

## **АННОТАЦИЯ**

диссертационной работы

**ЕЛШІБЕКОВ АМАНДЫҚ МАҚАМБЕТҰЛЫ**

**«Исследование эффективности применения накопителей энергии на электроподвижном составе»**, представленный на соискание степени  
доктора философии (PhD)  
по специальности 6D071300 – Транспорт, транспортная техника и  
технологии

### **Введение**

Железнодорожный транспорт является одним из основных потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на энергетическом рынке Казахстана. В современных условиях развития экономики энергосбережение и энергоэффективность являются важнейшими факторами повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта на внутреннем и международном рынках транспортных услуг. Основная доля потребляемых ТЭР перевозочным процессом приходится на тяговый подвижной состав (свыше 500 тыс.т. в год), поэтому снижение удельных расходов энергоресурсов на тягу поездов выражается, прежде всего, в повышении энергетической эффективности тягового подвижного состава (далее - ТПС). Одним из важнейших источников энергосбережения на электрифицированных участках железных дорог является рекуперация энергии торможения, эффективность использования которой является одним из основных направлений технических мероприятий по снижению удельного расхода энергии на тягу поездов [2].

При загруженном графике движения поездов доля рекуперированной электрической энергии, используемой неэффективно, является значительной.

Исследования многих авторов посвящались различным вариантам рекуперации электроэнергии при торможении ТПС, однако эта задача до сегодняшнего дня не нашла успешного решения. Основное затруднение использования режима рекуперативного торможения является не способность электрической сети принятия рекуперативной энергии торможения. Системы тягового электроснабжения (далее - СТЭ) железных дорог до настоящего времени не оборудованы устройствами приема энергии рекуперации.

В связи с трудностями, а порой и не возожностью прямой рекуперации энергии торможения в контактную сеть в последнее время, особое значение приобретают исследования, направленные на разработку систем накопления энергии в накопителях с последующим использованием энергии при пуске, разгоне поездов и для питания собственных нужд ТПС.

Целью настоящей работы является повышение энергоэффективности ТПС снижением энергозатрат на тяговые нужды электроподвижного состава (далее - ЭПС) путем накопления рекуперативной энергии торможения в

накопительных устройствах и использование ее на собственные нужды локомотива.

К настоящему времени накоплен большой опыт по исследованию вопросов преобразования энергии на электрическом транспорте. Значительный вклад в решение вопроса, связанного с разработкой энергоэффективных тяговых приводов и разработкой методов снижения энергопотребления на движение поезда внесли учёные: И.С. Ефремов, В.Е. Розенфельд, К.Г. Марквардт, В.П. Феоктистов, В.В. Шевченко, Шевлюгин М. В., A. Ruffer, Д.А. Бут, Н.И. Щуров, В.И. Сопов, А.А. Штанг, В.Н. Аносов, M. Zolot, K.J. Kelly, T.Markel, A.Burke и др.

**Актуальность диссертационного исследования** обусловлена исключением тех недостатков электрической тяги, которые связаны с неравномерным потреблением электроэнергии электроподвижным составом, а также с обеспечением гарантированной возможности реализации рекуперативного торможения. Решение этой проблемы имеет особое значение для мотор-вагонных электропоездов пригородного сообщения, а также для магистральных электровозов. Полное использование энергии рекуперативного торможения дает снижение энергозатрат на тягу поездов на 7-18% [3].

**Цель и задачи исследования** состоит в создании методов расчета параметров и определения энергетических характеристик накопительных устройств в системе электроподвижного состава, а также в разработке схемных решений, направленных на повышение эффективности использования энергии электродинамических торможений с учетом влияния случайных факторов.

В соответствии с поставленной целью возникает последовательность выполнения следующих задач:

1) провести комплексную оценку эффективности и основных вопросов применения рекуперативного торможения с учетом влияния случайных факторов и обосновать решения, связанные с установкой накопителей энергии на ЭПС, обеспечивающие эффективное использование энергии торможения подвижного состава;

2) определение размеров избыточной энергии рекуперации и средней емкости накопителя энергии (НЭ) способных полностью принять всю эту избыточную энергию рекуперации, с помощью комплексного метода исследований, включающего в себя методы математического анализа и имитационного моделирования, методы обработки математической статистики;

3) выполнить анализ существующих типов накопителей и сформулировать требования, предъявляемые к ним системой железнодорожного электроподвижного состава.

4) разработать методы и схемотехнические решения, позволяющие повысить эффективность использования накопительных устройств в системе электроподвижного состава, исходя из экспериментальной и количественной оценки электрической энергии, вырабатываемой в режиме торможения;

5) определить основные параметры накопительного устройства, отвечающего требованиям использования его в системе электротранспорта, разработать методику расчёта параметров накопителя энергии для размещения его на электроподвижном составе, а также произвести технико-экономическую оценку применения НЭ.

