

Акционерное общество
«Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»
АО «ВНИИЖТ»

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)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Доктор технических наук, профессор
Косарев Александр Борисович

Москва 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВЕ.....	10
1.1 Выводы по разделу 1	19
2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МОСКОВСКОГО ЦЕНТРАЛЬНОГО КОЛЬЦА.....	20
2.1 Показатели энергоэффективности тягового электроснабжения Московского центрального кольца	21
2.2 Показатели энергоэффективности системы тягового электроснабжения	22
2.3 Показатели энергоэффективности электроподвижного состава.....	24
2.4 Небаланс и «коммерческие» потери электроэнергии на тягу поездов.....	26
2.5 Определение провозной способности межподстанционной зоны системы тягового электроснабжения при пропуске поездов с одноподвижным составом	29
2.6 Выводы по разделу 2	37
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ НАТУРНЫХ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	38
3.1 Анализ режимов работы системы тягового электроснабжения.....	38
3.1.1 Анализ динамики расхода электрической энергии по присоединениям тяговых подстанций	38
3.1.2 Анализ преобразовательных агрегатов, применяемых для электроснабжения Московского центрального кольца	47
3.1.3 Анализ потерь электроэнергии в преобразовательных трансформаторах....	49
3.1.4 Анализ потерь электроэнергии в вентильных конструкциях.....	51
3.1.5 Анализ режимов работы преобразовательных агрегатов	51
3.2 Анализ режимов работы электроподвижного состава	57
3.2.1 Анализ расхода электрической энергии по электропоездам.....	57
3.2.2 Анализ тяговых энергетических параметров движения электропоездов	61

3.2.3	Анализ графика исполненного движения.....	64
3.3	Анализ результатов синхронных измерений на тяговых подстанциях и электроподвижном составе в границах Московского центрального кольца	65
3.3.1	Сбор и обработка данных синхронных измерений	67
3.3.2	Расчет небаланса электроэнергии в границах Московского центрального кольца по данным системы регистрации параметров движения	70
3.3.3	Анализ поездок по данным системы регистрации параметров движения....	73
3.4	Разработка имитационной модели работы системы тягового электроснабжения	84
3.5	Выводы по разделу 3	87
4	ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ.....	92
4.1	Применение накопителей электроэнергии на базе аккумуляторов и конденсаторов различной конструкции, а также кинетических накопителей	92
4.2	Размещение накопителей электроэнергии на полигоне Московского центрального кольца.....	99
4.3	Результаты оценки энергоемкости для условий работы накопителя	116
4.4	Оценка влияния внедрения накопителей электроэнергии на режимы работы системы тягового электроснабжения.....	117
4.5	Экономический расчет и оценка объема инвестиций	124
4.6	Выводы по разделу 4	126
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	127
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	129
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	130
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	145
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	148
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	173
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г	178

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Уже на протяжении нескольких лет в общественных, политических и научных кругах одним из приоритетных вопросов является проблема сокращения углеродного следа и влияния производственной деятельности человека на окружающую среду. ОАО «РЖД» является одним из крупнейших потребителей электрической энергии в России. ОАО «РЖД» большое внимание уделяет повышению эффективности расходования топливно-энергетических ресурсов и снижению потерь электроэнергии, учитывая, что железнодорожный транспорт является одним из главных потребителей электрической энергии в стране [15, 19, 50, 51].

С точки зрения потребления электрической энергии работа железнодорожного транспорта является сложным комплексным процессом. В нем можно выделить отдельные подпроцессы: передача, преобразование и потребление электроэнергии. Целесообразно учитывать специфику и рассматривать энергоэффективность каждого подпроцесса по отдельности [93, 94].

Основной 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 [105].

Существует множество различных типов накопителей. Их подразделяют в зависимости от принципов работы. Характеристики накопителей выбирают в зависимости от решаемой задачи [1, 2, 6, 28, 30, 58, 83, 88].

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. [52, 62, 79-81, 85, 86, 89, 90, 92, 100, 101, 106].

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 [7, 42, 56, 59-61, 78, 103, 104].

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 [20, 29, 39, 40, 63].

Следует отметить, что большую роль в определении характеристик накопителей электрической энергии играют особенности алгоритмов работы их внутренней системы управления. Посредством настройки этих алгоритмов можно варьировать параметры накопителей для достижения требуемых технико-экономических характеристик [38, 82, 84, 87, 91, 95, 96, 98, 99, 102]

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 проработанности проблемы. 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 [31-37], В.Т. Черемисина – в части изучения вопроса эффективности применения энергии рекуперативного торможения [65-71], В.Е. Марского – по определению и повышению пропускной

способности железнодорожных участков по устройствам тягового электроснабжения [40-41], М.П. Бадёра – в части технологического совершенствования системы тягового электроснабжения [3-5], М.В. Шевлюгина – в части внедрения технологии накопления электрической энергии в работу системы тягового электроснабжения метрополитена [55, 72-76], М.М. Никифорова – в части повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения постоянного тока 3 кВ [16, 18, 45-48], В.Л. Незевака – в части разработки методов повышения эффективности использования энергии рекуперации, и других специалистов [8-14, 17, 21, 23-26, 49, 54, 57, 77].

В настоящей диссертационной работе рассмотрен пример внедрения системы накопления электрической энергии на конкретном полигоне Московского центрального кольца (МЦК) – замкнутой изолированной системы электроснабжения, с учетом вышеуказанных исследований и разработок

Целью диссертационной работы является 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 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 результатов 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 работы:

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 энергетической 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 международных конференциях МАТЕС Scopus.

Полученные результаты используются Трансэнерго – филиалом ОАО «РЖД», который эксплуатирует и обслуживает инфраструктуру электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД», при эксплуатации и развитии железнодорожного электроснабжения городского транспортного узла.

Личный вклад автора заключается в определении и обосновании актуальности темы диссертации, разработке программы натурных измерений в системе тягового электроснабжения и на подвижном составе Московского центрального кольца, проведении и обработке результатов натурных измерений, формировании предложений по уточнению математической модели расчета энергетической эффективности работы замкнутой кольцевой системы тягового электроснабжения, формулировании выводов по результатам работы и рекомендаций о местах внедрения средств накопления электрической энергии на полигоне Московского центрального кольца.

По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе 2 статьи в изданиях из перечня ВАК Министерства образования и науки России, одна в издании из международной базы цитирования Scopus и две в изданиях РИНЦ. Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, легли в основу разработки ПО «Система планирования, нормирования и анализа использования топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов (АСУ ТЭР). очередь 2020-1» (АСУ ТЭР. очередь 2020-1), номер свидетельства о регистрации 2021666664 от 07.10.2021.

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.

1 АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВЕ

Совершенствование процесса потребления электроэнергии с точки зрения энергосбережения требует эффективного использования существующих решений, в частности накопители энергии, которые на железнодорожном транспорте могут быть использованы в электрической тяге, системе электроснабжения и для автономной тяги.

Анализ опыта применения систем накопления электроэнергии в технологически развитых странах показал: муниципальное метро г. Осака (Япония) применяет накопители Кавасаки Gigacell 750 В (тип: никель-металлгидридная батарея); железная дорога Сейбу использует суперконденсаторные накопители CAPAPOST компании Meiden; муниципальный транспорт в г. Кобе применяет литий-ионные накопители В-СНОР компании Hitachi; E3Solution компании Toyo Electric (литий-ионная батарея) муниципальный транспорт г. Кагошима; GS Yuasa Компании Toyo Electric (литий ионная батарея) Западные японские ж.д.; SITRAS SES компании Сименс для малого метро, г. Кельн (батарея суперконденсаторов). Таким образом следует отметить, что интерес к применению рассматриваемого технического решения не ограничивается единичными случаями или странами. В то же время опыт внедрения накопителей в настоящее время носит скорее характер пилотных или экспериментальных проектов.

Подобным образом сформировался и российский опыт: накопители энергии неуправляемого типа были применены на экспериментальном кольце ж.д. постоянного тока в г. Щербинка (ВНИИЖТ). На тяговой подстанции «Щербинка» была создана и испытана на шинах 3,3 кВ макетная установка из двух параллельно соединенных ветвей по двенадцать последовательно соединенных суперконденсаторов ($C = 1,55 \text{ Ф}$, $U_n = 300 \text{ В}$) производства России. В настоящее

время она используется при коммутационных испытаниях быстродействующих выключателей для обеспечения требуемого di/dt . Кроме того такая установка может использоваться для фильтрации напряжения и тока на шинах 3,3 кВ подстанций постоянного тока.

В 2006 году специалистами РУТ (МИИТ) совместно с Московским метрополитеном были проведены первые опыты автономного хода ЭПС метро с использованием бортовых накопителей, состоящих из 14 суперконденсаторов. Тогда удалось на одном заряде батареи провести состав из 5 вагонов, массой 160000 кг, со скоростью 8 км/ч, около 800 м. В период с 2012 – 2013 г. на Филевской линии Московского метрополитена проводились работы по установке в системе тягового электроснабжения накопителей электрической энергии с последующими испытаниями. Стационарные накопители энергии неуправляемого типа были установлены на двух тяговых подстанциях Т-23 и Т-24 с основным функциональным назначением принятия избыточной энергии рекуперации, обеспечение вывода подвижного состава своим ходом при отключенном основном электроснабжении, повышение энергетической надежности и экономия электроэнергии.

Как видно, исследование по поиску способов экономии топливно-энергетических ресурсов является нетривиальной многофакторной задачей. Ограниченный отечественный опыт и отсутствие подробного описания технических аспектов иностранных примеров внедрения в доступных источниках информации создают предпосылки для продолжения изучения практического применения систем накопления электроэнергии на железнодорожном транспорте.

Для этого на первом этапе необходимо определить отдельные места потребления топливно-энергетических ресурсов, которые в дальнейшем будут ранжированы с точки зрения перспективы повышения энергетической эффективности работы. Итоговый перечень представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень объектов электропотребления

№ п/п	Объект энергопотребления
1	Электроустановки электровоза
2	Электроустановки электропоезда
3	Тяговая сеть переменного тока 25 кВ и 2х25 кВ
4	Электроустановка тяговой подстанции
5	Рельсовая цепь
6	Тяговая сеть постоянного тока 3,3 кВ
7	Электрооборудование служебных помещений
8	Электроустановки пассажирских вагонов
9	Электроустановки локомотивных депо

Для исследования значимости объектов с точки зрения возможности повышения энергетической эффективности их работы применены метод парного сравнения и метод ранговой корреляции. Был проведен опрос выборки экспертов и результат, полученный по итогу обработки совокупности представленных мнений, был принят за основу решения задачи [27, 53].

Использованные методы просты в реализации и позволяют выполнить качественную оценку факторов путем опроса выборки без проведения масштабного статистического исследования. Выборка для экспертной группы была сформирована на основе критериев компетентности экспертов (стаж работы в области железнодорожной электрификации, 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. Масштабная география сети электрифицированных железных дорог России позволила опросить более 100 экспертов отрасли.

Опрошенные эксперты провели оценку данных в соответствии с разработанными и направленными в их адрес опросными листами (рисунок 1.1).

Опросный лист «Объекты энергопотребления на предприятиях железнодорожного транспорта»

№ №	Объект энергопотребления	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
1	Электроустановки электровоза	x	0,5	1	0	1	0,5	1	1	1
2	Электроустановки электропоезда	0,5	x	1	0	1	0,5	1	1	1
3	Тяговая сеть переменного тока 25 кВ и 2х25 кВ	0	0	X	0	1	0,5	1	1	1
4	Электроустановки тяговых подстанция	1	1	1	X	1	0,5	1	1	1
5	Рельсовая цепь	0	0	0	0	X	0,5	1	1	1
6	Тяговая сеть постоянного тока 3,3 кВ	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	X	1	1	1
7	Электрооборудование служебных помещений	0	0	0	0	0	0	x	1	1
8	Электроустановки пассажирских вагонов	0	0	0	0	0	0	0	x	
9	Электроустановки локомотивных депо	0	0	0	0	0	0	0	0	x

Занимаемая должность: ЭЧЗ-2

Производственный стаж: 26 лет

Указания:

1. Сравнить попарно объекты с точки зрения потенциала энергосбережения
2. Выставить оценку:
 - 1 - если объект по вертикали более перспективен с точки зрения энергосбережения;
 - 0,5 - если объекты по вертикали и горизонтали одинаково перспективны;
 - 0 - если объект по вертикали менее перспективен с точки зрения энергосбережения.

Рисунок 1.1 – Пример заполненного опросного листа при использовании метода парного сравнения

В данных опросных листах описан предмет исследования, представлены формы таблиц-анкет с перечнем объектов энергопотребления и инструкция с основными принципами их заполнения.

В рамках применения метода парного сравнения объекты энергопотребления заполнялись в случайном порядке, но одинаковом по строкам и столбцам.

Экспертам предлагалось сравнить каждый объект попарно со всеми остальными, выставляя оценку r_{ij} :

- 1; если i -ый объект более перспективен с точки зрения экономии электроэнергии, чем j -ый;
- 0,5; если i -ый и j -ый объекты равнозначны;
- 0; если более перспективен j -ый объект.

Применение данного способа сравнительной оценки может содержать в себе нарушения транзитивности: в процессе сравнения i -ый объект определен как более перспективный чем j -ый, j -ый объект – как более перспективный чем k -ый, а k -ый – как более перспективный чем i -ый. Принято, что:

при m – общем количестве опрашиваемых экспертов;

m_i – количество результатов, в которых $r_{ij} = 1$;

m_j – количество результатов, в которых $r_{ij} = 0$;

m_k – количество результатов, в которых источники равнозначны [53].

Математическое ожидание величины r_{ij} :

$$M[r_{ij}] = x_{ij} = \frac{1}{m} (m_i + \frac{1}{2} m_k). \quad (1.1)$$

Задачи на собственные значения решаются в соответствии с алгоритмами, которые подразделяются на две группы.

Для того, чтобы определить наибольшее и наименьшее собственные значения удобнее использовать итерационную процедуру. Таким образом, вычисление коэффициентов K_i реализовано с применением метода последовательных приближений.

В рамках использования метода ранговой корреляции мнением эксперта объекту присваивается определенный ранг (позиция). В результате ранжирования объекты располагаются в порядке возрастания суммы рангов P_j , которая вычисляется по формуле:

$$P_j = \sum_{i=1}^n R_{ij}, \quad (1.2)$$

где R_{ij} – ранг, присвоенный i -м экспертом j -му объекту.

В опросном листе в произвольном порядке представлены объекты энергопотребления железнодорожного электрохозяйства. Чтобы упростить формальную обработку мнений, при заполнении рекомендовано придерживаться следующих правил:

- 1 самый значимый объект должен иметь ранг 1.
- 2 остальные источники должны располагаться в порядке убывания значимости с присвоением рангов 2, 3, 4 и т.д.;
- 3 поля балльных оценок заполняются исходя из степени значимости объектов энергопотребления, а также из условия, что наивысший балл по 100-балльной шкале присваивается объекту с рангом 1.

Показатель, характеризующий связность рангов, T_i определяется в соответствии с формулой:

$$T_i = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{H_i} (k^3 - k), \quad (1.3)$$

где H_i – количество связей (групп равных рангов) в ранжировке, составленной i -м экспертом, а k – количество членов в связи.

С учетом того, что согласно:

$$S_{max} = \frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) - m \sum_{i=1}^m T_i', \quad (1.4)$$

При этом коэффициент конкордации будет равен:

$$W = \frac{S}{S_{max}} = \frac{\sum_{j=1}^n (P_j - P_{cp})^2}{\frac{1}{12} m^2 (n^2 - n) - m \sum_{i=1}^m T_i'}. \quad (1.5)$$

Причем в случае, когда в i -й ранжировке отсутствуют связи, $T_i=0$.

При полностью совпадающих мнениях экспертов $W = 1$. При значительных различиях в суждениях экспертов, W при $n > 7$ проводится по критерию χ^2 , который формируется в соответствии с формулой:

$$\chi_{\Gamma}^2 = W_m(n - 1). \quad (1.6)$$

При случайном заполнении таблицы величина χ_{Γ}^2 совпадает с известным χ^2 – распределением с $\nu = n - 1$ степенями свободы [1].

Принимая в качестве условия однопроцентный уровень значимости для группы экспертов по таблицам χ^2 – распределения определяем критическую величину $\chi_{кр}^2$ для соответствующей V . Таким образом $\chi_{кр}^2 = 18,475$.

Тогда в соответствии с формулой (1.6) $\chi_{\Gamma}^2 = 29,4$. Учитывая, что полученная величина χ_{Γ}^2 выше чем критическая, коэффициент W признается значимым и согласованность экспертов существенна.

Коэффициент конкордации является значимым также и с точки зрения распределения Фишера.

Рисунки 1.2 и 1.3 иллюстрируют результаты, которые были получены по итогам применения методов парного сравнения и ранговой корреляции. Наибольшим площадям прямоугольников на рисунках 1.2 и 1.3 соответствуют наиболее значимые объекты. На представленных диаграммах (рисунки 1.2 и 1.3) по вертикальной оси обозначены усредненные значения суждений экспертов, а по горизонтальной оси – объекты энергопотребления по степени их значимости.

Результаты ранжирования показали следующий рейтинг объектов энергопотребления по степени значимости:

- 1 Электроустановки электровоза;
- 2 Электроустановки тяговых подстанция;
- 3 Электроустановки электропоезда;
- 4 Тяговая сеть постоянного тока 3,3 кВ;
- 5 Тяговая сеть переменного тока 25 кВ и 2x25 кВ;
- 6 Электроустановки локомотивных депо;
- 7 Электрооборудование служебных помещений;
- 8 Рельсовая цепь;
- 9 Электроустановки пассажирских вагонов.

Ранжирование объектов сопровождается обработкой бальной оценкой степени значимости объектов железнодорожного транспорта с точки зрения энергопотребления.

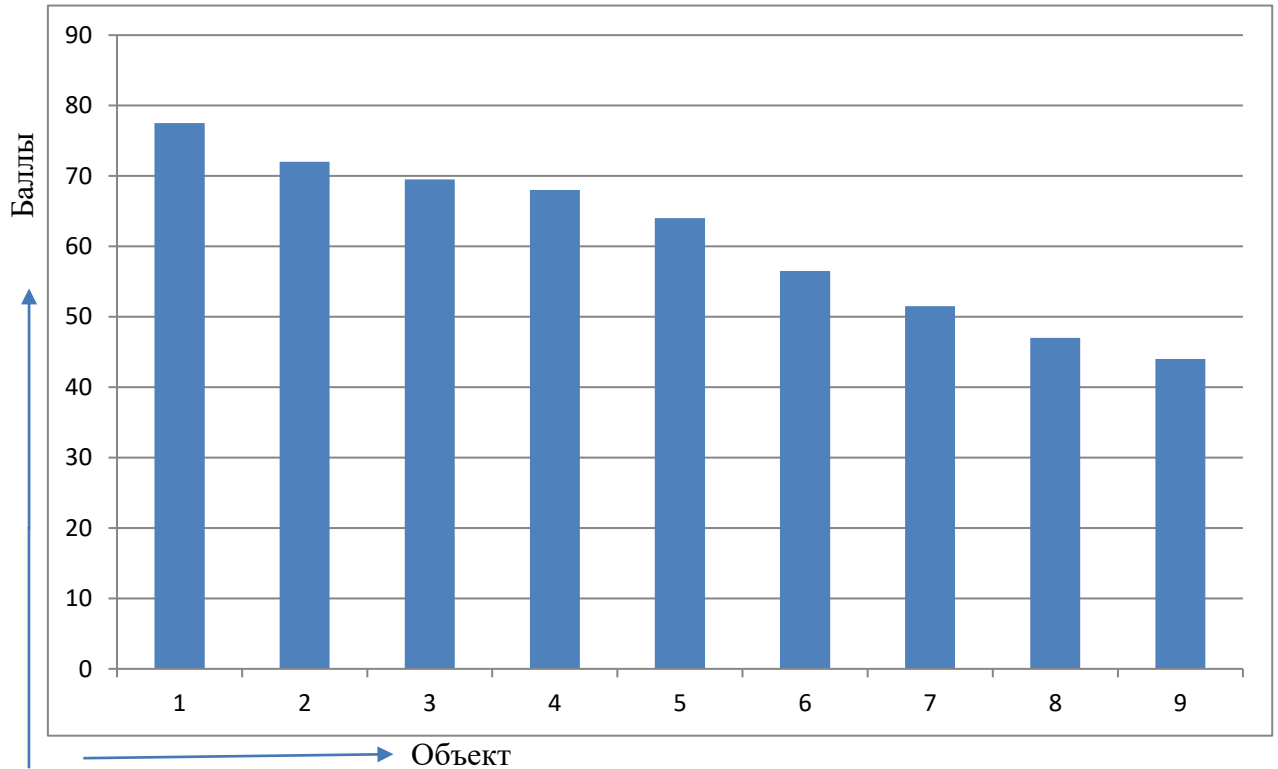


Рисунок 1.2 – Результаты ранжирования объектов энергопотребления методом парного сравнения

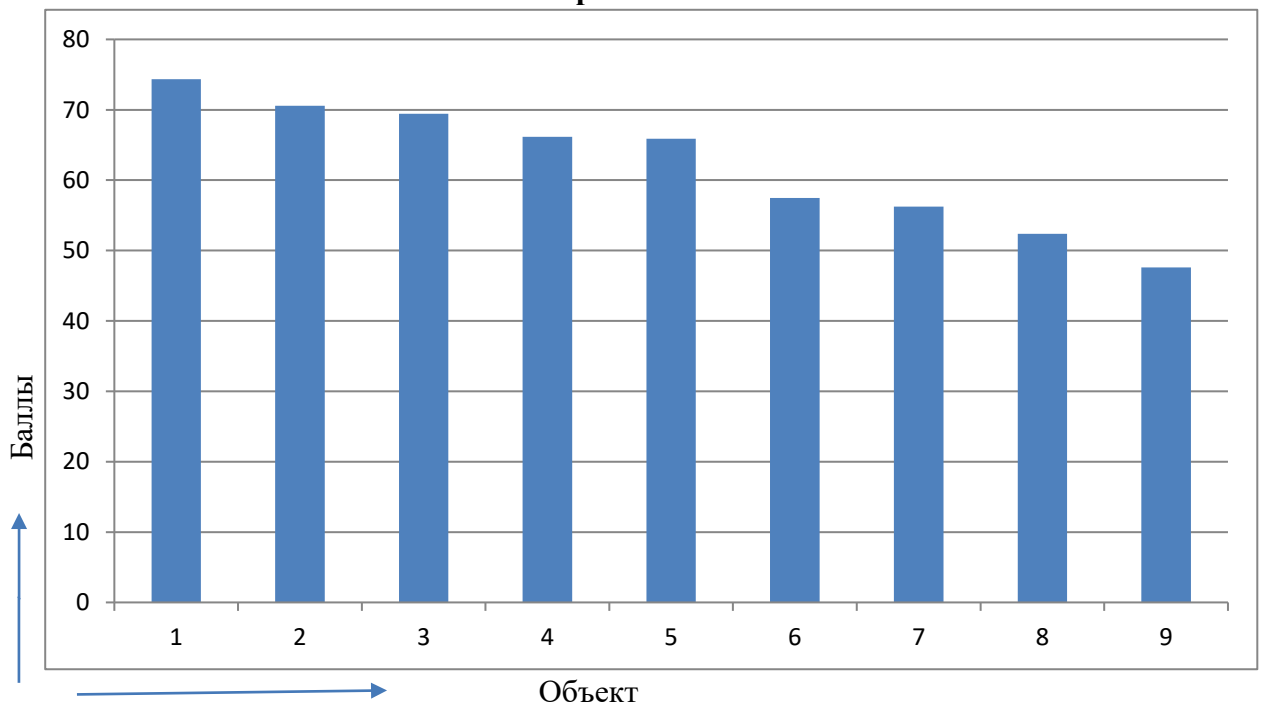


Рисунок 1.3 – Результаты ранжирования объектов энергопотребления методом ранговой корреляции

Присваиваемые экспертами баллы имеют разброс значений, что ведет к необходимости преобразования бальных оценок в относительные весовые коэффициенты C_{ij} :

$$C_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (1.7)$$

при фиксированном i .

По итогам расчета C_{ij} производились вычисления их средних значений. Средние по оценкам всех экспертов значения принимались относительными весовыми коэффициентами важности факторов [53].

Результаты анализа показывают, что экспертами оценена несомненная значимость (перспективность) ряда объектов электрохозяйства ОАО «РЖД» с точки зрения повышения энергоэффективности.

Объекты энергопотребления в соответствии с результатами оценки можно дифференцировать следующим образом:

наиболее перспективные:

- 1 электроустановки электровоза;
- 2 тяговая сеть постоянного тока 3,3 кВ;
- 3 электроустановки тяговых подстанций;

менее перспективные:

- 1 обратная тяговая сеть;
- 2 тяговая сеть переменного тока 25 кВ и 2х25 кВ;
- 3 электроустановка электропоезда;

бесперспективные:

- 1 электрооборудование служебных помещений;
- 2 электроустановки локомотивных депо;
- 3 электроустановки пассажирских вагонов.

Близость результатов, полученных посредством применения разных методов, говорит об их достоверности. Важно отметить также, что наибольшая корреляция результатов наблюдается при выявлении наиболее значимых с точки зрения перспективы энергосбережения объектов, а также наименее значимых.

Посредством применения данных экспертных методов подтверждено наличие в электрохозяйстве ОАО «РЖД» объектов с высокой перспективой увеличения энергетической эффективности. Она может быть реализована за счет учета и соблюдения требований нормативной базы, проведения технических и организационных мероприятий, а также концентрации научно-исследовательской деятельности на выделенных объектах.

1.1 Выводы по разделу 1

Постановка цели и задач исследования:

1 По итогам анализа выявлены объекты энергопотребления, перспективные с точки зрения повышения энергоэффективности их работы.

2 Определено, что наиболее перспективные объекты – электроустановка электровоза, тяговая сеть постоянного тока 3,3 кВ и электроустановка тяговой подстанции – будут рассмотрены с точки зрения применения мероприятий и средств повышения энергетической эффективности.

3 Для оценки эффективности реализации мер повышения энергоэффективности объектов электроснабжения предложено определить математическую модель их работы.

4 Для подтверждения эффективности предлагаемых технических решений предложено провести натурные эксперименты на выбранном полигоне железных дорог.

2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МОСКОВСКОГО ЦЕНТРАЛЬНОГО КОЛЬЦА

В настоящее время электропотребление на тягу для пассажирских перевозок в границах МЦК составляет около 8,0 млн кВт·ч в месяц. Текущий уровень рекуперации электропоездами серии ЭС2Г (за период с апреля 2018 г. по май 2019 г.) составляет 37,8 % от расхода на тягу, при этом заявленный производителем электропоездов платформы «Siemens Desiro» уровень рекуперации в условиях МЦК достигает 50 %. Существующая перспектива повышения энергетической эффективности тяги поездов в границах МЦК, в том числе за счет использования энергии рекуперации, обуславливает целесообразность настоящей научно-исследовательской работы.

