнергии от номинальной энергоемкости. По результатам расчетов выполнена оценка вариантов пропуска пакетов поездов в четном и нечетном направлении в сравнении с графиком исполненного движения. Получен диапазон изменения номинальных значений мощности и энергоемкости системы накопления электроэнергии. Выполнено сравнение параметров системы накопления для однопутных и двухпутных участков железных дорог, в том числе с преобладанием пассажирского движения.

Ключевые слова: тяговое электроснабжение; система накопления электроэнергии; однопутный участок; постоянный ток; пост секционирования; зарядная характеристика; степень заряженности

Введение. Повышение качественных и количественных показателей железных дорог непосредственно связано с ростом скоростей движения, масс составов и объемов грузовых и пассажирских перевозок. Данное обстоятельство для электрифицированных участков железных дорог приводит к росту тяговой нагрузки и

увеличению потерь напряжения и мощности в системе тягового электроснабжения. Для повышения нагрузочной способности устройств и энергетической эффективности системы тягового электроснабжения разрабатываются специальные мероприятия, к числу которых традиционно относят повышение мощности силового оборудования или замену оборудования на аналоги с более высокими технико-экономическими показателями, увеличение сечения тяговой сети, использование специальных устройств и др.

На решение указанных задач ориентировано и применение систем накопления электроэнергии, позволяющих использовать неравномерность графика электротяговой нагрузки и рекуперацию электроподвижного состава для повышения нагрузочной способности и энергетической эффективности системы тягового электроснабжения.

Условия применения систем накопления электроэнергии на различных участках железных дорог отличаются друг от друга, что связано с объемами перевозок и условиями пропуска поездов. При проведении технико-экономической оценки эффективности внедряемого мероприятия исходят из возможности повышения пропускной и провозной способности участка железной дороги за счет повышения нагрузочной способности системы тягового электроснабжения. Расчетные условия формирования электротяговой нагрузки на одно- и двухпутных участках определяют различные параметры системы накопления электроэнергии.

Обзор выполненных исследований. Результаты отечественных и зарубежных исследований в области применения систем накопления электроэнергии на железнодорожном транспорте показывают техническую эффективность данного мероприятия [1–7]. В настоящее время реализован ряд пилотных проектов по созданию автономного гибридного и электрического подвижного состава с использованием различных видов накопителей электроэнергии. Системы накопления электроэнергии нашли применение в тяговом электроснабжении метрополитенов, городского

транспорта, пригородного транспорта разных стран (Китай, Япония, США, Германия, Россия и др.). Техническая эффективность данных систем проявляется в стабилизации уровня напряжения, выравнивании графика нагрузки, повышении эффективности применения рекуперативного торможения, надежности электроснабжения и др. Применение систем накопления электроэнергии на магистральных линиях железнодорожного транспорта в настоящее время сдерживается их стоимостью, большим количеством, связанным со значительной протяженностью электрифицированных путей, и высокими требованиями к энергетическим параметрам.

Анализ зарубежных исследований, выполненных в области влияния систем накопления электроэнергии на показатели работы существующей инфраструктуры, позволяет выделить несколько научных направлений, среди которых следует отметить следующие: доработка схем замещения и методов расчета энергетических показателей [8, 9]; моделирование движения поезда и работы системы тягового электроснабжения для определения энергетических показателей [10–12]; расчеты по укрупненным показателям в условиях моделирования крупных систем и взаимодействия тягового электроснабжения с другими системами электроснабжения, например на основе возобновляемых источников [13–16]; моделирование работы систем накопления с различной топологией и преобразователями; выбор вида накопителя и оценка показателей его работы [17]; оптимизация режимов работы систем накопления [18]; совершенствование методов расчета на основе применения различного математического аппарата [19].

Работа систем накопления электроэнергии рассматривается в различных аспектах: применение в условиях рынка электрической энергии, сетях распределенной генерации, использование энергии рекуперации, применение в качестве бортовых систем электроподвижного состава, выбор мест размещения систем [20–26].

Аналогичные работы в области применения систем накопления электроэнергии были выполнены и российскими исследователями [27–35].

Методика определения параметров системы накопления электроэнергии. Моделирование режимов работы системы накопления основано на построении схемы замещения электроподвижного состава и объектов системы тягового электроснабжения, в том числе системы накопления. Усовершенствованный метод расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения с учетом системы накопления электроэнергии, приведенный в [36], опирается на предложенные порядок расчетов и алгоритмы управления режимами, разработанные на основе дополненных схем замещения.

