

УДК 621.311

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ПОСТОВ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Черемисин Василий Титович,

д-р техн. наук, профессор, зав. каф. подвижного состава электрических ж.д. Электромеханического факультета Омского государственного университета путей сообщения, Россия, 644046, г. Омск, пр. Карла Маркса, 46.
E-mail: Cheremisinv@gmail.com

Незевак Владислав Леонидович,

канд. техн. наук, доцент каф. электроснабжения ж.д. транспорта Электромеханического факультета Омского государственного университета путей сообщения, Россия, 644046, г. Омск, пр. Карла Маркса, 46.
E-mail: NezevakWL@mail.ru

Шатохин Андрей Петрович,

аспирант каф. подвижного состава электрических ж.д. Электромеханического факультета Омского государственного университета путей сообщения, Россия, 644046, г. Омск, пр. Карла Маркса, 46.
E-mail: Shatohin_ap@mail.ru

Повышение энергетической эффективности работы системы тягового электроснабжения направлено на достижение целевых показателей, обозначенных Энергетической стратегией ОАО «РЖД». Одной из основных задач, требующих решения, является повышение эффективности рекуперативного торможения на участках железных дорог, что может быть достигнуто обеспечением приема энергии рекуперации. Одним из возможных решений является размещение накопителя электрической энергии в системе тягового электроснабжения на посту секционирования, так как по ряду энергетических параметров именно на посту секционирования установка накопителя оказывается более эффективной по сравнению с размещением на тяговых подстанциях. Изучение основных режимов работы системы тягового электроснабжения в условиях применения рекуперативного торможения позволяет определить необходимые параметры и найти наиболее эффективные участки применения устройств.

Цель работы: оценка целесообразности и эффективности применения емкостных накопителей электрической энергии на постах секционирования железных дорог постоянного тока, в целях повышения эффективности применения рекуперативного торможения, а также повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения.

Методы исследования: имитационное моделирование тяговой нагрузки в системе тягового электроснабжения на основе экспериментальных данных, полученных с измерительных систем электровазов постоянного тока.

Результаты. Исследовано влияние емкостных накопителей энергии, расположенных на постах секционирования, на режимы работы системы тягового электроснабжения постоянного тока в условиях применения рекуперативного торможения. Моделирование работы накопителей энергии выполнено для одного из реальных участков железной дороги, содержащих несколько межподстанционных зон, на основе данных, полученных по результатам обработки тяговой нагрузки грузового поезда. Профиль пути рассматриваемого участка железной дороги содержит уклоны до десяти промилле, что обуславливает широкое применение рекуперативного торможения. Предложен алгоритм управления режимами работы накопителя электроэнергии на посту секционирования постоянного тока, основанный на измерениях уровня напряжения на шинах поста секционирования постоянного тока и шинах накопителя энергии. Рассмотрена схема управления накопителем энергии со встречным включением электронных ключей, обеспечивающая заряд накопителя энергии при применении поездов рекуперативного торможения и его разряд при минимальном напряжении на шинах поста секционирования при максимальной тяговой нагрузке. Показано, что применение накопителей энергии на посту секционирования постоянного тока позволяет повысить среднее напряжения на шинах смежных тяговых подстанций, сократить потери электроэнергии в тяговой сети, уровень тяговой нагрузки по вводу преобразовательного агрегата и суммарный расход электроэнергии, определяемый по присоединениям контактной сети тяговых подстанций. Выполнена оценка влияния накопителя на параметры работы системы тягового электроснабжения. Отмечены недостатки рассматриваемой схемы подключения накопителя электроэнергии к шинам поста секционирования постоянного тока, которые могут быть устранены в дальнейшем путем совершенствования схемы управления.

Ключевые слова:

Энергетическая эффективность, система тягового электроснабжения, пост секционирования, емкостной накопитель энергии, электроподвижной состав, расход электроэнергии.

Повышение энергетической эффективности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте является одной из важнейших задач, требующих решения. Одним из основных направлений решения указанной задачи холдингом ОАО

«РЖД» обозначено направление расширения применения рекуперативного торможения, позволяющего снизить расход электрической энергии на тягу поездов по тяговым подстанциям [1]. За последнее десятилетие объемы рекуперации на сети оте-

чественных железных дорог практически удвоились и превысили 1,9 млрд кВт·ч по итогам 2014 г., однако потенциал повышения эффективности рекуперативного торможения и энергетической эффективности системы тягового электроснабжения далеко не исчерпан.

В настоящее время полигон железных дорог постоянного тока составляет около половины электрифицированных линий и именно на этих участках задача повышения эффективности энергии рекуперации стоит особо остро. Обусловлено это, в первую очередь, необходимостью создания условий для приема энергии рекуперации путем соответствующей организации движения поездов или путем размещения специальных приемников энергии рекуперации. Организация движения поездов позволяет максимально полно использовать энергию рекуперации путем такого взаимного расположения поездов, при котором прием энергии рекуперации поезда, находящегося в режиме рекуперативного торможения, обеспечивается поездами, находящимися на соответствующей межподстанционной зоне или смежных зонах в режиме тяги [2]. Расчеты показывают, что для каждого участка железной дороги и заданных размеров движения существует некоторое множество оптимальных нормативных графиков движения, позволяющих обеспечить минимальный уровень потребления электрической энергии на тягу поездов по тяговым подстанциям участка железной дороги. Следует отметить, что возможности изменения расписания следования поездов ограничены, что объясняется влиянием ряда факторов, например размерами движения на участке или количеством путей станции отправления. Указанные и подобные ограничения в целом ряде случаев не позволяют обеспечить прием энергии рекуперации в полном объеме. Исходя из этого, целесообразно рассмотреть вопрос размещения специальных приемников рекуперации в системе тягового электроснабжения. Известны случаи повышения напряжения в контактной сети выше 4000 В на участках с эксплуатацией электропоездов серий ВЛ10 и ВЛ11 [3], приводящие к срабатыванию защиты от повышенного напряжения на электроподвижном составе и остановке поезда. Применение приемников энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения позволяет обеспечить изменение напряжения в контактной сети в допустимых диапазонах. Указанные проблемы могут быть решены путем размещения в системе тягового электроснабжения (СТЭ) специальных приемников энергии рекуперации (инверторы или поглощающие устройства) [4, 5].

Появление различных типов промышленно выпускаемых образцов накопителей электроэнергии (НЭЭ), а также расширение номинального ряда их емкости позволяет рассмотреть использование НЭЭ в качестве приемника энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения или на электроподвижном составе. Если размещение инверторов в системе тягового электроснабжения нераз-

рывно связано с тяговыми подстанциями, то НЭЭ возможно размещать на объектах, непосредственно не связанных с внешней системой электроснабжения, например, на постах секционирования. Это позволяет в ряде случаев приблизить приемник энергии к местам с наибольшей частотой применения рекуперативного торможения или объемам рекуперации.

