

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

**Е.Л. Рыжова**

ORCID: 0000-0001-7984-2558 e-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

*Санкт-Петербург, Россия*

Рассмотрены проблемы повышения энергетической эффективности железнодорожного транспорта при использовании различных систем накопления энергии, в первую очередь, рекуперативной энергии торможения. Актуальность работы определена тем, что на электрифицированных участках железных дорог недостаточно реализован потенциал рекуперативного торможения. Главная причина – отсутствие регенерационных приемников энергии, в результате чего наблюдается повышение уровня напряжения в контактной сети выше допустимых норм, что вызывает ряд негативных последствий, включая прекращение процесса рекуперации и снижение уровня безопасности движения поездов. Соответственно, встает задача разработки технических и технологических решений, повышающих энергетическую эффективность железной дороги и безопасности движения поездов. Представлены основные возможности энергосбережения на железнодорожном транспорте с использованием различных типов накопителей энергии, наиболее перспективным из которых является использование гибридных накопителей энергии. Сделан вывод о необходимости мер для дальнейшего роста экологичности и энергетической эффективности железнодорожного электротранспорта путем внедрения самых современных инновационных систем накопления энергии. Решение задачи предполагает правильный подбор накопителей энергии, выполнение необходимых расчетов и моделирования с учетом всех особенностей эксплуатации.

**Ключевые слова:** аккумуляторные батареи, железнодорожный транспорт, рекуперативная энергия торможения, системы накопления энергии, суперконденсаторы, топливные элементы, экологичность, энергетическая эффективность.

**Для цитирования:** Рыжова Е.Л. Повышение энергоэффективности на железнодорожном транспорте путем применения систем накопления энергии // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 36-48.

DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_2\_36

# IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN ROAD TRANSPORT BY USING ENERGY STORAGE SYSTEMS

**E.L. Ryzhova**

ORCID: 0000-0001-7984-2558 e-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** The article discusses the importance of increasing the energy efficiency of railway transport using various energy storage systems and, first of all, regenerative braking energy. The potential of regenerative braking on electrified sections of railways is not fully realized. The main reason for this is the lack of regenerative energy receivers, as a result of which there is an increase in the voltage level in the contact network above the permissible norms, which causes a number of negative consequences, including the termination of the recovery process and a decrease in the train safety level. The most important research task is the development of solutions aimed at improving the energy efficiency of the railway and train safety. The paper analyzes and summarizes the data of scientific and technical literature, presents the main possibilities for energy saving in railway transport using various types of energy storage devices. The most promising direction is the use of hybrid energy storage devices. Thus, there is a need to develop measures to further increase the environmental friendliness and energy efficiency of railway electric transport through the introduction of the most modern innovative energy storage systems. To solve this problem, it is necessary to correctly select energy storage devices, perform the necessary calculations and modeling, taking into account all the features of their operation.

**Keywords:** batteries, energy efficiency, energy storage systems, environmental friendliness, fuel cells, railway transport, regenerative braking, supercapacitors.

**For citation:** E.L. Ryzhova, «Improving energy efficiency in road transport by using energy storage systems», *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 36-48, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_2\_36

## I. Введение

Железнодорожное транспортное сообщение – одна из наиболее энергоэффективных отраслей экономики, а железная дорога – самый экологичный вид транспорта, имеющий значительный энергосберегающий потенциал. Большая часть грузов в России перевозится электрифицированным железнодорожным транспортом, поэтому российские железные дороги по энергосбережению занимают лидирующие позиции в мире.