Определение параметров системы накопления электроэнергии на однопутных участках выполняется

на основе тяговой нагрузки, условия формирования которой отличаются от условий ее формирования для двухпутных участков. Указанные различия обусловлены параметрами системы тягового электроснабжения сравниваемых участков и условиями пропуска электроподвижного состава.

В ряде случаев результаты расчетов по определению параметров устройств системы тягового электроснабжения для пакетной организации движения в условиях пропуска поездов повышенной массы существенно отличаются от действующих условий пропуска поездов на участке. При определении параметров на перспективу данное обстоятельство может привести к выбору системы накопления с избыточными характеристиками.

Применение систем накопления направлено на решение задач по повышению напряжения в контактной сети лимитирующих межподстанционных зон, что позволяет обеспечить заданный уровень пропускной и провозной способности. При выборе мест размещения и параметров систем накопления предлагается использовать методику, включающую следующие этапы.

1. Определение задачи, сбор исходных данных.
2. Проведение тяговых расчетов для заданных условий движения поездов.

Выполнение расчетов производится для условий приведенного профиля пути с указанием мест постоянного ограничения скорости.

3. Выполнение электрических расчетов:
 - а) определение потенциала рекуперации по объектам системы тягового электроснабжения;
 - б) определение особенностей режимов питания межподстанционных зон;
 - в) проведение электрических расчетов для расчетной схемы движения поездов.

Ресурс работы накопителя электроэнергии в системе определяется на основе анализа эпизодичности с учетом пороговых напряжений.

4. Определение энергоемкости, мощности и режимов работы системы накопления [37].
5. Определение вида накопителей электроэнергии для системы и уточнение параметров, в том числе гибридных систем [38].

6. Сравнение показателей для различных вариантов электротяговой нагрузки.

Для повышения энергетической эффективности тягового электроснабжения необходимо обеспечить условия приема избыточной энергии рекуперации.

7. Техничко-экономическое сравнение вариантов.
- Выбор конкурирующих вариантов размещения устройств при достижении заданных энергетических показателей работы производится на основе укрупненных показателей стоимости системы накопления электроэнергии, в качестве которых используются удельная стоимость мощности и энергоемкости, номинальная энергоемкость.

Рис. 1. Изменение приращения напряжения на токоприемнике $\Delta U_{3\min}$ при пропуске пакетов поездов в четном (а) и нечетном (б) направлении в зависимости от мощности системы накопления P

Fig. 1. Change in the voltage increment at $\Delta U_{3\min}$ pantograph when passing train packets in the even (a) and odd (b) direction, depending on the power of the storage system P

Рассмотрение условий работы системы накопления электроэнергии. Полученные результаты расчетов для условий работы системы накопления электроэнергии для однопутных участков проиллюстрированы на примере однопутного участка Свердловской железной дороги со смешанным движением и преобладанием грузового. Профиль пути в границах рассматриваемого участка относится к четвертому типу, расчетный подъем составляет 9‰. Максимальная масса поезда на расчетном участке составляет 6300 т. Для расчетов принимается график движения с пакетной организацией пропуска поездов.

Влияние мощности активного поста секционирования на напряжение. Преобразование поста секционирования в активный позволяет создать дополнительный источник мощности в границах межподстанционной зоны, который оказывает влияние на показатели нагрузочной работы системы тягового электроснабжения, в частности на уровень напряжения. В качестве примера можно привести зависимость прироста напряжения на токоприемнике для рассматриваемой межподстанционной зоны Свердловской железной

дороги от мощности, размещаемой на посту секционирования (рис. 1).

Мощность, требуемая на посту секционирования для поддержания минимального напряжения на токоприемнике для рассматриваемой межподстанционной зоны, составляет 7,6 МВт, ток разряда $I_{3\min} = 2,3$ кА при принятии порогового напряжения для режима разряда $U_{\text{раз}} = 3300$ В. Номинальная энергоемкость литий-ионной батареи для рассматриваемых условий без учета условий заряда и глубины разряда при принятой кратности токов разряда $2C_n$ составит 3800 кВт·ч.

Аналогичные расчеты для других межподстанционных зон позволяют оценить требуемую мощность, размещаемую на постах секционирования для поддержания уровня минимального напряжения, в диапазоне от 6,3 до 12,5 МВт.

