НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.331
DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-1

Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 2 (105). С. 6–17

Моделирование кратковременных режимов работы тяговых накопителей электроэнергии

Владислав НЕЗЕВАК

Александр ДМИТРИЕВ

Святослав САМОЛИНОВ

Владислав Леонидович Незевак [1], Александр Дмитриевич Дмитриев [2], Святослав Сергеевич Самолинов [3]

[1, 2, 3] Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия.

✉ *[1] NezevakWL@mail.ru.*

АННОТАЦИЯ

Концепция построения системы тягового электроснабжения с накопителями электроэнергии предусматривает их применение для решения задач повышения пропускной и провозной способности, энергетической эффективности перевозок, надёжности электроснабжения и качества электрической энергии. Реализация пилотных проектов по решению различных задач в области тягового электроснабжения как в России, так и за рубежом, показывает их техническую эффективность.

Повышение надёжности электроснабжения за счёт применения устройств накопления сегодня рассматривается в основном для вариантов их использования в качестве бортовых устройств на электроподвижном составе или стационарных – на объектах системы тягового электроснабжения. Повышение надёжности электроснабжения достигается за счёт работы систем накопления при возникновении вынужденных или послеаварийных режимов работы систем тягового электроснабжения. При решении указанной задачи требуется оценивать уровень напряжения, изменение которого обусловлено разрядной характеристикой используемого накопителя электроэнергии.

Целью работы является оценка изменения уровня напряжения и энергоёмкости накопителя электроэнергии, используемого в качестве бортового на электроподвижном составе или стационарного на объектах.

На основе предложенных моделей в работе проведена оценка изменения напряжения накопителя электроэнергии для условий кратковременного отсутствия напряжения в контактной сети на примере трёх видов аккумуляторов и суперконденсатора. Полученные в работе результаты позволяют перейти к оценке показателей работы систем накопления электроэнергии при различных условиях формирования тяговой нагрузки и режимах работы системы тягового электроснабжения.

Ключевые слова: железные дороги, система тягового электроснабжения, электроподвижной состав, имитационная модель, программный комплекс Matlab, аккумуляторная батарея, суперконденсатор, уровень напряжения, энергоёмкость.

Финансирование: исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22–29–00002, https://rscf.ru/project/22–29–00002.

Для цитирования: Незевак В. Л., Дмитриев А. Д., Самолинов С. С. Моделирование кратковременных режимов работы тяговых накопителей электроэнергии // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 2 (105). С. 6–17. DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-1.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

© Незевак В. Л., Дмитриев А. Д., Самолинов С. С., 2023

ВВЕДЕНИЕ

Отказы в работе коммутационного оборудования тяговых подстанций и контактной сети приводят к изменению нормального режима питания межподстанционных зон, при котором отдельные секции контактной сети работают в режиме одностороннего питания. Продолжительность вынужденных режимов работы может составлять различное время: от нескольких минут, до нескольких часов или суток. Концепция использования накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения железных дорог предусматривает решение задач повышения пропускной и провозной способности, энергоэффективности, надёжности электроснабжения и ряда других за счёт регулирования энергообменных режимов. Одной из частных задач повышения надёжности тягового электроснабжения за счёт использования систем накопления является оценка уровня напряжения на шинах линейных устройств, к которым они подключены, с учётом характеристик накопителей электроэнергии. В качестве последних могут применяться различные виды, а одними из наиболее распространённых являются электрохимические и электрические. Падение напряжения на шинах систем накопления указанных видов наиболее сильно проявляется в первые моменты работы и зависит от их суммарной энергоёмкости, что связано с нелинейностью разрядных характеристик. Вопросы оценки уровня напряжения и зависимости его от суммарной энергоёмкости связаны с задачей повышения надёжности в послеаварийных и вынужденных режимах работы тягового электроснабжения и являются актуальными.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель статьи – разработать имитационную модель системы тягового электроснабжения, содержащую накопитель электроэнергии, для оценки влияния его вида и энергоёмкости на уровень напряжения. На основе разработанной имитационной модели – определить уровень напряжения для выбранных видов накопителя электроэнергии, оценить влияние энергоёмкости на уровень напряжения для вариантов стационарного и бортового применения. В расчётах используются *методы* имитационного моделирования и обработки результатов эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования различных аспектов работы накопителей электроэнергии выполняются как отечественными, так и зарубежными учёными. Подходы к применению возобновляемых источников без систем накопления электроэнергии обладают рядом недостатков, а проекты по их внедрению на железных дорогах без учёта специфики тягового электропотребления нецелесообразны, поскольку имеют довольно большой срок окупаемости, как показано в [1, 2]. Ряд исследований посвящён разработке саморегулируемой системы электроснабжения, в которой регулирование режимов работы входящих в систему устройств, в том числе систем накопления электроэнергии, осуществляется на основе автоматического управления, как это показано, например, в статьях [3, 4]. Ряд авторов рассматривает системы тягового электроснабжения для высокоскоростных магистралей железных дорог, содержащие источники возобновляемой энергетики [5]. Стратегия управления гибридными устройствами, основанная на компенсации высокочастотной составляющей переменной мощности с помощью суперконденсатора и низкочастотной с помощью аккумуляторной батареи, рассмотрена в статье [6].

В настоящее время пилотные проекты по использованию технологий хранения электроэнергии в транспортном комплексе охватывают систему тягового электроснабжения и пассажирский электроподвижной состав как на железнодорожном транспорте и в метрополитене, так и в других сферах транспорта, где системы накопления находят применение в качестве бортовых систем.

В системах тягового электроснабжения железнодорожного транспорта системы накопления электроэнергии в качестве мобильных устройств могут применяться и для решения временных задач, продолжительность которых может достигать нескольких десятков дней. В качестве примера можно привести работы по капитальному ремонту устройств инфраструктуры, длительность которых может достигать одного-двух месяцев, в ходе которых длительное время одна или несколько секций контактной сети оказываются выведены из эксплуатации.