В настоящее время известно несколько типов НЭЭ – электрохимические, суперконденсаторы и кинетические [6], применение которых может рассматриваться в СТЭ [7–14]. Наиболее целесообразным в настоящее время представляется применение в СТЭ НЭЭ двух типов – емкостного (суперконденсатор) и электрохимического (аккумуляторная батарея), в силу ряда характеристик [15], или созданного на их основе гибридного накопителя энергии.

Применение накопителей энергии прошло апробацию на тяговых подстанциях Московского метрополитена [16, 17] и показало достаточно высокую энергетическую эффективность. В то же время следует учитывать, что применение НЭЭ на тяговых подстанциях содержит ряд недостатков, к которым можно отнести отсутствие эффектов разгрузки питающих линий тяговой подстанции, снижение потерь напряжения и мощности в тяговой сети, уменьшение нагрева проводов тяговой сети [18]. Указанных недостатков лишен случай размещения НЭЭ на электроподвижном составе, но он сопряжен со значительными инвестициями в модернизацию электроподвижного состава. Одним из предпочтительных вариантов размещения НЭЭ является пост секционирования, находящийся в границах ординат рекуперативного торможения, способствующий разгрузке питающих линий тяговых подстанций, снижению потерь напряжения и мощности в тяговой сети, уменьшению нагрева проводов тяговой сети. Как показывают расчеты, по сравнению с вариантом размещения НЭЭ на ТП, размещение накопителей на посту секционирования (ПС) по ряду энергетических параметров является более эффективным [19, 20].

Решение поставленной задачи на основе критерия минимума расхода электроэнергии по тяговым подстанциям позволяет получить вариант исполнения нормативного графика движения поездов, а также размещения приемников энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения на основе планируемых размеров движения и имеющихся ограничений со стороны инфраструктуры. При решении задачи примем такой нормативный график движения поездов, который обеспечивает благоприятные условия для применения рекуперации, но не позволяет реализовать абсолютный уровень рекуперации. Реализация абсолютного уровня рекуперации в рассматриваемом случае будет осуществляться с помощью накопителя энергии таким образом, чтобы обеспечить снижение уровня электропотребления по тяговым подстанциям.

Рассмотрим задачу оценки эффективности размещения НЭЭ на посту секционирования одной из межподстанционных зон участка железной дороги. Для решения задачи проанализируем работу одного из участков железной дороги постоянного тока, состоящей из трех межподстанционных зон, на которых реализован узловый параллельный режим питания. Расчетная схема участка (рис. 1, а) содержит четыре тяговых подстанции (ТП1–ТП4), три поста секционирования (ПС1–ПС3) и единицу электроподвижного состава. К шинам поста секционирования ПС2 подключен накопитель электроэнергии емкостного типа (ЕНЭ) [21]. Схема замещения для расчетного участка представлена на рис. 1, б.

На расход электроэнергии на тягу оказывает влияние множество факторов, таких как: скорость движения, масса поезда, профиль пути, температура окружающего воздуха и др. [22, 23]. Для решения рассматриваемой задачи примем, что указанные факторы не подвержены изменениям и в данном аспекте решения задачи не учитываются. С целью оценки эффективности применения ЕНЭ на посту секционирования выполним имитационное моделирование движения поездов по рассматриваемому участку. Определим параметры схемы замещения, приняв следующие характеристики рассматриваемого участка. Тип контактной подвески по обоим путям участка – М-95+2МФ-100 с усиливающим проводом 2А-185; рельсовая сеть состоит из рельсов Р65 с межпутными соединителями. Каждая подстанция оборудована двумя 12-ти пульсовыми преобразовательными агрегатами, работающими параллельно, двумя понижающими трансформаторами типа ТДН-16000/110 и двумя преобразовательными трансформаторами типа ТРДП-16000/10ЖУ1. Схема выпрямительного

преобразователя – двенадцатипульсовая, последовательного типа. На выходе преобразователя установлен апериодический сглаживающий фильтр.

Определение основных параметров работы для рассматриваемого участка железной дороги основано на проведении тяговых расчетов поезда [24] и выполнении на их основе электрических расчетов. Наиболее точные результаты позволяют получить методы, учитывающие параметры тяговой нагрузки и взаимное расположение поездов на межподстанционных зонах [25–27].

Оценку эффективности применения ЕНЭ на посту секционирования ПС2 выполним по критерию сокращения суммарного расхода электрической энергии по тяговым подстанциям с учетом соблюдения обязательных требований к системе тягового электроснабжения и пропуску поездов (к минимальному и максимальному уровням напряжения в контактной сети, перегрузке трансформаторов и выпрямительных преобразователей подстанций, нагреву проводов тяговой сети). Энергетические параметры системы тягового электроснабжения оценим по среднему уровню напряжения в контактной сети и тяговой нагрузке подстанций.

Примем ряд допущений для определения параметров рассматриваемой схемы замещения (рис. 1, б):

- 1) система напряжений внешнего электроснабжения является симметричной и синусоидальной, мгновенные значения напряжений на входе тяговых подстанций определяются по выражению (1):

$$U_{a,b,c} = U_m \sin(\omega t + \alpha_{a,b,c}), \quad (1)$$

где U_m – амплитудное значение напряжения; $\alpha_{a,b,c}$ – фаза напряжений а, b, с соответственно;

- 2) параметры понижающих и преобразовательных трансформаторов, а также выпрямитель-

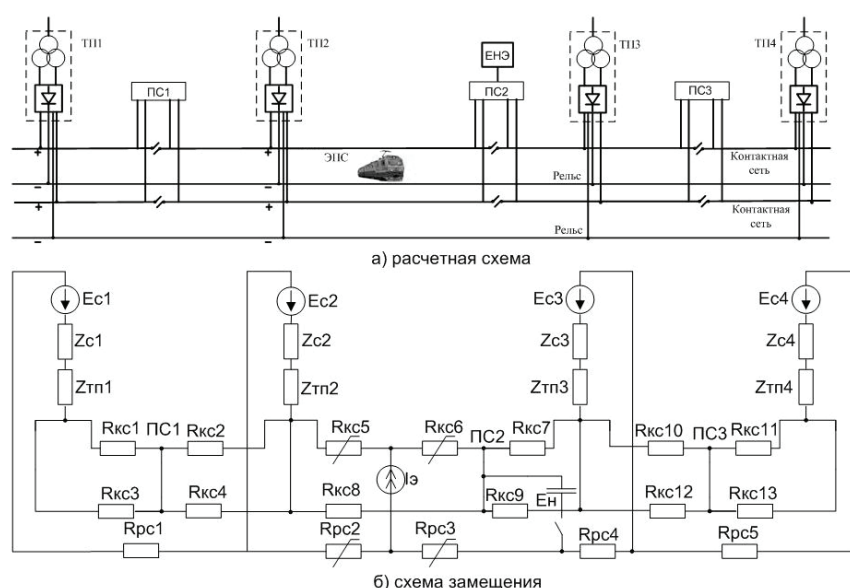


Рис. 1. Расчетная схема участка

Fig. 1. Calculated scheme of the section

ных преобразователей на тяговых подстанциях являются идентичными и определяются по выражению (2):

$$Z_{\text{ТП}} = Z_{\text{ПТ}} + Z_{\text{ПРТ}} + Z_{\text{ВП}}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{ТП}}$ – входное сопротивление i -й подстанции, Ом; $Z_{\text{ПТ}}$ – сопротивление понижающего трансформатора, Ом; $Z_{\text{ПРТ}}$ – сопротивление преобразовательных трансформаторов; $Z_{\text{ВП}}$ – сопротивление выпрямителей, Ом;