Определение основных показателей работы. Результаты электрических расчетов нагрузки системы тягового электроснабжения позволяют построить графики степени заряженности и соответствующие им частотные распределения для системы накопления для случаев пропуска пакетов поездов в четном и нечетном направлении и для графика исполненного движения (рис. 2). Полученные результаты свидетельствуют о различных условиях работы подобных систем, в графике степени заряженности которых SoC преобладает разряд.

Максимальные токи заряда для номинальной энергоемкости системы на уровне 7000 кВт·ч при преобладании заряда в графике степени заряженности ($\Delta SoC \geq 0$) составляют 1600 А при пропуске пакетов поездов в четном и нечетном направлении (рис. 3, а, б). Для расчета по графику исполненного движения поездов (рис. 3, в) за отчетные сутки требуемая номинальная энергоемкость снижается до уровня 1000 кВт·ч (см. таблицу), а ток заряда — до 100 А (рис. 3, г). Расчет степени заряженности для различных условий накопления позволяет получить зависимость изменения глубины разряда DoD от номинальной энергоемкости для рассмотренного участка при пропуске пакетов поездов в четном и нечетном направлении, а также для графика исполненного движения (рис. 4).

При выборе видов накопителей для системы накопления электроэнергии следует рассматривать электрические и механические накопители, для которых глубина разряда не оказывает критического воздействия на их ресурс работы (10^6 циклов и выше против 10^3 – 10^4 циклов у накопителей на литий-ионных аккумуляторах).

При применении литий-ионных аккумуляторов для системы накопления с учетом ограничения глубины разряда до критического значения (30 %) для рассматриваемого участка номинальная энергоемкость должна быть не менее 2300 кВт·ч, мощность

Рис. 2. Графики степени заряженности SoC и соответствующие им частотные распределения p при пропуске пакетов поездов в четном (а, б) и нечетном (в, г) направлении и для графика исполненного движения за сутки (д, е)
 Fig. 2. Graphs of the state of charge of SoC and the corresponding frequency distributions p when passing train packages in the even (a, б) and odd (в, г) direction and for the schedule of the performed train operation per day (д, е)

разряда — не менее 3,2 МВт, заряда — не менее 1,8 МВт. При использовании накопителей другого вида требуемая номинальная энергоёмкость падает до уровня 1000 кВт·ч, мощность заряда — 0,36 МВт, разряда — 3,2 МВт.

Параметры системы накопления на посту секционирования для расчетных условий по графику исполненного движения за отчетные сутки приведены на рис. 3 и в таблице.

Характер изменения DoD для однопутных участков аналогичен полученному для двухпутных участков, при этом номинальная энергоёмкость $W_{ном}$ превышает уровень, требуемый для двухпутных участков: 1500 кВт·ч для Октябрьской желез-

ной дороги; 1000 кВт·ч для Свердловской железной дороги; 1200 кВт·ч для Московского центрального кольца.

Результаты расчетов условий работы для системы накопления в условиях однопутного участка железной дороги показывают, что цикличность режимов заряд/разряд составляет для расчетного пакетного пропуска 1,5 цикла/ч, для графика исполненного движения частота смены снижается до 0,3 цикла/ч, что обусловлено более легкими условиями пропуска по сравнению с расчетными. Для условий Московского центрального кольца цикличность составляет менее 0,2 циклов/ч, для условий Октябрьской и Свердловской железных дорог — 2 цикла/ч.

Рис. 3. Нагрузки системы накопления электроэнергии на посту секционирования:
 а — нагрузка при пропуске в четном направлении; б — нагрузка при пропуске в нечетном направлении;
 в — график исполненного движения за сутки: 1 — заряд; 2 — разряд; г — зарядные характеристики:
 1 — четный пакет; 2 — нечетный пакет; 3 — график исполненного движения

Fig. 3. Loads of energy storage systems at the sectioning post:
 а — load when passing in an even direction; б — load when passing in an odd direction;
 в — schedule of the performed train operation per day: 1 — charge; 2 — category; г — charging characteristics:
 1 — even package; 2 — odd package; 3 — schedule of the performed train operation

Параметры системы накопления электроэнергии для условий работы на посту секционирования
 Electricity storage system parameters for operating conditions at the sectioning post

Глубина разряда, %	Номинальная мощность, МВт		Номинальная энергоемкость, кВт·ч	Продолжительность, мин		Средняя продолжительность, мин (кол-во эпизодов, ед.)	
	Заряд	Разряд		Заряд	Разряд	Заряд	Разряд
$DoD \leq 30$	1,8	3,2	2300	204,5	87,5	4,6 (44)	3,7 (24)
$DoD > 90$	0,36	3,2	1000	777,0	87,5	16,2 (53)	3,7 (24)

Примечание: Приведенные параметры определены для расчета по графику исполненного движения за сутки.