Широкое распространение в качестве бортовых систем накопления электроэнергии на электропоездах получили литий-ионные батареи, у которых время зарядки снижено до 10

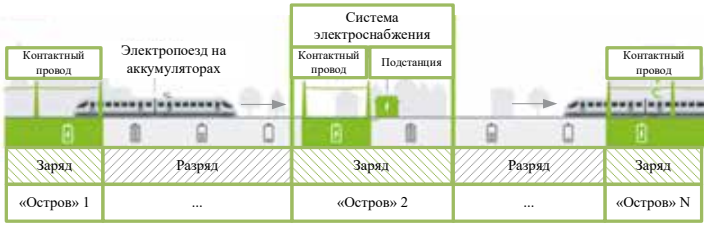


Рис. 1. Структурная схема «островной» системы тягового электроснабжения[2].

мин., а запас хода при разряде достигает 100 км. Литий-ионные батареи нашли применение в электропоездах Talent 3 Bombardier, эксплуатирующихся на участках с системами электроснабжения переменного тока напряжением 15 кВ[1], и ряде других серий электроподвижного состава европейских производителей.

Целесообразность применения устройств накопления электроэнергии на пассажирском электроподвижном составе увеличивается по мере снижения интенсивности перевозок и оправдана, как правило, на малодеятельных участках железных дорог. С целью сокращения капитальных вложений в инфраструктуру на данных участках рассматривается так называемая «островная» система тягового электроснабжения (рис. 1), особенностью которой является отсутствие контактной сети на ряде участков следования электроподвижного состава. Заряд бортовых систем накопления выполняется при нахождении электропоезда на «островах» 1…N, где имеется контактная подвеска. Эффективность создания указанных систем связана с отказом от дизельной тяги[2]. При росте масс, скоростей и интенсивности движения поездов экономическая целесообразность внедрения систем накопления электроэнергии падает в связи с необходимостью соответствующего увеличения энергоёмкости [7].

Оперативное управление в системах тягового электроснабжения осуществляется с учётом условий работы силового и коммутационного оборудования тяговых подстанций и линейных устройств контактной сети [8]. Работа в вынужденных режимах работы системы тягового электроснабжения характеризуется увеличением нагрузки тяговых подстанций и соответствующим падением уровня напряжения в контактной сети [9], что обусловливает необходимость мониторинга энергетических показателей и разработки мероприятий по усилению системы тягового электроснабжения [10, 11].

Протяжённость отключённых секций контактной сети на перегонах и станциях определяет требования к автономности хода электроподвижного состава до ближайшей исправной секции контактной сети, как это проиллюстрировано на примере одного режима питания межподстанционной зоны (рис. 2).

Энергетические параметры для электропоезда в границах межподстанционной зоны протяжённостью l с двумя тяговыми подстанциями *ТП1* и *ТП2* зависят от различных условий (профиля пути, направления движения, скорости и протяжённости автономного следования l_i). Оценка энергетических показателей выполнена на основе моделирования работы *Velaro RUS* при движении по участку Санкт-Петербург–Москва (рис. 3). На приведённом графике по абсциссе l_p определяется направление следования движения электропоезда с минимальным электропотреблением.

Результаты расчётов, выполненные для электропоезда *Velaro RUS* при следовании по одной из межподстанционных зон участка Тверь–Москва, показывают изменение электропотребления и средней потребляемой мощности в зависимости от максимальной скорости движения (рис. 4).

Работа в послеаварийных режимах эксплуатации систем накопления электроэнергии должна быть согласована с автоматикой в системе тягового электроснабжения [12].

Энергоёмкость бортовой системы накопления электроэнергии для движения со скоростями, не превышающими 100 км/ч,

---

[1] Realize your vision with Bombardier TALENT 3 BEMU / Bombardier. APTA 2019 Rail Conference. – 2019. – [Электронный ресурс]: https://www.apta.com/wp-content/uploads/Realize-your-vision-with-Bombardier-TALENT-3-BEMU_Yves_Lappierre.pdf. Доступ 14.01.2023.

[2] Deutsche Bahn baut erstmals Oberleitungsinseln für Regionalverkehr mit Akku-Zügen / Deutsche Bahn. [Электронный ресурс]: https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Deutsche-Bahn-baut-erstmals-Oberleitungsinseln-fuer-Regionalver kehr-mit-Akku-Zuegen-7343070. Доступ 14.01.2023.

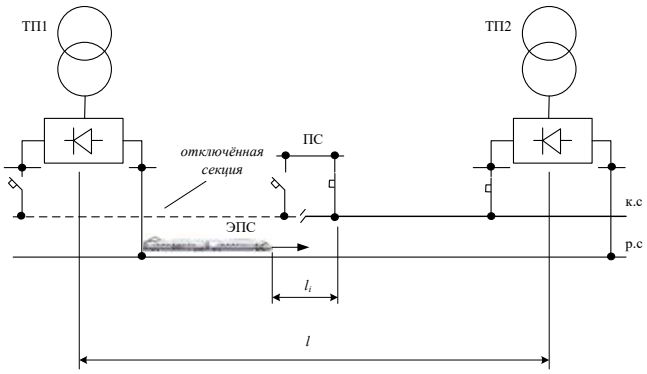


Рис. 2. Режим питания межподстанционной зоны [создано авторами].

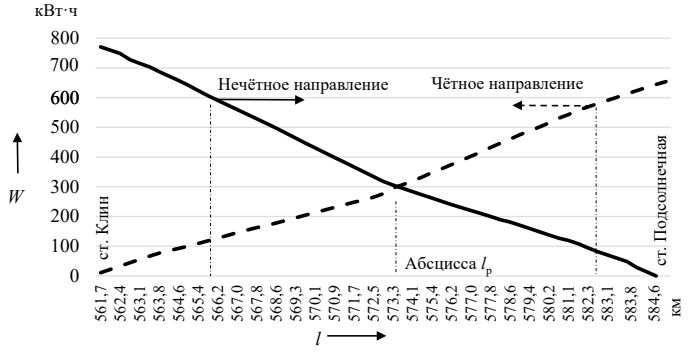


Рис. 3. Потребляемая электропоездом электроэнергия [создано авторами].