**Объектом исследования** является система магистрального электровоза и электроподвижного состава.

**Предметом исследования** являются энергетические характеристики электроподвижного состава, оборудованного накопителями энергии и перераспределение энергетических потоков в системе ЭПС при использовании накопителей электрической энергии.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использован комплексный метод исследования, включающий в себя анализ и обобщение данных научно-технической литературы, теоретические и экспериментальные методы. В основе теоретических исследований лежат методы математического, структурного и имитационного моделирования с применением прикладных программных пакетов, методы теории электрических цепей. Достоверность полученных результатов обеспечивается параллельным использованием различных моделей, а также подтверждением их в ходе экспериментальных исследований.

Расчеты и математические модели выполнены как с использованием расчётно-программных комплексов, написанных в среде «Кортэс» (комплекс тяговых расчетов электроснабжения), «Вектрум», так и с помощью математического моделирования в среде «Matlab – Simulink».

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Необходимость и целесообразность создания и внедрения накопительных устройств на основе суперконденсаторов и литий - ионного аккумулятора, позволяющих наиболее эффективно использовать энергию электрических торможений в системе ЭПС.

2. Результаты экспериментальных исследований энергопотребления тяговых и собственных нужд ЭПС и определение выравнивающих функций распределений удельных энергий тяги и электрических торможений ЭПС.

3. Основные положения, обосновывающие наиболее эффективное использование накопительных устройств в системе ЭПС, математическое описание и моделирование процессов движения ЭПС, позволяющих определять характер распределения энергии электрических торможений.

4. Способы повышения эффективности использования энергии торможения подвижного состава в режиме регенеративного торможения взамен рекуперации.

5. Разработанные принципиальные схемы НЭ для использования в магистральных электровозах и пригородных электропоездах, а также методы определения показателей, определяющие эффективность их работы, с оценкой технико-экономических показателей.

**Научная новизна диссертационной работы.**

- Установлено, что наиболее эффективным является применение накопителей энергии на электроподвижном составе, а не в системе электроснабжения.
- Выполнен комплексный анализ и дана количественная оценка снижения электропотребления при установке накопителей энергии в различных звеньях рассматриваемой системы, определяющие энергобаланс электроподвижного состава, оборудованного накопительными устройствами.
- Разработаны схемные решения и создан метод расчета, позволяющий оценивать эффективность использования накопительного устройства на ЭПС и определять его параметры. Показана целесообразность использования и внедрения накопителей энергии непосредственно на электроподвижном составе.
- Создана математическая модель, реализованная при применении ПК позволяющая рассчитывать электрические процессы, протекающие в силовой цепи ЭПС, оборудованного накопительным устройством.
- Определено рациональное размещение накопительного устройства и предложено его схемное решение при использовании в системе ЭПС.
- Разработаны методики оценки технико-экономического эффекта от использования НЭ

**Практическая значимость результатов работы** заключается в решении актуальной комплексной задачи использования накопительных устройств, направленной на снижение электропотребления в системе ЭПС. Разработаны инженерные методы расчетов, позволяющие проектировать эффективные по энергетическим показателям накопительные устройства.

**Реализация результатов работы.** Теоретические и практические материалы по применению накопителей энергии и методы эффективного использования рекуперативного торможения в ЭПС, разработанные в диссертационной работе, использованы в учебном процессе в рамках изучения дисциплин «Теория локомотивной тяги» и «Локомотивы» при подготовке студентов по образовательной программе 6В07117 - «Локомотивы» в АЛит, а также используются в качестве дополнительного методического указания в эксплуатационных локомотивных депо Алматинской и Жамбылской филиалов ТОО «КТЖ – Грузовые перевозки».

**Апробация работы.** Результаты исследования докладывались на: XLII международной научно-практической конференции «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика», КазАТК, Алматы, 18 апреля 2018 г; международной научно-практической конференции «Потенциал современной науки», Прага, Чехия, 30 ноября 2018 г.; XLIII международной научно-практической конференции «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика», КазАТК, г.Алматы, 17 апреля 2019 г.; VI Международной научно-технической конференции «Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век», Санкт-

Петербург, Россия, 13–15 ноября 2018 г.; на расширенном заседании кафедры «Подвижной состав», АЛит, 10.10.2022 г., г. Алматы.