Note: The above parameters are determined for calculation according to the schedule of the performed train operation per day.

Влияние системы накопления на показатели нагрузочной способности системы тягового электро-снабжения однопутных участков постоянного тока при разряде токами C -rate, равными $2C_n$, проявляется

при увеличении номинальной мощности на постах секционирования в диапазоне 3,1–5,8 МВт. Реализация зарядных характеристик в периоды минимальных нагрузок приводит к падению напряжения на 400 В и

обеспечивает поддержание степени заряженности на заданном уровне с преобладанием разряда и последующим восстановлением. Результаты расчетов для графика исполненного движения за отчетные сутки применительно к месту размещения системы на посту секционирования позволяют определить мощность системы накопления на базе литий-ионных аккумуляторов в режиме заряда/разряда не менее 1,8/3,2 МВт, энергоемкость — 2300 кВт·ч. При использовании накопителей, допускающих глубокий разряд, номинальная мощность в режиме заряда/разряда снижается до уровня 0,36/3,2 МВт, энергоемкость — 1000 кВт·ч. Допустимая кратность мощности заряда/разряда определяется предприятием-изготовителем и оказывает влияние на выбор номинальной мощности системы накопления для работы с электротяговой нагрузкой.

Заключение. Сравнение расчетных условий работы системы накопления электроэнергии на однопутных и двухпутных участках при тяговой нагрузке, формируемой при пакетном пропуске поездов, показывает, что в первом случае требуются большие значения номинальной мощности и энергоемкости, обусловленные необходимостью обеспечения ресурса работы электрохими-

ческих накопителей. Применение накопителей других видов позволяет снизить значения этих параметров как для двухпутных, так и для однопутных участков. Существующие условия организации движения на однопутных участках, как правило, отличаются от расчетных условий, что приводит к снижению мощности и энергоемкости, значения которых приближаются к аналогичным параметрам системы накопления электроэнергии для двухпутных участков. В этом случае при проведении технико-экономической оценки следует рассматривать альтернативу литий-ионным аккумуляторам и их аналогам в виде накопителей, глубина разряда которых не оказывает существенного влияния на ресурс работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A novel energy storage system incorporating electrically rechargeable liquid fuels as the storage medium / H. Jiang [et al.] // Science Bulletin. 2019. Vol. 64. No. 4. P. 270–280.
2. Reliability evaluation of power systems in the presence of energy storage system as demand management resource / H. Yang [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 110. P. 1–10.
3. Бычкова М.П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро // Энергосовет. 2011. № 3 (16). С. 74–76.