- 3) система внешнего электроснабжения обладает бесконечной мощностью исходя из условий (3):

$$S_{\text{к.з.}} \rightarrow \infty, \quad Z_{\text{с1,2,3,4}} = 0, \quad (3)$$

где $S_{\text{к.з.}}$ – мощность короткого замыкания системы внешнего электроснабжения, кВт; $Z_{\text{с1,2,3,4}}$ – сопротивление системы внешнего электроснабжения, Ом;

- 4) посты секционирования ПС1–ПС3 расположены на середине межподстанционных зон, при этом сопротивления элементов контактной сети определяются по выражению (4):

$$R_{\text{к.с}} = \frac{L_{\text{МПЗ}}}{2} \cdot r_{0 \text{ к.с}}, \quad (4)$$

где $L_{\text{МПЗ}}$ – длина межподстанционной зоны, км; $r_{0 \text{ к.с}}$ – сопротивление 1 км контактной сети, Ом;

- 5) при движении электровоза от ТП2 до ПС2 сопротивления контактной и рельсовой сетей от ТП2 до электровоза и от электровоза до ПС2 изменяются линейно и для заданных параметров тяговой сети определяются по выражению (5):

$$R_{\text{к.с5,6;р.с2,3}} = 0,000374 \cdot t, \quad (5)$$

где t – время, прошедшее с начала моделирования, с;

- 6) скорость электровоза при движении по участку межподстанционной зоны принимается постоянной (6):

$$V_{\text{с}} = \text{const}; \quad (6)$$

- 7) ток электровоза изменяется в соответствии с проведенными тяговыми расчетами или полученными в ходе измерений данными и является функцией времени (7):

$$I_{\text{с}} = f(t); \quad (7)$$

- 8) напряжение на накопителе энергии на посту секционирования изменяется в зависимости от времени заряда/разряда и напряжения в контактной сети и является функцией нескольких переменных (8):

$$E_{\text{н}} = f(U_{\text{к.с}}, t, I_{\text{рек}}), \quad (8)$$

где $U_{\text{к.с}}$ – напряжение в контактной сети в месте подключения поста секционирования, В; t – время заряда/разряда накопителя энергии, с; $I_{\text{рек}}$ – величина тока рекуперативного торможения, А.

Получение параметров тяговой нагрузки возможно двумя способами – путем проведения тяговых расчетов или путем получения данных измерений на электроподвижном составе. Для оценки эффективности применения ЕНЭ воспользуемся вто-

рым способом – результатами измерений электрических параметров движения поезда с электровозом серии 2ЭС10 по участку железной дороги с параметрами (профиль пути, параметры системы тягового электроснабжения и др.), идентичными тем, которые приняты для схемы замещения (рис. 2).

Для заданных параметров схемы замещения и тяговой нагрузки выполним имитационное моделирование с помощью программного комплекса MatLab, позволяющего проводить исследования режимов работы системы тягового электроснабжения [28]. Имитационная модель для оценки эффективности применения ЕНЭ на посту секционирования, реализованная в MatLab, представлена на рис. 3. Она состоит из четырех блоков – тяговых подстанций (ТП 1–4), включает в себя тяговую сеть, представленную сопротивлениями контактной ($R_{\text{к.с}} 1–13$) и рельсовой ($R_{\text{р.с}} 1–5$) сетей. Сопротивления контактной сети $R_{\text{к.с}} 5–6$ и сопротивления рельсовой сети $R_{\text{р.с}} 2–3$ межподстанционной зоны представлены блоками переменных резисторов. Электровоз и ЕНЭ на ПС представлены блоками ЭПС и ЕНЭ. В блок ЭПС входит управляемый источник тока, позволяющий регулировать тяговую нагрузку в соответствии с полученными экспериментальными данными системы регистрации параметров движения электровоза 2ЭС10 (рис. 2), а также устройство защиты от повышенного напряжения, которое прерывает процесс рекуперативного торможения при достижении напряжения на токоприемнике выше 4000 В. Токи $I_{\text{р}} 1–4$ и напряжения $U_{\text{р}} 1–4$, измеряемые на всех тяговых подстанциях, электровозе ($I_{\text{е}}$, $U_{\text{е}}$) и ЕНЭ ($I_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$), регистрируются блоками Scope 1 и Scope 2. В связи со значительным объемом вычислений для увеличения скорости расчетов была проведена дискретизация модели. Дискретизация выполнена методом Тастина (интегрирование методом трапеций с фиксированным шагом). Величина шага дискретизации составляет 0,2 мс.

Схема замещения тяговой подстанции рассматриваемого участка железной дороги в Matlab представлена на рис. 4 и включает в себя три источника переменного напряжения (фазы А, В, С), имитирующих трехфазную внешнюю сеть. Для моделирования понижающего и преобразовательных трансформаторов использовались блоки Three-Phase Transformer (Two Windings) и Three-Phase Transformer (Three Windings) соответственно. Для приведения параметров схемы замещения, понижающего трансформатора и двух преобразовательных, к базовым величинам использовалась методика, позволяющая производить данные расчеты по паспортным данным [29]. Моделирование 12-ти пульсовых выпрямителей выполнялось на основе 6-ти пульсовых блоков Universal Bridge.

Варианты подключения ЕНЭ к шинам поста секционирования и параметры тяговой нагрузки определяют схему подключения и схему заряда-разряда накопителя энергии. Для оценки эффективности применения ЕНЭ в системе тягового