Повышение экологичности и энергоэффективности железнодорожного электротранспорта в стране обеспечивается систематическим внедрением инновационных систем накопления энергии (СНЭ). Электроэнергетические и технические характеристики СНЭ напрямую зависят от варианта их расположения, параметров тяговой электросистемы, профиля путей,

массы подвижного состава. При этом важнейшими показателями эффективности применения накопителей являются экономические и технические последствия их использования. Инновационные СНЭ – основа дальнейшего повышения энергетической эффективности транспорта железных дорог и снижения негативного экологического влияния отрасли на окружающую среду [1]. Для снижения потерь энергии в процессе ее преобразования могут использоваться различные виды запасной энергии [2, 3]. Требуются инструменты, которые способны влиять на снижение потребляемого топлива, а также уменьшение выбросов в атмосферу углекислых газов и прочих загрязнителей при эксплуатации железнодорожного транспорта в России и за рубежом [4].

## **II. Объект и методика**

В настоящее время существуют комплексные эксплуатационно-технологические мероприятия по повышению энергоэффективности железнодорожной отрасли:

- накопление рекуперативной энергии и повышение уровня ее рекуперации;
- интеллектуальное управление процессами перевозок, применение экологически безопасных методов вождения и управления движением подвижного состава;
- улучшение технического состояния поездов, уменьшение потерь мощности в электросетях и в тяговом электрооборудовании, снижение массы подвижного состава;
- усовершенствование систем отопления, освещения, терморегулирования, вентиляции и кондиционирования воздуха, а также рекуперация отработанного тепла в различных режимах работы [5, 6].

При системном внедрении на железнодорожном транспорте указанных технологий и мер возможно снижение потребления энергии примерно на 25-35 %. При этом наибольший эффект может дать применение различных систем накопления энергии и, в первую очередь, использование рекуперативной энергии торможения (до 96 %), осуществляемое четырьмя основными способами:

- 1) преобразуется в тепловую энергию через сопротивление силовой электроники;
- 2) одновременно используется другим подвижным составом при стартовом и разгонном движениях напрямую передается в железнодорожную сеть;
- 3) возвращается обратно в электрическую сеть низкого напряжения через инвертор для использования другими потребителями;
- 4) накапливается в СНЭ для последующего применения при движении поездов и передачи другим потребителям [7, 8].

Обязательное условие устойчивой рекуперации – наличие приемников избыточной рекуперационной энергии, которая не может потребляться другими, находящимися в движении поездами на участке. Рекуперативное торможение связано с множеством преимуществ перед механическим и реостатным торможением, которые заключаются в возврате электроэнергии в контактную сеть. Возврат электроэнергии позволяет уменьшить энергопотребление транспорта, определяемое уровнем потребления мощности тяговыми подстанциями. Энергию рекуперующего электровоза могут потреблять другие локомотивы, работающие в режиме тяги, при этом ее избыток может быть преобразован в тепловую энергию или передан в первичную питающую сеть переменного тока. В 2022 г. уровень энергорекуперации на российской железной дороге превысил 1 млрд кВт·ч [9].

### **III. Результаты исследования**

Одним из способов повышения эффективности рекуперативного торможения является использование выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП), с помощью которых производится инвертирование избыточного рекуперативного тока на тяговых подстанциях. Исследования [10, 11] показали, что ВИП на участках постоянного тока имеют большое значение для эффективного использования рекуперативной энергии и, следовательно, для применения рекуперативного торможения: 90-95 % энергии рекуперации получают с помощью преобразовательных установок из полупроводниковых вентилей с преобразовательными трансформаторами. ВИП, мощность которых составляет 8 000-10 000 кВт, имеют высокий КПД (98-99 %), просты по конструкции, имеют меньшие потери энергии, что позволяет повысить надежность электроснабжения тяговой сети. Выпрямительно-инверторный агрегат переходит из режима выпрямителя в режим инвертора и наоборот, автоматически при уменьшении нагрузки и увеличении напряжения на шинах постоянного тока относительно напряжения переменного тока. При этом расположение ВИП на тяговых подстанциях или накопителей энергии в системах тягового электроснабжения (СТЭ) должно быть экономически целесообразным и научно обоснованным [10].