4. Radu P.V., Drazek Z. Analysis of wayside energy storage devices for DC heavy rail transport // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 180: 13th International Conference Modern Electrified Transport – MET’2017. P. 1–6. DOI:10.1051/mateconf/201818004001.
5. Tesla Powerpack [Электронный ресурс]. URL: <https://twitter.com/Tesla/status/1110712884286226432> (дата обращения: 29.06.2019 г.).
6. Повышение надежности электроснабжения собственных нужд тяговых подстанций метрополитена с помощью накопителей энергии / М.В. Шевлюгин [и др.] // Электротехника. 2020. № 9. С. 26–31.
7. Валинский О.С., Евстафьев А.М., Никитин В.В. Эффективность процессов энергообмена в тяговых электроприводах с бортовыми емкостными накопителями энергии // Электротехника. 2018. № 10. С. 10–14.
8. Fletcher D.I., Harrison R.F., Nallaperuma S. TransEnergy — a tool for energy storage optimization, peak power and energy consumption reduction in DC electric railway systems // Journal of Energy Storage. 2020. Vol. 30. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.est.2020.101425.
9. Multi-conductor model for AC railway train simulation / Y. Chen [et al.] // IET Electrical Systems in Transportation. 2016. No. 6. P. 67–75. DOI: 10.1049/iet-est.2013.0052.
10. Development of DC/DC Converter for Battery Energy Storage Supporting Railway DC Feeder Systems / Z. Li [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. No. 52 (5). P. 4218–4224. DOI: 10.1109/tia.2016.2582724.
11. Lithium-Ion Battery Storage for the Grid — A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids / H.C. Hesse [et al.] // Energies. 2017. No. 10. P. 2107. DOI: 10.3390/en10122107.
12. Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems / T. Chen [et al.] // Transactions of Tianjin University. 2020. No. 26. P. 208–217. DOI: 10.1007/s12209-020-00236-w.
13. Rivera-Barrera J.P., Muñoz-Galeano N., Sarmiento-Maldonado H.O. SoC Estimation for Lithium-ion Batteries: Review and Future Challenges // Electronics. 2017. No. 6. P. 102. DOI: 10.3390/electronics6040102.
14. Peak power reduction and energy efficiency improvement with the superconducting flywheel energy storage in electric railway system / H. Lee [et al.] // Physica C: Superconductivity and its Applications. 2013. Vol. 494. P. 246–249. DOI: 10.1016/j.physc.2013.04.033.
15. Research and analysis of a flexible integrated development model of railway system and photovoltaic in China / N. Fuwei [et al.] // Renewable Energy. 2021. Vol. 175. P. 853–867. DOI: 10.1016/j.renene.2021.04.119.
16. Adaptive energy management of a battery-supercapacitor energy storage system for electric vehicles based on flexible perception and neural network fitting / T. Zhu [et al.] // Applied Energy. 2021. Vol. 292. P. 261–271. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116932.
17. Energy storage sizing methodology for mass-transit direct-current wayside support: Application to French railway company case study / A. Ovalle [et al.] // Applied Energy. 2018. Vol. 230. P. 1673–1684. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.035.
18. Energy storage systems to exploit regenerative braking in DC railway systems: Different approaches to improve efficiency of modern high-speed trains / M. Ceraolo [et al.] // Journal of Energy Storage. 2018. Vol. 16. P. 269–279. DOI: 10.1016/j.est.2018.01.017.
19. Modelling and simulation of electric urban transportation systems with energy storage / A. Capasso [et al.] // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, June 7–10, 2016. [S. l.], 2016. P. 425–437. DOI: 10.1109/eeeic.2016.7555480.
20. Lepszy S. Analysis of the storage capacity and charging and discharging power in energy storage systems based on historical data on the day-ahead energy market in Poland // Energy. 2020. Vol. 213. P. 189–198. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118815.
21. Mehrjerdi H., Hemmati R. Modeling and Optimal Scheduling of Battery Energy Storage Systems in Electric Power Distribution Networks // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 316. P. 355–367. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.195.
22. The influence of electric vehicle charging strategies on the sizing of electrical energy storage systems in charging hub microgrids / L. Haupt [et al.] // Applied Energy. 2020. Vol. 273. P. 201–212. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115231.
23. Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system / W. Zhao [et al.] // Journal of Power Sources. 2019. Vol. 427. P. 174–183.
24. Barrero R., Tackoen X., Mierlo J. Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2010. Vol. 224 (3). P. 207–225.
25. Techno-economic evaluation of transportable battery energy storage in robust day-ahead scheduling of integrated power and railway transportation networks / R. Ebadi [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021. Vol. 126. P. 251–263. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106606.
26. Determining the optimum installation of energy storage systems in railway electrical infrastructures by means of swarm and evolutionary optimization algorithms / D. Roch-Dupré [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021. Vol. 124. P. 311–319. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106295.
27. Евстафьев А.М. Оценка энергоемкости бортового накопителя энергии для тягового подвижного состава [Электронный ресурс] // Бюллетень результатов научных исследований / ПГУПС. 2018. № 2. С. 7–15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-energoemkosti-bortovogo-nakopitelya-energii-dlya-tyagovogo-podvijnogo-sostava> (дата обращения: 02.10.2019 г.).
28. Шевлюгин М.В., Ермоленко Д.В., Стадников А.Н. Опыт пуска электроподвижного состава при помощи «накопительных» тяговых подстанций на московском метрополитене // Электротехника. 2017. № 11. С. 75–80.
29. Рябцев Г.Г., Желтов К.С. Показатели эффективности конденсаторных накопителей энергии для вагонов метрополитена // Электротехника. 2014. № 8. С. 47–50.
30. 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. DOI: 10.3103/S1068371220100119.
31. Буйносов А.П., Дурандин М.Г., Тугуниин О.И. Перспективы использования накопителей электрической энергии на моторвагонном подвижном составе // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4 (48). С. 35–45.
32. 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. DOI: 10.3103/S1068371220090114.
33. Titova T.S., Evstaf'ev A. M. Energy efficiency increase of locomotives with energy storage units // Proceedings of Saint Petersburg State Transport University. 2017. Vol. 14. No. 2. P. 200–210.
34. Electric Stock Digital Twin in a Subway Traction Power System / M.V. Shevlyugin [et al.] // Russian Electrical Engineering. 2019. Vol. 90. No. 9. P. 647–652. DOI: 10.3103/S1068371219090098.
35. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт / В.М. Зырянов [и др.] // Энергетическая политика. 2020. № 6 (148). С. 76–87.
36. Незевак В.Л. Имитационная модель системы тягового электроснабжения для определения энергетических показателей в условиях работы систем накопления электроэнергии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 3 (67). С. 70–80. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).70-80.
37. Nezevak V., Shatokhin A. Interaction's Simulation Modeling of Electric Rolling Stock and Electric Traction System // 2019 Interna-