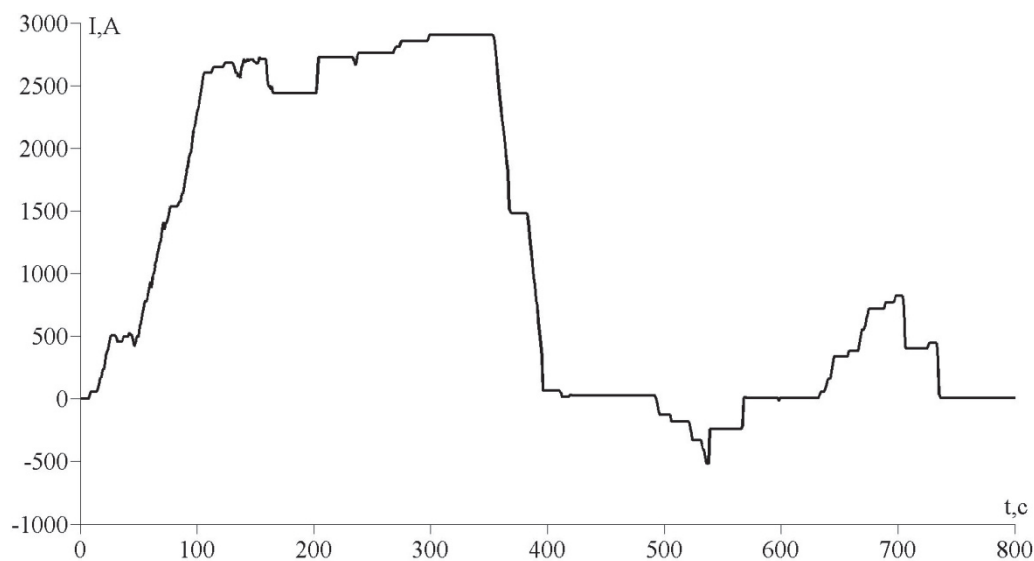


Рис. 2. График изменения тяговой нагрузки при следовании поезда

Fig. 2. Diagram of traction capacity modification

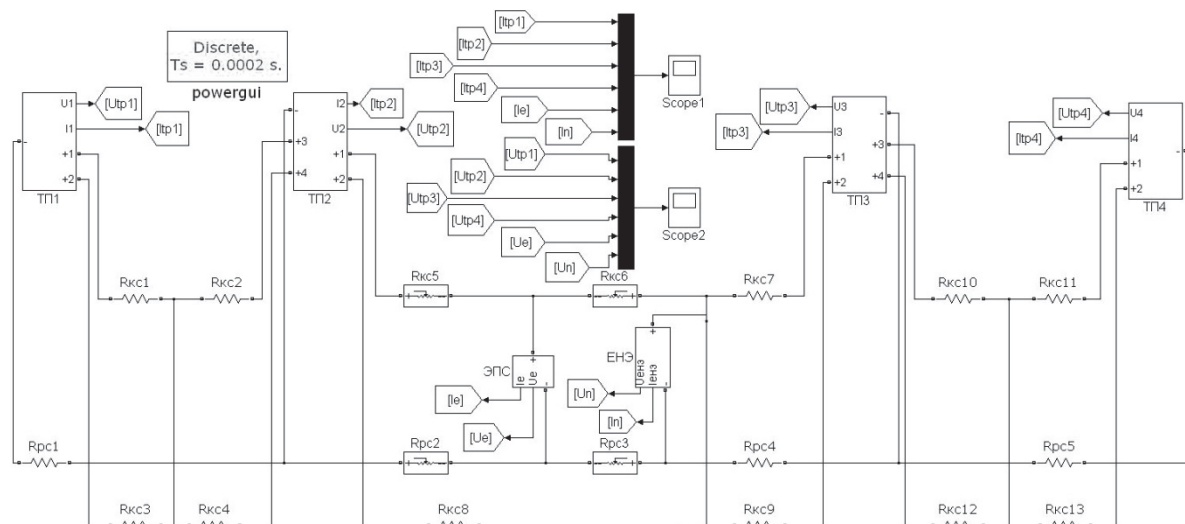


Рис. 3. Имитационная модель системы тягового электроснабжения

Fig. 3. Simulator of the electric traction system

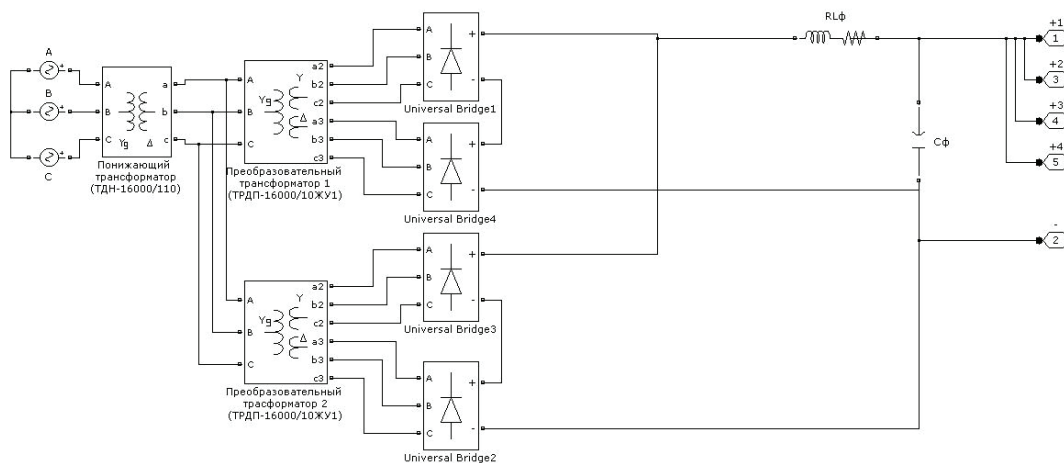


Рис. 4. Схема замещения тяговой подстанции в MatLab

Fig. 4. Equivalent circuit of the traction substation in MatLab

электропитания рассмотрим схему подключения ЕНЭ с помощью встречно включенных IGBT транзисторов [21]. Схема замещения представленной модели в MatLab примет вид, приведенный на рис. 5. Схема состоит из блоков IGBT/Diode K1 и K2, моделирующих IGBT-транзисторы и предназначенных для управления режимами работы ЕНЭ. Накопитель моделируется блоком Cn, состоящим из конденсаторов, позволяющих изменять суммарную емкость.

Управление режимами работы ЕНЭ основано на измерениях уровня напряжения на шинах поста секционирования и накопителе. Управление режимами работы реализуется таким образом, чтобы обеспечить переход в режим заряда ЕНЭ при повышении номинального уровня напряжения (при рекуперативном торможении) и переход в режим разряда при падении уровня напряжения на шинах поста секционирования до минимального значения. Результаты измерений используются в системе управления устройством по заданному алгоритму. В основу алгоритма работы (рис. 6) рассматриваемой схемы положены измерения тока и напряжений с помощью датчиков тока и напряжения в контактной сети в точке присоединения ПС, а также на емкостном накопителе. На основе измерений указанных величин осуществляется переключение транзисторных ключей для реализации процесса заряда, разряда или перехода в режим ожидания.