Экспериментально подтверждена высокая энергетическая эффективность рекуперативного торможения на однопутных участках с невысокой интенсивностью железнодорожного движения, которую определяют наличие и исправность рекуперационных систем на электроподвижном составе (ЭПС) и ВИП тяговых подстанций этих участков. При увеличении интенсивности движения поездов роль ВИП на участках постоянного тока и переменного тока снижается, а эффективность рекуперации на таких участках в большей мере определяется характеристиками контактной сети и состоянием поездных условий на участке. Потери в выпрямительно-инверторных

агрегатах и трансформаторах тяговых подстанций постоянного тока в основном определяются средней мощностью потерь холостого хода понижающих трансформаторов. Если использование ВИП связано с увеличением потерь преобразовательного трансформатора подстанции и с невозможностью сгладить график электрических нагрузок, то применение СНЭ на тяговых подстанциях или на ЭПС позволяет избежать этих недостатков. Одним из преимуществ СНЭ перед ВИП является возврат рекуперационной энергии в контактную сеть, что не только позволяет снизить потери мощности в трансформаторах и элементах подстанции, но и устраняет необходимость балансового расчета с энергоснабжающими организациями по возврату энергии рекуперации [12]. Следовательно, использование накопителей в СТЭ и на ЭПС является наиболее перспективным вариантом повышения энергоэффективности перевозок.

Появившиеся на транспорте и в электроэнергетической сфере СНЭ показывают техническую эффективность и дают возможность рассматривать возможность их использования на участках постоянного тока с использованием рекуперативного торможения. СНЭ на основе преимущественно кинетических накопителей применяются для рекуперации энергии торможения, компенсации скачков и стабилизации напряжения, как аварийные источники питания и для регулирования частоты, при этом достигается до 30 % экономия энергии подвижным составом [13, 14].

Для снижения энергопотребления, издержек на эксплуатацию и обслуживание железнодорожной системы для рекуперации энергии торможения применяются стационарные (в составе электрической железнодорожной инфраструктуры), а также бортовые (на подвижном составе) СНЭ, а также повторное использование электроэнергии для питания подвижного состава (в режиме ускорения или замедления, во время движения в зонах без контактной сети). В качестве накопителей СНЭ используются аккумуляторные батареи и суперконденсаторы двойного электрического слоя благодаря их преимуществам:

- высокой удельной мощности (до 50 кВт/кг) и КПД (до 98 %);
- долгому сроку службы (от 10 до 20 лет);
- широкому диапазону температуры при эксплуатации ( $-50^{\circ}\text{C} \dots +75^{\circ}\text{C}$ );
- повышенным вибростойкости и ударопрочности;
- экологичности.

Эксплуатация СНЭ компанией *Bombardier Transportation* в 2003 г. на транспортных средствах *LRV*, *Metro-Train*, показала сокращение потребления энергии на 30 %, а применение бортовой СНЭ на *Diesel Multiple* привело к снижению энергозатрат и выбросов на 25–40 %. Суперконденсаторы в составе СНЭ подвижного состава, выполняя функции рекуперации энергии

торможения и стабилизации напряжения в сети, могут быстро перезаряжаться при торможении. Исследования и разработки в области применения углеродных нанотрубок в суперконденсаторах могут повысить удельную энергию до 85 Вт·ч/кг.

Аккумуляторные батареи являются наиболее распространенными накопителями и источниками энергии, в том числе, на железнодорожном транспорте. Неперезаряжаемые батареи обычно используются в качестве легкого источника питания и/или для автономности энергоснабжения (измерительные приборы, счетчики электрической энергии, медицинские аппараты, оборудование для регистрации данных и систем связи и др.) Основным назначением перезаряжаемых батарей является хранение энергии в системах ее накопления.

Используемые на железнодорожном транспорте свинцово-кислотные батареи, несмотря на высокую мощность и низкую цену, в составе СНЭ не применяются, поскольку имеют очень ограниченную удельную энергию, малый срок эксплуатации, низкую надежность и значительное снижение производительности в условиях экстремальных температур.