tional Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon): coll. of works. [S. I.], 2019. P. 410–416. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877672.

38. Nezevak V., Cheremisin V., Shatokhin A. Electric energy storage units applicability assessment of different kinds in the conditions of Moscow central ring // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1115. P. 42–51. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2-5.

Для цитирования: 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. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-216-224>.

Operating conditions of electric energy storage system in DC traction power supply for single-track sections of railways

V. L. NEZEVAK

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Omsk State Transport University" (FGBOU VO "OmGUPS"), Omsk, 644046, Russia

Abstract. Considered are the issues of using electric energy storage system in the traction power supply of direct current of a single-track section. An overview of the main directions of domestic and foreign research in the field of using these systems to increase the capacity and energy efficiency of power supply systems is given. Modeling the operation of energy storage system in traction power supply is based on the calculation of load graphs within the boundaries of inter-substation zones, formed depending on the conditions for the passage of trains and traction load on the railway section. The main provisions of the method for choosing locations and determining the parameters of energy storage system in traction power supply are considered. On the example of one of the inter-substation zones of the Sverdlovsk railway, the influence of the power of the active sectioning station on the increase in the minimum voltage level at the pantograph of the electric rolling stock is shown. The graphs of the degree of charge and the corresponding frequency distributions are given, which make it possible to evaluate the operating conditions of the electric energy storage system depending on the conditions for the formation of the traction load, as well as the graphs of the load of the electric energy storage system and the corresponding charging characteristics for the operating conditions at the sectioning post. On the example of the section under consideration, the dependence of the discharge depth of the electric energy storage system on the nominal energy intensity is shown. Based on the results of calculations, an evaluation was made of the options for passing train batches in the even and odd direction in comparison with the schedule of the performed train operation. The range of variation of the nominal values of power and energy intensity of the electric energy storage system is obtained. Comparison of the accumulation system parameters for single- and double-track sections of railways, including those with a predominance of passenger traffic, is carried out.

Keywords: traction power supply; energy storage system; single track section; DC; sectioning post; charging characteristic; state of charge

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-216-224>

REFERENCES

- Jiang H., Wei L., Fan X., Xu J., Shyy W., Zhao T. *A novel energy storage system incorporating electrically rechargeable liquid fuels as the storage medium*. Science Bulletin, 2019, Vol. 64, no. 4, pp. 270–280.
- Yang H., Zhang Y., Ma Y., Zhou M., Yang X. *Reliability evaluation of power systems in the presence of energy storage system*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

НЕЗЕВАК Владислав Леонидович,
канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «ОмГУПС»

Статья поступила в редакцию 08.06.2021 г., принята к публикации 21.06.2021 г.

as demand management resource. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, Vol. 110, pp. 1–10.

3. Bychkova M. P. *Sistema nakopiteley elektroenergii dlya povysheniya energoэффективности v metro* [System of energy storage devices for increasing energy efficiency in the metro]. Energosovet, 2011, no. 3 (16), pp. 74–76.

4. Radu P. V., Drazek Z. *Analysis of wayside energy storage devices for DC heavy rail transport*. MATEC Web of Conferences, 2018, Vol. 180, pp. 1–6. DOI: 10.1051/mateconf/201818004001.

5. *Tesla Powerpack*. URL: <https://twitter.com/Tesla/status/1110712884286226432> (retrieved on 29.06.2019).