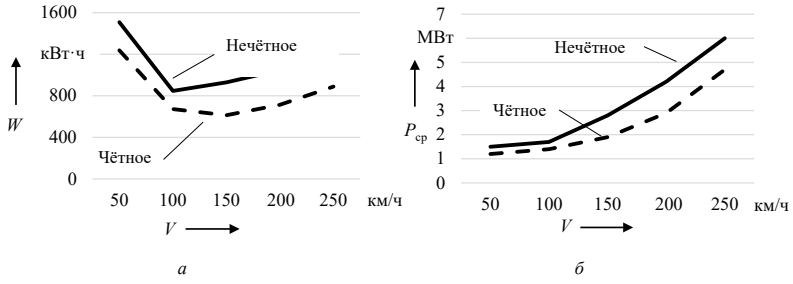


Рис. 4. Графики изменения электропотребления (а) и средней мощности электропоезда (б) в зависимости от скорости движения [составлены авторами].

составляет около 1000 кВт•ч в зависимости от условий формирования тяговой нагрузки. Аналогичные оценки энергоёмкости приводятся в других исследованиях для бортовых систем накопления электроэнергии[3], для которых максимальная мощность не превышает 2 МВт. Соотношение максимальной мощности и энергоёмкости систем накопления электроэнергии позволяет применять аккумуляторные батареи, допускающие разряд токами $2C_н$.

[3] Гибридный поезд. Как будет работать российский локомотив на аккумуляторах. [Электронный ресурс]: https://gudok.ru/content/science_education/1598983/?ysclid=ll4z3bgyba487665577. Доступ 14.01.2023.

При проведении работ, связанных с проведением капитального ремонта, модернизацией или реконструкцией устройств инфраструктуры, одна из секций контактной сети отключается. Движение поездов осуществляется по вариантному графику движения (рис. 5). В указанных режимах работы существует риск выхода уровня напряжения на токоприёмниках за нижнюю границу допустимого диапазона.

Моделирование системы тягового электроснабжения выполняется для накопителей электроэнергии, построенных на базе аккумуляторов и суперконденсатора с двойным электрическим слоем (EDLC). Аккумуляторные батареи рассматриваются на основе четырёх аккумулято-

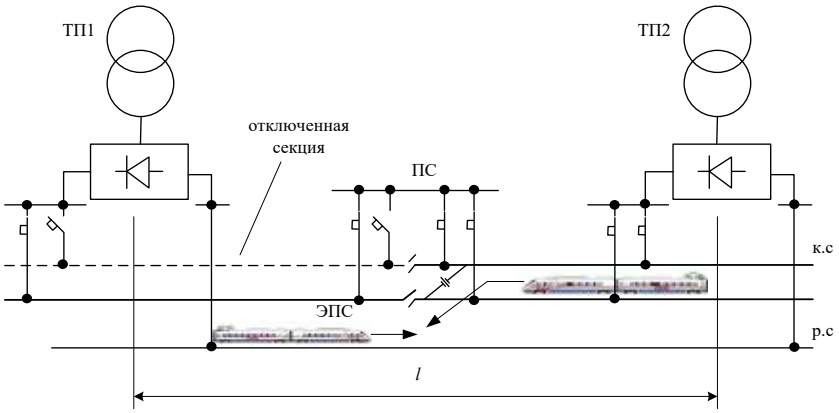
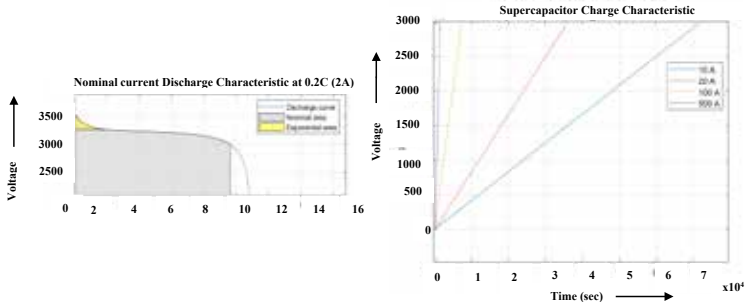


Рис. 5. Схема следования электропоезда при отключении секции контактной сети [составлена авторами].



а *б*

Рис. 6. Номинальная разрядная NiMh (а) и зарядная суперконденсатора EDCL (б) характеристики [создано авторами в Matlab].

ров: никель-металлогидридного; никель-кадмиевого; литий-ионного; свинцово-кислотного. При формировании накопителя электроэнергии использован конденсатор с двойным электрическим слоем [13]. Разрядные характеристики вышеприведённых аккумуляторов, (для номинальной ёмкости 10 А•ч) и суперконденсатора, реализованные в соответствующих моделях Matlab, приведены на рис. 6.

При рассмотрении зарядных и разрядных характеристик аккумуляторов необходимо учитывать экспоненциальную зону изменения напряжения, для которой, в отличие от суперконденсаторов, характеристики могут рассматриваться как линейные во всем диапазоне (рис. 6).

Для описания процессов измерения напряжения в зависимости от нагрузки в режимах заряда и разряда используются аналитические выражения, основанные на уравнениях Пейкерта, Шеферда, моделях Тевенина, Зиммерманна – Петерсона и др. [14, 15].

Для свинцово-кислотной батареи в модели Matlab используются следующие уравнения для определения напряжения в режимах разряда и заряда.