Как для любой другой организации, осуществляющей регулируемые виды деятельности, для ОАО «Российские железные дороги» установлены следующие целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности деятельности:

энергоёмкость производственной деятельности ОАО «РЖД»;

энергоэффективность производственной деятельности ОАО «РЖД».

Указанные интегральные показатели позволяют оценить энергосберегающую деятельность ОАО «РЖД» и определяются в соответствии с «Методикой определения энергоёмкости производственной деятельности ОАО «РЖД», утвержденной 21 декабря 2009 г.

Однако для оценки эффективности работы отдельных хозяйств, филиалов, дочерних и зависимых обществ ОАО «РЖД» необходимо использовать собственные показатели энергетической эффективности, отражающие специфику потребления ими энергоресурсов. Так, для оценки энергоэффективности тяги поездов используют показатели удельного расхода электроэнергии, которые, по сути, являются показателями энергоёмкости. В данной работе также будем

оперировать в основном показателями энергоёмкости, снижение которых будет означать повышение энергоэффективности и наоборот.

В рамках настоящей работы требуется сформировать систему показателей, характеризующую энергетическую эффективность СТЭ и ЭПС МЦК.

2.1 Показатели энергоэффективности тягового электроснабжения Московского центрального кольца

На показатели энергетической эффективности работы системы тягового электроснабжения прямое влияние оказывают характеристики электроэнергетической системы и силовых трансформаторов подстанции. Эквивалентное электрическое сопротивление, предназначенное для расчета энергетических показателей в установившихся режимах, определяется по формуле:

$$R_{\text{э ТП}} = k_{\text{пр}} \times \left(\frac{1}{S_{\text{к.з.}}} + \frac{u_{\text{к ПТ}}}{100 \times n_{\text{ПТ}} \times S_{\text{ПТ ном}}} + \frac{u_{\text{к ПрТ}}}{100 \times n_{\text{ПрТ}} \times S_{\text{ПрТ ном}}} \right), \quad (2.1)$$

где $S_{\text{к.з.}}$ – мощность трехфазного короткого замыкания на шине высшего напряжения тяговой подстанции; $S_{\text{ПТ ном}}$, $S_{\text{ПрТ ном}}$ – номинальная мощность понижающего и преобразовательного трансформатора соответственно; $u_{\text{к ПТ}}$, $u_{\text{к ПрТ}}$ – напряжение короткого замыкания понижающего трансформатора и напряжение короткого замыкания коммутации преобразовательного трансформатора соответственно; $k_{\text{пр}}$ – коэффициент, зависящий от схемы преобразования.

В целях выполнения расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения с установленными накопителями электрической энергии в схему замещения системы тягового электроснабжения следует дополнить соответствующим сопротивлением системы накопления электроэнергии, которое определяется по формуле (без учета сопротивления преобразователей):

$$R_{\text{э СНЭ}} = \frac{U_{\text{НН}}^2}{k_{\text{тр}}^2} \times \left(\frac{u_{\text{кТ}}}{100 \times n_{\text{р}} \times n_{\text{Т}} \times S_{\text{Т ном}}} \right). \quad (2.2)$$

Энергоэффективность тягового электроснабжения:

$$w^{\text{ТП}} = \frac{W^{\text{ТП}} - W_{\text{ИНВ}}^{\text{ТП}}}{A}, \quad (2.3)$$

где $W^{\text{ТП}}$ и $W_{\text{ИНВ}}^{\text{ТП}}$ – это соответственно объемы электроэнергии, отпущенные на тягу поездов и возвращенные во внешнюю сеть через выпрямительно-инверторные преобразователи, кВт·ч;

A – работа ЭПС, 10^4 ткм брутто.

Совокупная энергоэффективность СТЭ, ЭПС, путевого хозяйства, организации движения и т.д. отражается посредством удельного расхода электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций. Однако сам по себе данный показатель недостаточно информативен. Для более глубокого анализа энергоэффективности целесообразно декомпозировать показатель энергоэффективности тягового электроснабжения $w^{\text{ТП}}$ и рассматривать его составляющие по отдельности.

2.2 Показатели энергоэффективности системы тягового электроснабжения

Приведенные в настоящем разделе показатели лишь условно можно считать показателями энергоэффективности СТЭ, так как на их формирование также оказывают влияние множество факторов, таких как режимы вождения поездов, организация движения, размеры грузо- и пассажирооборота и т.д.

В соответствии с ГОСТ 32895-2014 [22] под системой тягового железнодорожного электроснабжения понимается совокупность электроустановок, предназначенная для преобразования, распределения и передачи электрической энергии к железнодорожному электроподвижному составу. Исходя из данного определения, энергоэффективность СТЭ будет определяться эффективностью преобразования, распределения и передачи электроэнергии к ЭПС, которая в свою очередь характеризуется таким показателем, как потери электрической энергии (рисунок 2.1).

В общем виде значение технических потерь электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС в процентном выражении определяется по формуле:

$$\delta w_{\text{тяг}}^{\text{тех}} = \frac{\Delta W_{\text{тяг}}^{\text{тех}}}{W_{\text{ТП}}} \cdot 100, \quad (2.4)$$

где $\Delta W_{\text{тяг}}^{\text{тех}}$ – абсолютное значение технических потерь электроэнергии в СТЭ при ее передаче к ЭПС, кВт·ч.

Следует заметить, что приведенное выше определение СТЭ не учитывает возможности транспортировки, распределения и преобразования электроэнергии в обратном направлении, т.е. от ЭПС в систему внешнего электроснабжения, что имеет место при применении рекуперативного торможения на ЭПС на участках постоянного тока с вентильно-инверторным преобразователем (ВИП) на тяговых подстанциях. На участках железных дорог с применением рекуперативного торможения должны также учитываться потери электроэнергии в СТЭ при ее транспортировке от рекуперирующего ЭПС к другим ЭПС, находящимся в режиме тяги. Таким образом, еще одним показателем энергоэффективности СТЭ должны являться *потери энергии рекуперации в СТЭ*. Данный показатель характеризует эффективность использования энергии рекуперации.

В общем виде значение этого показателя в процентном выражении определяется по формуле:

$$\delta w_{\text{рек}}^{\text{тех}} = \frac{\Delta W_{\text{рек}}^{\text{тех}}}{W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}} \cdot 100, \quad (2.5)$$

где $\Delta W_{\text{рек}}^{\text{тех}}$ – абсолютное значение потерь энергии рекуперации в СТЭ, кВт·ч;

$W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}$ – общий объем выработанной ЭПС энергии рекуперации, кВт·ч.

Как видно из рисунка 2.1 потери электроэнергии подразделяются на основные, т.е. потери в устройствах СТЭ, определяемые уровнем основной нагрузки (тяги поездов), и дополнительные – потери в устройствах СТЭ, обусловленные неудовлетворительными режимами работы СТЭ и условиями эксплуатации устройств СТЭ.

Приведенные показатели в зависимости от потребностей, технических

возможностей и применяемых методов могут определяться для различных зон учета: полигона железной дороги, дистанции электроснабжения, межподстанционной зоны или произвольного участка железной дороги. В рамках настоящей работы искомые показатели должны быть получены в границах МЦК.



Рисунок 2.1 – Структура технических потерь электроэнергии в СТЭ постоянного тока

2.3 Показатели энергоэффективности электроподвижного состава

На приведенные в данном разделе показатели оказывают влияние организация движения, состояние и режимы работы СТЭ и другие факторы, но это влияние относительно невелико и в рамках настоящего исследования они не

учитываются.

Главным показателем, определяющим энергоэффективность работы ЭПС, является *удельный расход электроэнергии на тягу поездов без учета потерь электроэнергии в СТЭ*. В идеальном случае – это расход по счетчикам ЭПС, отнесенный к выполненной работе, при допущении, что счетчики электроэнергии на ЭПС учитывают весь объем потребляемой из контактной сети электроэнергии, кВт·ч/10⁴ ткм брутто:

$$w^{\text{ЭПС}} = \frac{W^{\text{ЭПС}}}{A}, \quad (2.6)$$

где $W^{\text{ЭПС}}$ – расход электроэнергии по счетчикам ЭПС, кВт·ч;

A – работа ЭПС, 10⁴ ткм брутто.

Дополнительным показателем, влияющим на энергоэффективность ЭПС, является *удельная рекуперация*. В идеальном случае – объем рекуперируемой электроэнергии по счетчикам ЭПС, отнесенный к выполненной работе, при допущении, что счетчики электроэнергии на ЭПС учитывают весь объем энергии рекуперации, кВт·ч/10⁴ ткм брутто:

$$w_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}} = \frac{W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}}{A}. \quad (2.7)$$

Удельная рекуперация характеризует эффективность применения рекуперативного торможения подвижным составом.

Данные показатели в зависимости от потребностей, технических возможностей и применяемых методов могут определяться: в границах полигона или в границах участков работы локомотивных бригад, для отдельной поездки, в границах произвольного участка железной дороги, в том числе по видам движения и по сериям ЭПС.

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

2.4 Небаланс и «коммерческие» потери электроэнергии на тягу поездов

В теории в общем случае для участка железной дороги должно выполняться следующее равенство:

$$W^{\text{ТП}} - W_{\text{инв}}^{\text{ТП}} = W^{\text{ЭПС}} - W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}} + \Delta W_{\text{рек}}^{\text{тех}} + \Delta W_{\text{тяг}}^{\text{тех}} + W^{\text{нетяг}}, \quad (2.8)$$

где $W^{\text{нетяг}}$ – потребление электроэнергии от контактной сети на нетяговые или технологические нужды.



Рисунок 2.2 – Структура «коммерческих» потерь электроэнергии на тягу поездов

На практике на точность определения расходов электроэнергии существенно влияют техническое состояние средств измерения, методические погрешности и методические ошибки, что приводит к нарушению равенства (2.6).

Получаемую при этом разницу принято называть «коммерческими» потерями электроэнергии (рисунок 2.2), а совокупность «коммерческих» и технических потерь (в т.ч. технических потерь энергии рекуперации) – небалансом электроэнергии.

В настоящее время в ОАО «РЖД» относительное значение небаланса электроэнергии на тягу поездов принято определять отношением потерь электроэнергии к объему первичной (поставленной) электроэнергии, поступившей в контактную сеть (за вычетом электроэнергии, возвращенной во внешнюю сеть), %:

$$\delta W = \frac{(W^{\text{ТП}} - W_{\text{инв}}^{\text{ТП}}) - (W^{\text{ЭПС}} - W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}) - W^{\text{нетяг}}}{(W^{\text{ТП}} - W_{\text{инв}}^{\text{ТП}})} \cdot 100, \quad (2.9)$$

или

$$\delta W = \frac{\Delta W_{\text{тяг}}^{\text{тех}} + \Delta W_{\text{рек}}^{\text{тех}} + \Delta W^{\text{ком}}}{(W^{\text{ТП}} - W_{\text{инв}}^{\text{ТП}})} \cdot 100. \quad (2.10)$$

Однако приведенные формулы не вполне корректны, так как в данном случае в числителе присутствуют технические потери энергии рекуперации, но при этом в знаменателе отсутствует общий объем энергии рекуперации. В этой ситуации с ростом объемов энергии рекуперации будет расти и относительный уровень небаланса, что особенно сильно сказывается на участках дорог с преобладающим пассажирским или пригородным движением и в частности на МЦК.

Более правильной и объективной формулой для определения относительного значения небаланса является следующая, %:

$$\delta W = \frac{(W^{\text{ТП}} - W_{\text{инв}}^{\text{ТП}}) - (W^{\text{ЭПС}} - W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}) - W^{\text{нетяг}}}{(W^{\text{ТП}} - W_{\text{инв}}^{\text{ТП}}) + W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}} \cdot 100. \quad (2.11)$$

В графическом виде структура показателей энергоэффективности тяги поездов МЦК представлена на рисунке 2.3.

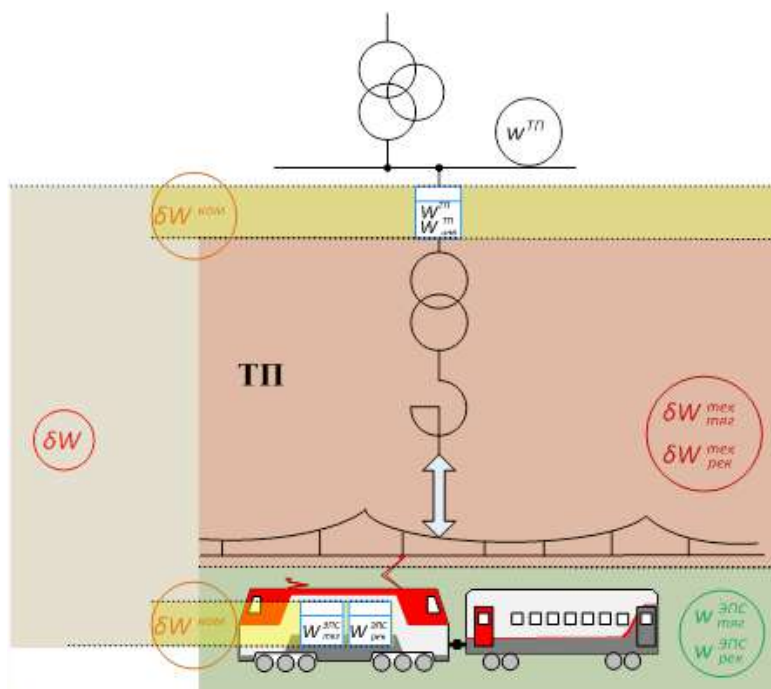


Рисунок 2.3 – Структура показателей энергоэффективности тяги поездов МЦК

«Коммерческие» потери электроэнергии на тягу поездов в границах МЦК, которые характеризуют текущее состояние учета электроэнергии на тягу поездов, определяются по формуле, %:

$$\delta W^{\text{ком}} = \frac{(W^{\text{ТП}} - W_{\text{инв}}^{\text{ТП}}) - (W^{\text{ЭПС}} - W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}) - W_{\text{нетяг}} - \Delta W_{\text{тяг}}^{\text{тех}}}{(W^{\text{ТП}} - W_{\text{инв}}^{\text{ТП}}) + W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}} \cdot 100. \quad (2.12)$$

Относительное значение полезного использования электроэнергии рекуперативного торможения электроподвижного состава определяется по формуле, %:

$$\delta_{\text{эф.рек}}^{\text{ЭПС}} = \frac{W_{\text{эф.рек}}^{\text{ЭПС}}}{W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}} \times 100\% \quad (2.13)$$

где $W_{\text{эф.рек}}^{\text{ЭПС}}$ – абсолютное значение полезного использования электроэнергии рекуперативного торможения, $W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}}$ – объем электроэнергии рекуперативного торможения, который вычисляется в соответствии с формулой:

$$W_{\text{рек}}^{\text{ЭПС}} = W_{\text{рек}}^{\text{КС}} + W_{\text{рек}}^{\text{с.н.ЭПС}} \quad (2.14)$$

где $W_{\text{рек}}^{\text{КС}}$ – объем электроэнергии рекуперативного торможения, переданного электроподвижным составом в контактную сеть, $W_{\text{рек}}^{\text{с.н.ЭПС}}$ – объем электроэнергии рекуперативного торможения, который электроподвижной состав потребил на собственные нужды.

2.5 Определение провозной способности межподстанционной зоны системы тягового электроснабжения при пропуске поездов с однотипным электроподвижным составом

Провозная способность участка железной дороги характеризуется массой всех поездов, пропускаемых через определенные межпоездные интервалы по данному участку за единицу времени. В конечном итоге нас интересует влияние допустимой нагрузочной способности системы тягового электроснабжения, а именно лимитирующей межподстанционной зоны, на этот показатель.

В соответствии с «Инструкцией по расчету наличной пропускной способности» и её изменений межпоездные интервалы рассчитывают при определенных режимах пропуска поездов и сочетаниях грузовых поездов наибольшей и средней массы. Время хода пакета n -поездов $T_{\text{п}}$ по длине межподстанционной зоны $L_{\text{МПЗ}}$ будет равно периоду от времени входа первого поезда из пакета - t_0 до времени выхода последнего поезда с зоны t

$$T_{\text{п}} = t_x + (n - 1)J \text{ или } t_x \cdot [1 + (n - 1)K_J], \text{ мин} \quad (2.15)$$

где t_x – время движения одного поезда по всей длине межподстанционной зоны

$$t_x = \frac{L_{\text{МПЗ}}}{V} \cdot 60, \text{ мин};$$

n – число поездов в пакете;

$$J – \text{ межпоездной интервал, } J = \frac{l_{\text{п}}}{V} \cdot 60, \text{ мин};$$

V – скорость поездов в расчетном параллельном графике, км/ч;

$l_{\text{п}}$ – расстояние между поездами в пакете, км;

$$K_J = \frac{J}{t_x} = \frac{l_{\text{п}}}{L_{\text{МПЗ}}} – \text{ относительная величина межпоездного интервала.}$$

Работа – A (ткм), выполняемая на межподстанционной зоне за время полного прохода пакета поездов по ней равна

$$A = L_{\text{МПЗ}} Q'_1 + \dots + L_{\text{МПЗ}} Q'_n = L_{\text{МПЗ}} \sum_{i=1}^{i=n} Q'_i, \quad (2.16)$$

где Q'_i – эквивалентная масса поезда.

Таким образом провозная способность межподстанционной зоны Π_I (ткм/ч) однопутного участка при пропуске пакета в составе которого находятся $n_{\text{наиб.}}$ поездов наибольшей массы и $n_{\text{сред.}}$ поездов средней массы $n = n_{\text{наиб.}} + n_{\text{сред.}}$ при $\frac{Q_{\text{наиб.}}}{Q_{\text{сред.}}} = k_{\text{п}}$ в общем виде будет равна

$$\begin{aligned} \Pi_I &= \frac{A}{T_{\text{п}}} \cdot 60 = \frac{L_{\text{МПЗ}} \cdot 60}{T_{\text{п}}} (k_{\text{п}} n_{\text{наиб.}} + n_{\text{сред.}}) Q'_{\text{сред.}} = \\ &= V \cdot \frac{k_{\text{п}} n_{\text{наиб.}} + n_{\text{сред.}}}{1 + (n-1)k_{\text{п}}} \cdot Q'_{\text{сред.}}, \text{ ткм/ч} \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\text{где } V = \frac{L_{\text{МПЗ}} \cdot 60}{t_x}$$

Для пропуска поездов массой Q по участку необходимо обеспечить определенную силу тяги электровоза, величина которой зависит не только от массы состава поездов, но и величины уклона – $i_{\text{р}}$, основного удельного сопротивления движения грузовых вагонов – ω''_0 , электровоза – ω'_0 , и его массы – P .

Максимально возможная масса состава – Q при его движении по расчетному подъёму с установившейся скоростью определяется по следующей формуле:

$$Q = \frac{F_{\text{кр}} - (\omega'_0 + i_{\text{р}})P}{\omega''_0 + i_{\text{р}}}, \quad (2.18)$$

где $F_{\text{кр}}$ – расчетная сила тяги электровоза;

Преобразуем её и представим в следующем виде определив $F_{\text{кр}}$ через требуемый тяговый ток двигателей электровоза, потребляемый из контактной сети межподстанционной зоны системы тягового электроснабжения – $I_{\text{э}}$. Получить зависимость $F_{\text{кр}}$ от $I_{\text{э}}$ можно, аппроксимировав электротяговые характеристики электровоза $F(I_{\text{э}})$ в виде

$$F_{кр} = k_T \cdot I_э - F_0 , \quad (2.19)$$

где k_T – коэффициент пропорциональности;

F_0 – сила сопротивления, зависящая от механических, магнитных и электрических потерь в электровозе.

Тогда подставив $F_{кр}$ в формулу (2.12) получим зависимость эквивалентной массы поезда Q' от тока электровоза:

$$Q' = k_p \cdot I_э , \quad (2.20)$$

где

$$Q' = Q + \frac{\omega'_0 + i_p}{\omega''_0 + i_p} \cdot P + \frac{1}{\omega''_0 + i_p} \cdot F_0 ; \quad (2.21)$$

$$k_p = \frac{k_T}{\omega''_0 + i_p}.$$

Сила сопротивления, обусловленная механическими, магнитными и электрическими потерями в электровозе – F_0 , и коэффициент пропорциональности - k_T постоянны и определяются по типовым тяговым характеристикам используемого электроподвижного состава.

Тяговые токи электроподвижного состава, идущего в пакете поездов, ограничиваются возможностями системы тягового электроснабжения. Как было показано ранее, эти токи в разных точках токосъема по длине межподстанционной зоны ограничены максимально допустимым током тяговой сети по нагреву её проводов, при нахождении пакета поездов у одной из тяговых подстанций или минимально допустимым напряжением на токоприемниках электроподвижного состава при нахождении пакета посередине межподстанционной зоны.

На первом этапе, чтобы понять физику процесса, определим эти наименьшие на межподстанционной зоне максимально реализуемые токи по схеме замещения межподстанционной зоны, принимая допущения, что $R_э$ – эквивалентное сопротивление тяговых подстанций близко к нулю. Это соответствует практике при использовании на тяговых подстанциях постоянного

тока двенадцатипульсовых выпрямителей, а на переменном токе мощных тяговых трансформаторов.

Таким образом, провозная способность по межподстанционной зоне тягового электроснабжения для однопутных участков и пропуске пакета или пачки из трёх поездов в соответствии с «Инструкцией...» равна:

$$\Pi_I = \frac{L_{\text{МПЗ}}}{t_x + 2J} \cdot \sum_{i=1}^3 Q'_i = V \frac{1}{1 + 2k_J} \cdot \sum_1^3 Q'_i, \quad (2.22)$$

где $L_{\text{МПЗ}}$ – длина межподстанционной зоны, км.

Как следует Методика определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования [43] в пакете из трёх поездов могут находиться один или два поезда наибольшей массы. Обозначив отношение $Q'_{\text{наиб}}/Q'_{\text{сред}}$, через коэффициент k_{Π} и поскольку Q' пропорциональна току электровоза (2.5.3) можно записать:

$$\Pi_I = \frac{L_{\text{МПЗ}}}{t_x + 2J} k_{\Pi} I_{\text{э}}^{\text{сред}} (k_{\Pi} + 2) \quad (2.23)$$

при одном поезде наибольшей массы в пакете из трёх поездов (1-3);

$$\Pi_I = \frac{L_{\text{МПЗ}}}{t_x + 2J} k_{\Pi} I_{\text{э}}^{\text{сред}} (2k_{\Pi} + 1) \quad (2.24)$$

при двух поездах наибольшей массы в пакете из трёх поездов (2-3),

где $I_{\text{э}}^{\text{сред}}$ – тяговый ток электровоза с эквивалентной средней массой поезда.

В первом варианте (1-3) ток фидеров тяговых подстанций $I_{\text{ф}}$ будет равен

$$I_{\text{ф}}^{(1-3)} = I_{\text{э}}^{\text{сред}} (k_{\Pi} + 2 - 3k_J) \quad (2.25)$$

Во втором варианте (2-3)

$$I_{\text{ф}}^{(2-3)} = I_{\text{э}}^{\text{сред}} [2k_{\Pi} - (k_{\Pi} + 2)k_J + 1]. \quad (2.26)$$

Для произвольного количества поездов в пакете n , уместяющихся на межподстанционной зоне, и $n_{\text{наиб}}$ поездов наибольшей массы, расположенных у одной из тяговых подстанций ток наиболее нагруженного фидера тяговой сети равен

$$I_{\text{ф}}^{n_{\text{наиб}}-n} = I_{\text{э}}^{\text{сред}} \cdot n \left[k_{\text{Т}}^{\text{сред}} + \frac{n_{\text{наиб}}}{n} \cdot (k_{\Pi} - 1) k_{\text{Т}}^{\text{наиб}} \right], \quad (2.27)$$

где $k_T^{\text{сред}}$ - коэффициент токораспределения всех n ЭПС поездов в пакете

$$k_T^{\text{сред}} = 1 - 0,5(n - 1)k_J;$$

$k_T^{\text{наиб}}$ – коэффициент токораспределения токов ЭПС поездов наибольшей массы

$$k_T^{\text{наиб}} = 1 - 0,5(n_{\text{наиб}} - 1)k_J.$$

Ток фидера тяговой сети не должен превышать допустимый по нагреву проводов ток тяговой сети - $I_{\text{доп}}^{\text{ТС}}$. В расчетном режиме пропуска пакета или пачки по однопутному участку трех поездов, один (1-3) или два (2-3) из которых имеют наибольшую массу ($Q_{\text{наиб}}$), остальные среднюю массу. Соответственно токи ЭПС, которые обеспечивают движение поездов с установившейся скоростью - V с эквивалентной массой $Q'_{\text{наиб}}$, $Q'_{\text{сред}}$ - $I_{\text{э}}^{\text{наиб}} = k_{\text{п}} \cdot I_{\text{э}}^{\text{сред}}$ и $I_{\text{э}}^{\text{сред}}$ (6, 7) будут равны при $I_{\text{ф}} = I_{\text{доп}}^{\text{ТС}}$:

режим (1-3)

$$I_{\text{э}}^{\text{сред}} = \frac{I_{\text{доп}}^{\text{ТС}}}{k_{\text{п}} - 3k_J + 2}; \quad (2.28)$$

режим (2-3)

$$I_{\text{э}}^{\text{сред}} = \frac{I_{\text{доп}}^{\text{ТС}}}{2k_{\text{п}} - (k_{\text{п}} + 2)k_J + 1} \quad (2.29)$$

Тогда из полученных формул, принимая, что токи фидеров во всех режимах должны быть $I_{\text{ф}} \leq I_{\text{доп}}^{\text{ТС}}$, можно определить минимально допустимый межпоездной интервал по k_J , характеризующий наличную пропускную способность, а также её зависимость от токов поездов наибольшей и средней массы $I_{\text{э}}^{\text{наиб}} = k_{\text{п}} \cdot I_{\text{э}}^{\text{сред}}$:

режим (1-3)

$$k_J \geq \left(k_{\text{п}} + 2 - \frac{I_{\text{доп}}^{\text{ТС}}}{I_{\text{э}}^{\text{сред}}} \right) \cdot \frac{1}{3}; \quad (2.30)$$

режим (2-3)

$$k_J \geq \left(2k_{\text{п}} + 1 - \frac{I_{\text{доп}}^{\text{ТС}}}{I_{\text{э}}^{\text{сред}}} \right) \cdot \frac{1}{k_{\text{п}} + 2}. \quad (2.31)$$

На рисунке 2.4 изображены зависимости k_J от тока поезда средней массы при их равных массах в пакете $k_{\text{п}} = 1$ и одном соединенном поезде среди трех

двойной массы $k_n = 2$. Для примера расчета использовались параметры системы тягового электроснабжения постоянного тока – 2МФ100+М120 без усиливающего провода и с одним и двумя А185. При таких сочетаниях параметров тяговой сети и режимах пропуска, соответствующих значениям k_j и $I_э^{ср\text{ед}}$, нагрузочная способность СТЭ по исследуемой межподстанционной зоне будет использоваться полностью и не превышает допустимую.