В тяговых устройствах в качестве аварийных и резервных источников энергии для питания аварийного освещения, запуска двигателей дизелей в системах управления железнодорожным транспортом широко применялись никель-кадмиевые батареи. Но применение данного типа батарей в составе систем накопления энергии проблематично в связи с наличием кадмия и эффекта памяти, когда из-за заряда после неполного разряда батарея постепенно теряет максимальную энергетическую емкость. Несмотря на имеющийся недостаток никель-металлогидридных батарей, которые могут терять около 20-50 % емкости после полугодового хранения, батареи данного типа нашли свое применение на железнодорожном транспорте в составе СНЭ благодаря высокой удельной мощности, простоте в управлении, медленному старению, высокой надежности и умеренному эффекту памяти.

В данный момент в составе СНЭ используются как самые популярные и конкурентоспособные на железной дороге литий-ионные, так и литий-титанатные батареи. Они имеют существенные преимущества: высокую удельную мощность (0,25-1,3 кВт/кг), увеличенную поверхность электродов. При их изготовлении используют новые мультикомпозиционные материалы, способные увеличить их долговечность и термоустойчивость для их применения на высокоскоростном транспорте. Несмотря на явные достоинства, использование новых энергоресурсов на железных дорогах осложняется вредным воздействием литий-ионных батарей на окружающую среду в процессе их производства и утилизации [15].

Особого внимания заслуживают современные рекуперационные системы с суперконденсаторами, которые имеют высокую энергоемкость, работают в режимах пиковых нагрузок и перепадов температур от  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Суперконденсаторы позволяют увеличить энергоэффективность подвижного состава на 40 %, но их удельная мощность ниже, чем у электрохимических аккумуляторов.

Электрохимические накопители энергии также могут применяться в СТЭ. Они обладают высокой удельной энергоемкостью и высоким КПД в режиме длительного разряда, однако при пиковом и форсированном режимах, и при температурах ниже  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  их КПД снижается [16].

Кроме того, для эффективного использования рекуперированной энергии могут использоваться и кинетические накопители. Так, компания «Кинетик» разработала проект по внедрению накопителей кинетической энергии на объектах СТЭ ОАО «РЖД» при рекуперативном торможении ЭПС. Данная технология безопасных динамических систем накопления и хранения базируется на основе ленточного витого супермаховика – это конструкция из тонкой высокопрочной стальной ленты со склейкой витков, навитой на специальный центр. Такая конструкция отличается разрывобезопасностью, не требует дополнительных сдерживающих устройств и армированных корпусов. Основной материал – тонкая лента с минимальной толщиной сечения, хорошими условиями прокаливаемости, легко обнаруживаемыми дефектами и высокой прочностью – до 2500 МПа. Имеющаяся технология позволяет навивать такие маховики с заранее заданными распределениями напряжений в теле маховика, где самым напряженным является внешний виток маховика, который напряжен в 1,5 раза больше, чем остальные витки [13].

Последние исследования показывают, что для рекуперации энергии торможения наиболее эффективны гибридные накопители энергии (литиевые аккумуляторные батареи и суперконденсаторы). Работая совместно, они обладают преимуществами накопителей обоих типов: и удельной энергией суперконденсатора, и удельной мощностью аккумуляторной батареи, более компактны по сравнению с обычными накопителями и допускают эксплуатацию в широком диапазоне температур (табл. 1).

Суперконденсаторы СНЭ несколько тысяч раз в сутки в течение 15-20 с накапливают энергию торможения, вызывая повышение напряжения в контактной сети. Кроме того, гибридная СНЭ выполняет функцию модуляции нагрузки для обеспечения частотного регулирования в энергосистеме, при этом потребление электроэнергии из сети сокращается на 20 % [17, 18].