Режим разряда ($i_* > 0$):

$$f_p(it, i_*, i) = E_0 - K_1 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i_* - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \bar{\Phi}^{-1}\left(e^s, sel(s)\right), \quad (1)$$

где E_0 – постоянное начальное напряжение, В;

K_1, K_2 – постоянные, соответственно В/А и В;

Q – номинальная ёмкость аккумулятора, А•ч;

i_* – низкочастотный ток, А;

i – ток батареи, А;

t – время работы в режиме заряда или разряда, ч;

it – реализованная ёмкость, в А•ч;

Ф(x) – нормированная функция Лапласа,

$$\bar{\Phi}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{\frac{-t^2}{2}} dt, \quad (2)$$

e^s – функция изменения напряжения в зоне, близкой к напряжению разомкнутой цепи аккумулятора;

sel*(s)* – функция, значение которой соответствует режиму работы аккумулятора: для ре-

жима разряда sel*(s)* = 0, для режима заряда sel*(s)* = 1.

Режим заряда ($i_* < 0$):

$$f_з(it, i_*, i) = E_0 - K_1 \cdot \frac{Q}{0{,}1Q + it} \cdot i_* - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \bar{\Phi}^{-1}\left(\frac{e^s}{s}, sel(s)\right). \quad (3)$$

Для литий-ионной батареи в модели используются нижеприведённые уравнения изменения напряжения для определения напряжения в режимах разряда и заряда.

Режим разряда ($i_* > 0$):

$$f_р(it, i_*, i) = E_0 - K_1 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i_* - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Ae^{-B \cdot it}, \quad (4)$$

где A – напряжение экспоненциальной части характеристики, В;

B – коэффициент, соответствующий ёмкости экспоненциальной части характеристики, (А•ч)$^{-1}$.

Режим заряда ($i_* < 0$):

$$f_з(it, i_*, i) = E_0 - K_1 \cdot \frac{Q}{0{,}1Q + it} \cdot i_* - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Ae^{-B \cdot it}. \quad (5)$$

Для никель-кадмиевых и никель-металлгидридных аккумуляторов в модели используются нижеприведённые уравнения для определения напряжения в режимах разряда и заряда.

Режим разряда ($i_* > 0$) описывается уравнением (1).

Режим заряда ($i_* < 0$):

$$f_з(it, i_*, i) = E_0 - K_1 \cdot \frac{Q}{0{,}1Q + |it|} \cdot i_* - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \bar{\Phi}^{-1}\left(\frac{e^s}{s}, sel(s)\right). \quad (6)$$

Напряжение суперконденсатора определяется в модели на основе уравнения Штерна [16] по формуле:

$$V_{sc} = \frac{N_s Q_T d}{N_p N_e \varepsilon\varepsilon_0 A_i} + \frac{2N_e N_s RT}{F} \cdot \sinh^{-1}\left(\frac{Q_{TR}}{N_p N_e^2 A_i \sqrt{8RT\varepsilon\varepsilon_0 c}}\right) - R_{sc} i_{sc}, \quad (7)$$

где A_i – площадь поверхности раздела между электродами и электролитом, м^2;

c – молярная концентрация вещества, моль/м^3;

r – молекулярный радиус, м;

F – постоянная Фарадея, Кл/моль;

i_{sc} – ток суперконденсатора, А;

V_{sc} – напряжение суперконденсатора, В;

T – рабочая температура, К;

R_{sc} – суммарное сопротивление, Ом;

N_e – количество слоёв электродов, шт.;

N_p, N_s – количество суперконденсаторов, включённых параллельно и последовательно, соответственно, шт.;

Q_T – электрический заряд, Кл;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К);

d – эффективный молекулярный диаметр, м;

ε – диэлектрическая проницаемость материала, Ф/м;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость свободного пространства, Ф/м.

Работа бортовых и стационарных устройств накопления электроэнергии рассматривается на примере межподстанционной зоны, представляющей собой фрагмент системы тягового электроснабжения (см. рис. 2 и 5). Модель содержит два источника питания (система 1 и система 2), имитирующих электроэнергетические системы, две тяговые подстанции постоянного тока (ТП1 и ТП2), пост секционирования (ПС) и тяговую сеть 1-го и 2-го путей. Электроподвижной состав представлен в модели двумя единицами (ЭПС 1 и ЭПС 2), нагрузка которых для моделирования принята постоянной в интервале до 20 с.

Для измерения электрических величин в модели используются осциллографы, позволяющие зафиксировать процессы в линиях электропередачи (ЛЭП 1 – ЛЭП 3) в соответствующих точках (В1 – В4). Регулирование работы устройств накопления осуществляется при помощи блока управления. Общий вид модели системы тягового электроснабжения в Matlab приведён на рис. 7.

Модели тяговых подстанций ТП1, ТП2 и поста секционирования приведены на рис. 8. Тяговая подстанция содержит силовой понижающий трансформатор с первичным напряжением 110 кВ, вторичным – 10 кВ и номинальной мощностью 25 МВ•А. Выпрямительный преобразователь представлен блоком «Выпрямитель», который подключается к контактной сети двух путей с помощью соответствующих выключателей, представляющих собой идеальные переключатели.

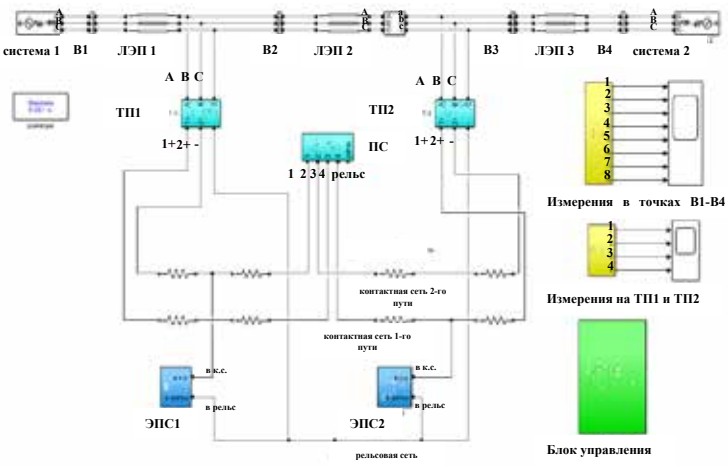
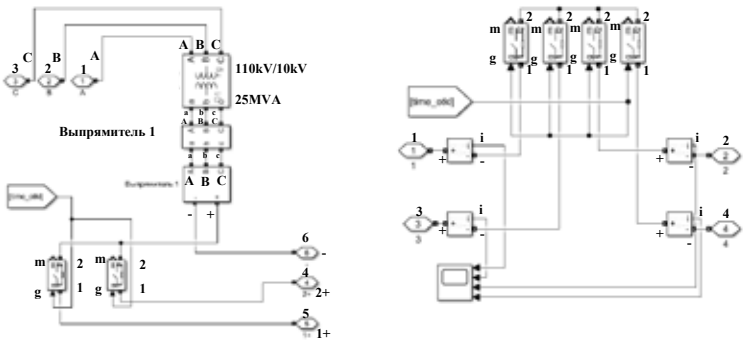


Рис. 7. Модель системы тягового электроснабжения в Matlab [создана авторами].