6. Shevlyugin M. V. *Povyshenie nadezhnosti elektrosnabzheniya sobstvennykh nuздn tyagovykh podstantsiy metropolitena s pomoshch'yu nakopiteley energii* [Increasing the reliability of power supply for own needs of metro traction substations using energy storage units]. Elektrotehnika, 2020, no. 9, pp. 26–31.

7. Valinskiy O. S., Evstaf'ev A. M., Nikitin V. V. *Effektivnost' protsessov energoobmena v tyagovykh elektropriivodakh s bortovymi emkostnyimi nakopitelyami energii* [Efficiency of energy exchange processes in traction electric drives with onboard capacitive energy storage devices]. Elektrotehnika, 2018, no. 10, pp. 10–14.

8. Fletcher D. I., Harrison R. F., Nallaperuma S. *TransEnergy — a tool for energy storage optimization, peak power and energy consumption reduction in DC electric railway systems*. Journal of Energy Storage, 2020, Vol. 30, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.est.2020.101425.

9. Chen Y., White R., Fella T., Hillmansen S., Weston P. *Multi-conductor model for AC railway train simulation*. IET Electrical Systems in Transportation, 2016, no. 6, pp. 67–75. DOI: 10.1049/iet-est.2013.0052.

10. Li Z., Hoshina S., Satake N., Nogi M. *Development of DC/DC Converter for Battery Energy Storage Supporting Railway DC Feeder Systems*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, no. 52 (5), pp. 4218–4224. DOI: 10.1109/tia.2016.2582724.

11. Hesse H. C., Schimpe M., Kucevic D., Jossen A. *Lithium-Ion Battery Storage for the Grid — A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids*. Energies, 2017, no. 10, pp. 2107. DOI: 10.3390/en10122107.

12. Chen T., Jin Y., Lv H., Yang A., Chen B., Liu M., Xie Y., Chen Q. *Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems*. Transactions of Tianjin University, 2020, no. 26, pp. 208–217. DOI: 10.1007/s12209-020-00236-w.

13. Rivera-Barrera J. P., Muñoz-Galeano N., Sarmiento-Maldonado H. O. *SoC Estimation for Lithium-ion Batteries: Review and*

Future Challenges. Electronics, 2017, no. 6, pp. 102. DOI: 10.3390/electronics6040102.

14. Lee H., Jung S., Cho Y., Yoon D., Jang G. *Peak power reduction and energy efficiency improvement with the superconducting flywheel energy storage in electric railway system*. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2013, Vol. 494, pp. 246–249. DOI: 10.1016/j.physc.2013.04.033.

15. Fuwei N., Li J., Jing M., Limin J., Zhenwei Y. *Research and analysis of a flexible integrated development model of railway system and photovoltaic in China*. Renewable Energy, 2021, Vol. 175, pp. 853–867. DOI: 10.1016/j.renene.2021.04.119.

16. Zhu T., Wills R., Lot R., Ruan H., Jiang Z. *Adaptive energy management of a battery-supercapacitor energy storage system for electric vehicles based on flexible perception and neural network fitting*. Applied Energy, 2021, Vol. 292, pp. 261–271. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116932.

17. Ovalle A., Pouget J., Bacha S., Gerbaud L., Vinot E., Sohier B. *Energy storage sizing methodology for mass-transit direct-current wayside support: Application to French railway company case study*. Applied Energy, 2018, Vol. 230, pp. 1673–1684. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.035.

18. Ceraolo M., Lutzemberger G., Meli E., Pugi L., Rindi A., Pancari G. *Energy storage systems to exploit regenerative braking in DC railway systems: Different approaches to improve efficiency of modern high-speed trains*. Journal of Energy Storage, 2018, Vol. 16, pp. 269–279. DOI: 10.1016/j.est.2018.01.017.

19. Capasso A., Lamedica R., Ruvio A., Ceraolo M., Lutzemberger G. *Modelling and simulation of electric urban transportation systems with energy storage*. 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, June 7–10, 2016. [S. l.], 2016, pp. 425–437. DOI: 10.1109/eeeic.2016.7555480.

20. Lepszy S. *Analysis of the storage capacity and charging and discharging power in energy storage systems based on historical data on the day-ahead energy market in Poland*. Energy, 2020, Vol. 213, pp. 189–198. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118815.

21. Mehrjerdi H., Hemmati R. *Modeling and Optimal Scheduling of Battery Energy Storage Systems in Electric Power Distribution Networks*. Journal of Cleaner Production, 2019, Vol. 316, pp. 355–367. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.195.