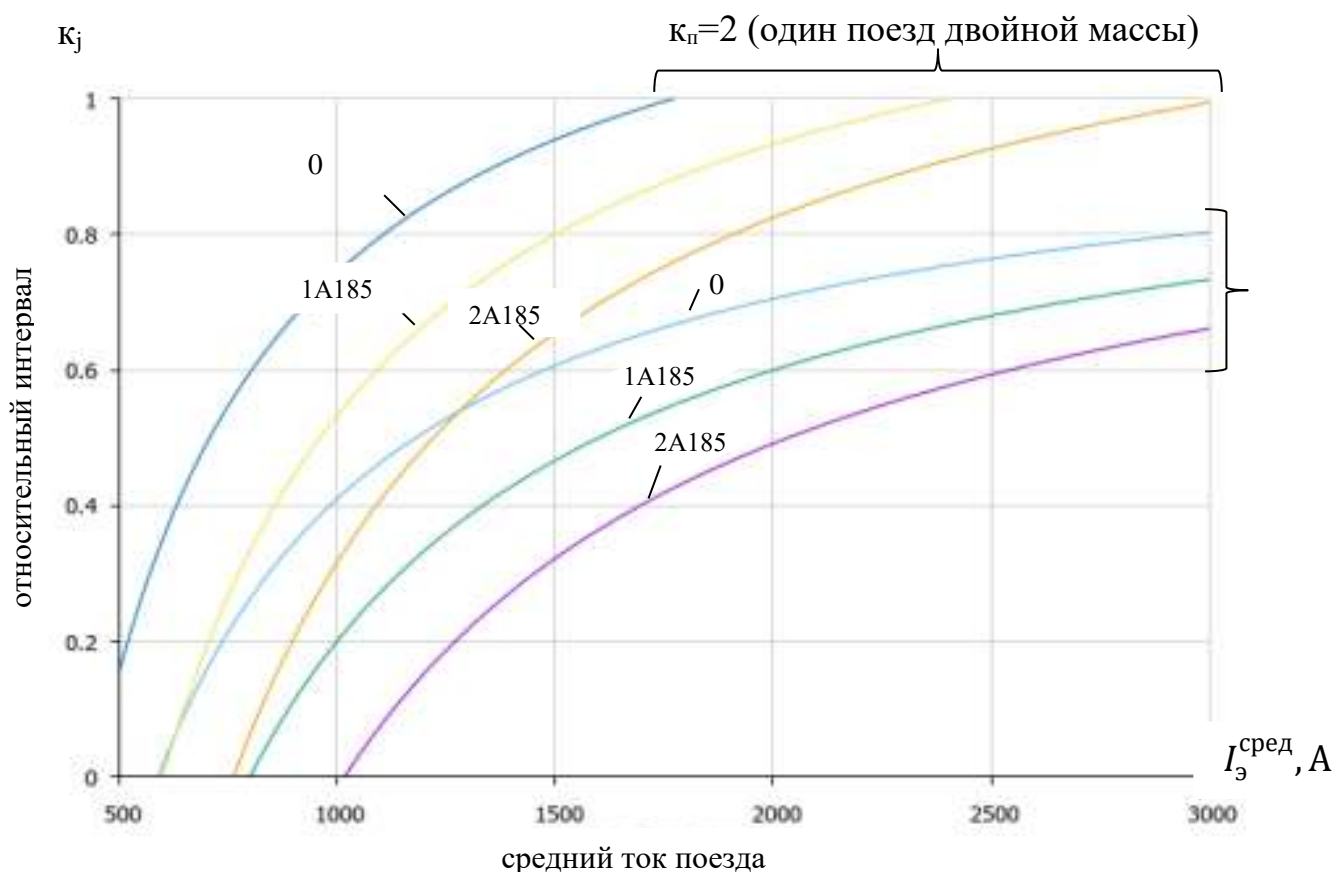


Рисунок 2.4 – Зависимости относительного межпоездного интервала $k_j = \frac{J}{t_x} = \frac{l_n}{L_{МПЗ}}$ при равной массе поездов в пачке $k_n=1$ и одном соединенном поезде двойной массы $k_n=2$ от тока поезда средней массы в расчетном графике движения

Как видно из полученных формул величина k_j линейно зависит от величины кратности предельно допустимого тока в тяговой сети на данной межподстанционной зоне, по отношению к тяговому току ЭПС, имеющего среднее значение массы в пакете поездов - $k = \frac{I_{доп}^{ТС}}{I_э^{ср\text{ед}}}$:

режим (1-3):

$$k_J = \frac{1}{3}(k_{\Pi} - k + 2);$$

режим (2-3)

$$k_J = \frac{1}{4}(2k_{\Pi} - k + 1).$$

Так при пропуске пакета поездов в составе которого находятся один или два двойных составов т.е. при $k_{\Pi} = 2$ зависимости k_J от k изображены на рисунке 2.5

В виде зависимости от k и произвольной наибольшей массы поезда в пакете она изображается в виде плоскости $k_J = f(k_{\Pi}, k)$ на рисунке 2.6

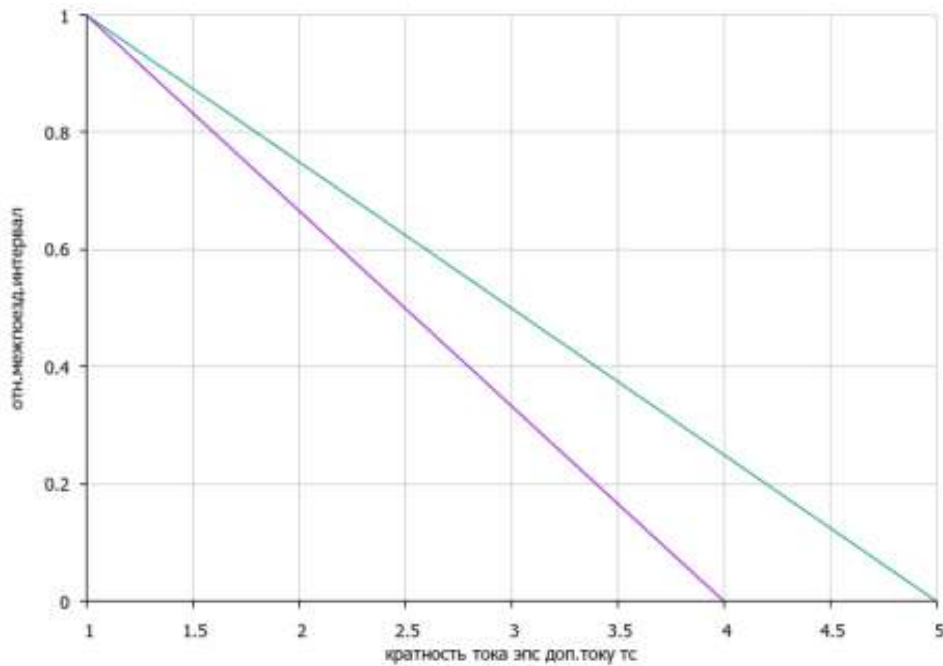


Рисунок 2.5 – Зависимости k_J от k

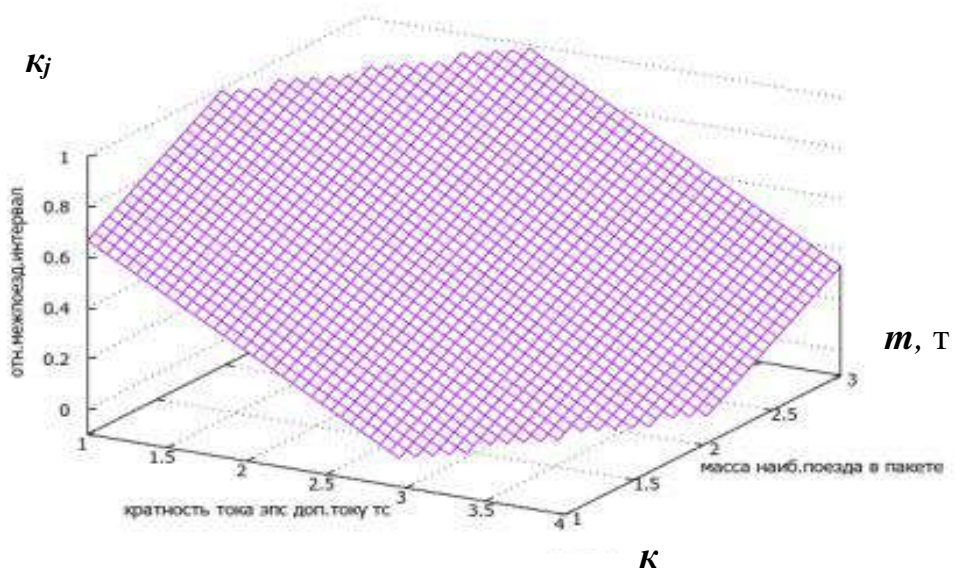


Рисунок 2.6 – Зависимости k_J от k и произвольной наибольшей массы поезда в пакете

Представленные зависимости позволяют относительно просто решать задачи соответствия параметров СТЭ поставленной задачи пропуска поездов по её межподстанционной зоне и расчета допустимого межпоездного интервала в пакетах поездов при их различных наибольших массах поездов.

Тогда предельная провозная способность в зависимости от $I_{\text{доп}}^{\text{ТС}}$ и условий пропуска (соотношение эквивалентной наибольшей и наименьшей массы поезда - $\kappa_{\text{п}}$ и межпоездного интервала $-\frac{J}{t_x} = \kappa_J$) будет равна:

$$\Pi_I = \frac{L_{\text{МПЗ}}}{t_x(1+2\kappa_J)} \cdot \frac{\kappa_{\text{п}}+2}{\kappa_{\text{п}}+2-3\kappa_J} \cdot \kappa_{\text{р}} I_{\text{доп}}^{\text{ТС}} = V \cdot \frac{\kappa_{\text{п}}+2}{(1+2\kappa_J)(\kappa_{\text{п}}+2-3\kappa_J)} \cdot \kappa_{\text{р}} I_{\text{доп}}^{\text{ТС}}. \quad (2.32)$$

Аналогично, при тех же допущениях можно получить зависимость Π_I и от допустимого по напряжению на электроподвижном составе $I_{\text{э}}^{\text{сред}}$ при заданном минимальном уровне напряжения в тяговой сети на токоприемнике ЭПС

$$[I_{\text{э}}^{\text{сред}}]_{U_{\text{э доп}}} = \frac{U_{\text{ТП}} - U_{\text{э доп}}}{\kappa_{\text{прив}} \cdot R_{\text{МПЗ}}}, \quad (2.33)$$

где $U_{\text{ТП}}$ – напряжение на шинах тяговой подстанции;

$U_{\text{э доп}}$ – минимально допустимое напряжение на токоприемнике электроподвижного состава;

$R_{\text{МПЗ}} = r_{\text{КС}} \cdot L_{\text{МПЗ}}$ – сопротивление тяговой сети межподстанционной зоны от правой до левой тяговой подстанции;

$\kappa_{\text{прив}}$ – коэффициент приведения $R_{\text{МПЗ}}$ к точке токосъема посередине межподстанционной зоны:

$$\kappa_{\text{прив}} = \kappa_{\text{п}}(0,25 - \kappa_J) + (0,5 - \kappa_J).$$

Тогда

$$\Pi_I = \frac{L_{\text{МПЗ}} \kappa_{\text{р}} (\kappa_{\text{п}} + 2)}{t_x (1 + 2\kappa_J) \kappa_{\text{прив}} \cdot R_{\text{МПЗ}}} (U_{\text{ТП}} - U_{\text{э доп}}) \quad (2.34)$$

ИЛИ

$$\Pi_I = V \cdot \frac{(\kappa_{\text{п}} + 2) \kappa_{\text{р}}}{(1 + 2\kappa_J) \kappa_{\text{прив}} \cdot R_{\text{МПЗ}}} (U_{\text{ТП}} - U_{\text{э доп}}). \quad (2.35)$$

Таким образом, провозная способность по системе тягового электроснабжения в прямой пропорции зависит от допустимого по нагреву тока.

проводов тяговой сети с коэффициентом пропорциональности – $K_{прI}$, соответствующим условиям пропуска поездов и соотношения повышенной и средней массы поездов в пакете.

Обратная пропорциональная зависимость провозной способности от активного сопротивления $R_{МПЗ}$, т.е. от погонного сопротивления применяемой тяговой сети и длины межподстанционной зоны, а также коэффициента пропорциональности $K_{прU}$ существует при наличии ограничений по минимально допустимому напряжению на токоприемнике ЭПС.

2.6 Выводы по разделу 2

1 Выполнен анализ характеристик систем тягового электроснабжения и выявлена особенность работы замкнутой кольцевой системы тягового электроснабжения.

2 Определено, что для замкнутой кольцевой системы тягового электроснабжения необходимо сформировать собственную математическую модель расчета параметров энергетической эффективности.

3 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 МЦК.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ НАТУРНЫХ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В рамках работы выполнены разработка программы проведения натуральных экспериментов по оценке существующего уровня энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в границах МЦК, обработка и анализ результатов экспериментальных исследований.

3.1 Анализ режимов работы системы тягового электроснабжения

3.1.1 Анализ динамики расхода электрической энергии по присоединениям тяговых подстанций

Электроснабжение МЦК осуществляется от 5 тяговых подстанций: Андроновка, Белокаменная, Окружная, (Московско-Павелецкая дистанция электроснабжения), Москва-Киевская (Внуковская дистанция электроснабжения), Покровское-Стрешнево (Покровско-Стрешневская дистанция электроснабжения) Московской железной дороги, из числа которых тяговые подстанции Москва-Киевская, Покровское-Стрешнево и Окружная применяются также и для питания радиальных линий.

Для питания МЦК на тяговых подстанциях смонтировано распределительное устройство 3,3 кВ, схема которого на примере тяговой подстанции Андроновка приведена на рисунке 3.1.

Питание РУ 3,3 кВ осуществляется от трех преобразовательных агрегатов. Согласно данным из автоматизированной системы контроля и учета энергии (АСКУЭ) за 10.04.2019 г., на тяговых подстанциях Андроновка, Белокаменная и Покровское-Стрешнево в работе находятся два преобразовательных агрегата, а на остальных тяговых подстанциях – один агрегат.

Согласно однолинейной схеме имеется секционирование «+» шины 3,3 кВ (разъединители СР1-3,3 и СР2-3,3 в нормальном режиме включены). Запасная «+» шина отсутствует в соответствии с проектным решением

ООО «НИИЭФА-Энерго», согласованным с Трансэнерго. Ячейки фидеров контактной сети снабжены выключателями ВАБ-206 с выкатными элементами.

Учет расхода электроэнергии на тягу поездов осуществляется приборами учета, установленными на стороне высшего напряжения преобразовательных трансформаторов (10 кВ или 20 кВ). Учет электроэнергии на фидерах контактной сети и на выходе преобразовательных агрегатов отсутствует.

В связи с тем, что система электроснабжения МЦК является изолированной от системы электроснабжения радиальных линий, существующая система учета электроэнергии является достаточной для укрупненной оценки энергетических показателей на уровне тяговых подстанций.

Данные по расходу электроэнергии по тяговым подстанциям в постоянном режиме поступают в информационную систему «Аналитическая система оценки и контроля уровня небаланса электроэнергии и автоматизированной оценки удельного расхода электроэнергии электроподвижного состава на Московском центральном кольце» (Система). Необходимо отметить, что информация доступна с 30-минутным усреднением в целом по тяговой подстанции без детализации по каждому преобразовательному агрегату, что является недостатком данной системы.

Для оценки достоверности имеющейся информации о расходе электроэнергии осуществлено ее сравнение с данными АСКУЭ за 10.04.2019 г., которые приведены с одно- или трехминутным усреднением. Анализ показывает, что имеется временной сдвиг на полчаса между указанными источниками данных.

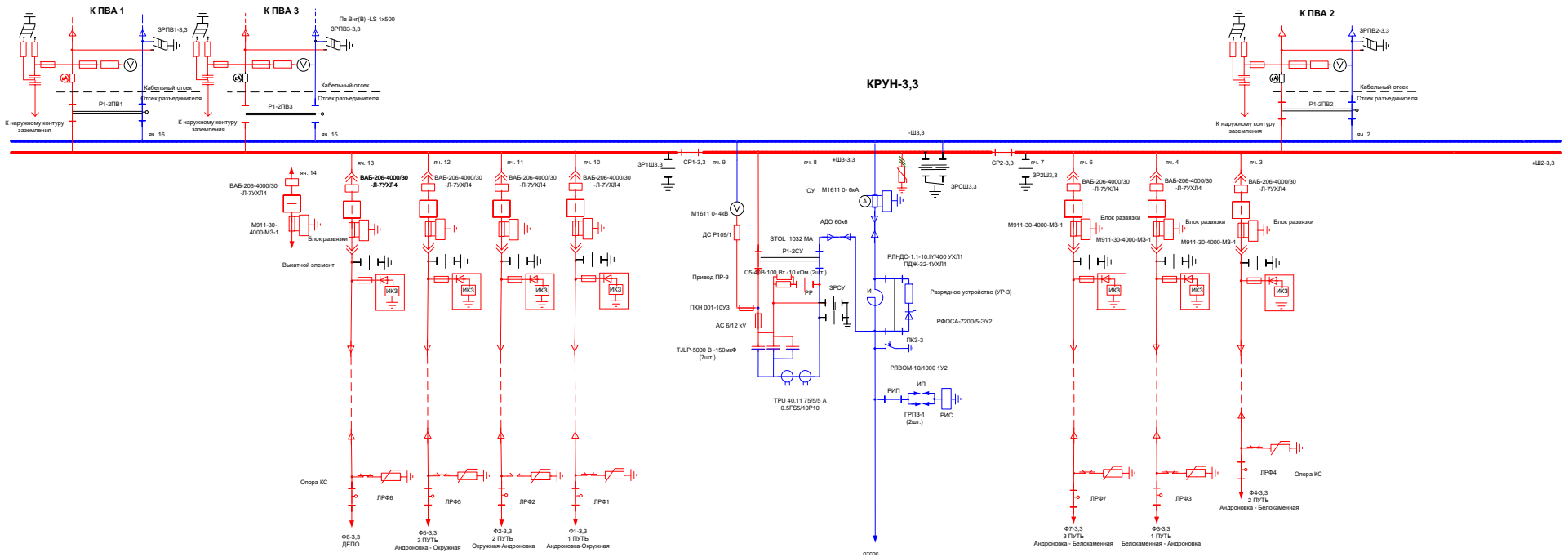


Рисунок 3.1 – Однолинейная схема РУ 3,3 кВ для питания МЦК (на примере тяговой подстанции Андроновка)

Результаты сравнения для тяговой подстанции Андроновка представлены на рисунке 3.2.

Значительное расхождение для отдельных получасовых интервалов объясняется, вероятно, тем, что по данным АСКУЭ прибор учета фиксирует не усредненное за 1 или 3 минуты значение мощности, а мгновенное, что приводит к ошибке. В целом за сутки расхождение составило (-0,3 %), что позволяет говорить о достоверности данных Системы. Аналогичные исследования выполнены для остальных тяговых подстанций. Графики, иллюстрирующие результаты сравнения, представлены на рисунках 3.3 – 3.6.

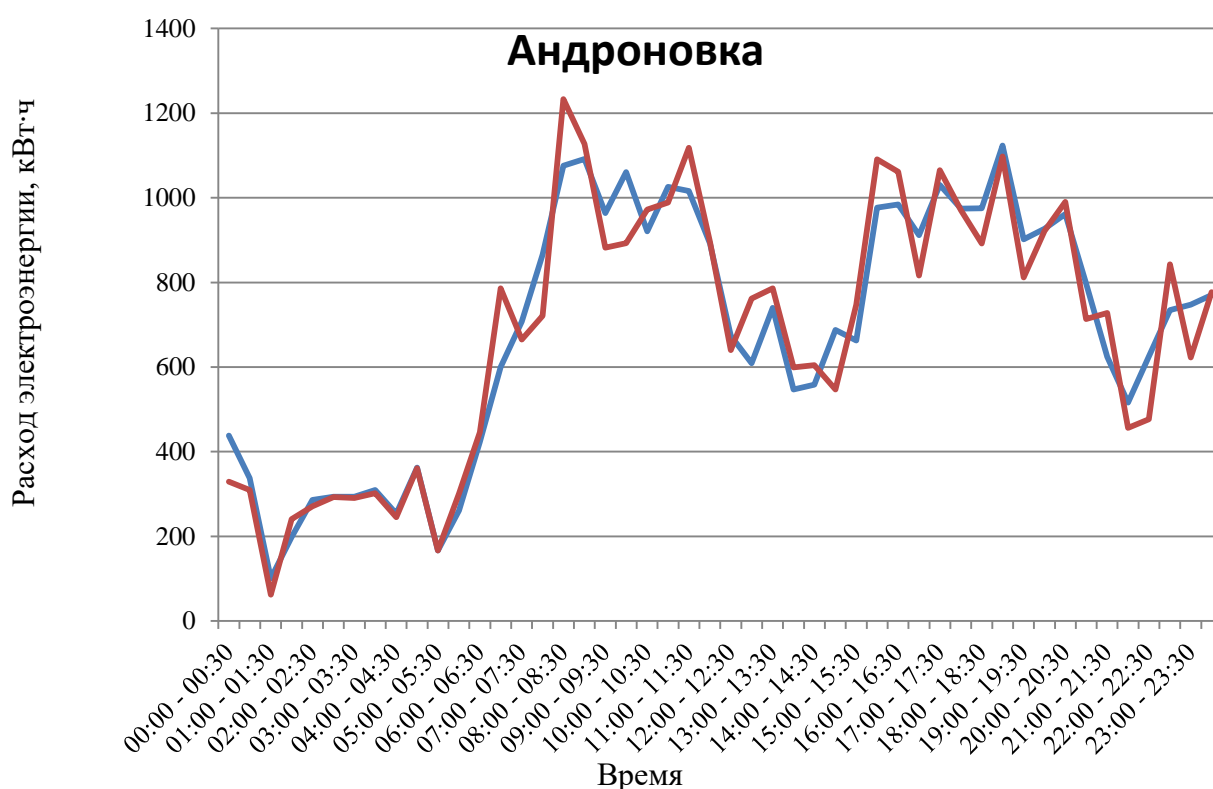


Рисунок 3.2 – Результаты сравнения расхода электроэнергии по данным Системы и АСКУЭ для тяговой подстанции Андроновка за 10.04.2019 г.



Рисунок 3.3 – Результаты сравнения расхода электроэнергии по данным Системы и АСКУЭ для тяговой подстанции Белокаменная за 10.04.2019 г.



Рисунок 3.4 – Результаты сравнения расхода электроэнергии по данным Системы и АСКУЭ для тяговой подстанции Москва-Киевская за 10.04.2019 г.



Рисунок 3.5 – Результаты сравнения расхода электроэнергии по данным Системы и АСКУЭ для тяговой подстанции Окружная за 10.04.2019 г.



Рисунок 3.6 – Результаты сравнения расхода электроэнергии по данным Системы и АСКУЭ для тяговой подстанции Покровское-Стрешнево за 10.04.2019 г.

В целом по рассматриваемым подстанциям расхождение между данными АСКУЭ и Системы за 10.04.2019 г. не превысило 4 % (за исключением тяговой подстанции Окружная, где оно составило около 8 %), что позволяет говорить о достоверности данных о расходе электроэнергии по тяговым подстанциям, предоставляемым Системой.

Анализ суточных графиков нагрузки позволяет выделить два ярко выраженных пика – с 8-00 до 11-00 и с 17-30 до 20-30. В ночное время нагрузка на тяговых подстанциях минимальна, за исключением тяговых подстанций Покровское-Стрешнево и Андроновка. Это связано с тем, что указанные подстанции осуществляют питание депо.

Динамика расхода электроэнергии по тяговым подстанциям за период с 01.04.2018 г. по 01.04.2019 г. (годовая) представлена на рисунке 3.7.

Из представленных данных видно, что расход электроэнергии в холодное время года значительно выше, чем в теплое, что связано с увеличением сопротивления движению поезда, а также с интенсивным использованием систем электроотопления вагонов.

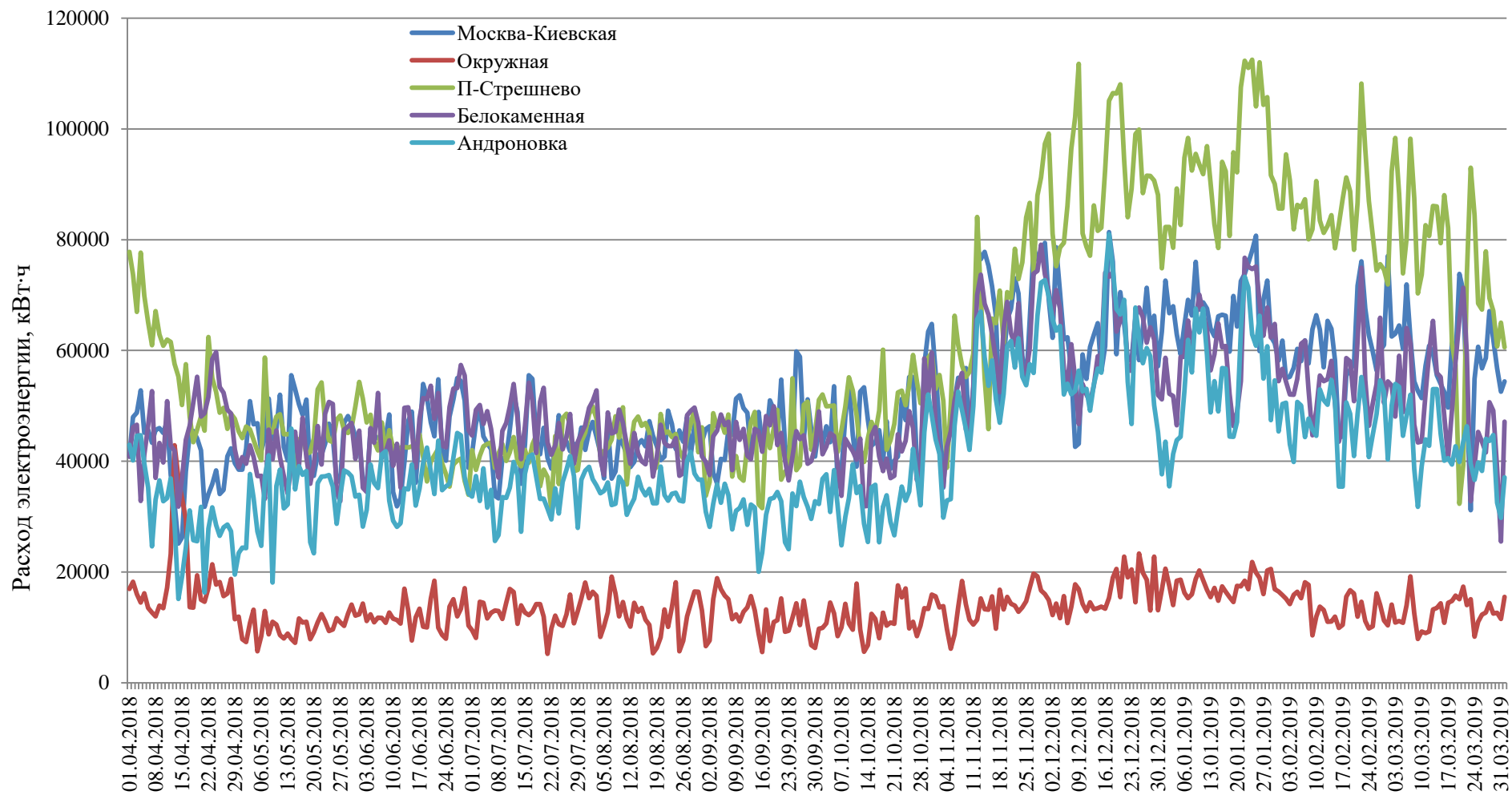


Рисунок 3.7 – Годовая динамика расхода электроэнергии по тяговым подстанциям, питающим МЦК

Согласно данным таблицы 3.1, отношение расхода электроэнергии в холодное время года к расходу в теплое время года для различных тяговых подстанций находится в интервале от 1,17 до 1,76, а в целом по МЦК составляет 1,48. Таким образом, данный факт следует учитывать при планировании мероприятий по энергосбережению.