**Таблица 1.**  
**Гибридный накопитель энергии**

**Table 1.**  
**Hybrid energy storage**

| <b>Гибридный источник питания</b> |                   |                                |                 |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|
| <b>Суперконденсатор</b>           |                   | <b>Аккумуляторная батарея</b>  |                 |
| Заряд                             | 1~30 с            | Заряд                          | 0,3~3 ч         |
| Разряд                            | 1~30 с            | Разряд                         | 1~5 ч           |
| Энергия                           | 1~20 Вт·ч/кг      | Энергия                        | 20~400 Вт·ч/кг  |
| Мощность                          | 1000~7000 Вт·ч/кг | Мощность                       | 50~2500 Вт·ч/кг |
| Количество циклов заряд-разряд    | 500 000~1 000 000 | Количество циклов заряд-разряд | 500~3 000       |

Исследования [19, 20], показали, что емкостные, инерционные и индуктивные накопители энергии наиболее эффективны в системах электропитания, включая метрополитены. В целом почти все специалисты сходятся в том, что применение химических аккумуляторов для работы в режимах коротких и мощных циклов заряд-разряд от тысячи и более в сутки нецелесообразно, поскольку небольшое количество рабочих циклов и длительный срок зарядки не соответствует установленным циклам службы. Использование индуктивных низкотемпературных сверхпроводящих накопителей рассматривается лишь теоретически, так как их капитальные и эксплуатационные расходы на 1 кВт установленной мощности и 1 кВт·ч емкости являются одними из самых высоких из всех видов накопителей.

Технически самые подходящие к применению при резко переменных графиках нагрузок, характерных для электротранспорта в целом, а также для метрополитена в частности, являются кинетические накопители и суперконденсаторы. Примечательно, что количество сэкономленной электроэнергии в сравнении с одним кинетическим накопителем прямо пропорционально интенсивности движения на линии, где он установлен, т.е. чем чаще ходят и тормозят электропоезда в метро, тем больше будет экономия.

По возврату в цикл потребления рекуперированной электроэнергии электропоездов метро лучшие результаты показывают маховиковые стационарные накопители кинетической энергии, позволяющие запасать и выдавать до 40 %, а во многих случаях – почти половину от рекуперированной тяговыми электродвигателями электроэнергии поездов. Статические преобразователи подстанций позволяют вернуть в централизованную сеть до 33 % энергии торможения поездов. Маховики-накопители, устанавливаемые на борту электропоездов, следующие по эффективности, возвращают



до 30 % энергии торможения, за ними следуют установленные на борту суперконденсаторы – до 20-30 %. Наименее эффективными являются стационарно установленные на подстанциях суперконденсаторы, которые сохраняют только до 10 % энергии рекуперации. Таким образом, очевидны основные тенденции в применении накопительных технологий: для использования накопителей энергии для хранения и выдачи в нужный момент энергии рекуперации при торможении поезда наиболее подходят два типа – маховики и суперконденсаторы. Кроме прямых эффектов экономии энергоресурсов, накопители благоприятно влияют на энергосистему метрополитена: уменьшают перепады напряжения при неравномерном графике энергопотребления, снижают потребность в большом резервировании мощностей подстанций, тем самым, сокращают капитальные затраты при их строительстве и реконструкции, а также снижают износ оборудования тяговых подстанций. Многие пилотные проекты в метрополитенах направлены на использование стационарных накопителей, чтобы не увеличивать потери энергии при перевозке на борту больших накопителей, а также не ограничивать их габариты при увеличении числа их применения на борту. Показана довольно значительная – до 40 % экономическая эффективность в пилотных проектах при этом эффективность маховичных накопителей намного больше, чем у суперконденсаторов. Удельная стоимость киловатта установленной мощности для метрополитена имеет большое значение – цена киловатта мощности для суперконденсаторов превышает стоимость киловатта мощности для маховиков разных типов от 1,5 до 5 раз [20].