а *б*

Рис. 8. Модель тяговой подстанции (а) и поста секционирования (б) [создана авторами].

Пост секционирования (см. рис. 8) представлен общей шиной, к которой подключены четыре выключателя, аналогичные выключателям, использованным на подстанциях. Выходы выключателей присоединяются к соответствующим секциям контактной сети (1–4) двух путей. На посту секционирования подключены датчики тока и осциллограф, позволяющие регистрировать нагрузку по присоединениям.

Модель выпрямительного преобразователя реализует схему двенадцатипульсового выпрямителя последовательного типа, на выходе которого подключён однозвенный резонансно-апериодический фильтр (рис. 9).

Моделирование работы бортового устройства накопления электроэнергии выполняется с помощью модели ЭПС, в которой параллельно нагрузке подключён накопитель электроэнергии (рис. 10). С целью управления накопителем в модели ЭПС размещены выключатели, позволяющие отключить главные цепи ЭПС и включить бортовой накопитель электроэнергии.

В качестве накопителя рассматриваются четыре вида аккумуляторов и суперконденсатор, аналитические описания изменения напряжения для режимов которых приведены выше: формулы (1)–(6).

Для оценки влияния режимов работы системы тягового электроснабжения на систему внешнего электроснабжения, реализована схема измерений, позволяющая регистрировать осциллограммы и определить среднеквадратичные значения электрических величин (рис. 11).

Аналогичным образом выполнена схема измерений на тяговой подстанции, позволяющая фиксировать изменения электрических величин на стороне постоянного тока (рис. 12).

С целью моделирования аварийного отключения в блок управления (рис. 13) внесены постоянные времени, соответствующие следующим меткам: 0 – начало рассматриваемого периода времени; 5 с – аварийное отключение выключателей на тяговой подстанции и посту секционирования; 10 с – включение устройства

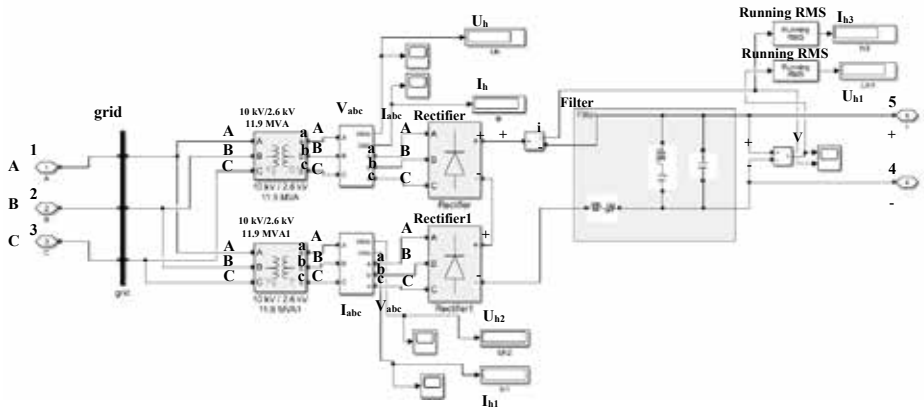


Рис. 9. Модель преобразовательных агрегатов [создана авторами].

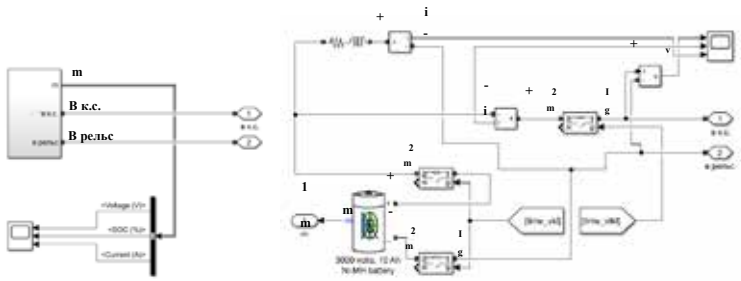


Рис. 10. Модель электроподвижного состава с бортовой системой накопления электроэнергии [создана авторами].

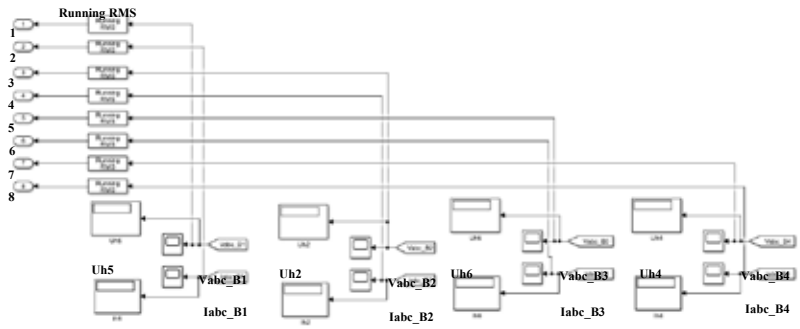


Рис. 11. Схема измерений в линиях электропередачи [создана авторами].

накопления электроэнергии; 15 с – восстановление напряжения в контактной сети и отключение накопителя. Время моделирования – 20 с.