Таблица 3.1 – Сравнение расхода электроэнергии в теплое и холодное время года по тяговым подстанциям

Показатель	Москва-Киевская	Окружная	П-Стрешнево	Белокаменная	Андроновка	Итого
Средняя суточная переработка электроэнергии на тягу поездов в период с 01.04.2018 по 01.11.2018 и с 15.03.2019 по 01.04.2019 (теплое время года)	45296,0	12785,8	47932,0	44576,2	34148,3	184738,4
Средняя суточная переработка электроэнергии на тягу поездов в период с 01.11.2018 по 15.03.2019 (холодное время года)	62937,9	14945,6	84301,3	58649,1	52968,2	273802,1
Отношение расхода электроэнергии в холодное время года к расходу в теплое время года	1,39	1,17	1,76	1,32	1,55	1,48
Линейный коэффициент корреляции расхода электроэнергии и температуры воздуха	-0,744	-0,363	-0,895	-0,673	-0,745	-0,876

Наблюдается значительная корреляция между расходом электроэнергии по тяговым подстанциям и температурой воздуха, информация о которой была принята по данным информационного портала gr5.ru. Согласно данным таблицы 3.3, абсолютные значения линейных коэффициентов корреляции для отдельных тяговых подстанций находятся в интервале 0,363 – 0,745, а в целом по МЦК этот показатель равен 0,876.

Сводная информация о годовом расходе электроэнергии по тяговым подстанциям представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – 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

Представленные данные о годовом расходе электроэнергии показывают существенную неравномерность загрузки тяговых подстанций, питающих МЦК.

Далее проведен анализ энергетических параметров и режимов работы следующего оборудования тяговых подстанций, влияющего на показатели энергоэффективности: преобразовательные агрегаты (ПВА), включающие в себя преобразовательный трансформатор, выпрямитель и сглаживающие устройства (СУ).

3.1.2 Анализ преобразовательных агрегатов, применяемых для электроснабжения Московского центрального кольца

Как было отмечено ранее, электроснабжение МЦК осуществляется от пяти тяговых подстанций: Андроновка, Белокаменная, Окружная, Москва-Киевская, Покровское-Стрешнево.

Электроснабжение МЦК осуществляется через 13 преобразовательных агрегатов, расположенных на тяговых подстанциях. Преобразовательные агрегаты имеют двенадцатипульсовую схему выпрямления последовательного типа.

Основные характеристики преобразовательных агрегатов, применяемых для питания МЦК, приведены в таблице 3.3. На всех фидерах тяговых подстанций используется выпрямитель типа В-МПП-Д-1,6к-3,3к УХЛ4.

Таблица 3.3 – Основные характеристики преобразовательных агрегатов

Тяговая подстанция	Наименование преобразовательного агрегата (фидера)	Режим работы согласно оперативной схеме и данным АСКУЭ за 10.04.2019 г.	Номинальное напряжение, кВ	Тип трансформатора
Андроновка	ПВА 1	в работе	20	ТРСЗП-12500/20УХЛ1
	ПВА 2	в работе	20	ТРСЗП-12500/20УХЛ1
	ПВА 3-1	отключен	20	ТРСЗП-12500/20УХЛ1
	ПВА 3-2	отключен		
Белокаменная	ПВА 1	в работе	20	ТРСЗП-12500/20УХЛ1
	ПВА 2	в работе	20	ТРСЗП-12500/20УХЛ1
	ПВА 3-1	отключен	20	ТРСЗП-12500/20УХЛ1
	ПВА 3-2	отключен		
Москва-Киевская	ПВА 2	отключен	20	ТРСЗП-12500/20УХЛ1
	ПВА 3-1	в работе	20	ТРСЗП-12500/20УХЛ1
Окружная	ПВА 3-2	отключен	10	ТРСЗП-12500/10УХЛ1
	ПВА 4	в работе	10	ТРСЗП-12500/10УХЛ1
П-Стрешнево	ПВА 3-1	отключен	20	ТРСЗП-12500/20УХЛ1
	ПВА 4	в работе	20	ТРСЗП-12500/20УХЛ1
	ПВА 5	в работе	20	ТРСЗП-12500/20УХЛ1

Примечания 1 Имеется расхождение между оперативной и однолинейной схемой ЭЧЭ Окружная по типу выпрямителя ПВА 4 (В-МПП-Д-1,6к-3,3к УХЛ4 или М-В-6-3,15к-3,3к).

2 Имеется расхождение между оперативной схемой ЭЧЭ Москва-Киевская и данными АСКУЭ. Согласно оперативной схеме в работе находится ПВА 2, а ПВА 3 отключен, по данным АСКУЭ наоборот.

3.1.3 Анализ потерь электроэнергии в преобразовательных трансформаторах

В составе преобразовательных агрегатов используется 13 преобразовательных трансформаторов, из них 11 – типа ТРСЗП-12500/20УХЛ1 и 2 – типа ТРСЗП-12500/10УХЛ1 производства ООО «Электрофизика» (Санкт-Петербург). Все трансформаторы произведены в 2013 г., а введены в эксплуатацию в 2016 г. С учетом нормативного срока службы 25 лет все трансформаторы имеют достаточный ресурс для дальнейшей работы.

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

$$\Delta W_{\text{тт}} = \left(\Delta P_{\text{xx}} + \Delta P_{\text{кз}} \cdot \left(\frac{k_{\text{э}} \cdot W}{t_p \cdot S} \right)^2 \cdot 10^6 \right) \cdot t_p \quad . \quad (3.3)$$

Результаты расчета потерь электроэнергии в преобразовательных трансформаторах представлены в таблице 3.4.

Общие потери энергии в преобразовательных трансформаторах участка – 3,9 тыс. кВт·ч или 2,2 % от общего потребления энергии на тягу поездов.

Наибольшие относительные значения потерь электроэнергии наблюдаются в преобразовательных трансформаторах с малой переработкой электроэнергии на тягу поездов:

тяговая подстанция Андроновка (ПВА 2) – 3,04 %;

тяговая подстанция Белокаменная (ПВА 2) – 3,32 %;

тяговая подстанция Покровское-Стрешнево (ПВА 4) – 12,55 %.

На указанных тяговых подстанциях в работе одновременно находятся два трансформатора. В дальнейшем необходимо рассмотреть возможность перехода на питание РУ 3,3 кВ от одного преобразовательного агрегата.

Таблица 3.4 – Расчетные потери электрической энергии в преобразовательных трансформаторах за 10.04.2019

Тяговая подстанция	Тип трансформатора	Год ввода в эксплуатацию	$S_{ном}$, кВ·А	$P_{х.х.}$, кВт	$P_{к.з.}$, кВт	Время работы, ч	Количество электроэнергии, переработанной преобразовательным агрегатом за время его работы W , тыс. кВт·ч	Потери электроэнергии	
								Абсолютное значение $\Delta W_{тр}$, тыс. кВт·ч	Относительное значение $\delta W_{тр}$, %
Андроновка	ТРСЗП-12500/20УХЛ1	2016	11400	20,11	57	24	17,867	0,491	2,75
	ТРСЗП-12500/20УХЛ1	2016	11400	18,83	57	24	15,052	0,458	3,04
	ТРСЗП-12500/20УХЛ1	2016	11400	23,72	57	0	0,000	0,000	0,00
Белокаменная	ТРСЗП-12500/20УХЛ1	2016	11400	18,79	57	24	18,805	0,460	2,45
	ТРСЗП-12500/20УХЛ1	2016	11400	26,4	57	24	19,399	0,644	3,32
	ТРСЗП-12500/20УХЛ1	2016	11400	20,26	57	0	0,000	0,000	0,00
Москва-Киевская	ТРСЗП-12500/20УХЛ1	2016	11400	22,72	57	0	0,000	0,000	0,00
	ТРСЗП-12500/20УХЛ1	2016	11400	18,23	57	24	39,812	0,479	1,20
Окружная	ТРСЗП-12500/10УХЛ1	2016	11400	17,88	57	0	0,000	0,000	0,00
	ТРСЗП-12500/10УХЛ1	2016	11400	16,65	57	24	13,740	0,404	2,94
П-Стрешнево	ТРСЗП-12500/20УХЛ1	2016	11400	18,41	57	0	0,000	0,000	0,00
	ТРСЗП-12500/20УХЛ1	2016	11400	18,41	57	24	3,524	0,442	12,55
	ТРСЗП-12500/20УХЛ1	2016	11400	18,41	57	24	49,361	0,506	1,03
Итого							177,6	3,9	2,2

3.1.4 Анализ потерь электроэнергии в вентиляльных конструкциях

В составе преобразовательных агрегатов используется 26 выпрямителей типа В-МПП-Д-1,6к-3,3к УХЛ4 производства ООО «НИИЭФА-Энерго» (Санкт-Петербург) (по два выпрямителя на каждый преобразовательный трансформатор). Выпрямители введены в эксплуатацию в 2016 г. Основные характеристики выпрямителей представлены в таблице 3.5.

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

$$\Delta W_{\text{в}} = \frac{k_{\text{сх}} s U_0 W}{U_d} \left(1 + \frac{k_{\text{сх}} R_d W k_3^2 \cdot 10^3}{2 a t_p U_d U_0} \right) + 2 \cdot 0,7 \cdot t_p, \text{ кВт}\cdot\text{ч} \quad (3.4)$$

Таблица 3.5 – Характеристики вентиляльных конструкций

Тип вентиляльных конструкций	Тип диода	Схема выпрямления	s, шт	a, шт	U_0 , В	R_d , Ом
В-МПП-Д-1,6к-3,3к УХЛ4	Д453-2000-24	Двенадцатипульсовая последовательного типа	2	2	0,8	$0,3 \cdot 10^{-3}$

Общие потери энергии в вентиляльных конструкциях участка незначительны и составляют 0,483 тыс. кВт·ч или 0,27 % от общего потребления энергии на тягу поездов.

3.1.5 Анализ режимов работы преобразовательных агрегатов

Согласно оперативной схеме и данным АСКУЭ на тяговых подстанциях Андроновка, Белокаменная и Покровское-Стрешнево в работе постоянно находятся два преобразовательных агрегата. При этом на тяговых подстанциях Андроновка и Белокаменная преобразовательные агрегаты работают параллельно на секцию шин 3,3 кВ, а на тяговой подстанции Покровское-Стрешнево расход электроэнергии по выпрямителю ПВА 4 составляет около 7 % от расхода по ПВА 5.

В связи с этим выполнен анализ параллельной работы преобразовательных агрегатов только для тяговых подстанций Андроновка и Белокаменная.

Коэффициент загрузки i -го преобразовательного агрегата определяется по формуле:

$$k_{\text{ПВА}i} = \frac{W_{\text{ПВА}i}}{\sum_{j=1}^N W_{\text{ПВА}j}}, \quad (3.5)$$

где N – количество параллельно работающих агрегатов;

$W_{\text{ПВА}i}, W_{\text{ПВА}j}$ – объем электроэнергии по вводу i -го рассматриваемого агрегата и j -го агрегата тяговой подстанции.

Результаты расчета коэффициента загрузки для преобразовательных агрегатов тяговых подстанций Андроновка и Белокаменная приведены в таблице 3.6.

Для преобразовательных агрегатов тяговой подстанции Белокаменная различие в загрузке агрегатов по данным работы за сутки 10.04.2019 г. составляет 2 %, для тяговой подстанции Андроновка – коэффициент загрузки отличается на 8 %.

Таблица 3.6 – Расход электроэнергии и загрузка преобразовательных агрегатов

Показатель	ЭЧЭ-160 Андроновка		ЭЧЭ-161 Белокаменная	
	ПВА-1	ПВА-2	ПВА-1	ПВА-2
Расход, кВт·ч	17867,01	15052,26	18804,78	19398,57
Коэффициент загрузки	0,54	0,46	0,49	0,51

Напряжение на выходе преобразовательного агрегата определяется по формуле:

$$U_d = U_{d0} \cdot \left(1 - \sin \frac{\pi}{m} \cdot u_k \cdot \frac{I_d}{I_{d\text{ном}}} \right), \text{ В} \quad (3.6)$$

где:

$$u_k = \frac{100 \cdot S_{1ном} \cdot (X_{тр.преобр} + X_{тр.пониж} + X_c)}{U_{2ном}^2} . \quad (3.7)$$

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

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

$$U_{d0} = \frac{\sqrt{6} \cdot m}{2\pi \cdot k_{сх}} \cdot U_{2ф}, \text{ В} \quad (3.8)$$

где m – количество пульсаций в кривой выпрямленного напряжения;

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

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

Отношение токов в формуле (3.6) при отсутствии измерения со стороны постоянного тока заменяется отношением токов на стороне первичной обмотки преобразовательного трансформатора.

Результаты обработки данных ПК «Энергия Альфа 2» позволяют получить внешние характеристики для ПВА-1 и ПВА-2 тяговых подстанций. Внешние характеристики для тяговых подстанций Андроновка и Белокаменная приведены на рисунках 3.10 и 3.11 соответственно.

Отличие коэффициента наклона для внешних характеристик тяговой подстанции Андроновка превышает 30 %, для тяговой подстанции Белокаменная – не превышает 2 %. Различие внешних характеристик для тяговой подстанции Андроновка объясняет неравномерную загрузку агрегатов по результатам обработки данных 10.04.2019 г.

Таким образом, параллельная работа преобразовательных агрегатов на тяговой подстанции Андроновка является недостаточно эффективной ввиду

значительного расхождения внешних характеристик ПВА. На тяговой подстанции Белокаменная такой проблемы нет.

На следующем этапе необходимо построить внешние характеристики преобразовательных агрегатов, работающих на остальных тяговых подстанциях МЦК поочередно.

Внешние характеристики преобразовательных агрегатов тяговых подстанций ЭЧЭ-150 Москва-Киевская (ПВА 3), ЭЧЭ-67 Окружная (ПВА 4) и ЭЧЭ-31 Покровское-Стрешнево (ПВА 5), находящихся в работе на 10.04.2019г., приведены на рисунках 3.12 – 3.14 соответственно.

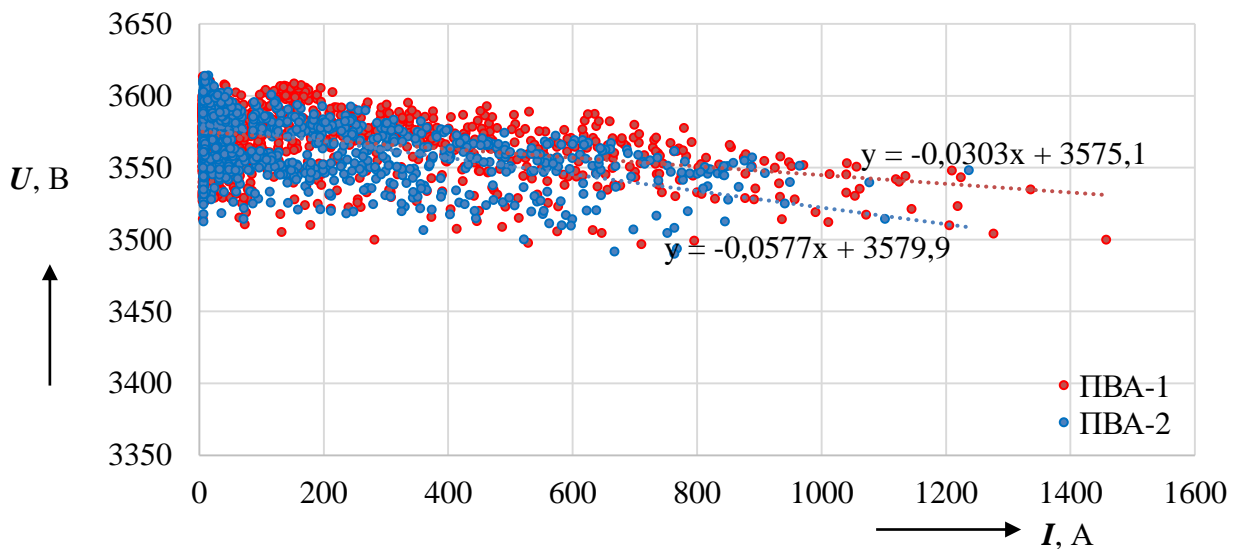


Рисунок 3.10 – Внешние характеристики ПВА-1 и ПВА-2 тяговой подстанции Андроновка

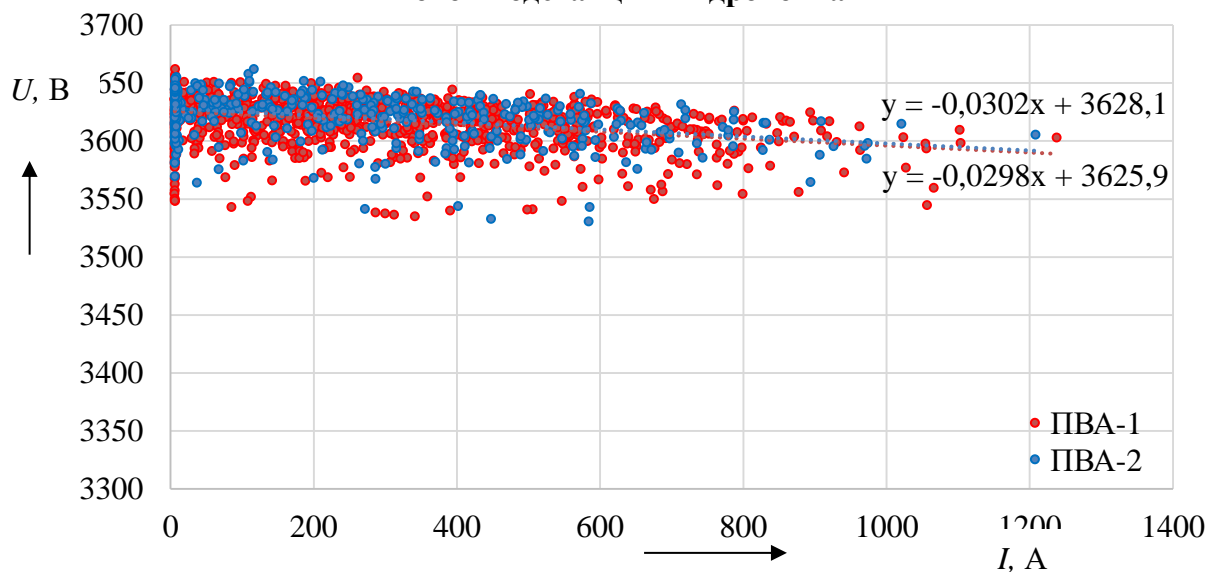


Рисунок 3.11 – Внешние характеристики ПВА-1 и ПВА-2 тяговой подстанции Белокаменная

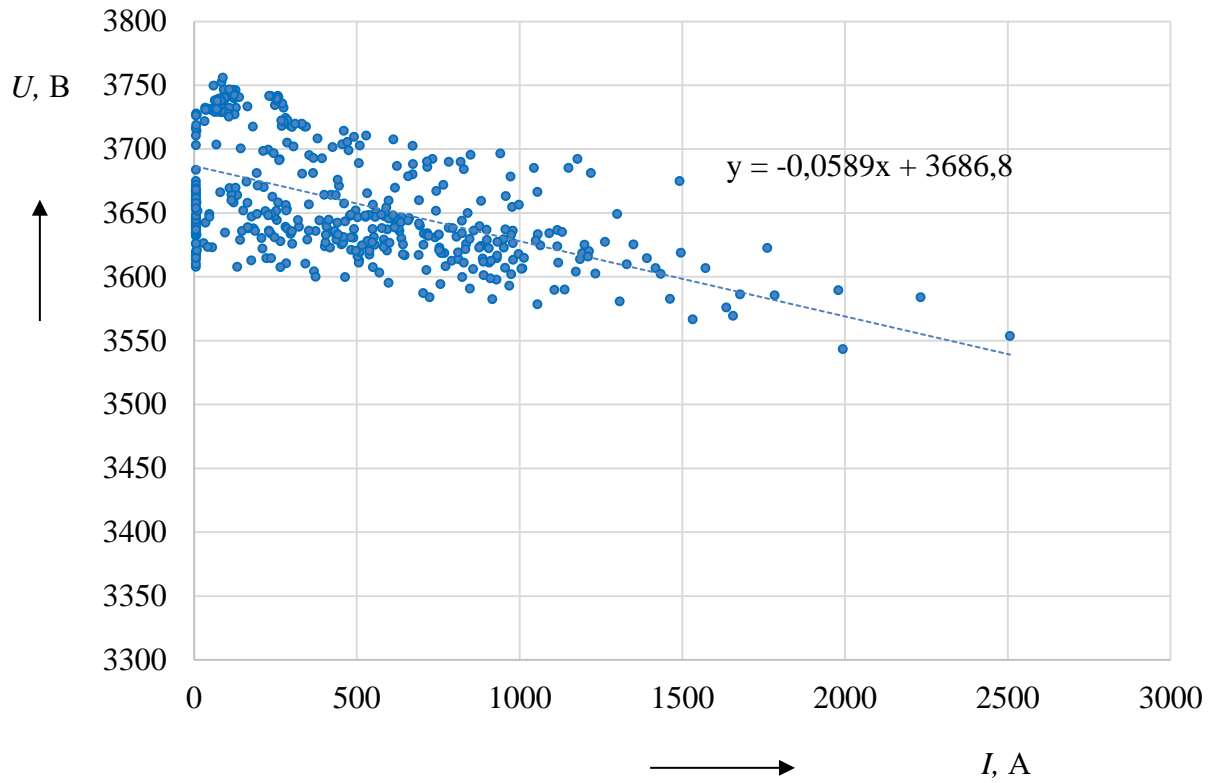


Рисунок 3.12 – Внешняя характеристика ПВА 3 тяговой подстанции Москва-Киевская

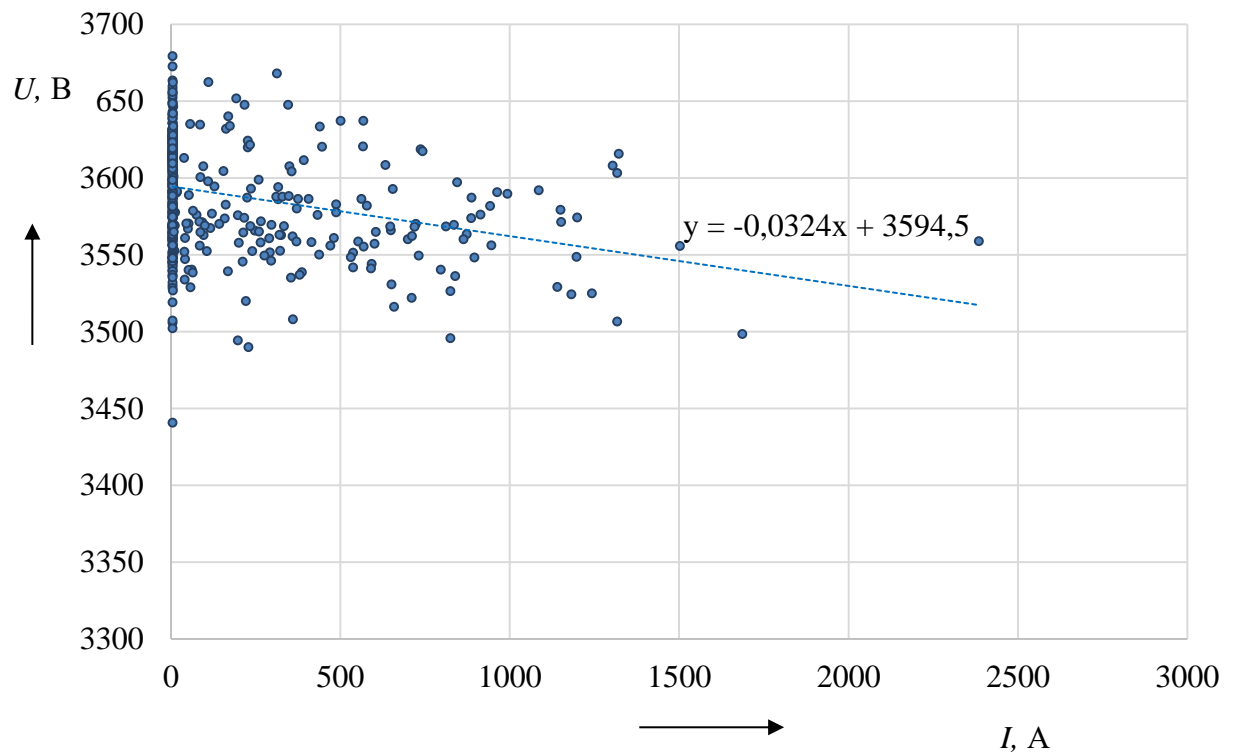
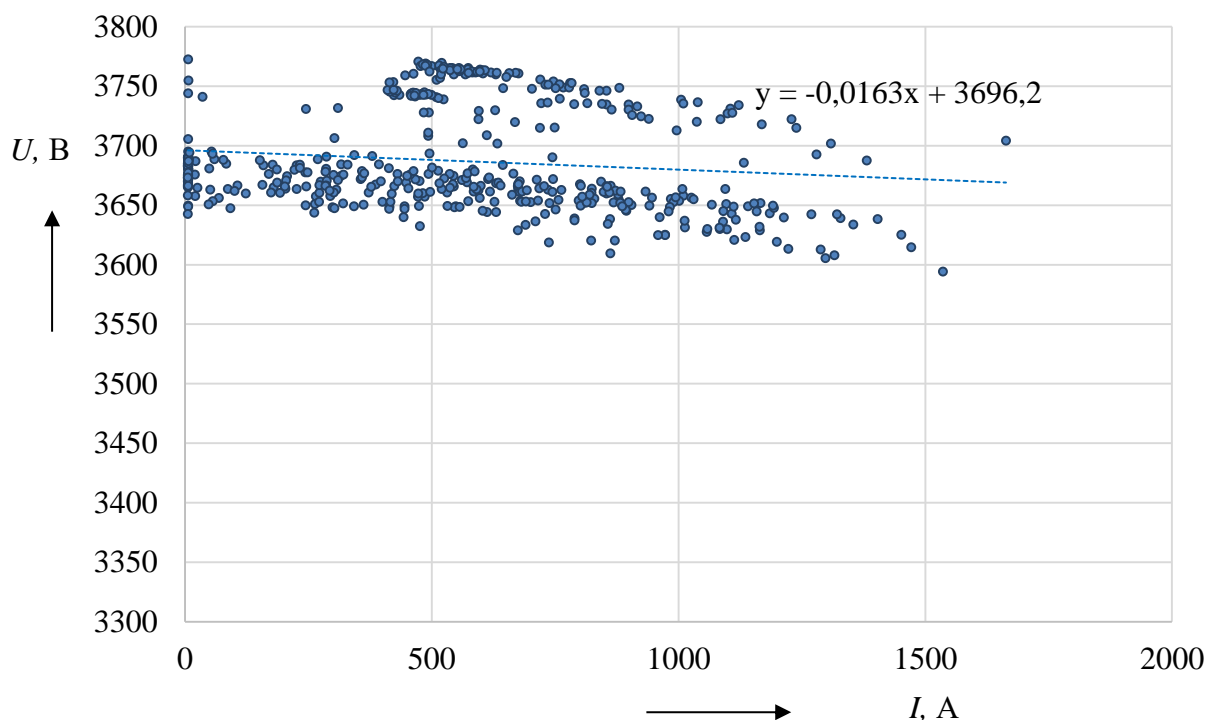


Рисунок 3.13 – Внешняя характеристика ПВА 4 тяговой подстанции Окружная



**Рисунок 3.14 – Внешняя характеристика ПВА 5 тяговой подстанции
Покровское-Стрешнево**

На основании выполненных расчетов сформирована таблица 3.7, в которой приведены значения напряжения холостого хода на шинах 3,3 кВ U_{xx} и коэффициента наклона внешней характеристики R_0 , которые в дальнейшем будут использованы для моделирования рассматриваемого участка в программном комплексе «КОРТЭС».