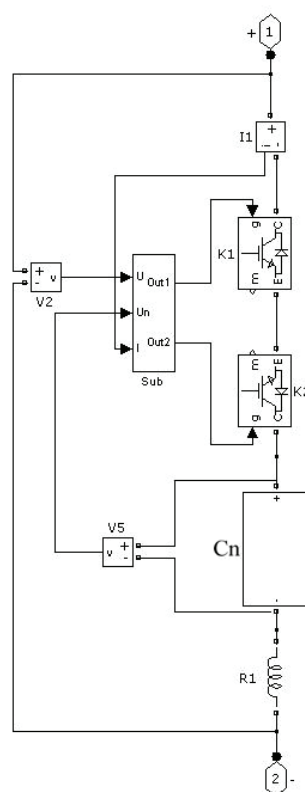


Рис. 5. Схема подключения ЕНЭ в MatLab

Fig. 5. Connection scheme of the CESU in MatLab

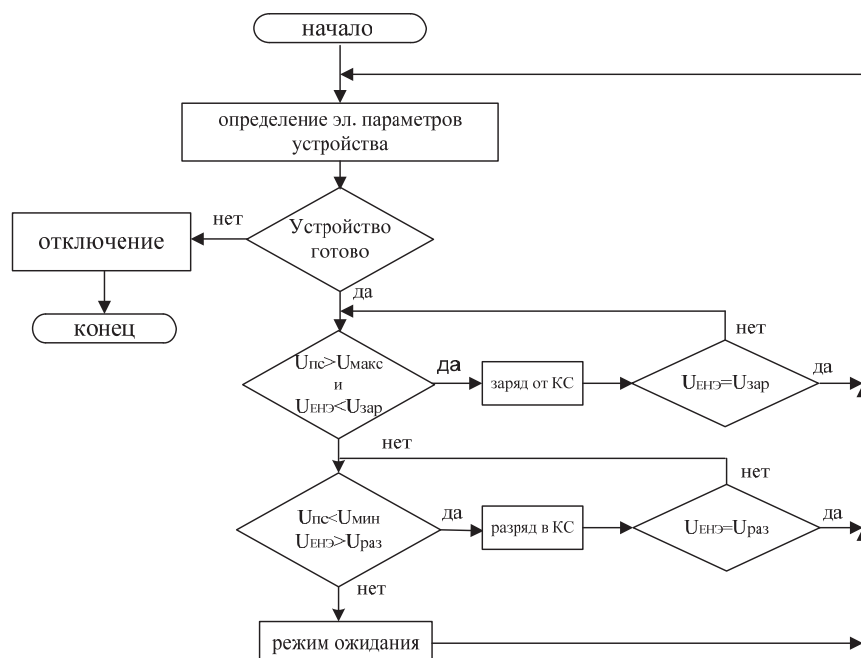


Рис. 6. Алгоритм работы ЕНЭ на посту секционирования

Fig. 6. Mechanism of the CESU operation on the sectioning post

Работа ЕНЭ на посту секционирования осуществляется следующим образом. В начальный момент времени определяется готовность устройства к работе, затем – уровень напряжения на шинах ПС. При повышении напряжения на шинах поста секционирования $U_{пс}$ до уровня $U_{макс}$, соответствующего режиму рекуперативного торможения поезда, и напряжении на накопителе $U_{ЕНЭ}$ ниже максимально возможного уровня $U_{зар}$, соответствующего полному заряду устройства, ЕНЭ переходит в режим заряда. При понижении напряжения на шинах поста секционирования $U_{пс}$ до уровня $U_{мин}$ и напряжении на накопителе $U_{ЕНЭ}$ выше уровня $U_{раз}$, обеспечивающего разряд, ЕНЭ переходит в режим разряда в контактную сеть. При отсутствии условий для перехода ЕНЭ в режим разряда или заряда накопитель на посту секционирования находится в режиме ожидания. Алгоритм работы предусматривает прекращение работы ЕНЭ в аварийных режимах.

Обозначившиеся перспективы развития систем тягового электроснабжения в направлении «smart grid» позволяют рассмотреть построение алгоритма работы накопителя электроэнергии на посту секционирования с учетом уровней напряжения и тяговых нагрузок на шинах тяговых подстанций. В этом случае использование накопителей позволит регулировать напряжение не только на посту секционирования, но и на тяговых подстанциях.

Имитационная модель позволяет получить результаты для режимов разряда и заряда ЕНЭ, когда электроподвижной состав находится в режимах тяги и рекуперативного торможения соответственно. В модели учтены требования к защите электроподвижного состава, в соответствии с которыми обеспечивается переход из режима рекуперации в режим торможения при увеличении напряжения на токоприемнике до 4000 В. Графики изменения напряжения, тока на ТП2 и ЭПС при разряде ЕНЭ, а также при его последующем заряде представлены на рис. 7. Из рисунка видно, что при переходе электроподвижного состава из режима тяги в режим рекуперативного торможения начинает повышаться напряжение на шинах тяговой подстанции $U_{ТП2}$ (в отличие от уровня $U_{ТП2}$, наблюдаемого при отключенном ЕНЭ на посту секционирования) и на токоприемнике электровоза $U_{ЭПС}$ (в отличие от уровня $U_{ЭПС}$, наблюдаемого при отключенном ЕНЭ на посту секционирования). Аналогичным образом изменяются токи присоединений тяговой подстанции ТП2 и электроподвижного состава. При достижении напряжения на токоприемнике уровня 4000 В или полном заряде ЕНЭ происходит прекращение процесса заряда.

Графики изменения напряжения и тока на ЕНЭ, установленном на посту секционирования ПС2, представлены на рис. 8. Зона 1, в которой происходит падение напряжения на токоприемни-

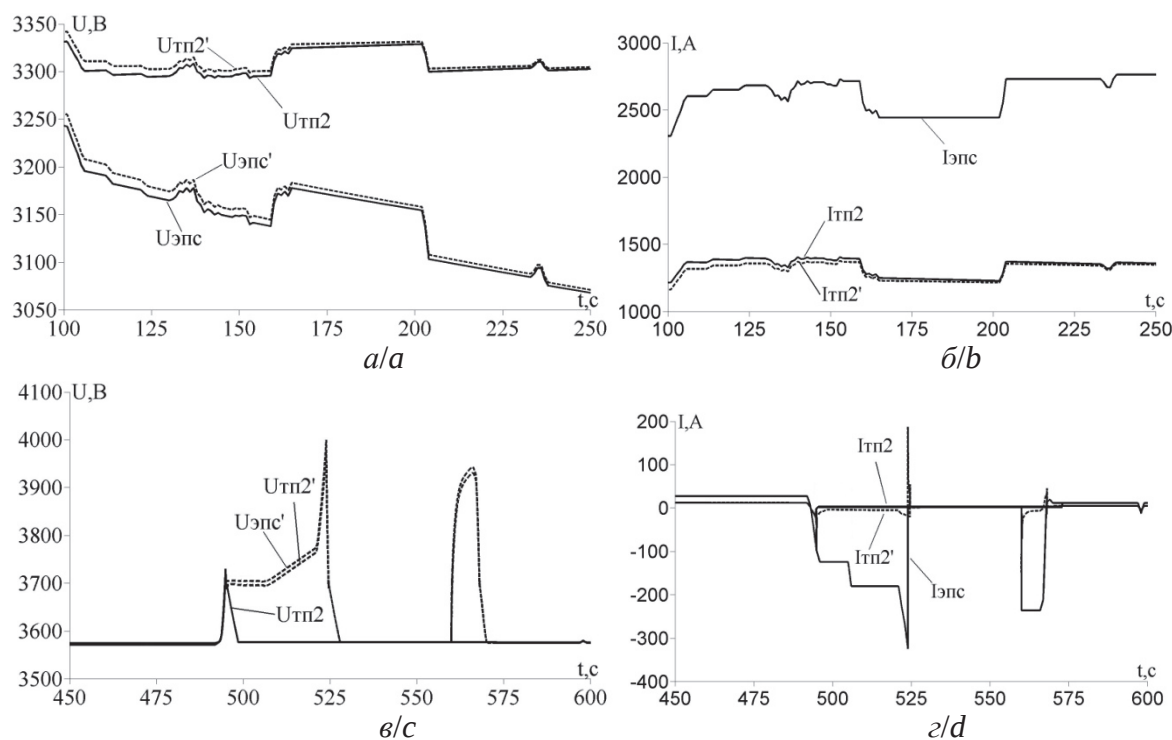


Рис. 7. Графики изменения напряжения и тока на тяговой подстанции ТП2 и электроподвижном составе при разряде (а, б) и при последующем заряде ЕНЭ (в, г)