Блок управления соответствует ситуационной модели по снятию напряжения в контактной сети, отсутствию напряжения, включению бортового устройства накопления, повторной подаче напряжения и отключению устройства.

Результаты моделирования процессов аварийного питания от накопителя электроэнергии, состоящего из различных аккумуляторов или суперконденсатора, позволяют оценить характер изменения напряжения, степени заряженности и тока нагрузки и других электрических величин. В качестве примера приведена оценка степени заряженности *SoC* накопителя электроэнергии за рассматриваемый период моделирования (таблица 1).

Минимальные значения *SoC* наблюдаются у суперконденсатора (EDLC), максимальные – у свинцово-кислотного аккумулятора (LeAc(Pb)). Для никель-металлогидридных (NiMh), никель-кадмиевых (NiCd) и литий-ионных (LiIon) аккумуляторов наблюдаются промежуточные значения. В связи с этим по уровню минимального значения степени заряженности для ЭПС целесообразно использовать аккумулятор LeAc(Pb).

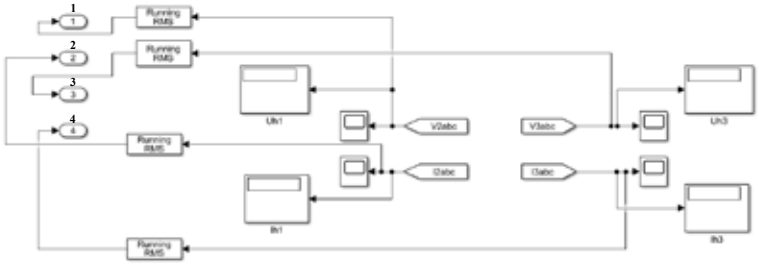


Рис. 12. Схема измерений на тяговой подстанции [создана авторами].

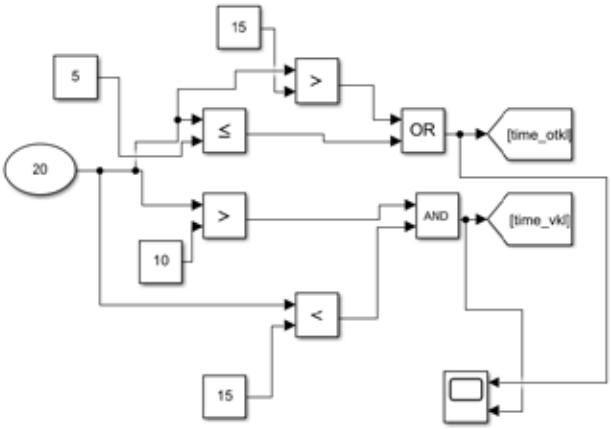


Рис. 13. Блок управления устройством накопления [схема создана авторами].

В качестве примера на рис. 14 приведены графики напряжения, *SoC* и тока нагрузки для применения в качестве накопителя электроэнергии батареи на свинцово-кислотных аккумуляторах.

Моделирование процессов осуществлялось для стационарного устройства накопления на тяговой подстанции и посту секционирования, а также для ситуационной модели, соответствующей снятию напряжения в контактной сети путём отключения выключателей присоединений контактной сети, далее – выдержке времени АПВ, далее – включению поста секционирования и устройства накопления, далее – возвращению к нормальной схеме питания. Блок управления реализует аналогичные первой рассмотренной модели выдержки времени (см. рис. 13).

Для моделирования используются модели тяговой подстанции и поста секционирования, приведённые на рис. 15. Результаты моделирования для заданного интервала (в качестве примера использована свинцово-кислотная батарея) приведены на рис. 16.

По результатам расчёта для размещения системы накопления на посту секционирования с аналогичными характеристиками определены значения SoC для четырёх видов аккумуляторных батарей и суперконденсатора (таблица 2).

Минимальные значения SoC наблюдаются у суперконденсатора (EDLC), максимальные – у свинцово-кислотного аккумулятора (LeAc(Pb)). При применении систем накопления электроэнергии на постах секционирования целесообразно использовать аккумуляторы LeAc(Pb).

Падение напряжения на выходе накопителя электроэнергии при включении определяется разрядной характеристикой аккумуляторных батарей, суперконденсаторов. В начальный период напряжение на аккумуляторах различных типов определяется экспоненциальной зоной характеристики. Падение уровня напряжения может оказаться существенным и критичным для обеспечения работы электроподвижного состава.

Для исключения падения напряжения при сохранении тяговой нагрузки на заданном уровне энергоёмкость накопителей электроэнергии необходимо выбирать с запасом.

На основании результатов имитационного моделирования работы накопителя электро-

Таблица 1

Результаты определения SoC для накопителя на ЭПС [составлена авторами]

Показатель	NiMh	NiCd	LiIon	LeAc(Pb)	EDLC
Среднее значение	98,77	98,86	98,70	98,96	97,74
Максимальное значение	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Минимальное значение	96,73	96,99	96,55	97,27	93,97

Таблица 2

Результаты определения SoC для накопителя энергоёмкостью 10 кВт•ч, размещаемого на посту секционирования [составлена авторами]

Показатель	NiMh	NiCd	LiIon	LeAc(Pb)	EDLC
Среднее значение	98,17	98,32	98,06	98,52	95,97
Максимальное значение	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Минимальное значение	95,17	95,56	94,87	96,13	89,30

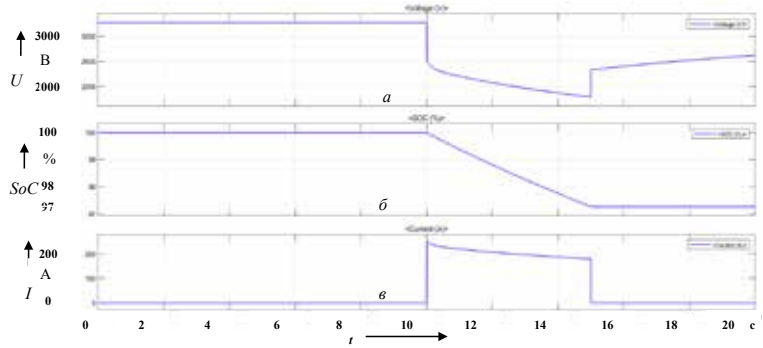


Рис. 14. Результаты моделирования работы бортовой системы накопления электроподвижного состава [схема создана авторами].