**Публикации.** По научной работе 1 статья опубликована в журнале «Transport Problems», входящем в базу Scopus (процентиль – не ниже 25), 6 статей в журналах, входящих в базу комитета по обеспечению качества в сфере образования Министерства образования Республики Казахстан (ККСОН), 3 статьи в журналах – сборниках материалов международных научно-технических конференций и получено 2 патента на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, содержания, основной части из 5 разделов, заключения и выводов, приложений. Содержание работы изложено на 142 страницах машинописного текста, включает 65 таблиц, 89 рисунков, список использованных источников из 84 наименований, 2 приложений на 8 страницах.

Основной материал диссертации изложен в пяти главах.

**Во введении** отражена актуальность темы и направление научного исследования. Сформулированы цели, задачи работы и предполагаемые пути решения. Описаны методы исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту, изложены сведения о научной значимости, новизне и практической ценности результатов исследований, реализации и апробации работы.

**В первой главе** рассмотрен электрический транспорт как сложный электротехнический комплекс, в котором выделены две основные подсистемы: электроснабжение и электроподвижной состав. В настоящее время главной проблемой стало решение вопросов по повышению энергетической эффективности применения рекуперативного торможения. В результате многочисленных исследований и анализов на сегодняшний день основным способом эффективного использования рекуперативной энергии является применение накопителей энергии на подстанциях электроснабжения или в системе ЭПС. Основная причина не широкого использования накопителей энергии в магистральных электровозах и электропоездах обусловлена несоответствием его массогабаритных характеристик. Но в настоящее время динамично идет научно – техническое развитие по накопителям энергии, внедряются эффективные накопители энергии с отличными массогабаритными характеристиками (например, литий – ионные аккумуляторы, суперконденсаторы). Представлен энергобаланс, определяющий энергетику движения электроподвижного состава.

**Во второй главе** проведен расчет потенциала энергии рекуперации по электрифицированным железнодорожным участкам с помощью имитационного моделирования. Проведен полный анализ электрифицированных железнодорожных участков по количественному показателю энергии, получаемой от рекуперативного торможения. Расчет проводился по четным и нечетным направлениям ж.д. участков. В результате установлено, что получаемая рекуперативная энергия (относительно полной энергии, затрачиваемой на тягу поездов) в процентном отношении составляет

10% в четным направлении и 7% в нечетным направлении. Из этих показателей следует, что существует большая возможность применения рекуперативной тормозной системы для снижения удельных энергозатрат на тягу поездов, но данный метод расчета энергии на движение ЭПС из-за полного или частичного пренебрежения случайным характером движения не в полной мере отражает реальные процессы энергопотребления на электроподвижном составе.

Показано, что удельные расходы энергии торможения и тяги представляют случайные величины. Это обусловлено наличием значительного числа случайных факторов, влияющих на процессы движения. Установлено, что основным законом распределения вероятностей удельных энергий тяги и торможений можно принять гамма - распределение. В связи с постоянным ростом энергетической составляющей и большим запасом неиспользуемой энергии, вырабатываемой в режиме электрического торможения, применение накопительных устройств является выгодным и целесообразным.

**В третьей главе** выполнен анализ различных видов накопителей энергии: электрохимических, индуктивных, сверхпроводящих, гибридных видов накопителей, емкостных, конденсаторов с двойным электрическим слоем и гибридных электрохимических конденсаторов. В результате проведенного анализа установлено, что наиболее перспективным и удовлетворяющим основным требованиям для внедрения в ЭПС является накопительный элемент на базе конденсаторов двойного электрического слоя (суперконденсаторы) и электрохимические (литий-ионные аккумуляторы). Данный вид накопительных элементов способен обеспечить при малых массах и размерах высокие энергетические показатели, необходимые для реализации электродвигателями заданных тяговых характеристик.

Выработаны критерии сравнительной оценки накопительных устройств, на основе которых выполнен подробный анализ накопителей энергии, выявлены преимущества и недостатки их использования в электротранспортном комплексе

Накопители энергии на основе суперконденсатора сочетают в себе: высокую удельную мощность порядка  $10^4 \cdot 10^5$  Вт/кг при запасаемой удельной энергии до 50 кДж/кг; большое число зарядно - разрядных циклов, лежащих в диапазоне от ста тысяч до одного миллиона; время заряда до 30 с; работу в широком диапазоне температур  $-50... +100$  °С; высокий КПД, превышающий 95%; длительное время хранения запасенной энергии, составляющее сотни часов; практически неизменную скорость разряда во всем рабочем диапазоне температур. Модульная конструкция из суперконденсатора выдерживает токи в килоамперах и напряжения в сотни вольт.

Накопители энергии на основе литий-ионных аккумуляторов сочетают в себе: имеют более высокую плотность энергии по сравнению с другими батареями такого же типа. Они могут выдавать энергию до 150 Вт·час/кг, низкую скорость разряда. Таким образом, они обладают более надежными и

стабильными возможностями зарядки, что позволяет им работать в течение продолжительных периодов времени между двумя последовательными периодами зарядки, а также литий-ионные батареи могут работать с минимальным обслуживанием или без него. Они не требуют частого и дополнительного ухода и грунтовки, доступны в различных видах и размерах.

**В четвертой главе** показано, что наиболее эффективно использовать накопительное устройство на электроподвижном составе, с целью оперативного использования энергии электрических торможений с аккумулярованием, кратковременным хранением и реализацией в режиме тяги. Рекомендуется использовать энергию накопителя для собственных нужд ЭПС (мотор-вентиляторы, мотор-компрессоры, мотор-насосы электровоза). Предложены схемные решения силовой цепи ЭПС с накопительным элементом. Проведены экспериментальные замеры с собственными потребностями электровоза, определены потребляемая мощность и текущие показатели напряжения и тока. С помощью математических уравнений была определена емкость накопителя энергии для собственных нужд электровоза и разработана схематическая компьютерная модель ЭПС с накопителем энергии на программном комплексе «Matlab-Simulink». Данная модельная работа поможет на соответствие применения накопителя энергии, правильность его математических расчетов и электрических схем.

Проведена оценка изменения энергопотребления собственных нужды ЭПС и величины избыточной энергии рекуперации с учетом внедрения накопительных устройств.

**В пятой главе** показано, что наиболее эффективно энергия электрического торможения используется в электротехническом комплексе при установке накопительного устройства на электроподвижном составе и сформулированы предварительные условия размещения накопителя энергии в системе ЭПС. Проведены исследования возможности размещения накопителей энергии на существующих ЭПС, в результате которых установлено, что размещение накопителя энергии на существующем электроподвижном составе производится только путем проведения модернизационных работ. Определены эффективные места размещения накопителей энергии на ЭПС. Установлено, что накопительное устройство имеет массу, не превышающую 3% от массы ЭПС и позволяет в полной мере использовать энергию электрических торможений.

Рассчитана технико – экономическая эффективность внедрения НЭ на действующих электрофицированных железных дорогах, которая показала, что срок окупаемости НЭ может составить 4,5 – 5 лет, при сроке службы литий-ионных аккумуляторных батарей достигает до 9-10 лет (сроке службы может достигать суперконденсаторов – до 25-30 лет), что говорит о возможном повышении эффективности предложения.

**Заключение** содержит характеристику основных результатов по теоретической и практической разработке проблемы, связанной с

повышением эффективности использования энергии в электроподвижном составе с помощью накопительных устройств.

- Определены основные критерии, позволяющие оценить эффективность использования НЭ в ЭПС.
- Сравнительный анализ существующих накопителей энергии позволил выработать требования, предъявляемые к накопительным устройствам ЭПС и выбрать в качестве такого устройства литий-ионные аккумуляторы и суперконденсаторы, позволяющие наиболее рационально использовать энергию электрических торможений транспортных средств.
- Разработана методика определения основных показателей работы ЭПС, которая определяет целесообразность использования НЭ.
- Определены полигоны наиболее эффективного использования НЭ в ЭПС на сегодняшний день с предварительной оценкой эффективности, что позволяет раскрыть возможный потенциал энергосбережения на действующих электрифицированных железных дорогах РК
- Использование накопительных устройств на электроподвижном составе может дать суммарную экономию электроэнергии от 7 до 14% в системе железнодорожного электрического транспорта.
- Рассмотрены различные варианты схемных реализаций и использования накопительных устройств, проведено обоснование рационального их внедрения в систему ЭПС.
- Разработаны принципиальные схемы, определены массогабаритные показатели основных типов НЭ для использования в ЭПС, а также произведена оценка потенциальной возможности их использования.
- Используются имитационные модели по расчету параметров ЭПС, позволяющие математически воспроизводить все процессы, сопровождающие энергообмен и рассчитывать электроэнергетические показатели работы исследуемых объектов.
- Разработана методика оценки эффективности внедрения НЭ на действующих железнодорожных линиях с НЭ, которая показала, что срок окупаемости НЭ составит 4,5 – 5 лет. Однако, учитывая перспективу развития технологий изготовления молекулярных конденсаторов, можно предположить, что их стоимости будут значительно снижены.

Дальнейшие исследования по рассматриваемой проблеме должны быть направлены на более глубокий анализ процессов происходящих при совместной работе аккумуляторной батареи и накопительного устройства, оптимизацию их параметров, а также на совершенствование схемных решений силовых электрических цепей ЭПС с накопительными устройствами.