Fig. 7. Diagrams of voltage and current modification on the traction substation and the electric rolling train at discharge (a, b) and at the following charge of the CESU (c, d)

ке ЭПС с 3750 до 3250 В, соответствует режиму разряда ЕНЭ на посту секционирования ПС2. При переходе в режим рекуперативного торможения происходит увеличение напряжения на шинах поста секционирования ПС2 и ЕНЭ переходит в режим заряда (зона 2). В зоне 2 наблюдается два цикла заряда ЕНЭ, что объясняется ограниченной емкостью накопителя. Повторное применение рекуперативного торможения позволяет возобновить процесс заряда ЕНЭ.

Результаты имитационного моделирования для рассмотренного участка железной дороги с накопителем энергии на посту секционирования ПС2 представлены в таблице. Применение ЕНЭ на ПС позволяет улучшить основные энергетические характеристики режима работы системы тягового электроснабжения. В частности, установлено, что среднее напряжение за рассматриваемый интервал времени на присоединениях контактной сети смежных подстанций можно увеличить на 3 %, а средний уровень тяговой нагрузки снизить на 2 %. Предлагаемый вариант применения ЕНЭ для рассматриваемого случая позволяет сократить потери в контактной сети на 0,85 % и суммарный расход электроэнергии на 1,71 %.

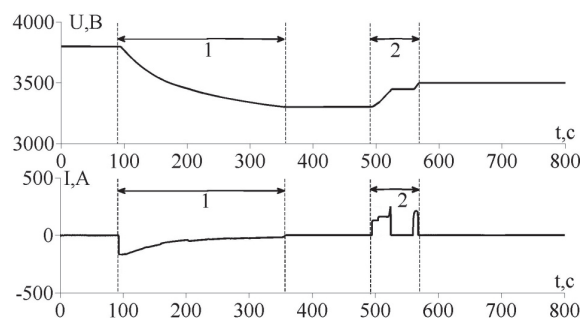


Рис. 8. Графики изменения напряжения и тока на ЕНЭ при его разряде и последующем заряде

Fig. 8. Diagrams of voltage and current modification of the CESU at its discharge and following charge

Следует отметить, что рассматриваемая имитационная модель участка железной дороги (рис. 3) для анализа протяженных участков может быть расширена до границ подразделения, железной дороги или полигонов обращения поездов в грузовом и пассажирском движении. В этом случае схема замещения должна быть дополнена необходимым количеством элементов системы тягового электроснабжения, а также необходимым количеством электроподвижного состава различного типа в соответствии с заданными размерами движения.

В ходе имитационного моделирования выявлен ряд недостатков схемы подключения накопителя

энергии на посту секционирования, к которым следует отнести невозможность как дополнительного подзаряда накопителя энергии малыми токами в моменты времени, когда нагрузка в контактной сети отсутствует или мала, так и изменения работы накопителя энергии в зависимости от уровня тяговой нагрузки. Эти и другие недостатки могут быть устранены совершенствованием схемы подключения накопителя энергии к посту секционирования.

Таблица. Результаты имитационного моделирования
Table. Results of simulation

Наименование Title	Расход, кВт·ч Consumption, kW·h		Напряжение на токоприем- нике, В Voltage at the current collec- tor, V		Ток, А Current, A		Изменение тока и на- пряжения, % Change of current and voltage, %	
	Без ЕНЭ Without CESU	С ЕНЭ With CESU	U _{сред} без ЕНЭ U _{сред} without CESU	U _{сред} с ЕНЭ U _{сред} with CESU	I _{сред} без ЕНЭ I _{сред} without CESU	I _{сред} с ЕНЭ I _{сред} with CESU	U	I
ТП1	208,02	205,70	3523,0	3532,2	270,7	267,6	0,26	-1,15
ТП2	406,50	402,33	3388,0	3476,7	548,4	542,3	2,62	-1,11
ТП3	154,76	149,53	3427,7	3546,4	199,4	192,6	3,46	-3,44
ТП4	77,34	74,61	3458,5	3566,1	98,5	95,0	3,11	-3,55
ЭПС	781,45	775,38	3377,5	3388,3	1117,0	1108,7	0,32	-0,74