энергии в системе тягового электроснабжения получены зависимости изменения напряжения от номинальной энергоёмкости (рис. 17).

Оценка изменения напряжения для аккумуляторов выполнена относительно напряжения разомкнутой цепи, принятого в качестве базисного значения. Для аккумулятора NiMh указанное напряжение составило 3533,9 В, NiCd – 3432,5 В, LiIon и LeAc(Pb) – 3491,9 В, EDLC – 3000 В.

Различие разрядных характеристик бортовых и стационарных систем накопления обусловливает падение напряжения до уровня 0,8 о.е. (от номинального уровня) для заданной нагрузки при применении бортовых систем и до уровня 0,4–0,6 о.е. для варианта стационарного размещения системы накопления. В отличие от аккумуляторных батарей применение суперконденсатора не требует существенного увеличения энергоёмкости для рассматриваемых условий кратковременной работы.

Результаты расчётов позволяют оценить требуемую энергоёмкость из условий обеспечения напряжения на шинах устройства. Для рассматриваемой тяговой нагрузки электропоезда энергоёмкость бортовой системы накопления оценивается на уровне 90 кВт•ч (при использовании аккумуляторов) и 30 кВт•ч (при использовании суперконденсаторов). Для стационарного использования системы накопления электроэнергии (при использовании на посту секционирования контактной сети) наименьшее увеличение энергоёмкости наблюдается при реализации аккумуляторной батареи на базе NiMh-аккумуляторов. Бо́льшая энергоёмкость требуется для батарей, построенных на основе NiCd- и LiIon-аккумуляторов, а максимальное увеличение – для батарей на базе LeAc(Pb)-аккумуляторов (в три раза). Рост энергоёмкости для суперконденсаторов сопоставим с батареей свинцово-кислотных аккумуляторов (в два раза).

При решении задач повышения пропускной и провозной способности при помощи устройств накопления электроэнергии критерием выступают показатели нагрузочной способности системы тягового электроснабжения. Для достижения целевых показателей требуется увеличение энергоёмкости и мощности накопителя электроэнергии, как это проиллюстрировано для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока в [17–19], где энергоёмкость накопителей

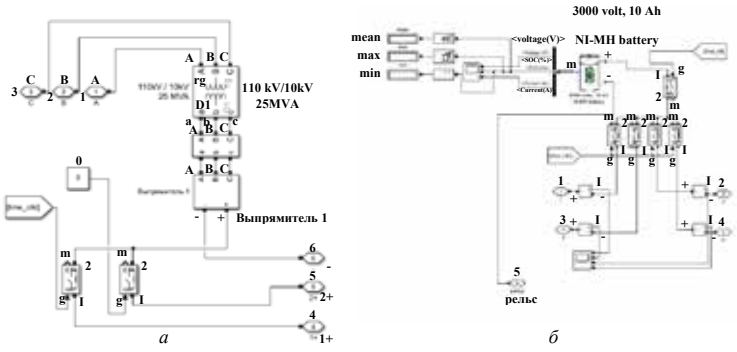


Рис. 15. Модели тяговой подстанции (а) и поста секционирования (б) [созданы авторами].

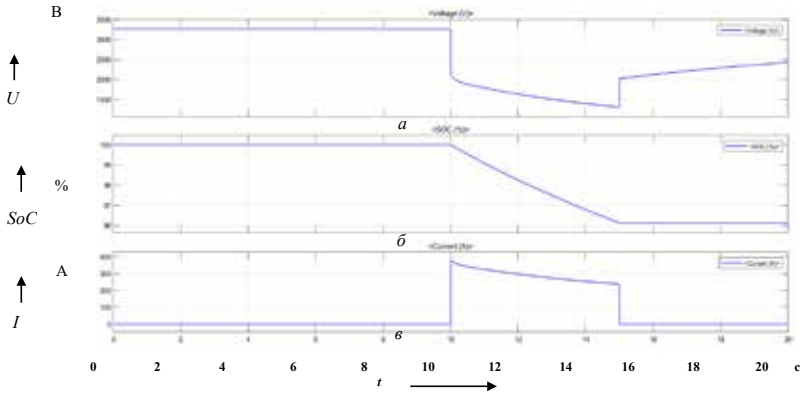


Рис. 16. Результаты моделирования работы системы накопления электроэнергии на посту секционирования [графики построены авторами].

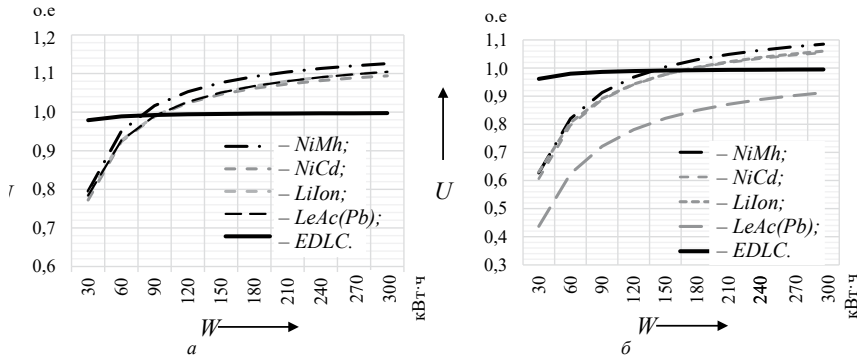


Рис. 17. Минимальные напряжения для бортовой (а) и стационарной (б) систем [графики построены авторами].

электроэнергии достигает уровня 1,5 и 12,0 МВт ч соответственно.