Эффект от использования накопителей в СТЭ, где возможен процесс рекуперации, зависит от того, как утилизируется сгенерированная энергия. Использование СНЭ позволит получать избыточную энергию от рекуперирующих установок и высвобождать энергию в периоды пиковой нагрузки. Массовое использование СНЭ сдерживается сложностью устройств соединения накопителя с сетью, динамикой изменения нагрузки и высокой ценой накопителя. Но постепенное внедрение СНЭ позволяет пройти процесс перехода от разовых внедрений к широкому применению накопителей энергии, получив ожидаемые положительные экономический и технический эффекты. При этом уровень мощности рекуперации, при котором накопители энергии становятся эффективными, составляет около 40 % от количества энергии, потребляемой самим подвижным составом [21]. Таким образом, анализ существующих технических мероприятий по повышению энергоэффективности рекуперативного торможения с применением СНЭ для приема и последующего накопления энергии рекуперации позволяет сделать вывод о возможности их использования не только для обеспечения необходимого диапазона тока рекуперации, но и для снижения отклонения напряжения на токоприемнике электровоза от номинального значения.

#### IV. Заключение

Применение систем накопления энергии является одной из перспективных технологий с наибольшим потенциалом с точки зрения энергосбережения на железнодорожном транспорте.

Использование систем накопления энергии должно стать частью комплексного плана мероприятий по повышению энергоэффективности и экологичности железнодорожного транспорта. Оно может дать экономию электроэнергии до 30 % при правильном подборе и применении накопителей энергии, учитывая все особенности их эксплуатации.

©Рыжова Е.Л., 2023

*Поступила в редакцию 17.03.2023*

*Принята к публикации 28.04.2023*

*Received 17.03.2023*

*Accepted 28.04.2023*

#### Библиографический список

- [1] Schut D., Wisniewski J. A global vision for railway development. Paris: UIC, 2015. – 44 p.
- [2] Астахов Ю.Н. Накопители энергии в электрических системах. М.: Высшая школа, 1989. – 158 с.
- [3] Алексеев Б.А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2005. № 1. С. 42-46.
- [4] Ковальчук В.В., Свистунов П.В. Энергосбережение как результат взаимодействия государства и бизнеса // Энергосбережение. 2009. № 7. С. 30-37.
- [5] Гапанович В.А. [и др.]. Энергосбережение на железнодорожном транспорте. М.: НИТУ МИСиС, 2012. – 619 с.
- [6] Молин Н.И., Крюков А.В. Повышение эффективности использования электроэнергии на предприятиях железнодорожного транспорта // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы энергосбережения и энергобезопасности в Сибири», 2003, Барнаул, Россия. Барнаул: АлтГУ, 2012. С. 139-143.
- [7] Аннин В.А. Рекуперация электроэнергии - основное направление энергосбережения // Локомотив. 2013. № 7 (679). С. 8-11.
- [8] Мельниченко О.В., Шрамко С.Г., Линьков А.О. Повышение коэффициента мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения // Мир транспорта. 2013. Т. 11. № 3 (47). С. 64-69.
- [9] Бегагоин Э.И., Русаков А.Г. Оценка энергетической эффективности рекуперативного торможения // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 1. С. 57-60.