Таблица 3.7 – Напряжение холостого хода на шинах 3,3 кВ и коэффициент наклона внешней характеристики

Тяговая подстанция	Напряжение холостого хода на шинах 3,3 кВ U_{xx}	Коэффициент наклона внешней характеристики R_0 ,
Андроновка	3577	0,044
Белокаменная	3626	0,03
Москва-Киевская	3687	0,059
Окружная	3595	0,0324
Покровское-Стрешнево	3696	0,0163

3.2 Анализ режимов работы электроподвижного состава

3.2.1 Анализ расхода электрической энергии по электропоездам

Анализ расхода электрической энергии по электропоездам $W_{\text{факт}}^{\text{ЭПС}}$ за время проведения исследования по оценке уровня энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в границах Московского центрального кольца выполнен по данным информационной системы «Аналитическая система оценки и контроля уровня небаланса электроэнергии и автоматизированной оценки удельного расхода электроэнергии электроподвижного состава на Московском центральном кольце» (разработка ООО «НПО ТрансИнфоПроект»).

Суммарный расход по электропоездам за 10 апреля 2019 г. составил – 250 353 кВт·ч, рекуперация – 114 179 кВт·ч, что в процентном отношении к расходу электроэнергии составляет 45,6 %. Данные измерений расхода и рекуперации электрической энергии, которые получены из бортовых регистраторов параметров движения РПД МПСУиД, приведены в таблице 3.8 и на рисунке 3.15. Данные представлены с усреднением за получасовые интервалы времени.

Таблица 3.8 – Значения расхода электроэнергии по данным бортовых регистраторов параметров движения РПД МПСУ и Д

Время	0:00	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30
Расход, кВт·ч	4516	2751	1058	703	761	864	864	845	835	1097	1511	2335	4415	4771	6815	8072	8067	8932	8588	8438	7810	7415	7667	6396
Рекуперация, кВт·ч	2044	1132	255	159	161	163	163	162	161	168	190	694	1883	2033	3115	3931	4071	4297	4046	3912	3745	3597	3757	2912
Время	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30
Расход, кВт·ч	4797	4466	3324	3454	3675	4563	6123	7016	7632	7922	7719	8483	8322	8652	8110	7810	7814	6929	5507	4362	4327	4435	4625	4760
Рекуперация, кВт·ч	2153	1966	1432	1639	1658	2243	2775	3230	3730	3938	3724	4108	3873	4010	3961	3733	3897	3279	2534	2032	1918	1863	1906	1826
Итого расход, кВт·ч																								250 353
Итого рекуперация, кВт·ч																								114 179
Итого рекуперация, %																								45,6

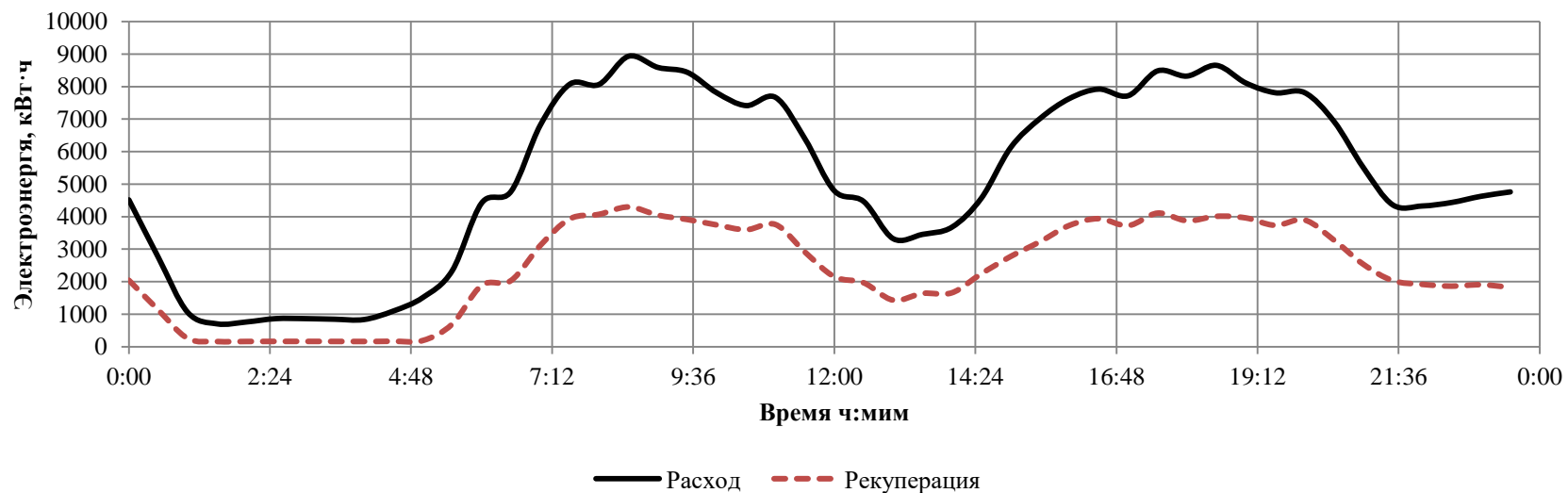


Рисунок 3.15 – Динамика расхода электроэнергии по данным бортовых регистраторов параметров движения РПД МПСУ и Д

Детальная информация по расходу электроэнергии по электропоездам, необходимая для анализа тяговых энергетических параметров движения электропоездов, приведена в таблицах 3.12 и 3.13.

Данные, приведенные в таблице 3.9, позволяют получить кривые распределения энергетических показателей движения электропоездов. Результаты статистической обработки приведены в таблице 3.14.

Таблица 3.9 – Результаты статистической обработки

Переменная	Число наблюдений	Значения выборки			СКО	Доверительный интервал, при доверительной вероятности	
		среднее	минимальное	максимальное		-90 %	+90 %
Расход электроэнергии	269	691,8	373,0	955,0	79,4	683,8	699,8
Рекуперация	269	331,4	101,0	451,0	46,7	326,7	336,1

Как видно из представленных данных, максимальное и минимальное значения расхода электрической энергии составляют 373 и 955 кВт·ч соответственно. По результатам статистической обработки промахами являются значения по шести поездкам:

- поезд № 6123, табельный номер 27730 (расход 460 кВт·ч);
- поезд № 6275, табельный номер 28123 (расход 373 кВт·ч);
- поезд № 6127, табельный номер 27735 (расход 415 кВт·ч);
- поезд № 6188, табельный номер 27727 (расход 435 кВт·ч);
- поезд № 6291, табельный номер 27680 (расход 924 кВт·ч);
- поезд № 6292, табельный номер 27618 (расход 955 кВт·ч).

Результаты статистической обработки, после исключения грубых погрешностей, приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Результаты статистической обработки

Переменная	Число наблюдений	Значения выборки			СКО	Доверительный интервал, при доверительной вероятности	
		среднее	минимальное	максимальное		-90 %	+90 %
Расход электроэнергии	263	694,0	687,0	701,1	69,6	525,0	876,0
Рекуперация	263	332,6	328,3	337,0	43,0	101,0	448,0

Для оценки адекватности сопоставления данных по расходу электроэнергии за время проведения натурального эксперимента и других дней в течение года на рисунке 3.16 приведен график месячного расхода электрической энергии по электропоездам.

Как видно из рисунка 3.16 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 % (таблица 3.11).

Таблица 3.11 – Расход электрической энергии по электропоездам за период февраль 2018 – апрель 2019 гг.

Год	2018							
Месяц	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь
Потребление, кВт·ч	9033609	9 888 835	6 882 962	7 297 471	7 122 146	7 208 145	7 290 286	6 966 415
Рекуперация, кВт·ч	2360381	2 977 763	2 652 854	3 169 310	2 979 424	3 029 321	3 013 046	2 981 208
Рекуперация, %	26,1	30,1	38,5	43,4	41,8	42,0	41,3	42,8
Год	2018			2019				
Месяц	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	
Потребление, кВт·ч	7 395 464	8 924 762	9 930 774	9 425 241	8 287 890	8 632 265	7 546 078	
Рекуперация, кВт·ч	3 122 595	3 047 324	3 033 006	2 742 531	2 770 075	3 081 855	3 226 123	
Рекуперация, %	42,2	34,1	30,5	29,1	33,4	35,7	42,8	

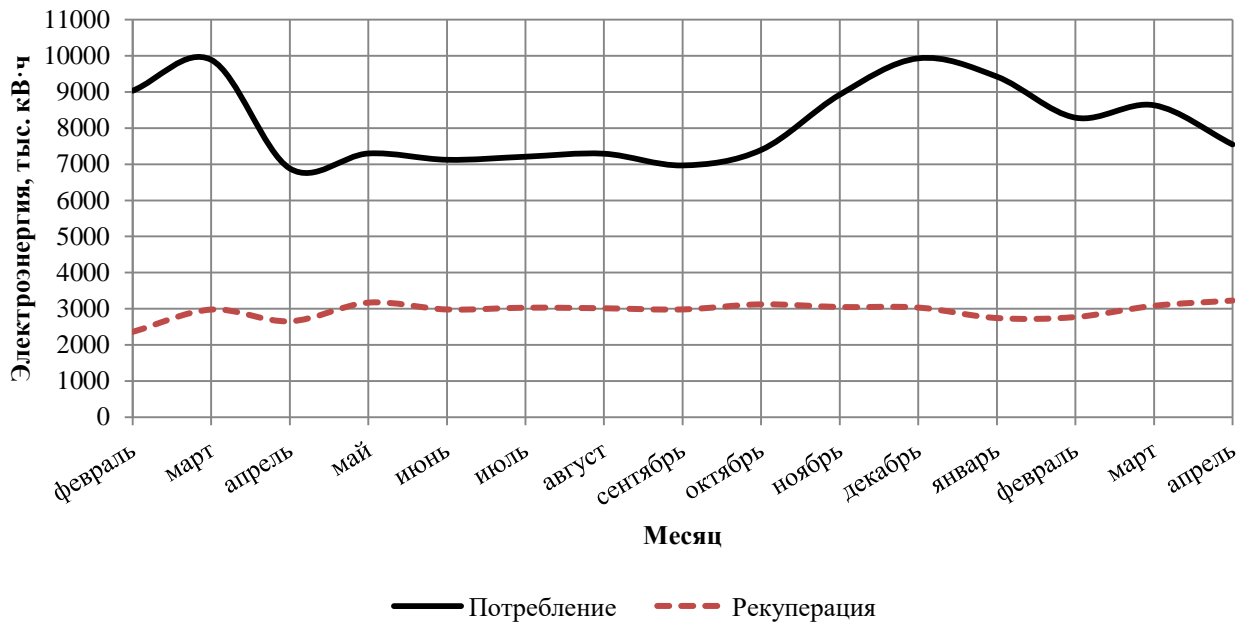


Рисунок 3.16 – Динамика потребления и рекуперации электрической энергии по данным РПД МПСУ и Д

3.2.2 Анализ тяговых энергетических параметров движения электропоездов

Анализ выполнен путем расшифровки данных бортовых регистраторов параметров движения РПД МПСУ и Д в границах МЦК. Выделены следующие параметры:

- ток;
- напряжение;
- скорость.

Параметры определяются с привязкой к конкретной координате исследуемого участка. Результаты параметров движения показаны в графическом виде на рисунках 3.17 и 3.18.

По итогам измерений были получены максимальные значения тока:

- 1100 А (режим тяги);
- 650 А (рекуперация).

Напряжение на токоприемнике варьируется в диапазоне от 3200 В до 3900 В.

В Приложении А собраны усредненные данные по движению электропоездов с детализацией по межстанционным участкам в нечетном и четном направлениях.

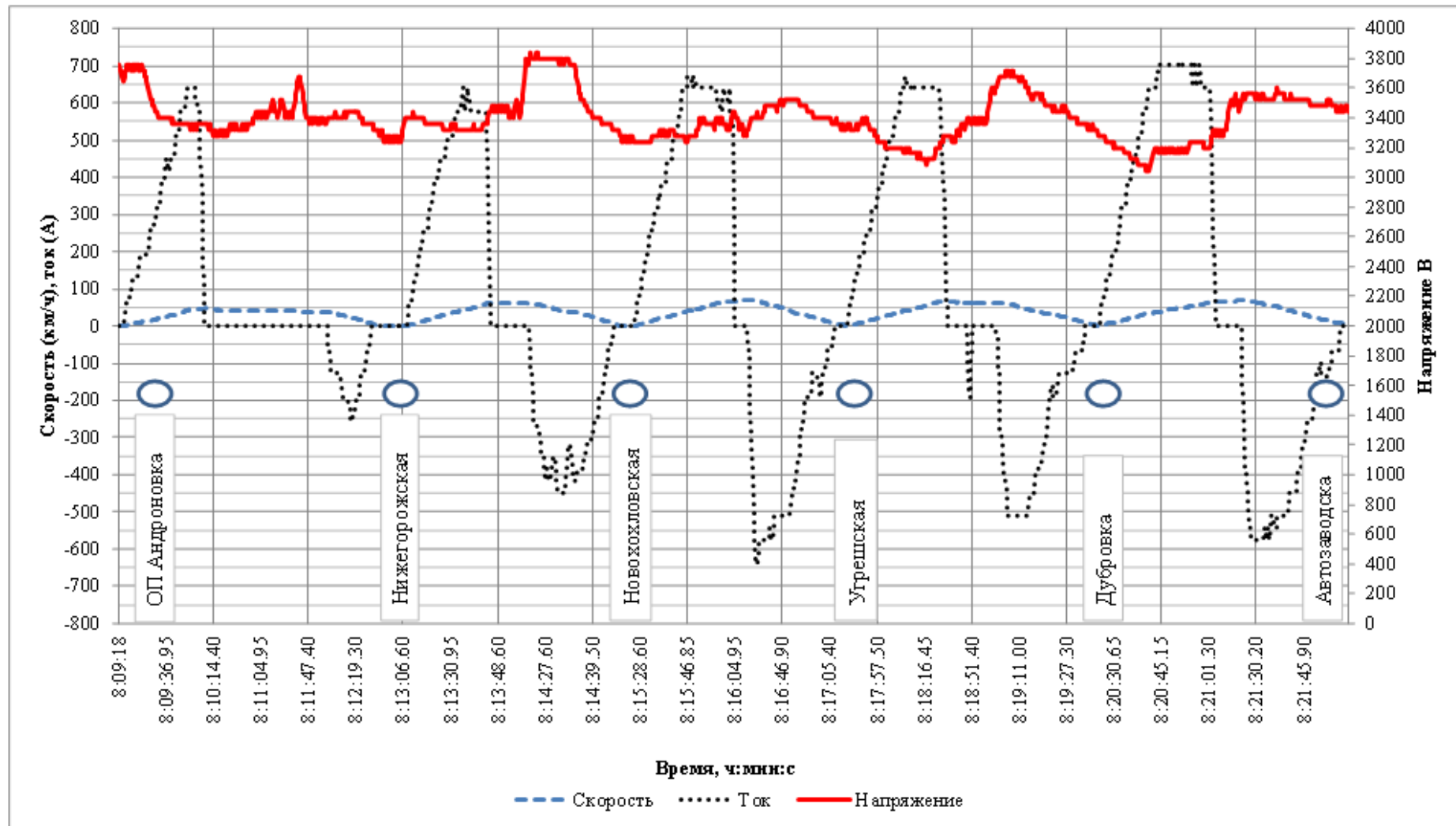


Рисунок 3.17 – Результаты расшифровки картриджей РПД МПСУ и Д (поезд 62 (6173), участок ОП Андроновка – Автозаводская)

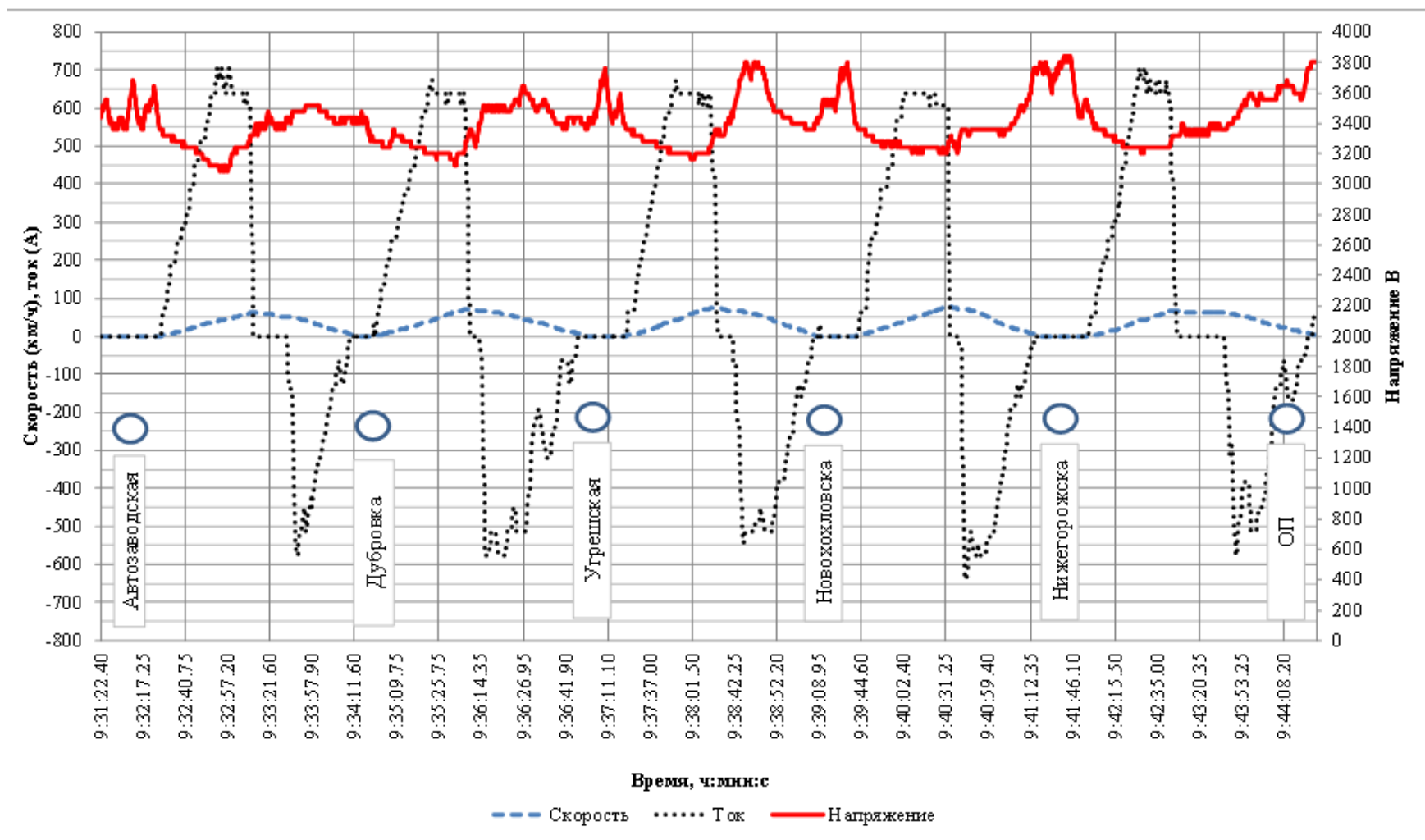


Рисунок 3.18 – Результаты расшифровки картриджей РПД МПСУ и Д (поезд 66 (6172), участок Автозаводская – ОП Андроновка)

3.2.3 Анализ графика исполненного движения

В границах МЦК реализованы графики движения рабочего и выходного дня, отличающиеся как общим количеством поездов в сутки, так и плотностью их движения в различные часы.

В графике рабочего дня предусмотрено 198 поездов в нечетном направлении и 192 в четном. При этом периодами наибольшего уплотнения графика являются промежутки времени с 7 до 12 часов и с 16 до 21 часа. В целом же пассажирское движение организовано с примерно с 5 часов 30 минут до 1 часа ночи. Последний поезд отправляется со станции Андроновка в 0 часов 26 минут.

График движения выходного дня включает 160 поездов нечетного направления и 162 четного. Период наиболее интенсивного движения приходится на промежуток времени с 13 до 18 часов. Пассажирское движение продолжается до 1 часа 30 минут, последний поезд отправляется со станции Андроновка в 0 часов 33 минуты.

В обоих случаях нормативные графики являются двухпутными, параллельными, пакетными. Движение кольцевое. Интервал времени следования поездов в периоды наиболее интенсивного движения составляет 5 минут, в остальные периоды – 10 минут.

В соответствии с программой исследования существующего уровня энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в границах МЦК днем для проведения синхронных измерений выбрано 10 апреля 2019 года. В связи с этим выполним анализ графика исполненного движения за указанные сутки.

Анализ исполненного графика движения показывает, 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.

Детальный анализ ниток исполненного графика движения показывает, что в основном отклонения от нормативного графика в ходе поездок не превышают ± 1 минуты, итоговое отклонение по поездке так же не превышает данного значения.

Существенные задержки поездов, окна, перерывы в движении, отличающиеся от нормативных, в графике исполненного движения отсутствуют, что позволяет утверждать, что в выбранные для проведения экспериментальных исследований сутки график в целом соответствует нормативному графику рабочего дня.

3.3 Анализ результатов синхронных измерений на тяговых подстанциях и электроподвижном составе в границах Московского центрального кольца

Под синхронными измерениями подразумевается получение 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. При этом обязательным условием синхронных измерений является возможность сведения баланса расхода и потребления электроэнергии в границах данного участка за исследуемый промежуток времени, что подразумевает получение вышеуказанных параметров для всего электроподвижного состава, находившегося в границах исследуемого участка в исследуемом периоде.

Целью синхронных измерений является получение данных для анализа эффективности процессов потребления и рекуперации электрической энергии на участке в зависимости от режимов вождения поездов, поездной обстановки, параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на исследуемом участке и других влияющих факторов.

В настоящее время на сети железных дорог не существует систем, специально разработанных для выполнения таких задач. Для получения необходимых измерений на тяговых подстанциях, как правило, используются данные системы АСКУЭ со счетчиков электроэнергии, установленных на

преобразовательно-выпрямительных агрегатах. Для получения требуемых данных с электроподвижного состава используются различного рода бортовые регистраторы параметров движения поездов: РПДА, РП МПСУиД и другие. К сожалению, доля электроподвижного состава, оснащенного такими регистраторами на большинстве участков железных дорог ОАО «РЖД» значительно ниже 100%, что препятствует возможности сведения баланса расхода и потребления электроэнергии и баланса токов на исследуемом участке. Поэтому на сегодняшний день проведение такого рода экспериментов сопряжено с рядом трудностей и требует четкой организации, предполагающей взаимодействие многих дирекций, служб и структурных подразделений для обеспечения отсутствия на участке во время проведения эксперимента любого электроподвижного состава, не оснащенного бортовыми регистраторами, а также для сбора и передачи в обработку необходимой информации.

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. Дополнительным преимуществом данного полигона является электрическая изолированность его системы тягового электроснабжения и отсутствие заездов поездов с других участков железных дорог, что облегчает процедуру сведения баланса потребления электроэнергии.

Ввиду значительных функциональных недостатков существующих измерительных систем на тяговых подстанциях и электропоездах, а также низкой надежности передачи и хранения данных поездок с регистраторов параметров движения моторвагонного подвижного состава (МВПС), следует признать, что проведение синхронных измерений на полигоне МЦК в текущих условиях не представляется возможным. Тем не менее, даже полученный объем данных с

регистраторов параметров движения дает большие возможности для анализа эффективности электропотребления электропоездами в границах МЦК.

3.3.1 Сбор и обработка данных синхронных измерений

В соответствии с программой проведения натуральных экспериментов по оценке существующего уровня энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в границах МЦК синхронные измерения тока, напряжения и расхода электроэнергии осуществлялись в течение одних суток. Проведение синхронных измерений осуществлялось по единому времени, используемому в системах измерений электрической энергии на тяговых подстанциях (АСКУЭ), системах регистрации параметров движения РПМ МПСУиД и в программном комплексе «ГИД-УРАЛ».