Результаты моделирования взаимодействия электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения на примере одного из эксплуатационных участков железной дороги постоянного тока показали, что применение накопителей энергии на посту секционирования позволяет сократить уровень электропотребления по тяговым подстанциям за счет повышения эффективности рекуперативного торможения на величину 1,7 %. Одновременно с этим применение накопителей позволяет увеличить средний уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава и снизить средний ток тяговой нагрузки тяговых подстанций, что способствует увеличению пропускной и провозной способности участка железной дороги. Оценка влияния энергоемкости и режимов работы накопителей электроэнергии на энергетическую эффективность системы тягового электроснабжения в условиях различных профилей пути, скоростей движения и масс поездов, а также в условиях построения интеллектуальных систем тягового электроснабжения требует проведения дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение ОАО «РЖД» от 15 декабря 2011 года № 2718р. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года. – М., 2011.
2. Сидорова Н.Н., Третьяков О.В., Феоктистов В.П. Повышение эффективности рекуперативного торможения в электрической тяге // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 1. – С. 19–22.
3. Влияние рекуперативного торможения на систему тягового электроснабжения / В.Т. Черемисин, А.С. Вильгельм, В.А. Квацук, В.Л. Незевак // Локомотив. – 2013. – № 8. С. 5–8.
4. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
5. Соколов С.Д. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций. – М.: Транспорт, 1979. – 264 с.
6. Астахов Ю.Н. Накопители энергии в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1989. – 159 с.
7. Шатохин А.П. Перспективные места установки накопителей электрической энергии // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: матер. 2-й Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Омск, 2014. – С. 162–168.
8. Nezevak V.L., Cheremisin V.T., Shatochin A.P. Evaluation of the Energy Efficiency of Energy Storage for Electric Rolling Stock of Railways DC // International Journal of Advanced Railway. – 2013. – V. 1. – № 2. – P. 53–56.
9. Denton T. Automobile Electrical and Electronic Systems. – L.: Routledge, 2010. – 463 p.
10. Williams M. Rice University's James Tour Group creates single-surface material for energy storage, electronics // Nature Communications. – 2012. – № 3. URL: <http://news.rice.edu/2012/11/27/james-bond-a-graphenenanotube-hybrid-2/#sthash.9S22r6jx.dpuf> (дата обращения: 10.04.2015).
11. Yan G., Li J., Zhang Y., Gao F., Kang F. Electrochemical polymerization and energy storage for poly [Ni (salen)] as supercapacitor electrode material // Journal of Physical Chemistry. – 2014. – V. 118. – № 19. – P. 9911–9917.
12. Sevilla M., Mokaya R. Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage // Energy & Environmental Science. – 2014. – V. 7. – № 4. – P. 1250–1280.
13. Hybrid energy storage system based on supercapacitors and LI-ION Batteries / A. Zhuk, K. Denshikov, V. Fortov, A. Sheindlin, W. Wilczynski // Journal of Applied Electrochemistry. – 2014. – V. 44. – № 4. – P. 543–550.
14. Zherlitsyn A.G., Kanaev G.G. A gigawatt generator with an inductive energy storage discharge // Instruments and Experimental Techniques. – 2013. – V. 56. – № 3. – P. 287–288.
15. Бут А.Д. Накопители энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
16. Стационарная система аккумулирования энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе емкостных накопителей энергии / Ю.А. Бродский, А.И. Подаруев, В.Н. Пупынин, М.В. Шевелюгин // Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 38–41.
17. Бычкова М.П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро // Энергосовет. – 2011. – № 3. URL: http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=185 (дата обращения: 15.04.2015).
18. Незевак В.Л., Вильгельм А.С. К вопросу о выборе накопителя на участках постоянного тока с применением рекуперативного торможения // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: матер. науч.-практ. конф. – Омск, 2013. – С. 30–36.
19. Незевак В.Л., Никифоров М.М., Черемисин В.Т. Выбор мест установки накопителей электрической энергии на полигоне постоянного тока железнодорожного транспорта по критерию энергоэффективности // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. – 2013. – № 2 (6). – С. 14–18.
20. Вильгельм А.С., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Сравнительная эффективность вариантов использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного тока // Наука и образование транспорту: матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. – Самара, 2013. – С. 243–246.
21. Пост секционирования постоянного тока с емкостным накопителем энергии: пат. Рос. Федерация № 147814; завл. 02.04.2014; опубл. 20.11.2014, Бюл. № 32. – 2 с.
22. Сидорова Е.А. Разработка системы нормирования расхода электроэнергии на тягу поездов на основе исследования статистических закономерностей: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 1991. – 198 с.
23. Давыдов А.И., Никифоров М.М. Общие принципы сравнительного анализа эффективности использования электроэнергии на тягу поездов по участкам железных дорог // Наука и образование транспорту. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 237–240.
24. Правила тяговых расчетов для поездной работы / под ред. А.Н. Долганов. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
25. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
26. Вильгельм А.С., Гутников В.И., Никифоров М.М. Апробация расчетной модели системы тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока для оценки потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения // Известия Транссиба. – 2014. – № 1 (17). – С. 50–57.
27. Комяков А.А., Вильгельм А.С., Незевак В.Л. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока // Известия Транссиба. – 2014. – № 3 (19). – С. 54–65.
28. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems, Simulink. – СПб.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.
29. Борисов П.А., Томасов В.С. Расчет и моделирование выпрямителей. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2009. – 169 с.

Поступила 19.05.2015 г.

UDC 621.311

INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC TRACTION SYSTEM IN OPERATING CONDITION OF SECTIONING POSTS WITH ELECTRIC ENERGY STORAGE UNITS

Vasily T. Cheremisin,

Omsk State Transport University, 46, Karl Marx Avenue, Omsk, 644046, Russia.

E-mail: Cheremisinvt@gmail.com

Vladislav L. Nazevak,

Omsk State Transport University, 46, Karl Marx Avenue, Omsk, 644046, Russia.

E-mail: NezevakWL@mail.ru

Andrey P. Shatokhin,

Omsk State Transport University, 46, Karl Marx Avenue, Omsk, 644046, Russia.

E-mail: Shatokhin_ap@mail.ru

The increase of energy efficiency of the electric traction system is directed to achieving the target indicators, denoted by the Energy strategy of the OS «RZD». One of the basic problems, which must be solved, is the increase of efficiency of the regenerative braking on the railway sections. This could be achieved by receiving regeneration energy. One of the possible decisions is the disposal of the electric energy storage unit in the electric traction system on the sectioning post. For some energy parameters, the installation of storage unit on the sectioning post is more effective in comparison with its location on the traction substations. The analysis of the basic methods of the electric traction system operation when the regenerative braking is applied allows determining the required parameters and finding more effective areas for using the device.

The aim of the research is to evaluate the expediency and the efficiency of applying the capacitive energy storage units on the railway posts of the DC sectioning to increase the efficiency of using the regenerative braking as well as to increase the energy efficiency of the electric traction system.

Research methods: the simulation modeling of the traction capacity in the electric traction system based on the experimental data, obtained from the measuring system of the DC electric locomotive.

Results. The authors have analyzed the influence of the capacitive energy storage units, located on the sectioning posts on the operation modes of the DC electric traction system when the regenerative braking is applied. The electric energy storage unit operation was modeled for one of the actual area of the railroad with several areas between substations, on the base of the data, obtained by the results of processing the goods train traction load. The cross-section of a road includes gradients up to 10 ppm, that causes the wide use of the regenerative braking. The authors proposed the algorithm of controlling the operating mode of the electric energy storage unit on the post of the DC sectioning, which is based on measuring voltage level on the wires of the post of the DC sectioning and on the wires of the electric energy storage unit; considered the diagram of controlling the energy storage units with the counter turning on of the election keys, which provides the energy storage charge unit when using the trains with regenerative braking and its discharge at minimal voltage in the wires of the sectioning post by the maximal traction load. It was shown, that the use of the electric energy storage units on the post of the DC sectioning allows increasing the average voltage on the wires of the adjacent traction substations, reducing electric energy losses in the traction system, the level of the traction load of the converting unit input and the total electric power consumption, determined by the connections of the contact network of the traction substations. The authors estimated the influence of the storage unit on the working parameters of the electric traction system. The paper mentions the defects of the considered diagram of the energy storage unit connection to the wires of the DC sectioning post. The defects can be removed by improving the control diagram.

Key words:

Energy efficiency, electric traction system, sectioning post, capacitive energy storage unit, electric rolling train.