- [10] Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Незевак В.Л. Выбор мест установки накопителей электроэнергии на полигоне постоянного тока по критерию энергоэффективности // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. 2013. № 2 (6). С. 48-52.
- [11] Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Каштанов А.Л., Вильгельм А.С. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения на полигоне постоянного тока. Омск: ОмГУПС, 2016. – 176 с.
- [12] Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Вильгельм А.С. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации // Известия Транссиба. 2016. № 1 (25). С. 60-70.
- [13] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Применение накопителей энергии в системах тягового электроснабжения железных дорог переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 2 (42). С. 158-164.
- [14] Мусабеков М.О., Елшибеков А.М. Инновационный способ использования энергии рекуперации // Материалы ХLI Международ. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика», Апрель 03-04, 2017, Алматы, Казахстан: КазАТК им. М. Тынышпаева, 2017. Т. 3. С. 162-166.
- [15] Лапидус Б.М. Повышение энергоэффективности и перспективы использования водородных топливных элементов на железнодорожном транспорте // Вестник Научно-Исследовательского Института Железнодорожного Транспорта. 2019. Т. 78. № 5. С. 274-283. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-5-283
- [16] Сулов К.В. Модели и методы комплексного обоснования развития изолированных систем электроснабжения: дис. док. техн. наук, ИСЭМ СО РАН, Иркутск, 2020. – 297 с.
- [17] Евстафьев А.М. Об использовании суперконденсаторов // Железнодорожный транспорт. 2010. № 2. С.31-32.
- [18] Крюков А.В., Закарюкин В.П., Черепанов А.В. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных накопителями энергии // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 308-315.
- [19] Носков В.Н. К вопросу использования сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии в энергосистемах железнодорожного транспорта // Вестник Ростовского Государственного Университета Путей Сообщения. 2008. № 3 (31). С. 54-59.
- [20] Шевлюгин М.В. Снижение расхода энергии и рабочей мощности основного силового оборудования тяговых подстанций электрических железных дорог с помощью накопителей энергии. М.: МИИТ, 2007. – 151 с.
- [21] Баранов Л.А., Бродский Ю.А., Гречишников В.А., Подаруев А.И., Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В. Оценка эффективности использования стационарных емкостных накопителей энергии в метрополитене на основе экспериментальных замеров показателей работы системы тягового электроснабжения // Электротехника. 2010. № 1. С. 62а-65.

## References

- [1] D. Schut and J. Wisniewski, *A global vision for railway development*. Paris: UIC, 2015.
- [2] Yu.N. Astakhov, *Nakopiteli energii v elektricheskikh sistemah [Energy storage in electrical systems]*. Moscow: Higher school, 1989 (in Russian).
- [3] B.A. Alekseev, “Primenenie nakopitelej energii v elektroenergetike [The use of energy storage devices in the electric power industry]”, *Elektro. Elektrotehnika, elektro-energetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' [Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry]*, no. 1, pp. 42-46, 2005 (in Russian).
- [4] V.V. Kovalchuk and P.V. Svistunov, “Energoberezhenie kak rezul'tat vzaimodejstviya gosudarstva i biznesa [Energy saving as a result of interaction between the state and business]”, *Energoberezhenie [Energy Saving]*, no. 7, pp. 30-37, 2009 (in Russian).
- [5] V.A. Gapanovich et al., *Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte [Energy saving in railway transport]*. Moscow: NUST MISIS, 2012 (in Russian).
- [6] N.I. Molin, A.V. Kryukov, “Improving the efficiency of electricity use at railway transport enterprises”, in proc. *All-Russian scient. and pract. conf. "Problemy energoberezheniya i energobezopasnosti v Sibiri [Problems of energy saving and energy security in Siberia]*”, 2003, Barnaul, Russia, pp. 139-143 (in Russian).
- [7] V.A. Annin, “Rekuperaciya elektroenergii – osnovnoe napravlenie energoberezheniya [Recuperation of electricity – the main direction of energy saving]”, *Lokomotiv [Locomotive]*, vol. 7, no. 679, pp. 8-11, 2013 (in Russian).
- [8] O.V. Melnichenko, S.G. Shramko, A.O. Linkov, “Raising of power factor of electric locomotive at regenerative braking regime”, *World of Transport and Transportation*, vol. 11, no. 3 (47), pp. 64-69, 2013.
- [9] E.I. Begagoin and A.G. Rusakov, “Estimation of energetic efficiency of regenerative braking”, *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, no. 1, pp. 57-60, 2014.
- [10] V.T. Cheremisin, M.M. Nikiforov and V.L. Nezevak, “Vybor mest ustanovki nakopitelej elektroenergii na poligone postoyannogo toka po kriteriyu energoeffektivnosti [Choice of places for installation of electric power storage devices at the DC test site according to the criterion of energy efficiency]”, *Nauka i transport. Modernizaciya Zheleznodorozhnogo Transporta [Nauka i transport. Modernization of Railway Transport]*, vol. 2, no. 6, pp. 48-52, 2013 (in Russian).
- [11] V.T. Cheremisin, M.M. Nikiforov, Kashtanov A.L. and A.S. Vilgelm, *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti rekuperativnogo tormozheniya na poligone postoyannogo toka [Improving the Energy Efficiency of Regenerative Braking at the DC Range]*. Omsk: OSTU, 2016 (in Russian).
- [12] V.T. Cheremisin, M.M. Nikiforov and A.S. Vilgelm, “Methodology for assessing the energy efficiency of regenerative braking the use and energy recovery”, *Journal of Transsib Railway Studies*, vol. 1, no. 25, pp. 60-70, 2016.
- [13] V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov and A.V. Cherepanov, “Use of energy stores in traction power supply systems of alternating current railroads”, *Modern technologies. System Analysis. Modeling*, vol. 2, no. 42, pp. 158-164.
- [14] M.O. Musabekov and A.M. Elshibekov, “Innovacionnyj sposob ispol'zovaniya energii rekuperacii [An innovative way to use energy recovery]”, in proc. *Materialy XLI*