Значения токов, напряжений, активной и полной мощности по всем преобразовательным агрегатам тяговых подстанций МЦК по данным системы АСКУЭ были получены из программного комплекса «Энергия Альфа 2». К сожалению, полученные данные обладают существенными недостатками, не позволяющими использовать их для синхронных измерений. Во-первых, непостоянный интервал измерения (изменяется от 1 до 2 минут) затрудняет возможность синхронизации с измерениями на других тяговых подстанциях и МВПС. Во-вторых, минимальный интервал измерения 1 минута не обеспечивает достаточной детализации процессов электропотребления, так как за это время некоторые МВПС успевают полностью проследовать тот или иной межстанционный перегон. В-третьих, самым главным недостатком является функциональная невозможность получения усредненных значений токов, напряжений, мощности, а также расхода электроэнергии за интервал измерения, вместо этого фиксируются мгновенные значения указанных величин, которые могут многократно изменяться в широких диапазонах за измерительный интервал.

Файлы с регистраторов параметров движения электропоездов были предоставлены в формате *.gr. Для расшифровки файлов использовалось

специализированное программное обеспечение РПМ МПСУиД V 1.5.9 разработки ООО «НПО САУТ» (рисунок 3.19). Для возможности обработки результатов измерений программой предусмотрено формирование текстового файла с настраиваемым набором данных. По всем представленным фрагментам поездок были сформированы файлы со следующими параметрами: дата, время, путь, зад. сила, режим, скорость, напряжение в контактной сети, входной ток 2-го вагона (1-я моторная секция), входной ток 4-го вагона (2-я моторная секция).



Рисунок 3.19 – Интерфейс программы РПМ МПСУиД V 1.5.9

К сожалению, каждый файл охватывает не полные сутки, а лишь определенный временной отрезок. В обработку был предоставлен 341 фрагмент поездок. Детальный анализ указанных фрагментов показал, что представленные файлы охватывают только 281 поездочас за анализируемые сутки, в то время как общее количество поездочасов за 10.04.2019 в соответствии с графиком исполненного движения составило 819. То есть для анализа предоставлено менее 35% данных по поездкам за исследуемый период. Наибольший охват указанных данных приходится на временной промежуток с 7 до 12 часов дня. Таким

образом, для анализа был выбран именно этот период. Среди всех поездов, попадающих в данный интервал, было отобрано 54 поездки, для которых имеются полные данные с регистраторов параметров движения.

Недостатком файлов, полученных с регистраторов параметров движения, является отсутствие в них информации по текущей координате пути, несмотря на то, что функционально возможность получения таких данных предусмотрена. В ходе последующей обработки данных координаты были восстановлены расчетным путем на основании информации о скорости движения поезда, времени хода и времени прибытия и отправления поездов с остановочных пунктов по данным программного комплекса «ГИД-УРАЛ». Еще одним недостатком измерений, получаемых с регистраторов РПМ, является непостоянный интервал измерений, который может варьироваться от 0,1 с до нескольких десятков секунд, что так же затрудняет процесс синхронизации измерений.

Текстовые файлы поездок были экспортированы в среду Excel для последующей обработки. На основании исходных данных, приведенных в файлах, определены полный ток и потребляемая электропоездом активная мощность, приращения потребления и рекуперации электроэнергии за каждый интервал измерения. С помощью информации из «ГИД-УРАЛ» каждый момент измерения сопоставлен с тем или иным местонахождением поезда в процессе поездки (нахождение на соответствующей станции или межстанционном перегоне). Сопоставление выполнялось по времени, зафиксированному регистратором, и отраженному в графике исполненного движения, а также по скорости поезда в каждый момент измерения – нулевая скорость свидетельствует о нахождении поезда на остановочном пункте, ненулевая – о движении по перегону. Расчет координаты пути осуществлялся следующим образом. В качестве точки отсчета выбирался один из остановочных пунктов с известной координатой. От нее путем перемножения скорости и приращения времени отсчитывались координаты положения поезда в каждый последующий и предшествующий момент измерения.

Полученные суммарные значения расхода и рекуперации за поездку по выбранным поездам были сопоставлены с аналогичными значениями для данных поездов, полученными из аналитической системы оценки и контроля уровня небаланса электроэнергии и автоматизированной оценки удельного расхода электроэнергии электроподвижного состава на московском центральном кольце (автоматизированная система оценки расхода электроэнергии МЦК). В результате из дальнейшего анализа были исключены поездки с расхождением между данными РПМ и автоматизированной системы оценки расхода электроэнергии МЦК более 10 %. Остальные 44 поездки были сведены в Приложении Б.

3.3.2 Расчет небаланса электроэнергии в границах Московского центрального кольца по данным системы регистрации параметров движения

Отчетное значение небаланса за первый квартал 2019 года по данным из автоматизированной системы оценки расхода электроэнергии МЦК составило 25,8 %, что в 2,5 раза превышает допустимый уровень технологических потерь электроэнергии на тягу поездов для участков железных дорог постоянного тока. В значительной степени это объясняется некорректностью расчетной формулы небаланса, применяемой в настоящее время в ОАО «РЖД»:

$$\delta W = \frac{W_{\text{ЭЧЭ}} - (W_{\text{ЭПС}} - W_{\text{рек.}})}{W_{\text{ЭЧЭ}}} \cdot 100, \% \quad (3.9)$$

где $W_{\text{ЭЧЭ}}$ – расход электроэнергии, отпущенной в контактную сеть с тяговых подстанций, кВт·ч;

$W_{\text{ЭПС}}$ – объем потребления электроэнергии по счетчикам ЭПС, кВт·ч;

$W_{\text{рек.}}$ – объем энергии рекуперации по счетчикам ЭПС, кВт·ч.

Числитель приведенной формулы включает в себя как потери электроэнергии при ее транспортировке от тяговых подстанций к электроподвижному составу, так и потери энергии рекуперации, т.е. потери при передаче электроэнергии от рекуперирующего электроподвижного состава к потребляющему. В то же самое время в знаменателе формулы содержится только расход электроэнергии от тяговых подстанций. Получается, что потери

электроэнергии от разных источников (от тяговых подстанций и рекупирующего ЭПС) относятся к расходу от одного источника – тяговых подстанций. Это приводит к тому, что при увеличении объема рекуперации увеличиваются абсолютные потери рекуперации, что в свою очередь приводит к росту абсолютного и, что выглядит парадоксальным, – относительного уровня небаланса. Таким образом, относительное значение небаланса в данной формуле поставлено в прямую зависимость от уровня рекуперации, что в действительности не является справедливым. При небольших относительных объемах рекуперации на сети железных дорог ее влияние на относительный уровень небаланса было незначительным и ошибкой формулы пренебрегали, однако, при объемах энергии рекуперации на МЦК, которая превышает 30% от тяги поездов, данная неточность оказывает существенное влияние на расчетное значение небаланса.

Более справедливыми будут являться следующие формулы для определения небаланса:

$$\delta W = \frac{W_{\text{ЭЧЭ}} - (W_{\text{ЭПС}} - W_{\text{рек.}}) - \Delta W_{\text{рек.}}}{W_{\text{ЭЧЭ}}} \cdot 100, \% \quad (3.10)$$

или

$$\delta W = \frac{W_{\text{ЭЧЭ}} - (W_{\text{ЭПС}} - W_{\text{рек.}})}{W_{\text{ЭЧЭ}} + W_{\text{рек.}}} \cdot 100, \% \quad (3.11)$$

где $\Delta W_{\text{рек.}}$ – абсолютное значение потерь энергии рекуперации, кВт·ч.

Формула (3.10) описывает небаланс с экономической точки зрения, т.е. представляет собой потери первичной (поставленной) электроэнергии, отданной в контактную сеть с тяговых подстанций, без учета рекуперации и ее потерь.

Формула (3.11), напротив, учитывает объем рекупируемой энергии и потери энергии рекуперации, поэтому в технических и научных расчетах рекомендуется пользоваться именно данной формулой. Далее в настоящем отчете для расчета небаланса будет использоваться формула (3.11).

В соответствии с формулой (3.11) значение небаланса в границах МЦК за первый квартал 2019 года составляет 19%, что на 6,8% ниже отчетного. Тем не

менее, это значение почти в 2 раза превышает предел допустимых потерь электроэнергии на тягу поездов для участков постоянного тока. Суточный анализ динамики небаланса показывает, что даже в пиковые часы значение небаланса находится в районе отметки 10%, что является верхней границей допустимого уровня потерь электроэнергии на тягу для участков постоянного тока (рисунок 3.20).

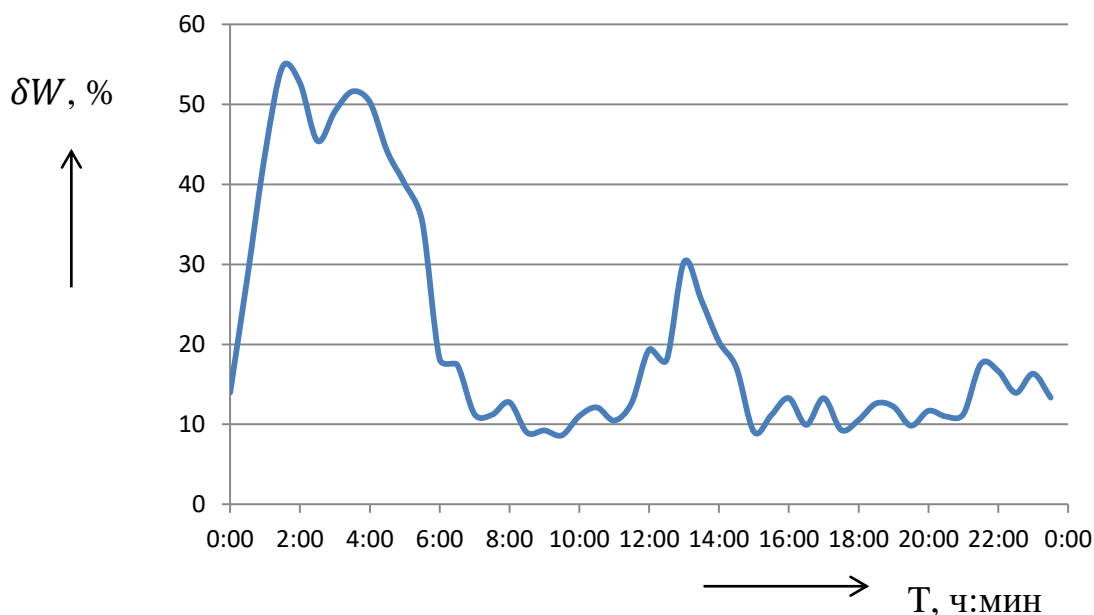


Рисунок 3.20 – Динамика суточного изменения уровня небаланса электроэнергии на тягу поездов за 10.04.2019

Как правило, причиной завышенного уровня небаланса электроэнергии на тягу поездов является коммерческая составляющая небаланса, которая в большинстве случаев обусловлена низким качеством учета электроэнергии на ЭПС. Для оценки достоверности учета небаланса выполним расчет небаланса с использованием данных регистраторов параметров движения электропоездов РПМ.

Как было отмечено в п. 3.3.1, наибольший охват данных РПМ приходится на временной отрезок с 7 до 12 часов дня. Поэтому для расчета был выбран именно этот период. На основании анализа 44 полных поездок определены усредненные значения расхода и рекуперации по всем межстанционным перегонам (см. Приложение Б таблицы Б.1 – Б.4). С учетом этих усредненных данных, а также информации о времени проследования поездами остановочных

пунктов из «ГИД-УРАЛ», для каждого поезда, частично или полностью попавшего в исследуемый интервал времени, определен расход и рекуперация электроэнергии в пределах расчетного периода. Результаты расчета приведены в Приложении В.

Как видно из таблицы В.1 Приложения В, расход и рекуперация электроэнергии по счетчикам ЭПС за период с 7:00 до 12:00 по результатам расчета на основе данных РПМ составили соответственно 82,1 тыс. кВт·ч и 39,1 тыс. кВт·ч, в то время как по данным автоматизированной системы оценки расхода электроэнергии МЦК эти значения составили 78,2 тыс. кВт·ч и 37,3 тыс. кВт·ч. Небаланс электроэнергии на тягу по данным расшифровки РПМ составил 8,1 %, что почти соответствует среднему уровню технологических потерь электроэнергии на тягу поездов для участков постоянного тока (7,9 %). Небаланс составил 10,8%.

Приведенные значения небаланса отражают его уровень в период наиболее интенсивного движения на полигоне. Среднесуточный же уровень небаланса за 10.04.2019 составил 15,3%. При этом результаты электрических расчетов с помощью программного комплекса КОРТЭС показывают, что расчетный уровень технических потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения МЦК для графика движения, соответствующего исполненному графику 10.04.2019 составляет всего 4,3 %, что более чем в 3 раза ниже отчетного уровня небаланса. Такое расхождение может свидетельствовать о значительной доле коммерческой составляющей в структуре небаланса. Для ее выявления следует провести детальный сравнительный анализ поездок за исследуемый период времени.

3.3.3 Анализ поездок по данным системы регистрации параметров движения

Гистограммы электропотребления поездами за полный круг обращения, представленные на рисунках 3.21 и 3.22, показывают отклонения от среднего значения электропотребления. Отклонения достигают 30% в нечетном направлении и 17,7 % – в четном. Разница между максимальным и минимальным значением энергопотребления в нечетном направлении достигает 60%, а в четном – 27 %.

На гистограммах рекуперируемой электроэнергии поездами за полный круг обращения, представленных на рисунках 3.23 и 3.24, видно, что отклонения от показателей среднего значения электропотребления достигают 50 % в нечетном направлении и 48% – в четном, а в свою очередь разница между максимальным и минимальным значением выработки энергии рекуперации в нечетном направлении достигает 89 %, а в четном – 77 %.

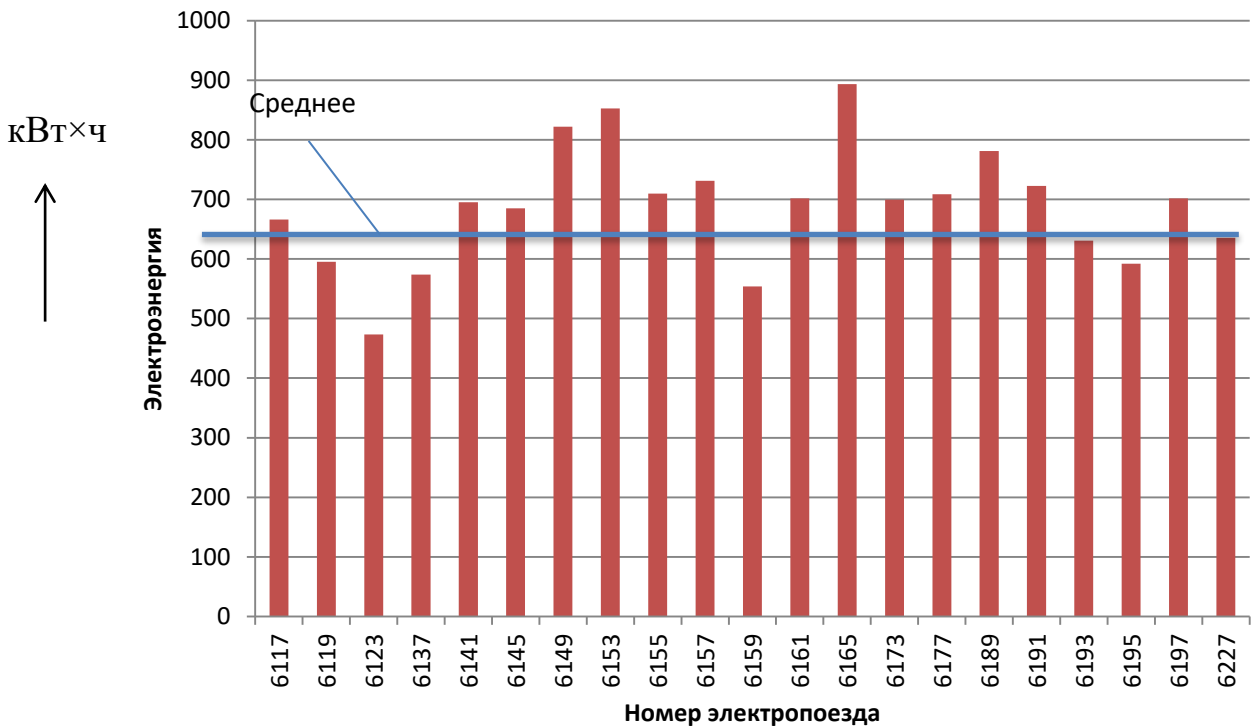


Рисунок 3.21 – Гистограмма электропотребления поездами за полный круг обращения в нечетном направлении

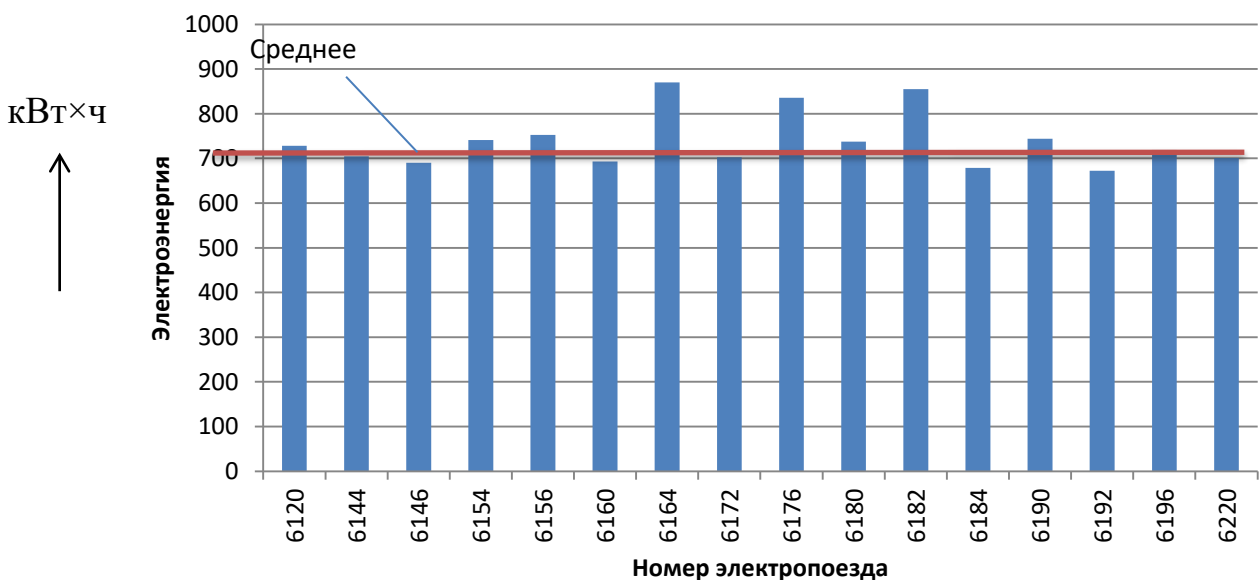


Рисунок 3.22 – Гистограмма электропотребления поездами за полный круг обращения в четном направлении

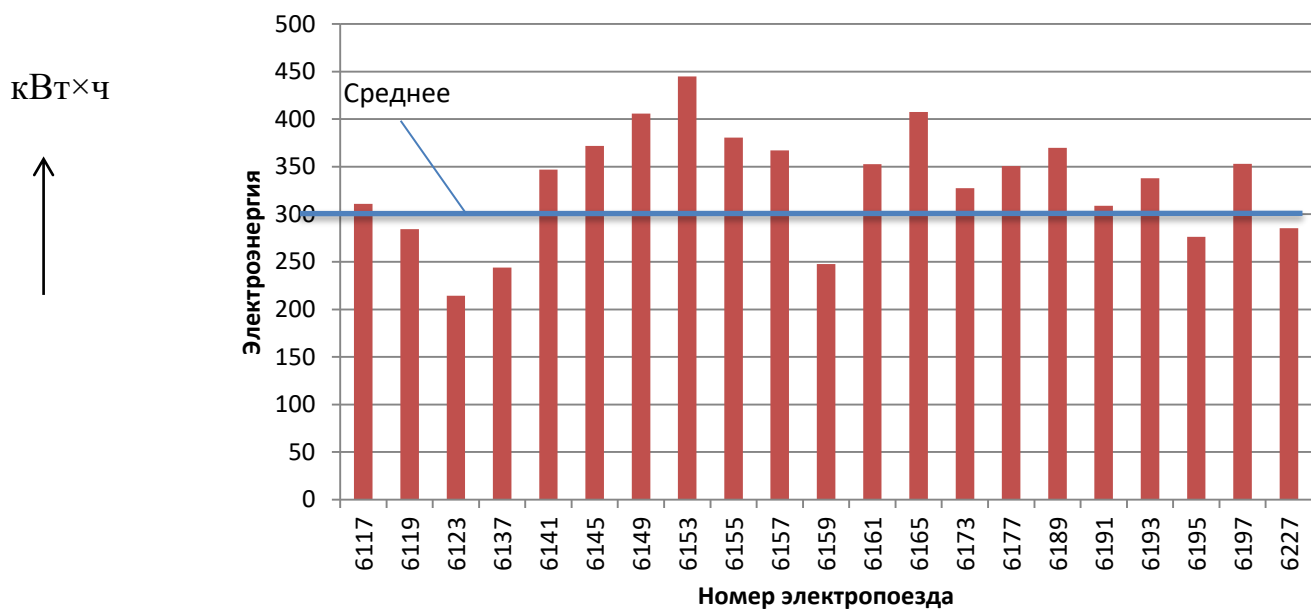


Рисунок 3.23 – Гистограмма рекуперируемой электроденергии поездами за полный круг обращения в нечетном направлении

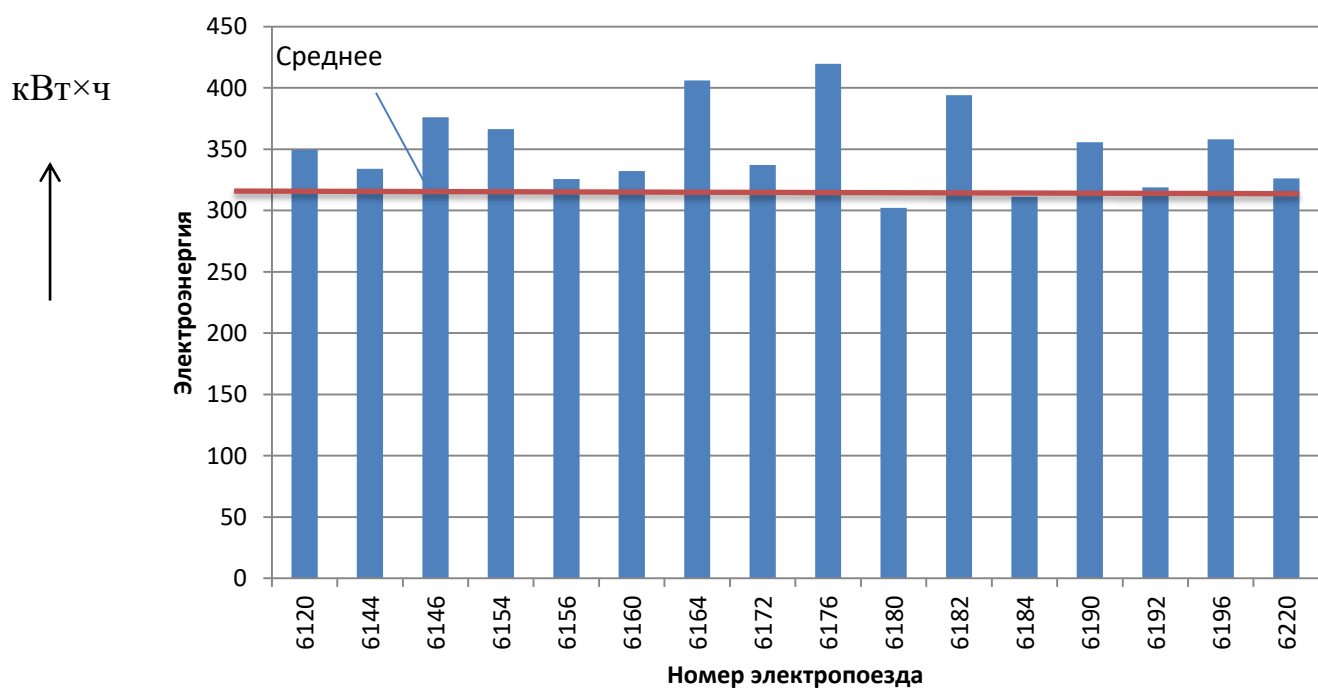


Рисунок 3.24 – Гистограмма рекуперируемой электроденергии поездами за полный круг обращения в четном направлении

Далее выполнен анализ отклонений расходов и рекуперации электроденергии поездами по межстанционным перегонам от средних значений. На рисунках 3.25 и 3.26 приведены графики законов распределения отклонений расхода и

рекуперации электроэнергии по поездкам. В таблицах 3.12 и 3.13 приведены результаты статистической обработки данных расходов и рекуперации электроэнергии по поездкам.

Как видно из приведенных графиков и таблиц отклонение расходов электроэнергии по поездкам от средних значений с доверительной вероятностью 0,95 находится в пределах интервала $\pm 44,0\%$. Отклонения по рекуперации достигают еще больших значений и находятся в интервале $\pm 53,0\%$.