ВЫВОДЫ

Выбранная по условиям обеспечения пропускной и провозной способности энергоёмкость проверяется на основе имитационного моделирования для заданной нагрузки в условиях работы в послеаварийных и вынужденных режимах работы системы тягового электроснабжения.

Результаты имитационного моделирования получены для мест размещения устройств накопления на электроподвижном составе и в системе тягового электроснабжения. Для каждого варианта моделирование выполнено для накопителей электроэнергии, построенных на базе рассмотренных аккумуляторов и суперконденсатора.

Разработанные модели могут быть использованы для определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения,

построенной на базе накопителей электроэнергии различных видов, при решении различных задач.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в разработке алгоритмов регулирования систем накопления электроэнергии по уровню напряжения и тяговой нагрузки с учётом специфики тягового электроснабжения постоянного и переменного тока.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Jiaxin Yuan, Ke Cheng, Kai Qu. Optimal dispatching of high-speed railway power system based on hybrid energy storage system. Energy Reports, 2022, Vol. 8, Supplement 13, pp. 433–442. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.08.039.

2. Vilberger, M., Arestova, A., Matrenin, P., Domakhin, E. Analysis of rectification techniques and autonomous hybrid power plants potential for railway power supply systems. Energy Reports, 2022, Vol. 8, Supplement 13, pp. 957–966. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.08.046.

3. Tretyakov, E., Istomin, S., Avdienko, E., Denisov, I. Development of the system of coordinated control of traction power supply equipment and electric rolling stock. Transportation Research Procedia, 2022, Vol. 63, pp. 1970–1978. DOI:10.1016/j.trpro.2022.06.218.

4. Alnuman, H. H., Gladwin, D. T., Foster, M. P., Ahmed, E. M. Enhancing energy management of a stationary energy storage system in a DC electric railway using fuzzy logic control. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, Vol. 142, Part B, 108345. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108345.

5. Zhiming Zhong, Yongxin Zhang, Hong Shen, Xingmei Li. Optimal planning of distributed photovoltaic generation for the traction power supply system of high-speed railway. Journal of Cleaner Production, 2020, Vol. 263, 121394. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121394.

6. Shanpeng Zhao, Qiang Feng, Hongwei Yang, Youpeng Zhang. Control strategy of hybrid energy storage in regenerative braking energy of high-speed railway. Energy Reports, 2022, Vol. 8, Supplement 1, pp. 1330–1338. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.230.

7. 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. DOI: 10.36535/023619142020094.

8. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Асташин С. М. Управление режимами систем тягового электроснабжения: монография. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2009. – 104 с. ISBN 978-5-98710-103-2.

9. Марский В. Е. Режимы работы системы тягового электроснабжения на линии Санкт-Петербург–Москва при пропуске сдвоенных поездов «Сапсан» // Железнодорожный транспорт на современном этапе: 70 лет аспирантуре ОАО «ВНИИЖТ»: сб. трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ». – М.: ВМГ-Принт, 2014. – С. 111–120.

10. Бадер М. П., Гречишников В. А., Шевлюгин М. В., Король Ю. Н. Анализ показателей работы силового оборудования системы тягового электроснабжения ОАО «РЖД» на основе мониторинга тяговых подстанций в режиме реального времени // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 5–6. – С. 5–8.

11. Черемисин В. Т., Каштанов А. Л., Незевак В. Л. Организация контроля предельных режимов работы тяговой сети в условиях скоростного и тяжеловесного движения // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 83–90.

12. Герман Л. А., Новиков Е. В., Фомина З. А., Ручкина Л. Г. Обоснование необходимости применения быстродействующего АПВ фидеров контактной сети переменного тока // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 1. – С. 105–108. [Электронный ресурс]: https://elibrary.ru/item.asp?id=23146329. Доступ 16.04.2023.

13. Shiraishi, S. Electric Double Layer Capacitors. In: Carbon Alloys. Novel Concepts to Develop Carbon Science and Technology, 2003, pp. 447–457. DOI: 10.1016/b978-008044163-4/50027-9 [ограниченный доступ].

14. Dongen, van, L. A. M., Graaf, van der, R., Visscher, W. H. M. Theoretical prediction of electric vehicle energy consumption and battery state-of-charge during arbitrary driving cycles. In: Andrews, L. (Ed.), EVC symposium VI proceedings: Baltimore, Maryland, October 21–23, 1981, Electric Vehicle Council, pp. 1–13. [Электронный ресурс]: https://pure.tue.nl/ws/files/4381208/604417.pdf. Доступ 16.04.2023.

15. Shepherd, C. M. Design of Primary and Secondary Cells: II. An Equation Describing Battery Discharge. Journal of Electrochemical Society, 1965, Vol. 112, No. 7, pp. 657–664. DOI 10.1149/1.2423659.

16. Stern, O. Zur Theorie der Elektrolytischen Doppelschicht. Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie, 1924, Vol. 30, Iss. 21–22, pp. 508–516. DOI: https://doi.org/10.1002/bbpc.192400182 [ограниченный доступ].

17. Незевак В. Л. Условия работы системы накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении постоянного тока однопутных участков железных дорог // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2021. – Т. 80. – № 4. – С. 216–224. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-4-216-224.

18. Nezevak, V. L., Cheremisin, V. T. Determination of Electric Energy Storage Units Parameters of Direct Current Traction Power Supply in Conditions of Goods Traffic Dominance. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2020. DOI: https://doi.org/10.1109/fareastcon50210.2020.9271611.

19. Незевак В. Л. О сравнении энергетических параметров систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81. – № 1. – С. 38–52. DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-38-52.

Информация об авторах:

Незевак Владислав Леонидович *– кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, NezevakWL@mail.ru.*

Дмитриев Александр Дмитриевич *– аспирант кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, alexandrorado@mail.ru.*

Самолинов Святослав Сергеевич *– аспирант кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, samolinov97@mail.ru.*

Статья поступила в редакцию 30.12.2022, одобрена после рецензирования 18.04.2023, принята к публикации 25.04.2023.