22. Haupt L., Schöpf M., Wederhake L., Weibelzahl M. *The influence of electric vehicle charging strategies on the sizing of electrical energy storage systems in charging hub microgrids*. Applied Energy, 2020, Vol. 273, pp. 201–212. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115231.

23. Zhao W., Wu G., Wang C., Yu L., Li Y. *Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system*. Journal of Power Sources, 2019, Vol. 427, pp. 174–183.

24. Barrero R., Tackoen X., Mierlo J. *Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, Vol. 224 (3), pp. 207–225.

25. Ebadi R., Sadeghi Yazdankhah A., Kazemzadeh R., Mohammadi-Ivatloo B. *Techno-economic evaluation of transportable battery energy storage in robust day-ahead scheduling of integrated power and railway transportation networks*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, Vol. 126, pp. 251–263. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106606.

26. Roch-Dupré D., Gonsalves T., Cucala A. P., Pecharromán R. R., López-López Á. J., Fernández-Cardador A. *Determining the opti-*

mum installation of energy storage systems in railway electrical infrastructures by means of swarm and evolutionary optimization algorithms. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, Vol. 124, pp. 311–319. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106295.

27. Evstaf'ev A. M. *Estimation of the energy intensity of an on-board energy storage device for traction rolling stock*. Bulletin of scientific research results. PGUPS, 2018, no. 2, pp. 7–15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-energoemkosti-bortovogo-nakopitelya-energii-dlya-tyagovogo-podvizhnogo-sostava> (retrieved on 02.10.2019) (in Russ.).

28. Shevlyugin M. V., Ermolenko D. V., Stadnikov A. N. *Experience of starting electric rolling stock using "storage" traction substations on the Moscow metro*. Elektrotehnika, 2017, no. 11, pp. 75–80.

29. Ryabtsev G. G., Zheltov K. S. *Efficiency indicators of capacitor energy storage for subway cars*. Elektrotehnika, 2014, no. 8, pp. 47–50.

30. Valinsky O. S., Titova T. S., Nikitin V. V., Evstaf'ev A. M. *Modeling Onboard Energy Storage Systems for Hybrid Traction Drives*. Russian Electrical Engineering, 2020, Vol. 91, no. 10, pp. 604–608. DOI: 10.3103/S1068371220100119.

31. Buynosov A. P., Durandin M. G., Tutynin O. I. *Prospects for the use of electric energy storage units on multi-unit rolling stock*. Herald of the Ural State University of Railway Transport, 2020, no. 4 (48), pp. 35–45.

32. 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, Vol. 91, no. 9, pp. 552–556. DOI: 10.3103/S1068371220090114.

33. Titova T. S., Evstaf'ev A. M. *Energy efficiency increase of locomotives with energy storage units*. Proceedings of Saint Petersburg State Transport University, 2017, Vol. 14, no. 2, pp. 200–210.

34. Shevlyugin M. V., Korolev A. A., Golitsyna A. E., Pletnev D. S. *Electric Stock Digital Twin in a Subway Traction Power System*. Russian Electrical Engineering, 2019, Vol. 90, no. 9, pp. 647–652. DOI: 10.3103/S1068371219090098.

35. Armeev D. V., Domakhin E. A., Zyryanov V. M., Kotin D. A. *Energy storage systems: Russian and foreign experience*. Energy policy, 2020, no. 6 (148), pp. 76–87.

36. Nezevak V. L. *Simulation model of a traction power supply system for determining energy indicators in the operating conditions of energy storage systems*. Modern technologies. System analysis. Modeling, 2020, no. 3 (67), pp. 70–80. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).70-80.

37. Nezevak V., Shatokhin A. *Interaction's Simulation Modeling of Electric Rolling Stock and Electric Traction System*. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Coll. of works. [S. l.], 2019, pp. 410–416. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877672.

38. Nezevak V., Cheremisin V., Shatokhin A. *Electric energy storage units' applicability assessment of different kinds in the conditions of Moscow central ring*. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, Vol. 1115, pp. 42–51. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2-5.

ABOUT THE AUTHOR

Vladislav L. NEZEVAK,

Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, FGBOU VO "OmGUPS"

Received 08.06.2021

Accepted 21.06.2021

■ E-mail: nezevakwl@mail.ru (V. L. Nezevak)

For citation: Nezevak V. L. Operating conditions of electric energy storage system in DC traction power supply for single-track sections of railways // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (4): 216–224 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-216-224>.