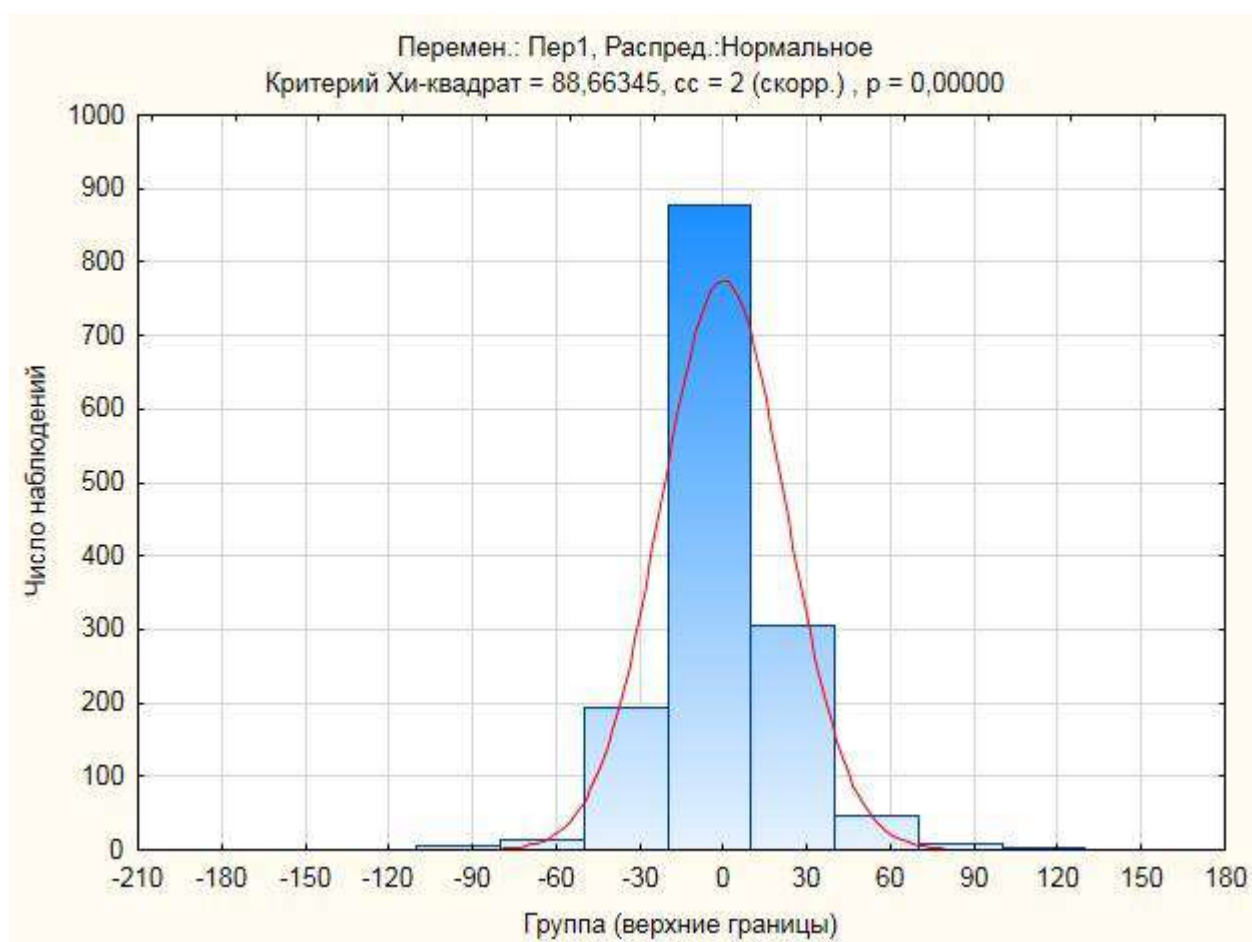


Рисунок 3.25 – График закона распределения отклонений расхода электроэнергии по поездкам (%)

Таблица 3.12 – Результаты статистической обработки расходов электроэнергии по поездкам

Переменная	Число наблюдений	Значения выборки		СКО	Доверительный интервал при $P_d=0,95$
		минимальное	максимальное		
Расход электроэнергии	1452	-98,3	177,67	22,43	$\pm 44,0$

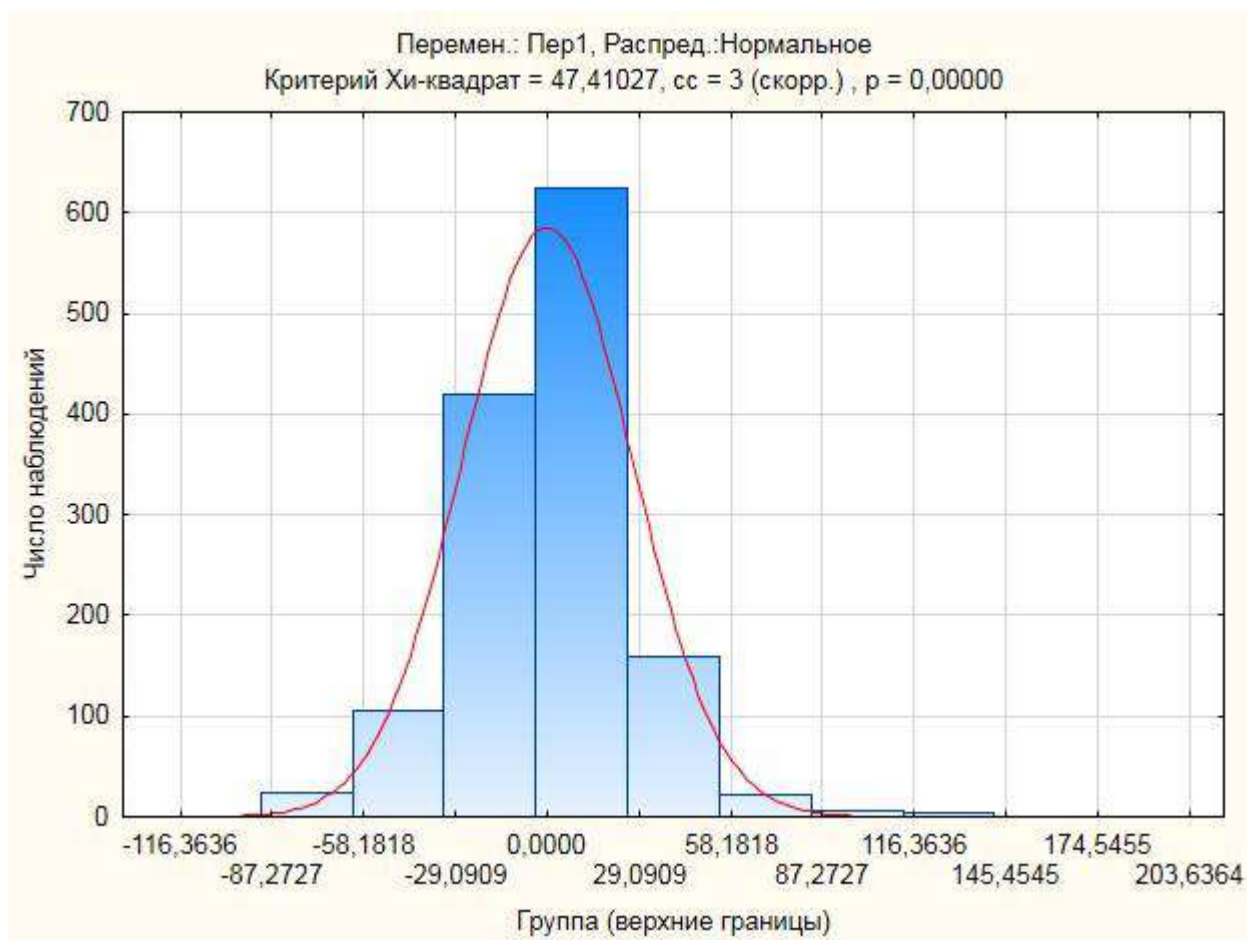


Рисунок 3.26 – График закона распределения отклонений рекуперации электроэнергии по поездкам (%)

Таблица 3.13 – Результаты статистической обработки объема рекуперации электроэнергии по поездкам

Переменная	Число наблюдений	Значения выборки		СКО	Доверительный интервал при $P_d=0,95$
		минимальное	максимальное		
Расход электроэнергии	1363	-83,76	161,96	27,02	$\pm 53,0$

Выявлены существенные отклонения расходов и рекуперации. Для выяснения причин проведен анализ потребления по электропоездам и машинистам, в целях чего были отобраны электропоезда и машинисты с достаточным количеством данных из регистраторов параметров движения РПМ для анализа.

Данные представлены в таблицах 3.14 и 3.15. Следует обратить внимание, что разброс значений разности расхода и рекуперации по электропоездам

нечетного направления достигает 39 % от минимального значения, в то время как аналогичный показатель для электропоездов четного направления составляет всего 11,6 %. В таблице 3.14 также представлены среднемесячные удельные показатели расхода и рекуперации по выбранным электропоездам. Это позволит выявить наличия или отсутствия закономерности в сложившемся распределении электропотребления.

Таблица 3.14 – Показатели электропотребления и рекуперации электропоездами по данным регистраторов параметров движения РПМ и автоматизированной системы оценки расхода электроэнергии МЦК

№ МВПС	Кол-во файлов поездок	Средние значения расхода и рекуперации электроэнергии, кВт·ч			Средние значения удельного расхода и рекуперации электроэнергии за апрель 2019 года, кВт·ч/10 ⁴ т·км		
		W	$W_{рек.}$	$W - W_{рек.}$	w	$w_{рек.}$	$w - w_{рек.}$
Нечетное направление							
65	3	540	246	294	354	153	201
56	2	681	352	329	339	163	176
51	2	702	353	349	352	146	206
48	4	666	315	351	355	150	205
62	2	637	286	351	354	145	208
84	2	702	349	353	363	153	210
77	2	817	407	410	360	147	214
Четное направление							
76	2	706	345	361	363	143	220
46	2	690	319	371	351	147	204
86	3	738	357	381	360	146	214
61	2	772	385	387	359	147	212
64	2	712	322	390	352	148	204
80	2	721	318	403	364	150	214

На рисунке 3.27 представлено расхождение показателей расхода и рекуперации электроэнергии по данным РПМ и разница средних удельных значений расхода и рекуперации по данным автоматизированной системы оценки расхода электроэнергии МЦК.

Аналогично рассмотрены средние значения расхода (W) и рекуперации ($W_{рек.}$) электроэнергии за один круг по данным РПМ и средние значения удельного расхода (w) и рекуперации ($w_{рек.}$) электроэнергии за апрель 2019 года по данным

автоматизированной системы оценки расхода электроэнергии МЦК в разрезе машинистов. Данные представлены в таблице 3.15.

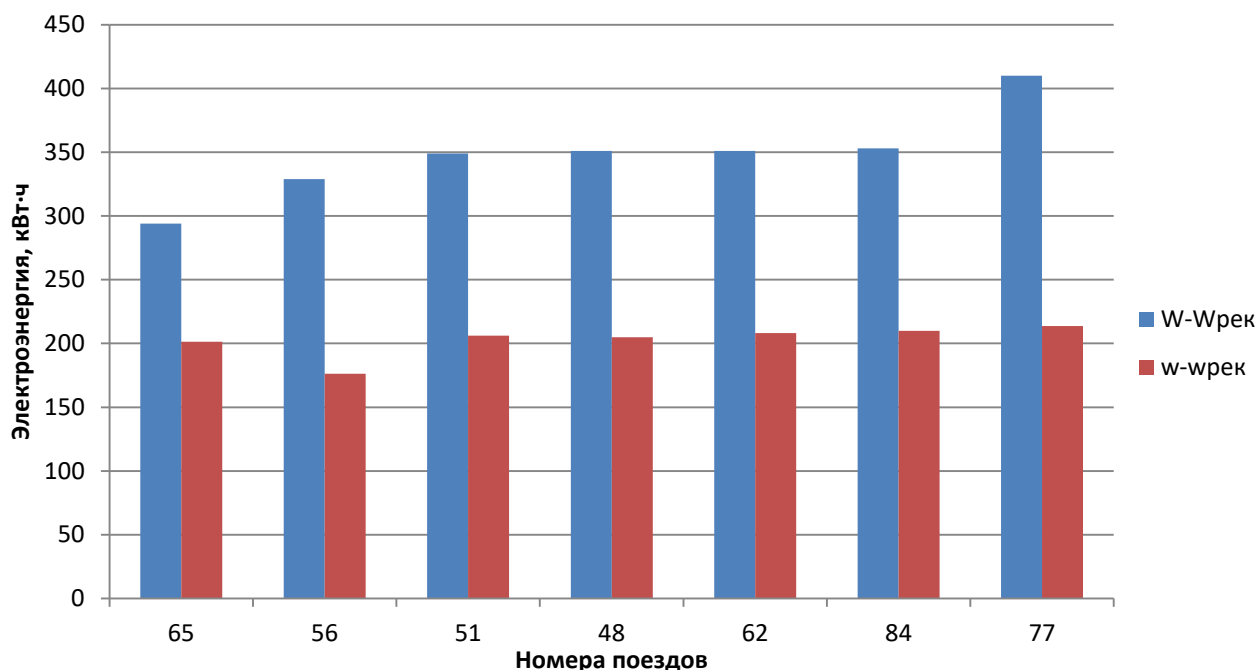


Рисунок 3.27 – Расхождение средних показателей расхода и рекуперации электроэнергии

Таблица 3.15 – Энергопотребление и рекуперация в разрезе машинистов по данным РПМ и автоматизированной системы оценки расхода электроэнергии МЦК

Машинист	№ МВПС	Кол-во файлов поездок	Средние значения расхода и рекуперации электроэнергии, кВт·ч			Средние значения удельного расхода и рекуперации электроэнергии за апрель 2019 года, кВт·ч/10 ⁴ т·км		
			W	W _{рек.}	W – W _{рек.}	w	w _{рек.}	w – w _{рек.}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нечетное направление								
Савельев А. П.	65	2	513	231	282	280	114	166
Каленов А. М.	56	2	681	352	329	340	148	192
Аксенов Р. С.	51	2	702	353	349	372	164	208
Николаев Н. А.	48	4	666	315	351	343	145	199
Ковалев А. А.	62	2	637	286	351	342	133	209
Катцин Д. А.	84	2	702	349	353	354	170	183
Бужин А. А.	77	2	817	407	410	407	175	232

Продолжение таблицы 3.15

Машинист	№ МВПС	Кол-во файлов поездок	Средние значения расхода и рекуперации электроэнергии, кВт·ч			Средние значения удельного расхода и рекуперации электроэнергии за апрель 2019 года, кВт·ч/10 ⁴ т·км		
			W	$W_{рек.}$	$W - W_{рек.}$	w	$w_{рек.}$	$w - w_{рек.}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Четное направление								
Смирнов А. В.	76	2	706	345	361	347	150	196
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фейзииков Р. Х.	46	2	690	319	371	362	151	211
Баженов Д. В.	86	2	735	358	377	365	163	203
Мясников В. Н.	61	2	772	385	387	370	154	216
Воробьев О. М.	64	2	712	322	390	350	150	200
Кузнецов А. В.	80	2	721	318	403	344	149	195

На рисунке 3.28 представлено в графическом виде расхождение показателей расхода и рекуперации электроэнергии по данным РПМ и разница средних удельных значений расхода и рекуперации по данным автоматизированной системы оценки расхода электроэнергии МЦК в разрезе машинистов

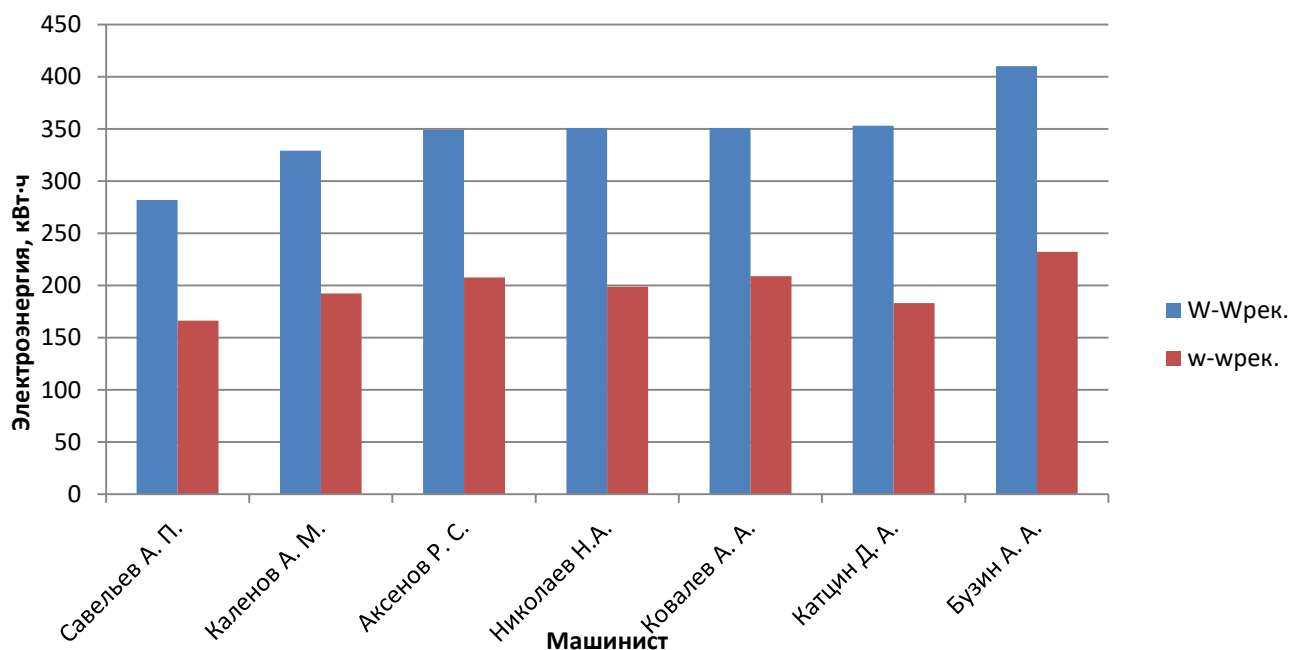


Рисунок 3.28 – Разница средних значений расхода и рекуперации электроэнергии по машинистам

Самый большой разброс значений по электропотреблению и рекуперации наблюдается для нечетного направления (таблица 3.16).

При рассмотрении представленной диаграммы прослеживается четкая корреляция между данными по отдельным поездкам в РПМ и среднемесячными значениями.

Таблица 3.16 – Характеристики результатов анализируемых поездок по маршруту Андроновка – Андроновка в нечетном направлении

Номер поезда	6159	6189	Нормативные показатели
Номер электропоезда	65	77	-
Машинист	Савельев А. П.	Бузин А. А.	-
Время отправления, чч:мм	7:36	8:51	
Общее время следования, мин	91,3	90,6	90
Расход электроэнергии, кВт·ч	554	781	697
Рекуперация, кВт·ч	248	370	334
Расход электроэнергии за вычетом рекуперации, кВт·ч	306	411	-

На рисунке 3.29 в графическом виде представлены графики мощности, скорости и времени следования поездов № 6159 и № 6189 по участку.

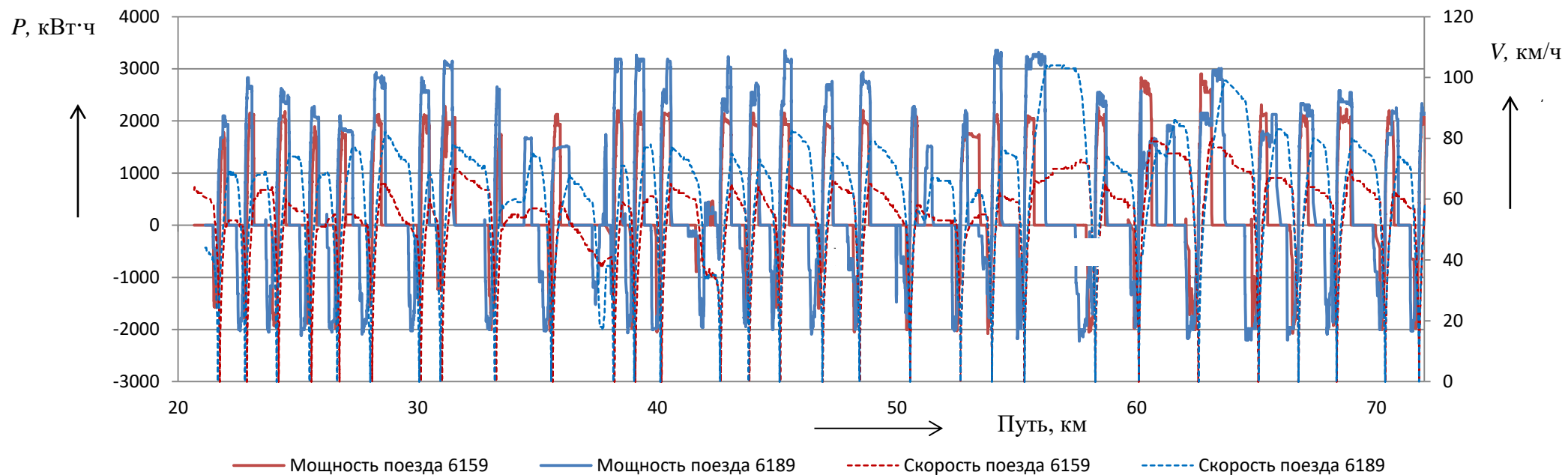


Рисунок 3.29 – Графики мощности, скорости и времени следования поездов №6159 и №6189 по участку

Исходя анализа измерений можно сделать вывод, что режим ведения поезда машинистом Савельевым на данном участке на 41 % эффективнее режима машиниста Бузина. Для более наглядного отображения показателей на рисунке 3.30 представлен фрагмент графика по участку Нижегородская – Дубровка.

На основе полученных данных можно сделать вывод о том, что совершенствование режимных карт вождения поездов на полигоне МЦК позволит существенно повысить экономию расхода электроэнергии. Введение такого показателя как норма рекуперации приведет к увеличению расхода электроэнергии вместо ее экономии, так как это требует набора достаточной кинетической энергии подвижного состава и таким образом лишним тратам энергии на разгон для последующего ее достижения.

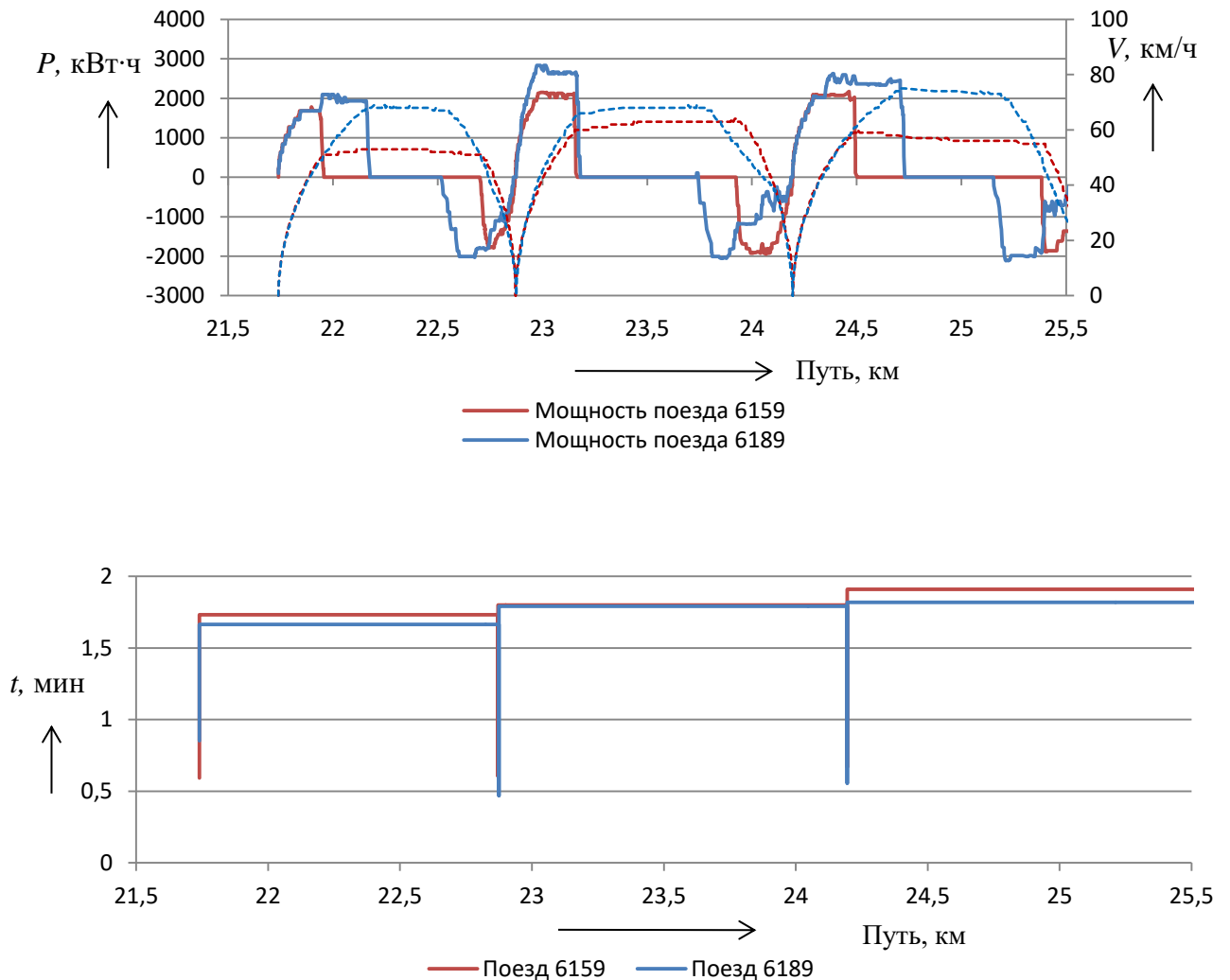


Рисунок 3.30 – График мощности и времени следования поездов №6159 и №6189 на участке Нижегородская – Дубровка

Также будут уменьшены технические потери электроэнергии при ее передаче от тяговых подстанций к электроподвижному составу и потери энергии рекуперации. Потенциал экономии электроэнергии на тягу поездов на полигоне МЦК исследован с помощью выполнения имитационного моделирования в программном комплексе КОРТЭС с учетом энергоэффективных режимов вождения поездов [64].

3.4 Разработка имитационной модели работы системы тягового электроснабжения

Имитационная модель работы системы тягового электроснабжения разработана на основании данных анализа результатов экспериментальных исследований по оценке энергетической эффективности системы тягового электроснабжения, в том числе:

- анализа энергетических параметров и режимов работы оборудования тяговых подстанций;
- расхода электрической энергии по присоединениям на шинах ТП;
- изменениям показателей расхода и рекуперации электрической энергии по данным бортовых регистраторов параметров движения РПД МПСУ и Д;
- исполненного графика исполненного движения;
- результатов синхронных измерений на ТП и ЭПС в границах МЦК [9].

Таблица 3.17 – Усредненные результаты тяговых расчетов в нечетном и четном направлениях МЦК для средних из наибольших и наименьших значений расхода энергии (за полный круг по МЦК)

Направление	Техническая скорость движения км/ч	Расход энергии за поездку, кВт·ч	Рекуперация за поездку, кВт·ч	Удельный расход энергии за поездку, кВт·ч/10 ⁴ ткм брутто	Удельная рекуперация за поездку, кВт·ч/10 ⁴ ткм брутто
Нечетное	57,9	754	348	387,9	179,0
		629	302	323,6	155,3
Четное	49,6	762	344	392,0	177,0
		684	292	351,9	150,2

В рассматриваемый период работа полигона МЦК характеризуется следующими показателями:

- количество поездов– 36 пар поездов;
- суммарный расход энергии по счетчикам тяговых подстанций – 31 299 кВт·ч;
- расход по счетчикам электропоездов – 44 462 кВт·ч;
- рекуперация – 21 460 кВт·ч;
- небаланс 15,7 % или 8 297 кВт·ч в абсолютном выражении.