- Mezhdunarod. nauch.-prakt. konf. Innovacionnye tekhnologii na transporte: obrazovanie, nauka, praktika [Proceedings of the XLI International. scientific-practical. conf. Innovative technologies in transport: education, science, practice]*, Apr. 03-04, 2017, Almaty, Kazakhstan, vol. 3, pp. 162-166 (in Russian).
- [15] B.M. Lapidus, "Improvements in energy efficiency and the potential use of hydrogen fuel cells in railway transport", *Russian Railway Science Journal*, vol. 78, no. 5, pp. 274-283, 2019. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-5-283
- [16] K.V. Suslov, "*Modeli i metody kompleksnogo obosnovaniya razvitiya izolirovannykh sistem elektrosnabzheniya [Models and methods of complex substantiation of the development of isolated power supply systems]*", Dis. Doc. Tech. Sci., Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia, 2020 (in Russian).
- [17] A.M. Evstafyev, "Ob ispol'zovanii superkondensatorov [On the use of supercapacitors]", *Zheleznodorozhnyj transport [Railway transport]*, no. 2, pp. 31-32, 2010 (in Russian).
- [18] A.V. Kryukov, V.P. Zakaryukin and A.V. Cherepanov, "Modelirovanie rezhimov sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh nakopitel'yami energii [Simulation of modes of traction power supply systems equipped with energy storage devices]", *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences]*, vol. 1, pp. 308-315, 2014 (in Russian).
- [19] V.N. Noskov, "About a superconductive magnetic energy storages (SMES) applications in railway traction", *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*, no. 3 (31), pp. 54-59, 2008.
- [20] M.V. Shevlyugin, *Snizhenie raskhoda energii i rabochej moshchnosti osnovnogo silovogo oborudovaniya tyagovykh podstancij elektricheskikh zheleznnykh dorog s pomoshch'yu nakopitelej energii [Reduction of energy consumption and operating power of the main power equipment of traction substations of electric railways with the help of energy storage devices]*. Moscow: MIIT, 2007 (in Russian).
- [21] L.A. Baranov, Yu.A. Brodsky, V.A. Grechishnikov, A.I. Podaruyev, V.N. Pupynin, and M.V. Shevlyugin, "Ocenka effektivnosti ispol'zovaniya stacionarnykh emkostnykh nakopitelej energii v metropolitene na osnove eksperimental'nykh zamerov pokazatelej raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Evaluation of the efficiency of using stationary capacitive energy storage devices in the subway based on experimental measurements of the performance indicators of the traction power supply system]", *Elektrotehnika*, no. 1, pp. 62a-65, 2010 (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Рыжова Елена Львовна**,  
кандидат технических наук, доцент Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Elena L. Ryzhova**, Cand. Sci. (Eng.),  
associate professor of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation