

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»



*На правах рукописи*

Ребров Илья Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация  
(технические науки)

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в акционерном обществе «Научно – исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Косарев Александр Борисович**

**Официальные оппоненты:** **Иньков Юрий Моисеевич**  
доктор технических наук, профессор,  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Российский университет  
транспорта», кафедра «Электропоезда и  
локомотивы», профессор

**Назаров Олег Николаевич**  
кандидат технических наук, Департамент  
технической политики ОАО «Российские  
железные дороги», заместитель  
начальника

**Ведущая организация:** Акционерное общество «Всероссийский  
научно-исследовательский и  
конструкторско-технологический  
институт подвижного состава»

Защита диссертации состоится 14 марта 2024 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), [www.rut-miit.ru](http://www.rut-miit.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Уже на протяжении нескольких лет в общественных, политических и научных кругах активно обсуждается проблема снижения антропогенного воздействия на окружающую среду и сокращения углеродного следа. ОАО «РЖД» является одним из крупнейших потребителей электрической энергии в России. В своей эксплуатационной деятельности компания огромное внимание уделяет снижению потерь и повышению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов.

В большом комплексном процессе потребления электрической энергии Российскими железными дорогами можно выделить отдельные подпроцессы: такие как передача, преобразование и потребление электроэнергии. Проблема снижения потерь и повышения энергетической эффективности рассматривается для каждого подпроцесса по отдельности, учитывая специфику.

Так, наибольший объем электроэнергии приходится на конечный этап – потребление энергии электроподвижным составом. Это обуславливает широкие возможности энергосбережения именно на этом этапе. В настоящей работе рассматривается перспектива реализации этих возможностей посредством применения систем накопления электроэнергии.

Существует множество различных типов накопителей. Их подразделяют в зависимости от принципов работы. Характеристики накопителей выбирают в зависимости от решаемой задачи.

В транспортной отрасли системы накопления электрической энергии находят применение в электромобилях, гибридах автомобилей и электромобилей, в сфере городского электрического транспорта. В данной сфере накопители энергии могут решать следующие задачи: автономное питание энергоустановок, сглаживание пиковых нагрузок в контактных сетях, прием энергии рекуперации и др.

При проектировании накопителей электроэнергии для тяговой сети необходимо учитывать следующие факторы: выбор вида запасаемой энергии, систему разряда-заряда, характеристики устройства, места размещения, режимы работы и систему защиты и управления.

Электроэнергетические характеристики накопителей электроэнергии формируются исходя из параметров электроподвижного состава, массы поездов, профиля пути и т.д. Целесообразность их применения определяется исходя из расчета технико-экономического обоснования.

Как показывает опыт использования инверторов для приема избыточных токов рекуперации, ток нагрузки инверторов на большинстве тяговых подстанций не превышает 1200 – 1600 А. Он имеет импульсный характер с продолжительностью импульсов, зависящей от используемых режимов торможения и профиля участка межподстанционной зоны.

Следует отметить, что большую роль в определении характеристик накопителей электрической энергии играет особенности алгоритмов работы их внутренней системы управления. Посредством настройки этих алгоритмов можно варьировать параметры накопителей для достижения требуемых технико-экономических характеристик.

Для точного определения характеристик накопителя электрической энергии для его использования на конкретном участке железных дорог необходимо производить подробные расчеты и детальный анализ данного участка.

**Степень разработанности темы исследования.** Решению задач повышения энергоэффективности работы системы тягового электроснабжения на постоянном токе 3 кВ посвящены работы А.Б. Косарева – в части комплексного изучения подходов к развитию энергетической эффективности работы системы тягового электроснабжения железнодорожного транспорта, В.Т. Черемисина – в части изучения вопроса эффективности применения энергии рекуперативного торможения, В.Е. Марского – по определению и повышению пропускной способности железнодорожных участков по устройствам тягового электроснабжения, М.П. Бадёра – в части технологического совершенствования системы тягового электроснабжения, М.В. Шевлюгина – в части внедрения технологии накопления электрической энергии в работу системы тягового электроснабжения метрополитена, М.М. Никифорова – в части повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения постоянного тока 3 кВ, В.Л. Незевака – в части разработки методов повышения эффективности использования энергии рекуперации, и других специалистов.

**Цель и задачи.** Оценка влияния различных факторов и разработка предложений по увеличению эффективности рекуперации в частности и энергетической эффективности системы тягового электроснабжения (СТЭ) в целом, в том числе в условиях применения перспективных средств преобразования и накопления электроэнергии в СТЭ.

С этой целью в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

- сформирована система показателей, характеризующих энергетическую эффективность СТЭ;
- выполнены натурные и вычислительные эксперименты по определению энергетической эффективности фактических режимов работы СТЭ и электроподвижного состава (ЭПС) в границах Московского центрального кольца (МЦК);
- разработан порядок расчета показателей в границах МЦК в условиях организации мониторинга энергетической эффективности перевозочного процесса;
- выполнена техническая и экономическая оценка возможности улучшения показателей, характеризующих энергетическую эффективность СТЭ в границах

МЦК, в зависимости от применения перспективных средств накопления электроэнергии;

- выполнена оценка объема инвестиций, необходимых для улучшения показателей, и экономический эффект оптимизации затрат ОАО «РЖД».

**Объект исследования.** Система тягового электроснабжения Московского центрального кольца, которая состоит из пяти тяговых подстанций, четырех постов секционирования.

**Предмет исследования.** Выявление факторов, влияющих на показатели эффективности использования энергии рекуперативного торможения, установление энергетических зависимостей, характеризующих энергоэффективность в условиях замкнутой кольцевой системы тягового электроснабжения.

**Научная новизна диссертационного исследования** заключается в уточнении математической модели оценки энергетической эффективности работы системы тягового электроснабжения с учетом особенностей работы уникального полигона МЦК, специфика которого заключается в значительных объемах пассажирских перевозок, сложном графике движения электропоездов и «изолированности» от других участков.

**Теоретическая и практическая значимость исследования:**

1 выполнен анализ работы системы тягового электроснабжения МЦК постоянного тока 3 кВ с точки зрения эффективности потребления электроэнергии и использования энергии рекуперативного торможения в условиях постоянного движения поездопотока;

2 разработаны предложения в части реализации мероприятий по повышению энергетической эффективности работы системы тягового электроснабжения МЦК и повышения эффективности использования электроэнергии рекуперативного торможения за счет применения перспективных средств накопления энергии;

3 Предложена альтернативная методика расчета небаланса в электрических сетях ОАО «РЖД» для повышения точности.

Диссертационная работа является частью научно-исследовательской работы, выполненной АО «ВНИИЖТ», по теме «Технико-экономическая оценка мероприятий по повышению энергетической эффективности системы тягового электроснабжения Московского центрального кольца с применением перспективных средств преобразования и накопления электроэнергии».

**Методология и методы исследования.**

В процессе выполнения работы диссертации выполнены анализ и обобщение материалов научно – технической литературы, использованы экспертные методы математического анализа, методы научной обработки статистических данных, методы теоретических и экспериментальных исследований. Кроме того, были выполнены опытные исследования на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ»,

натурные эксперименты непосредственно в системе тягового электроснабжения и подвижных составах МЦК.

**Положения, выносимые на защиту:**

1 математическая модель расчета эффективности работы системы тягового электроснабжения в условиях замкнутой кольцевой системы МЦК;

2 подтверждение эффективности внедрения накопителей электрической энергии в систему тягового электроснабжения МЦК;

3 предложения по местам размещения накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения полигона МЦК.

**Степень достоверности и апробация результатов** обоснована теоретически путем сопоставления метода расчета с методиками, выполненными другими авторами, подтверждена экспериментальными исследованиями на ЭК Щербинка и путем натурных измерений в системе тягового электроснабжения МЦК и моделированием в программных средствах.

Основные положения и результаты работы доложены и рассмотрены на научно-технических советах ЦЭТ АО «ВНИИЖТ», на международной конференции МАТЕС Scopus.

Получен акт внедрения результатов работы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 178 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 106 источников, 4 приложений. Работа иллюстрирована 69 рисунками, 24 таблицами.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается выбор темы, ее актуальность. Сформулированы цели, объект, предмет и задачи исследования. Описываются теоретические и методические основы. Так же сформулированы научная новизна, практическая значимость и сведения об апробации результатов исследовательской работы.

**В первом** разделе представлены результаты исследования по определению перечня основных объектов энергопотребления в хозяйстве электрифицированных железных дорог, а также их значимости с точки зрения возможности повышения энергетической эффективности работы.

Для исследования значимости объектов с точки зрения возможности повышения энергетической эффективности их работы были применены методы экспертного анализа: метод парного сравнения и метод ранговой корреляции. Указанные методы позволили провести опрос экспертов без проведения масштабного статистического исследования. При определении состава экспертной группы учитывались критерии компетентности экспертов, такие как стаж работы в области электрификации железнодорожного транспорта, образование, занимаемая должность и пр.). Опрос проведен в основном среди работников дирекций по

энергообеспечению – структурных подразделений Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД», куда входят дистанции электроснабжения, линейные отделы и дорожные электротехнические лаборатории.

В результате анализа произведено ранжирование объектов энергопотребления. Ранжирование объектов сопровождается обработкой бальной оценкой степени значимости объектов железнодорожного транспорта с точки зрения энергопотребления.

**Во втором** разделе представлено описание математической модели расчета энергетической эффективности работы системы тягового электроснабжения Московского центрального кольца (МЦК). Сформирована система показателей, характеризующая энергетическую эффективность системы тягового электроснабжения, тяги поездов и электроподвижного состава Московского центрального кольца:

1 удельный расход электроэнергии, отпущенной на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций – основной показатель, характеризующий энергоэффективность тяги поездов. Отражает совокупную энергоэффективность системы тягового электроснабжения, электроподвижного состава, путевого хозяйства, организации движения и т.д.;

2 технические потери электроэнергии в системе тягового электроснабжения при ее передаче к электроподвижному составу – этот показатель характеризует эффективность преобразования, распределения и передачи электроэнергии к электроподвижному составу, что в свою очередь и определяет энергоэффективность работы системы тягового электроснабжения (рисунок 1);

3 технические потери электроэнергии рекуперации в системе тягового электроснабжения – показатель характеризует эффективность использования энергии рекуперации. Необходимо учитывать для участков железных дорог с применением рекуперативного торможения при транспортировке электроэнергии от рекуперирующего электроподвижного состава к другому, находящемуся в режиме тяги, а также во внешнюю сеть, в случае наличия выпрямительно-инверторного преобразователя на тяговой подстанции.

Также сформирована система показателей энергоэффективности электроподвижного состава:

1 удельный расход электроэнергии на тягу поездов без учета потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения – главный показатель, определяющий энергоэффективность работы электроподвижного состава;

2 удельная рекуперация – дополнительный показатель, влияющий на энергоэффективность электроподвижного состава. Характеризует эффективность применения рекуперативного торможения подвижным составом.



**Рисунок 1** – Структура технических потерь электроэнергии в СТЭ постоянного тока

В рамках работы искомые показатели были получены в границах МЦК, в том числе с разбивкой по видам движения.

Рассмотрены показатели «коммерческих» потерь электроэнергии и относительного значения небаланса (рисунок 2).

Указано на неточность используемой в настоящее время в ОАО «РЖД» при расчете относительного небаланса электроэнергии формулы, %:

$$\delta W = \frac{\Delta W_{\text{тяг}}^{\text{тех}} + \Delta W_{\text{рек}}^{\text{тех}} + \Delta W^{\text{ком}}}{(W^{\text{ПП}} - W_{\text{инв}}^{\text{ПП}})} \cdot 100. \quad (1)$$



Вместо нее предложена более объективная формула, которая будет учитывать рост объемов энергии рекуперации и, таким образом, будет более корректно учитывать уровень небаланса на участках дорог с преобладающим пассажирским или пригородным движением и в частности на МЦК.



**Рисунок 2** – Структура «коммерческих» потерь электроэнергии на тягу поездов

В третьем разделе представлены результаты разработки программы проведения натурных экспериментов по оценке существующего уровня энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в границах МЦК, обработка и анализ результатов экспериментальных исследований по оценке энергетической эффективности системы тягового электроснабжения с целью последующей разработки ее имитационной модели.

Для анализа были использованы результаты измерений расхода электроэнергии на тяговых подстанциях с учетом того, что система электроснабжения МЦК является изолированной от системы электроснабжения радиальных линий. Данные по расходу электроэнергии были взяты из

информационной системы «Аналитическая система оценки и контроля уровня небаланса электроэнергии и автоматизированной оценки удельного расхода электроэнергии электроподвижного состава на Московском центральном кольце», а также из системы АСКУЭ. Результаты измерений показали следующие данные по годовому расходу электроэнергии по тяговым подстанциям (таблица 1):

**Таблица 1** – Сводная информация о годовом расходе электроэнергии по тяговым подстанциям, тыс. кВт·ч

Москва - Киевская	Окружная	Стрешнево	Белокаменная	Андроновка	Итого
18942,3	4969,0	22416,6	18200,7	15020,2	79548,8

Выполнен анализ энергетических параметров и режимов работы следующего оборудования тяговых подстанций, влияющего на показатели энергоэффективности: преобразовательные агрегаты, включающие в себя преобразовательный трансформатор, выпрямитель и сглаживающие устройства. На всех пяти тяговых подстанциях для питания МЦК применяются 13 преобразовательных агрегатов с двенадцатипульсовой схемой выпрямления последовательного типа.

Произведен анализ потерь электроэнергии в преобразовательных трансформаторах и в вентильных конструкциях, а также анализ режимов работы преобразовательных агрегатов для тяговых подстанций Андроновка и Белокаменная, так как на этих подстанциях преобразовательные агрегаты работают параллельно на секцию шин 3,3 кВ.

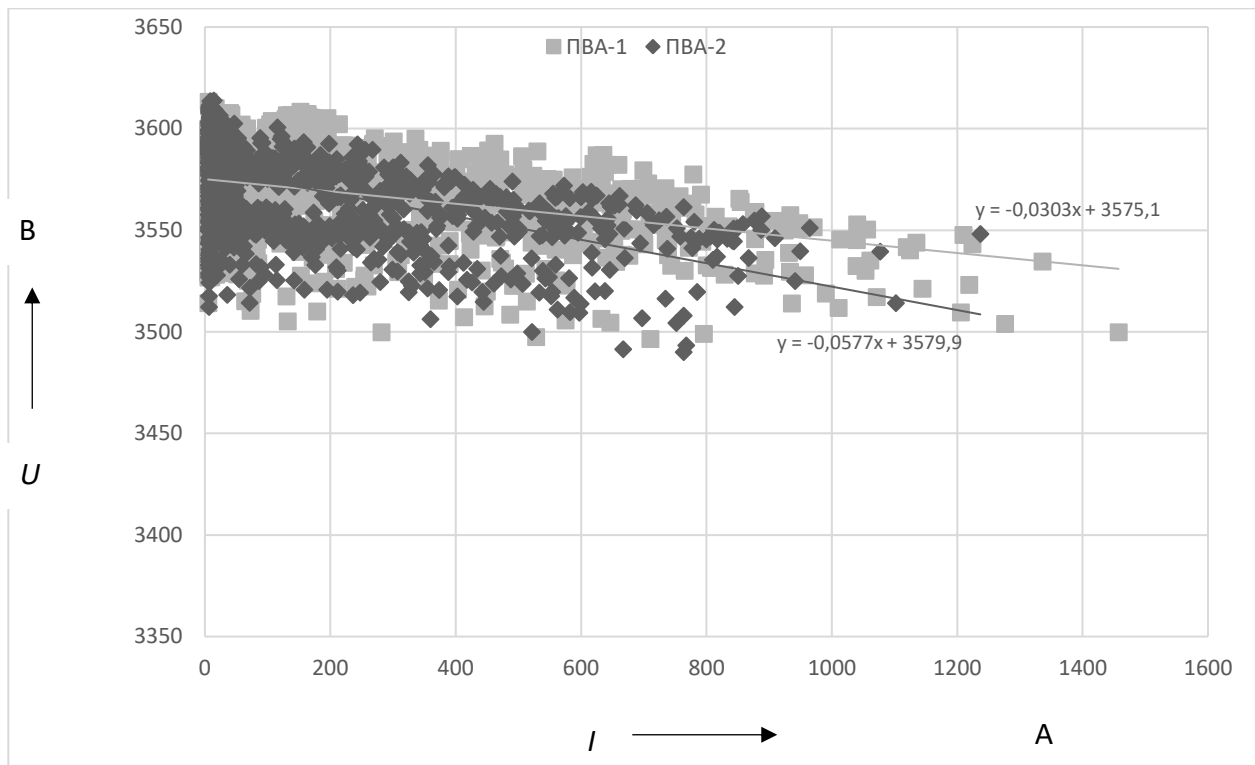
Потери электрической энергии в преобразовательном трансформаторе определяются по формуле, кВт·ч:

$$\Delta W_{\text{тр}} = \left( \Delta P_{\text{xx}} + \Delta P_{\text{кз}} \cdot \left( \frac{k_3 \cdot W}{t_p \cdot S} \right)^2 \cdot 10^6 \right) \cdot t_p, \quad (2)$$

Расчет потерь энергии в вентилях преобразовательных агрегатов с учетом расхода электроэнергии на собственные нужды выпрямителя 0,7 кВт·ч осуществляется в соответствии с выражением:

$$\Delta W_{\text{в}} = \frac{k_{\text{сх}} s U_0 W}{U_d} \left( 1 + \frac{k_{\text{сх}} R_d W k_3^2 \cdot 10^3}{2 a t_p U_d U_0} \right) + 2 \cdot 0,7 \cdot t_p, \quad (3)$$

По результату анализа выявлено, что параллельная работа преобразовательных агрегатов на тяговой подстанции Андроновка является недостаточно эффективной ввиду значительного расхождения внешних характеристик: коэффициента наклона для внешних характеристик тяговой подстанции Андроновка превышает 30 % (рисунок 3).



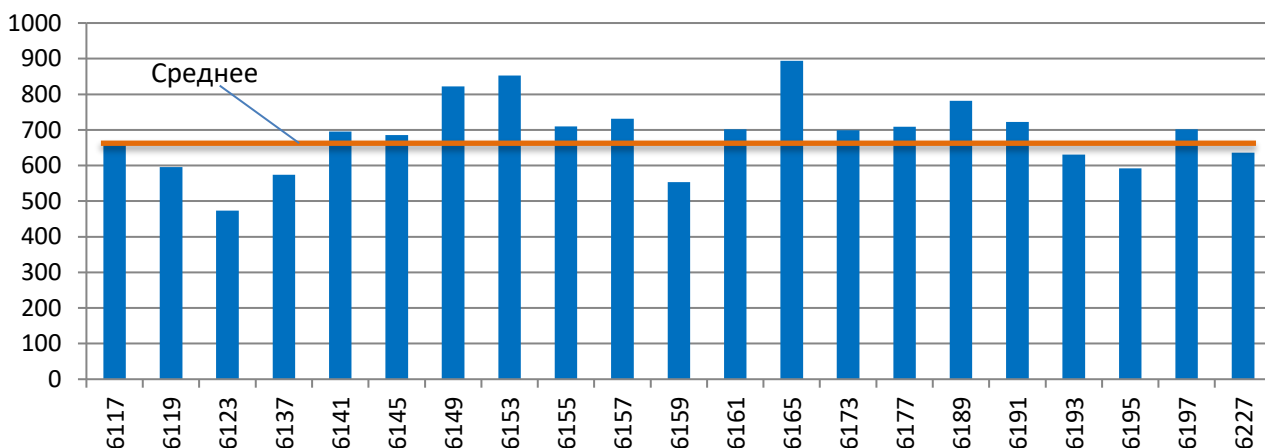
**Рисунок 3** – Внешние характеристики ПВА-1 и ПВА-2 тяговой подстанции Андроновка

Анализ режимов работы электроподвижного состава показал, что расход электрической энергии по электропоездам имеет явно выраженную сезонную зависимость, при этом значение энергии рекуперации в течение года остается постоянным. Наибольший расход приходится на ноябрь – январь, при этом по сравнению с летними месяцами его значение увеличивается в среднем на 32 %.

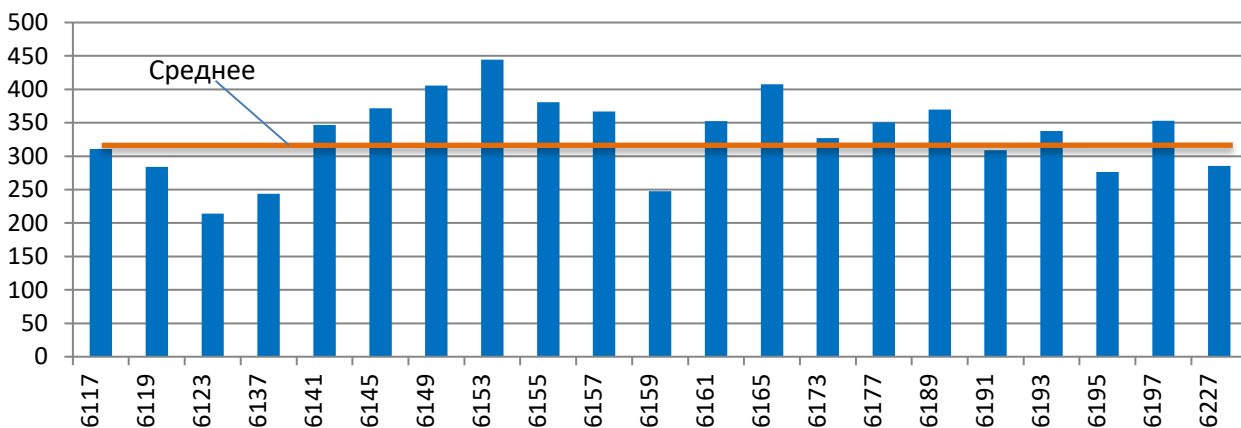
Анализ графика исполненного движения показал, что основные его характеристики (двухпутность, параллельность, пакетность, количество поездов по направлениям) полностью соответствуют нормативному графику рабочего дня. Время начала и окончания пассажирского движения на кольце так же соответствует нормативному, интервалы движения в пиковые и непиковые часы соблюдаются.

В разделе также представлен анализ результатов синхронных измерений на тяговых подстанциях и электроподвижном составе в границах Московского центрального кольца – соотнесенных по времени значений координаты пути, токов, напряжений, потребления и рекуперации электроэнергии электроподвижным составом со значениями токов, напряжений, отпуска и возврата электроэнергии тяговыми подстанциями с заданным интервалом измерения в границах определенного участка железной дороги. МЦК является единственным на сети железных дорог участком, где весь обращающийся на нем электроподвижной состав оборудован регистраторами параметров движения поездов РП МПСУиД, что дает возможность проведения синхронных измерений электрических параметров без вмешательства в организацию движения поездов, то есть в условиях реальных режимов работы электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения.

Анализ расхода и рекуперации по данным файлов регистраторов параметров показывает, что существует значительный разброс данных значений по поездкам (рисунки 4 и 5).



**Рисунок 4** – Гистограмма электропотребления поездами за полный круг обращения в нечетном направлении



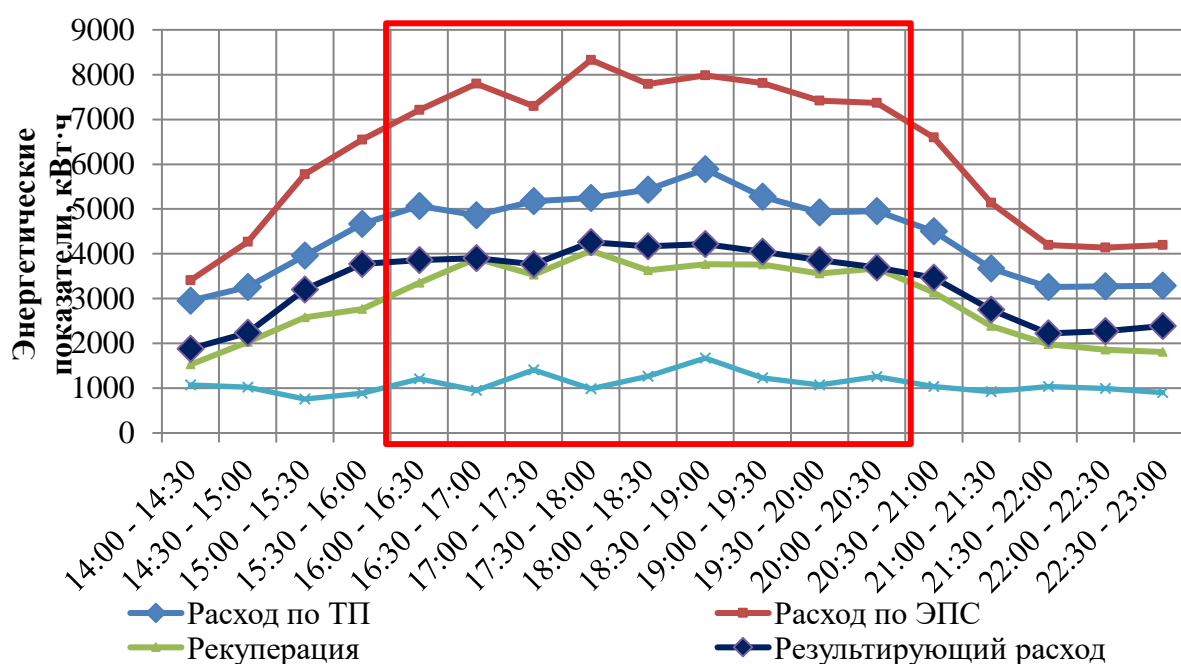
**Рисунок 5** – Гистограмма рекуперированной электроэнергии поездами за полный круг обращения в нечетном направлении

В результате анализа и расчетов сделан вывод о существенном потенциале экономии электроэнергии за счет совершенствования режимных карт вождения поездов на полигоне МЦК. При этом введение нормы рекуперации на участке себя не оправдывает, так как для ее достижения поезду необходимо набрать достаточную кинетическую энергию, затратив при этом значительный объем электроэнергии на разгон, что в целом не приводит к экономии электроэнергии, а, напротив, дает ее перерасход.

В целях оценки потенциала снижения электропотребления на тягу поездов в границах МЦК в главе проведено имитационное моделирование в программном комплексе КОРТЭС с учетом энергоэффективных режимов вождения поездов. Имитационная модель работы системы тягового электроснабжения разработана на

основании данных анализа результатов экспериментальных исследований по оценке энергетической эффективности системы тягового электроснабжения. Для апробации полученной имитационной модели (проверки адекватности результатов расчетов) были выполнены расчеты для пиковых периодов загрузки МЦК – за три утренних часа и четыре вечерних в будний день (10 апреля 2019 г.)

Полученные результаты свидетельствуют об адекватности созданной имитационной модели, поскольку расчетные значения расхода энергии по счетчикам тяговых подстанций имеют высокую степень сходимости с отчетными данными (отличия на 3,5 – 4,0 %) при идентичных анализируемых временных интервалах, а также идентичных параметрах модели и фактической организации работы на полигоне МЦК (рисунок 6).



**Рисунок 6** – Энергетические параметры работы МЦК за четырехчасовой интервал времени с 16:00 до 20:00 10.04.2019

**В четвертом** разделе представлены предложения по внедрению перспективных технических решений для повышения энергоэффективности работы системы тягового электроснабжения МЦК.

Анализ режимов работы преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях показал, что среднее значение напряжения холостого хода на тяговых подстанциях МЦК находится в широком диапазоне 3575 – 3750 В. Верхняя граница напряжения холостого хода на уровне около 3750 В на шинах 3,3 кВ потенциально ухудшает условия для работы накопителей электроэнергии на шинах подстанций и постов секционирования. В период времени интенсивных перевозок отмечается снижение уровня среднего напряжения на шинах тяговых подстанций до уровня 3600 – 3650 В.

Напряжение на выходе преобразовательного агрегата определяется по формуле:

$$U_d = U_{d0} \cdot \left( 1 - \sin \frac{\pi}{m} \cdot u_k \cdot \frac{I_d}{I_{d \text{ ном}}} \right), \quad (3)$$

где:

$$u_k = \frac{100 \cdot S_{1 \text{ ном}} \cdot (X_{\text{тр.преобр}} + X_{\text{тр.пониж}} + X_c)}{U_{2 \text{ ном}}^2}, \quad (4)$$

С целью сравнения внешних характеристик работающих параллельно преобразовательных агрегатов в связи с отсутствием систем учета и измерений на стороне постоянного тока выполнен перерасчет данных ПК «Энергия Альфа 2».

Для 12-пульсового выпрямителя среднее значение выпрямленного напряжения определяется по формуле:

$$U_{d0} = \frac{\sqrt{6} \cdot m}{2\pi \cdot k_{\text{сх}}} \cdot U_{2\phi}, \quad (5)$$

где  $m$  – количество пульсаций в кривой выпрямленного напряжения;

$k_{\text{сх}}$  – коэффициент схемы (определяется по количеству параллельно соединенных секций выпрямителя);

$U_{2\phi}$  – действующее фазное напряжение вторичной обмотки преобразовательного трансформатора, соединенного по схеме звезды, В.

Коэффициент нагрузки выпрямителей тяговых подстанций определяется по формуле:

$$k_{\text{ПВА}i} = \frac{W_{\text{ПВА}i}}{\sum_{j=1}^N W_{\text{ПВА}j}}, \quad (6)$$

и его значение за сутки 10.04.2019 г. не превышает значения 0,8.

Для определения мест установки накопителей и энергоемкости тяги используется информация, полученная в ходе натурных и вычислительных экспериментов, анализа синхронных измерений на тяговых подстанциях и на электроподвижном составе в границах МЦК, а так же анализа информационной системы ООО «НПО ТрансИнфоПроект». Места размещения и энергоемкость накопителей электроэнергии определены по результатам расчета мгновенных схем для диапазона времени обращения пассажирских перевозок на МЦК

Одним из наиболее эффективных мест размещения накопителей электроэнергии является линейное устройство системы тягового электроснабжения (пост секционирования). Указанное обстоятельство обусловлено одновременным сокращением потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения и повышением пропускной и провозной способности на межподстанционной зоне.

Режим работы накопителя электроэнергии характеризуется объемами электроэнергии в режимах заряда и разряда, продолжительностью эпизодов работы в указанных режимах работы (таблица 2).

**Таблица 2** – количество эпизодов работы в режиме заряда и разряда накопителей электроэнергии для условий работы на постах секционирования

Место размещения	Режим работы	
	разряд	заряд
ПСК 270	561	537
ПСК 445	495	451
ПСК-1	604	205
ПСК Черкизово	509	424
Среднее значение	542	404

В качестве показателей нагрузочной способности рассмотрены два – коэффициент нагрузки выпрямителей тяговых подстанций и минимальный уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава.

Коэффициент нагрузки выпрямителей, о.е., определяется по формуле:

$$k_{н.в.т} = \frac{I_{d t}}{\sum I_{в.ном} \cdot k_{доп.в.т}}, \quad (7)$$

где  $I_d$  – наибольшее среднее значение тока за период  $t$ , А;

$I_{в.ном}$  – номинальный ток выпрямительных агрегатов, определяемый по количеству включенных под нагрузку агрегатов, А;

$k_{доп.в.т}$  – коэффициент допустимой нагрузки (для интервалов усреднения 0,25 мин. – 1,9; 2 мин. – 1,5; 15 мин. – 1,25; 30 мин. и более – 1,0).

Изменение коэффициента нагрузки выпрямителей тяговых подстанций, %, определяется по формуле:

$$\Delta k_{н.в.т} = \frac{k_{н.в.т}^{баз} - k_{н.в.т}^{вар}}{k_{н.в.т}^{баз}} \cdot 100, \quad (8)$$

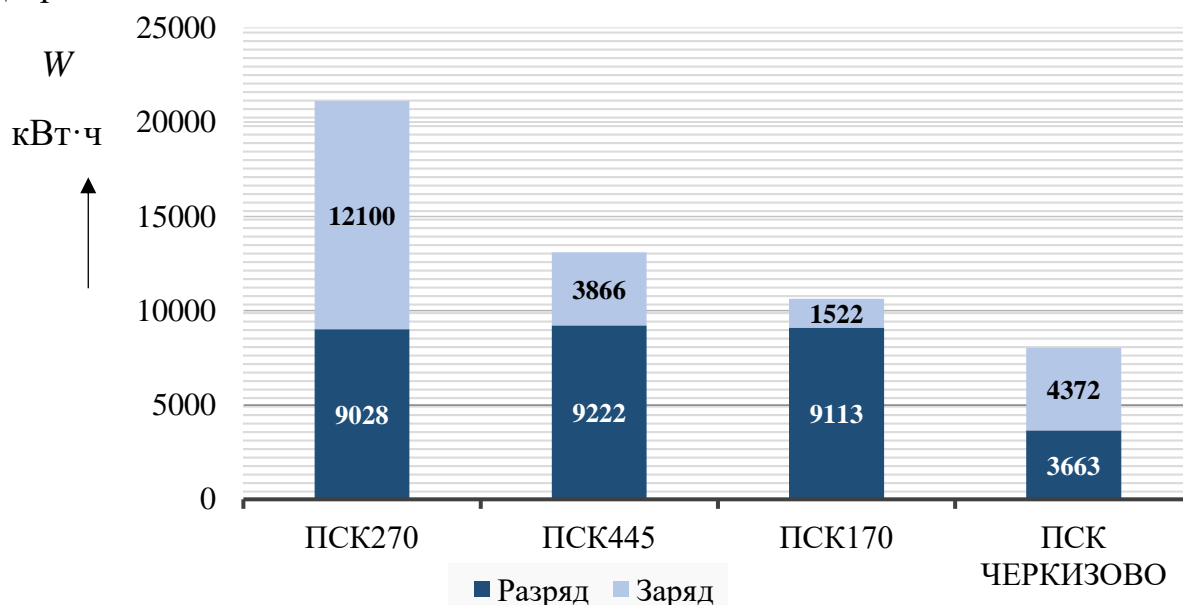
где  $k_{н.в.т}^{баз}$ ,  $k_{н.в.т}^{вар}$  – коэффициенты загрузки выпрямителей тяговых подстанций при периоде усреднения  $t$  для базового и рассматриваемого варианта соответственно.

По результатам оценки энергоемкости для накопителей электроэнергии на постах секционирования МЦК сделаны следующие выводы:

- 1) требуемая полезная энергоемкость для ПСК 270 составляет 1200 кВт·ч, ПСК 445 – 1100 кВт·ч, ПСК-1 – 1300 кВт·ч, ПСК Черкизово – 950 кВт·ч;
- 2) эффективная работа накопителей для ПСК 445 и ПСК-1 невозможна без реализации подзаряда в режиме ожидания, при этом для уравновешенного графика степени заряженности требуется реализовать мощность до 1000 кВт при условии напряжения на шинах поста секционирования в диапазоне 3550 – 3600 В;
- 3) сокращение энергоемкости накопителя на постах секционирования приводит к уменьшению объемов электроэнергии, передаваемой в режиме разряда до 70 % от уровня объема без ограничений энергоемкости.

Анализ данных показал, что наибольший объем использования энергии рекуперации достигается при реализации накопителей электроэнергии на постах секционирования ПСК 270 и ПСК Черкизово, а полезная энергоемкость накопителей электроэнергии для постов секционирования оценивается в диапазоне 950 – 1300 кВт·ч (рисунок 7).

С целью оценки эффекта накопителя по стабилизации напряжения на шинах поста секционирования проведено сравнение вариантов по величине минимального и одноминутного напряжения. Выполнены расчеты минимального одноминутного напряжения для базового варианта (существующий вариант реализации системы тягового электроснабжения МЦК) и варианта, в котором на постах секционирования МЦК расположены накопители.

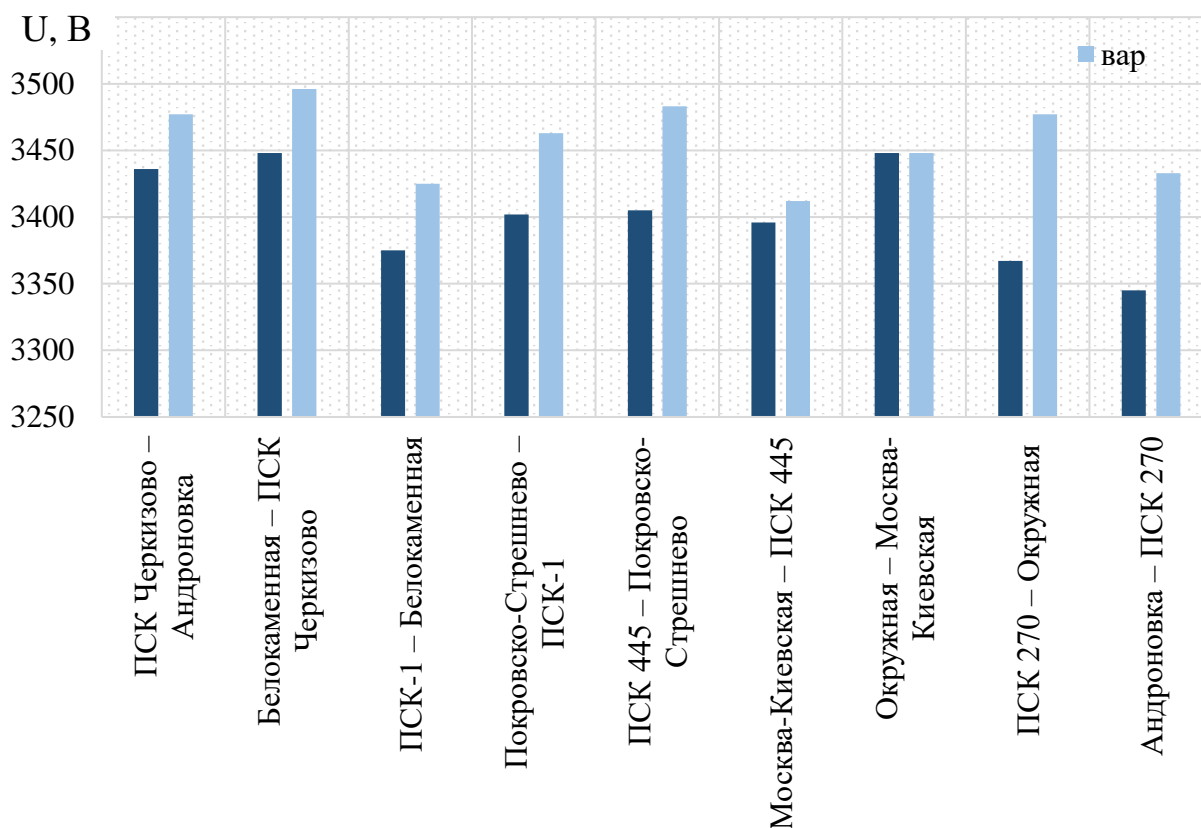


**Рисунок 7** – Гистограмма объемов электроэнергии накопителей электроэнергии по режимам работы

Сравнение результатов расчетов показывает, что для варианта расстановки накопителей электроэнергии относительно базового варианта минимальное



напряжение на токоприемнике электроподвижного состава оказывает выше в среднем на 1,5 % или на 50 В. Результаты расчета напряжения для I пути МЦК приведены на рисунке 8.



**Рисунок 8** – Гистограмма минимальных напряжений по перегонам МЦК для базового и варианта с накопителями на постах секционирования (I путь)

Таким образом, влияние работы накопителей электроэнергии приводит к снижению коэффициента нагрузки выпрямителей на тяговых подстанциях МЦК для интервалов усреднения 0,25 мин в диапазоне от 13,3 % до 26,2 %, в среднем за сутки – от 12,5 % до 28,6 %. Наибольшие объемы энергии в режимах заряда и разряда накопителя наблюдаются для условий поста секционирования ПСК 270, для которого объемы энергии разряда и заряда относятся друг к другу как 1/1,3. Применение накопителей электроэнергии на постах секционирования позволяет повысить минимальное напряжение на токоприемнике в среднем на 50 В

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Выявлена особенность работы замкнутой кольцевой системы тягового электроснабжения и доказано наличие зависимостей в расчетах параметров эффективности работы системы тягового электроснабжения Московского центрального кольца, что позволило получить начальные условия для разработки имитационной модели и создать собственную математическую модель расчета

энергетической эффективности работы системы тягового электроснабжения Московского центрального кольца.

2 Обоснована методика определения расхода и потребления электрической энергии в системе тягового электроснабжения рассматриваемого полигона, в том числе уточнено расчетное выражение для определения относительного значения небаланса для полигона Московского центрального кольца, позволяющее повысить точность определения значения небаланса в 1,5-2 раза для участков сети железных дорог, где объем рекуперации превышает 30 % от тяги поездов, что позволит повысить точность определения величины потерь электроэнергии.

3 Представлены новые технические решения, направленные на повышение энергетической эффективности работы системы тягового электроснабжения Московского центрального кольца, в том числе перспективные средства накопления электрической энергии, установка которых позволяет снизить коэффициент нагрузки выпрямителей на тяговых подстанциях Московского центрального кольца на величину от 12 % до 28 % в среднем за сутки, что повысит энергетическую эффективность их работы и увеличит срок службы работы подстанционного оборудования.

4 Результаты расчетов показали, что установка накопителей электроэнергии позволяет повысить минимальное напряжение на токоприемнике электроподвижного состава Московского центрального кольца на величину до 1,5 %, таким образом будет увеличена пропускная способность системы тягового электроснабжения и созданы предпосылки для обеспечения возможности увеличения пассажиропотока.

5 Представлены методические рекомендации по выбору мест размещения средств накопления электрической энергии и их характеристик в границах рассматриваемого полигона в условиях отсутствия ограничивающих элементов, на основе которых определено, что наиболее эффективными местами размещения накопителей электрической энергии в рамках рассматриваемого полигона являются линейные устройства секционирования.

6 Подтверждено, что результаты исследования актуальны для описания изолированной замкнутой системы тягового электроснабжения, аналогичной исследуемой в работе системы тягового электроснабжения Московского центрального кольца и получены в результате натурных измерений и имитационного моделирования работы накопителей электроэнергии.

7 Результаты исследования позволяют обеспечить дальнейшее развитие процесса внедрения средств накопления электрической энергии в эксплуатационную и производственную деятельность ОАО «РЖД» в направлениях разработки технических требований, опытно-конструкторской разработки и исследования влияния на энергетическую эффективность и пропускную способность участков сети

железных дорог при установке накопителей электроэнергии. Кроме того, в результате исследований созданы предпосылки для создания и совершенствования алгоритмов управления системой накопления электроэнергии, что позволит повысить эффективность ее работы и улучшить технико-экономические показатели.

**Список работ, опубликованных по теме диссертации:**

**а) в рецензируемых научных изданиях**

1 Косарев, А. Б. Научные приоритеты использования альтернативных источников энергии на железнодорожном транспорте / А. Б. Косарев, И. А. Ребров [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – Т. 79. – № 5. – С. 293-300. – DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-5-293-300. – Текст: непосредственный.

2 Косарев, А. Б. Определение переходного сопротивления между рельсом и землей для безбалластного пути и влияние сопротивления на растекание токов утечки в земляном полотне / А. Б. Косарев, И.А. Ребров, А. В. Рудашевская [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – № 1. – С. 7-15. – DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-5-293-300. – Текст: непосредственный.

**б) свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

3 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665672 Российская Федерация. «Система планирования, нормирования и анализа использования топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов (АСУ ТЭР). Очередь 2020-1» (АСУ ТЭР. Очередь 2020-1): № 2021665672: заявл. 07.10.2021; опубл. 18.10.2021 / Малыгин В.В., Рудашевский Р.А., Смолин П.И., Рудашевская А.В., Ребров И.А.

**в) в издании, входящем в международную базу цитирования Scopus**

4 Rebrov I, Kotelnikov A., Ermolenko D., Shevlyugin M. Electric power accumulators in system of supplying railways with traction energy by direct current, MATEC Web of Conferences, Novosibirsk, 16–19 may 2018 , vol. 239, Novosibirsk: EDP Sciences, 2018, p. 01057. – DOI 10.1051/matecconf/201823901057. – EDN RZYYRF.

**г) в других изданиях и материалах конференций**

5 Косарев, А. Б. Анализ трендов развития электрогенерации и оценка перспектив применения инновационных энергоэффективных технологий на транспорте / А. Б. Косарев, И. А. Ребров, С. Н. Науменко, А.В. Заручейский // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2018. – № 3. – С. 11-22. – Текст: непосредственный.

6 Ребров, И. А. Накопители электрической энергии в системе тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока / И. А. Ребров, М. В. Шевлюгин [и др.] // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности : материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием, Омск, 04–05 октября 2018 года / Омский государственный университет путей сообщения – Омск, 2018. – С. 67-79. – Текст : непосредственный.

Ребров Илья Алексеевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация  
(технические науки)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать \_\_\_\_\_.12.2023      Изд. № \_\_\_\_\_      Формат бумаги 60x84/16

Тип. АО «ВНИИЖТ»      Заказ № \_\_\_\_\_      Объем 1,5 усл. п.л.      Тираж 80 экз.