REFERENCES

1. *Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 15 dekabrya 2011 goda № 2718r. Energeticheskaya strategiya holdinga «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda* [Instruction of OS «RZhD» of 15 December 2011 no. 2718r. Energy strategy of the holding company «Russian Railways» for 2015 and in outlook till 2030]. Moscow, 2011.
2. Sidorova N.N., Tretinnikov O.V., Feoktistov V.P. Povyshenie effektivnosti rekuperativnogo tormozheniya v elektricheskoy tyage [The increase of of the regenerative braking efficiency in electric traction]. *The science and technology of transport*, 2015, vol. 113, no. 1, pp. 19–22.
3. Cheremisin V.T., Vilgelm A.S., Kvashchuk V.A., Nezevak V.L. Vliyanie rekuperativnogo tormozheniya na sistemu tyagovogo elektrosnabzheniya [The influence of the regenerative braking on the electric traction system]. *The locomotive*, 2013, no. 8, pp. 5–8.
4. Burkov A.T. *Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli* [Electronics and converters]. Moscow, Transport Publ., 1999. 464 p.
5. Sokolov S.D. *Poluprovodnikovye preobrazovatelnye agregaty tyagovykh podstantsiy* [Semiconducting converting units of the traction substations]. Moscow, Transport Publ., 1979. 264 p.
6. Astakhov Yu.N. *Nakopiteli energii v elektricheskikh sistemakh* [Energy storage units in the electrical systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 159 p.
7. Shatokhin A.P. Perspektivnye mesta ustanovki nakopiteley elektricheskoy energii [The perspective sites of installing the electric energy storage units]. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov. Materialy 2 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Materials of the 2nd All-Russian theoretical and practical conference with the international partnership. The operating reliability of the locomotive park and the increase of the train traction efficiency]. Omsk. pp. 162–168.
8. Nezevak V.L., Cheremisin V.T., Shatokhin A.P. Evaluation of the energy efficiency of the energy storage unit for the electric rolling stock of the DC railways. *International journal of advanced railways*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 53–56.

9. Denton T. *Automobile electrical and electronic systems*. London, Routledge, 2010. 463 p.
10. Williams M. Rice University's James Tour Group creates single-surface material for energy storage, electronics. *Nature Communications*, 2012, no. 3. Available at: <http://news.rice.edu/2012/11/27/james-bond-a-graphenenanotube-hybrid-2/#sthash.9S22r6jx.dpuf> (accessed 10 April 2015).
11. Yan G., Li J., Zhang Y., Gao F., Kang F. Electrochemical polymerization and energy storage for poly [Ni (salen)] as supercapacitor electrode material. *Journal of Physical Chemistry*, 2014, vol. 118, no. 19, pp. 9911–9917.
12. Sevilla M., Mokaya R. Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage. *Energy & Environmental Science*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 1250–1280.
13. Zhuk A., Denshikov K., Fortov V., Sheindlin A., Wilczynski W. Hybrid energy storage system based on supercapacitors and LI-ION Batteries. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2014, vol. 44, no. 4, pp. 543–550.
14. Zherlitsyn A.G., Kanaev G.G. A gigawatt generator with an inductive energy storage discharge. *Instruments and Experimental Techniques*, 2013, vol. 56, no. 3, pp. 287–288.
15. But A.D. *Nakopiteli energii* [Energy storage units]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 400 p.
16. Brodskiy Yu.A., Podaruev A.I., Pupynin V.N., Shevelyugin M.V. Stacionarnaya sistema akkumulirovaniya energii rekuperatsii elektropodvizhnogo sostava metropolitena na baze emkostnykh nakopiteley energii [Stationary system of regenerative energy accumulation in subway electric rolling train based on the capacitive energy storage units]. *The electrical engineering*, 2008, vol. 64, no. 7, pp. 38–41.
17. *Sistema nakopiteley elektroenergii dlya povysheniya energoefektivnosti v metro* [System of electric energy storage units for increasing energy efficiency in the subway]. Available at: http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?idd=185 (accessed 15 April 2015).
18. Nezevak V.L., Vilgelm A.S. K voprosu o vybere nakopitelya na uchastkakh postoyannogo toka s primeneniem rekuperativnogo tormozheniya [On the issue of selecting the storage unit on the DC areas applying the regenerative braking]. *Innovatsionnye proekty i novye tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials of the theoretical and practical conference. Innovative projects and new technologies in education, industry and transport]. Omsk. pp. 30–36.
19. Nezevak V.L., Nikiforov M.M., Cheremisin V.T. Vybor mest ustanovki nakopiteley elektricheskoy energii na poligone postoyannogo toka zheleznodorozhnogo transporta po kriteriyu energoefektivnosti [The choice of the installing the electric energy storage units on the railway transport ground according to the efficient energy use criterion]. *Nauka i transport. Modernizatsiya zheleznodorozhnogo transporta*, 2013, no. 2 (6), pp. 14–18.
20. Vilgelm A.S., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Sravnitel'naya effektivnost variantov ispolzovaniya energii rekuperatsii na zheleznnykh dorogakh postoyannogo toka [The comparative efficiency of the variants of using the recuperation energy on the DC railways]. *Nauka i obrazovanie transportu. Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials of the VIth International theoretical and practical conference. Science and education for transport]. Samara, 2013. pp. 243–246.
21. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. *Post sektionirovaniya postoyannogo toka s emkostnym nakopitelem energii* [The post of DC sectioning with the capacitive energy storage unit]. Patent RF, no. 147814, 2014.
22. Sidorova E.A. *Razrabotka sistemy normirovaniya rashkoda elektroenergii na tyagu poezdov na osnove issledovaniya statisticheskikh zakonornostey*. Dis. Kand. nauk [The development of the systems for rating power consumption for train traction based on the research of the statistical pattern]. Omsk, 1991. 198 p.
23. Davydov A.I., Nikiforov M.M. Obshchie printsipy sravnitel'nogo analiza effektivnosti ispolzovaniya elektroenergii na tyagu poezdov po uchastkam zheleznnykh dorog [General principles of the comparative analysis of using electrical energy for train traction on the railway sections]. *Science and transport education*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 237–240.
24. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* [The rules of traction calculation for train operation]. Ed. by A.N. Dolganova. Moscow, Transport Publ., 1985. 287 p.
25. Markvardt K.G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog* [The electric power supply of the electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
26. Vilgelm A.S., Gutnikov V.I., Nikiforov M.M. Aprobatsiya raschetnoy modeli sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog postoyannogo toka dlya otsenki potentsiala energoefektivnosti rekuperativnogo tormozheniya [Approbation of the design model of DC railroad electric traction system for estimating the potential of the regenerative braking energy efficiency]. *Proceedings of the TRANS-Siberian railway*, 2014, vol. 154, no. 1, pp. 50–57.
27. Komyakov A.A., Vilgelm A.S., Nezevak V.L. Sovershenstvovanie metoda rascheta sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka [Improvement of the design method of the DC electric traction system]. *Proceedings of the TRANS-Siberian railway*, 2014, vol. 154, no. 3, pp. 54–65.
28. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems, Simulink* [Modeling of the electro-technical devices in Matlab, SimPowerSystems, Simulink]. St. Petersburg, DMK Press, 2008. 288 p.
29. Borisov P.A., Tomasov V.S. *Raschet i modelirovanie vypryamiteley* [Calculation and modeling of the rectifiers]. St. Petersburg, ITMO University Press, 2009. 169 p.

Received: 19 May 2015.