На рисунке 3.31 представлены отчетные получасовые и суммарные характеристики работы МЦК за период времени с 16:00 до 20:00 исследуемых суток:

- количество поездов в нечетном направлении – 50;
- количество поездов в четном направлении – 48;
- суммарный расход энергии по счетчикам тяговых подстанций – 41 868 кВт·ч;
- расход по счетчикам электропоездов – 61 639 кВт·ч;
- рекуперация – 29 562 кВт·ч;
- небаланс 13,7 % или 9 791 кВт·ч в абсолютном выражении.

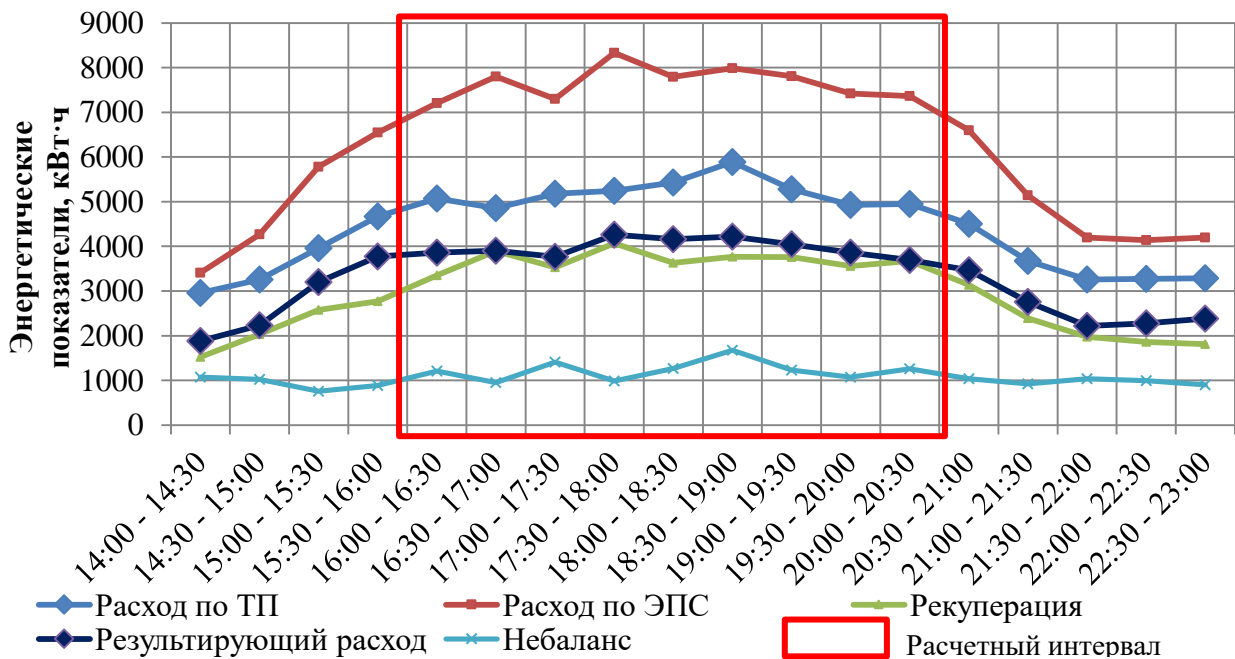


Рисунок 3.31 – Энергетические параметры работы МЦК за четырехчасовой интервал времени с 16:00 до 20:00 10.04.2019

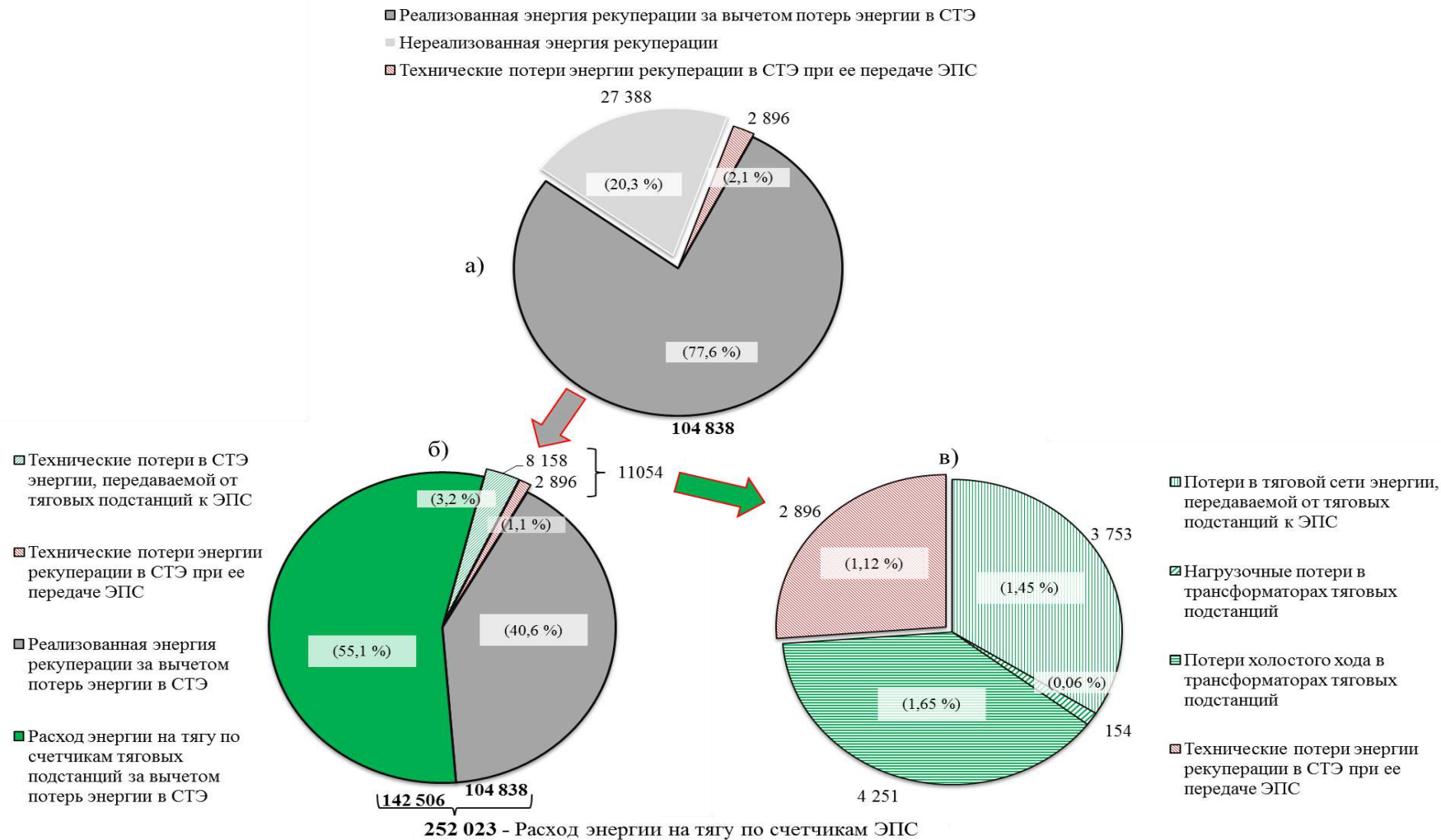


Рисунок 3.32 – Диаграммы баланса электроэнергии (кВт·ч) в границах полигона МЦК за сутки: а) баланс абсолютной энергии рекуперации; б) полный баланс энергии на тягу поездов; в) баланс потерь энергии в СТЭ

За четырехчасовой интервал с 16:00 до 20:00 по фактическому графику движения получены следующие результаты:

- расход энергии по счетчикам тяговых подстанций – 40 402 кВт·ч;
расхождение с отчетными данными – 3,5 %;
- расход по счетчикам электропоездов – 67 826 кВт·ч;
расхождение с отчетными данными – 10,0 %;
- рекуперация – 30 069 кВт·ч;
расхождение с отчетными данными – 6,3 %;
- расчетный уровень технических потерь – 3,75 % (2 645 кВт·ч в абсолютном выражении);
расхождение с отчетными показателями – 13,7 % (9 791 кВт·ч).

На основе данных, полученных в ходе натуральных измерений на полигоне МЦК, сформированы диаграммы баланса электроэнергии за сутки:

- а) баланс абсолютной энергии рекуперации;
- б) полный баланс энергии на тягу поездов;
- в) баланс потерь энергии в СТЭ.

Результат в графическом виде представлен на рисунке 3.32

3.5 Выводы по разделу 3

В рамках раздела выполнены: разработка программы проведения натуральных 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.

По результатам анализа сделаны следующие выводы.

1 Система электроснабжения МЦК является изолированной от системы электроснабжения радиальных линий. Существующая система учета электроэнергии является достаточной для укрупненной оценки энергетических показателей на уровне тяговых подстанций.

В рамках анализа динамики расхода электрической энергии по присоединениям тяговых подстанций получено, что в целом по подстанциям в границах МЦК расхождение между данными АСКУЭ и Аналитической системы оценки и контроля уровня небаланса электроэнергии и автоматизированной оценки удельного расхода электроэнергии электроподвижного состава на Московском центральном кольце за 10.04.2019 г. не превысило 4 % (за исключением тяговой подстанции Окружная, где оно составило около 8 %), что позволяет говорить о достоверности данных о расходе электроэнергии по тяговым подстанциям, предоставляемым Системой.

2 На тяговых подстанциях для питания МЦК применяются 13 преобразовательных агрегатов с двенадцатипульсовой схемой выпрямления последовательного типа, из них 11 – типа ТРСЗП-12500/20УХЛ1 и 2 – типа ТРСЗП-12500/10УХЛ1 производства ООО «Электрофизика» (Санкт-Петербург). Все трансформаторы произведены в 2013 г., а введены в эксплуатацию в 2016 г.

Общие потери энергии в преобразовательных трансформаторах участка – 3,9 тыс. кВт·ч или 2,2 % от общего потребления энергии на тягу поездов.

Наибольшие относительные значения потерь электроэнергии наблюдаются в преобразовательных трансформаторах с малой переработкой электроэнергии на тягу поездов:

тяговая подстанция Андроновка (ПВА 2) – 3,04 %;

тяговая подстанция Белокаменная (ПВА 2) – 3,32 %;

тяговая подстанция Покровское – Стрешнево (ПВА 4) – 12,55 %.

В составе преобразовательных агрегатов используется 26 выпрямителей типа В-МПП-Д-1,6к-3,3к УХЛ4 производства ООО «НИИЭФА-Энерго» (Санкт-Петербург) (по два выпрямителя на каждый преобразовательный трансформатор). Выпрямители введены в эксплуатацию в 2016 г.

3 Выполнен анализ параллельной работы преобразовательных агрегатов только для тяговых подстанций Андроновка и Белокаменная. Для преобразовательных агрегатов тяговой подстанции Белокаменная различие в

загрузке агрегатов по данным работы за сутки составляет 2 %, для тяговой подстанции Андроновка – коэффициент загрузки отличается на 8 %.

Отличие коэффициента наклона для внешних характеристик тяговой подстанции Андроновка превышает 30 %, для тяговой подстанции Белокаменная – не превышает 2 %. Различие внешних характеристик для тяговой подстанции Андроновка объясняет неравномерную загрузку агрегатов. Таким образом, параллельная работа преобразовательных агрегатов на тяговой подстанции Андроновка является недостаточно эффективной ввиду значительного расхождения внешних характеристик ПВА. На тяговой подстанции Белокаменная такой проблемы нет.

На основании выполненных расчетов сформирован массив данных со значениями напряжения холостого хода на шинах 3,3 кВ и коэффициента наклона внешней характеристики, которые в дальнейшем будут использованы для моделирования рассматриваемого участка в программном комплексе «КОРТЭС».

4 Выполнен анализ расхода электрической энергии по электропоездам. Анализ выполнен по данным информационной системы «Аналитическая система оценки и контроля уровня небаланса электроэнергии и автоматизированной оценки удельного расхода электроэнергии электроподвижного состава на Московском центральном кольце» (разработка ООО «НПО ТрансИнфоПроект»). Суммарный расход по электропоездам за сутки составил 250 353 кВт·ч, рекуперация – 114 179 кВт·ч, что в процентном отношении к расходу электроэнергии составляет 45,6 %.

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 %.

5 Для последующей разработки имитационной модели работы системы тягового электроснабжения в границах Московского центрального кольца выполнен анализ тяговых энергетических параметров движения электропоездов в

границах МЦК путем расшифровки данных бортовых регистраторов параметров движения РПД МПСУ и Д.

Максимальное значение тока электропоезда составляет: в режиме тяги 1100 А; в режиме рекуперации 650 А.

Напряжение на токоприемнике электропоезда находится в диапазоне 3200 – 3900 В.

6 В рамках анализа графика исполненного движения получено, что в границах МЦК реализованы графики движения рабочего и выходного дня, отличающиеся как общим количеством поездов в сутки, так и плотностью их движения в различные часы.

Нормативные графики являются двухпутными, параллельными, пакетными. Движение кольцевое. Интервал времени следования поездов в периоды наиболее интенсивного движения составляет 5 минут, в остальные периоды – 10 минут.

7 Анализ функциональности и надежности измерительных систем на тяговых подстанциях и ЭПС МЦК показал невозможность их применения в настоящем виде для проведения синхронных измерений токов, напряжений и электроэнергии в границах полигона, и, как следствие, обеспечения функций мониторинга энергетической эффективности перевозочного процесса.

9 Анализ 44 поездок электропоездов ЭС2Г в границах полигона МЦК по данным расшифровки файлов с регистраторов параметров движения РПМ МПСУиД выявил существенный разброс показателей электропотребления и рекуперации для различных машинистов при движении по одному и тому же участку (до 44 % от среднего в тяге и до 53 % в режиме рекуперации).

10 Анализ удельных среднемесячных показателей электропотребления и рекуперации также показал существенный разброс значений по машинистам, причем наблюдается четкая корреляция с результатами расшифровки файлов РПМ. То есть машинисты, которые имеют наиболее высокие показатели в результате отдельно взятых поездок в экспериментальные сутки, выдерживают их и в течение месяца, так же как и машинисты с более низкими показателями.

11 Анализ двух отдельно взятых поездок с сопоставимыми условиями, выполненных машинистами с наиболее высокими и низкими показателями

энергоэффективности, показал различия в стилях вождения электроподвижных составов этими машинистами. При этом время хода поездов по перегонам в целом выдерживается обоими машинистами, а показатель расхода электроэнергии за вычетом рекуперации на 25,5% ниже у машиниста, применяющего плавный стиль вождения.

4 ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

4.1 Применение накопителей электроэнергии на базе аккумуляторов и конденсаторов различной конструкции, а также кинетических накопителей

Эффективность работы накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения определяется графиком тяговой нагрузки подстанций и напряжения на шинах подстанций и линейных устройств, к шинам которых подключаются накопители электроэнергии.

На тяговых подстанциях Андроновка и Белокаменная принят режим параллельной работы преобразовательных агрегатов. На тяговой подстанции Андроновка питание ЗРУ-3,3 кВ осуществляется от преобразовательных трансформаторов ТП1, ТП2, ТП3. В работе нормально находится ТП1 и ТП2, а ТП3 – нормально отключен. Питание ТП1 и ТП2 осуществляется от 1-й и 2-й секций шин 20 кВ, работающих изолированно. Питание ЗРУ-3,3 кВ на тяговой подстанции Белокаменная осуществляется от аналогично включенных преобразовательных трансформаторов ТП1 и ТП2, преобразовательный трансформатор ТП3 находится в холодном резерве.

В качестве преобразовательных трансформаторов на подстанциях эксплуатируются трансформаторы марки ТРСЗП-12500/20УХЛ1. Номинальное напряжение ВН в позиции 3 ПБВ – 20,0 кВ, напряжение НН – 1 305 В. Номинальный коэффициент трансформации – 15,3.

Коэффициент загрузки i -го преобразовательного агрегата, о.е., определяется по формуле:

$$k_{\text{ПВА}i} = \frac{W_{\text{ПВА}i}}{\sum_{j=1}^N W_{\text{ПВА}j}}, \quad (4.1)$$

где N – количество параллельно работающих агрегатов;

$W_{\text{ПВА}i}, W_{\text{ПВА}j}$ – объем электроэнергии по вводу i -го рассматриваемого агрегата и j -го агрегата тяговой подстанции.

Результаты расчета коэффициента загрузки для преобразовательных агрегатов тяговых подстанций Андроновка и Белокаменная приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Расход электроэнергии и загрузка преобразовательных агрегатов за 11.04.2019

Параметр	Андроновка		Белокаменная	
	ПВА-1	ПВА-2	ПВА-1	ПВА-2
Расход, кВт·ч	17867,01	15052,26	18804,78	19398,57
Коэффициент загрузки	0,54	0,46	0,49	0,51

Для преобразовательных агрегатов тяговой подстанции Белокаменная различие в загрузке агрегатов по данным работы за сутки 11.04.2019 составляет 2 %, для тяговой подстанции Андроновка – коэффициент загрузки отличается на 8 %.

Напряжение на выходе преобразовательного агрегата, V , определяется по формуле:

$$U_d = U_{d0} \cdot \left(1 - \sin \frac{\pi}{m} \cdot u_k \cdot \frac{I_d}{I_{d\text{ном}}} \right), \quad (4.2)$$

где

$$u_k = \frac{100 \cdot S_{1\text{ном}} \cdot (X_{\text{тр.преобр}} + X_{\text{тр.пониж}} + X_c)}{U_{2\text{ном}}^2}. \quad (4.3)$$

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

$$U_{d0} = \frac{\sqrt{6} \cdot m}{2\pi \cdot k_{\text{сх}}} \cdot U_{2\phi}, \quad (4.4)$$

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.

Отношение токов в формуле (4.2) при отсутствии измерения со стороны постоянного тока заменяется отношением токов на стороне первичной обмотки преобразовательного трансформатора. Результаты обработки данных ПК «Энергия Альфа 2» позволяют получить внешние характеристики для ПВА-1 и ПВА-2 тяговых подстанций. Внешние характеристики для тяговых подстанций Андроновка и Белокаменная приведены на рисунках 4.1, 4.2 соответственно.

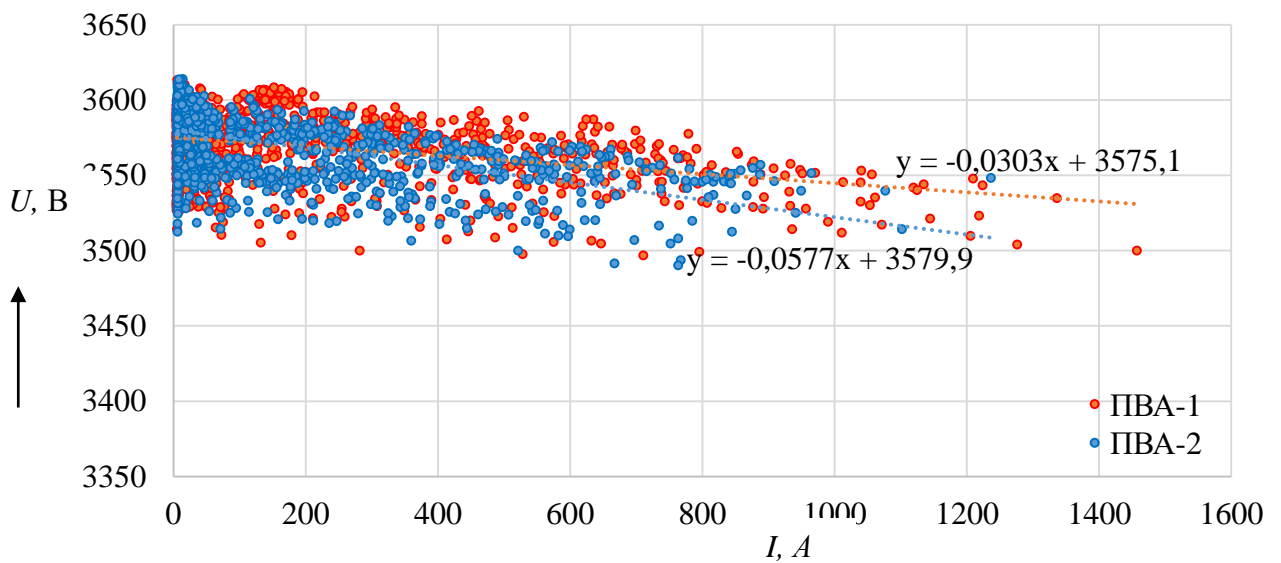


Рисунок 4.1 – Внешние характеристики ПВА-1 и ПВА-2 тяговой подстанции Андроновка

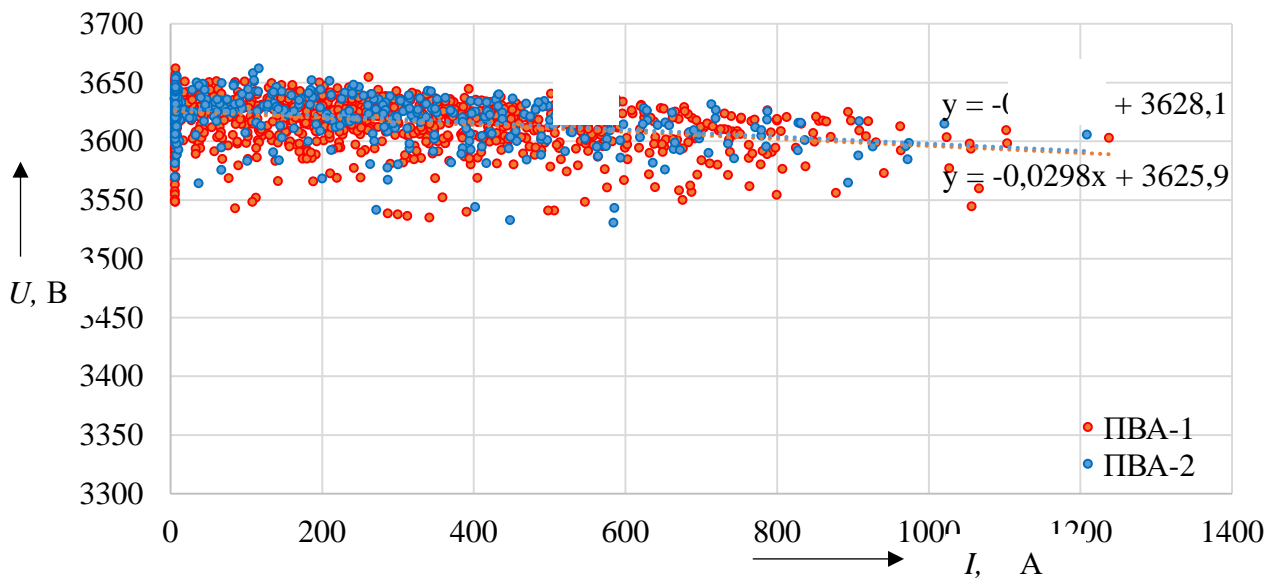


Рисунок 4.2 – Внешние характеристики ПВА-1 и ПВА-2 тяговая подстанции Белокаменная

Отличие коэффициента наклона для внешних характеристик тяговой подстанции Андроновка превышает 30 %, для тяговой подстанции Белокаменная – не превышает 2 %. Различие внешних характеристик тяговой подстанции Андроновка объясняет неравномерную загрузку агрегатов по результатам обработки данных 11.04.19. Уровень напряжения на шинах в режиме холостого хода для обеих подстанций изменяется в диапазоне 3500 – 3660 В.

На трех из пяти тяговых подстанций МЦК преобразовательные агрегаты работают поочередно. Внешние характеристики преобразовательных агрегатов тяговых подстанций Москва-Киевская (ПВЗ), Окружная и Покровское-Стрешнево, находящихся в работе на 10.04.2019 г., приведены на рисунках 4.3 – 4.5 соответственно. По результатам расчетов уровень напряжения на шинах в режиме холостого хода для тяговой подстанции Москва-Киевская изменяется в диапазоне 3600 – 3730 В, для тяговой подстанции Окружная – в диапазоне 3440 – 3680 В, для тяговой подстанции Покровское-Стрешнево – в диапазоне 3640 – 3670 В.

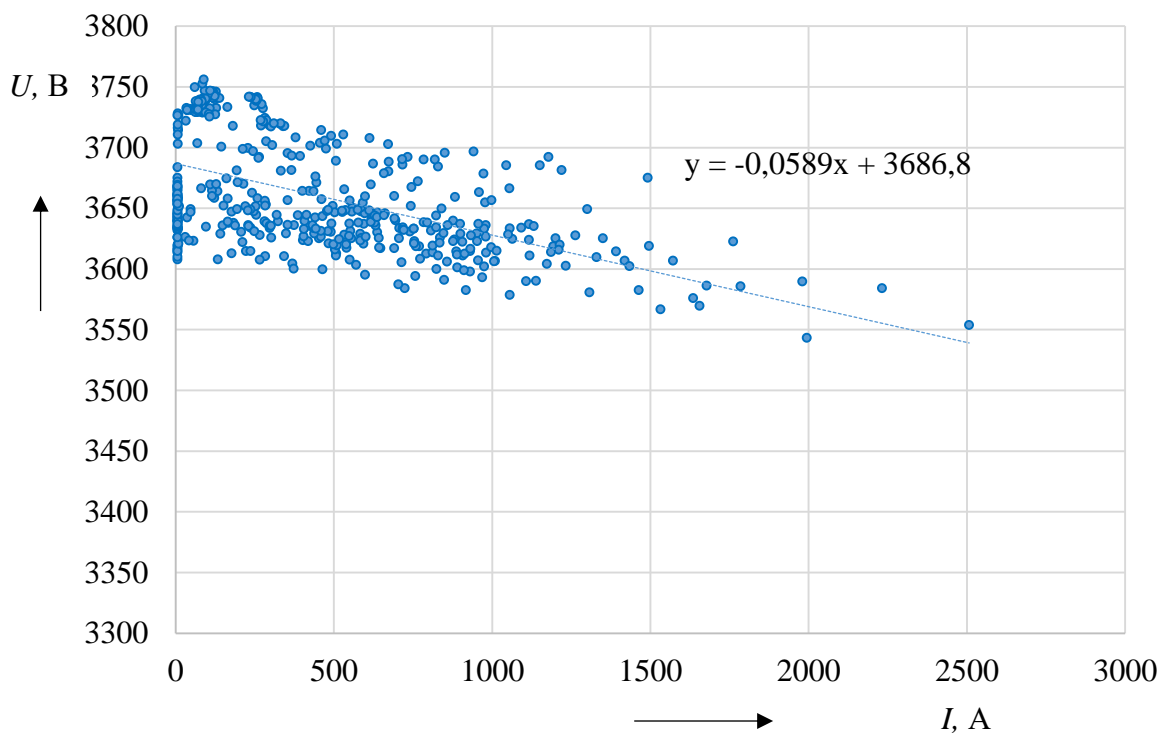


Рисунок 4.3 – Внешняя характеристика ПВА-3 тяговой подстанции Москва-Киевская

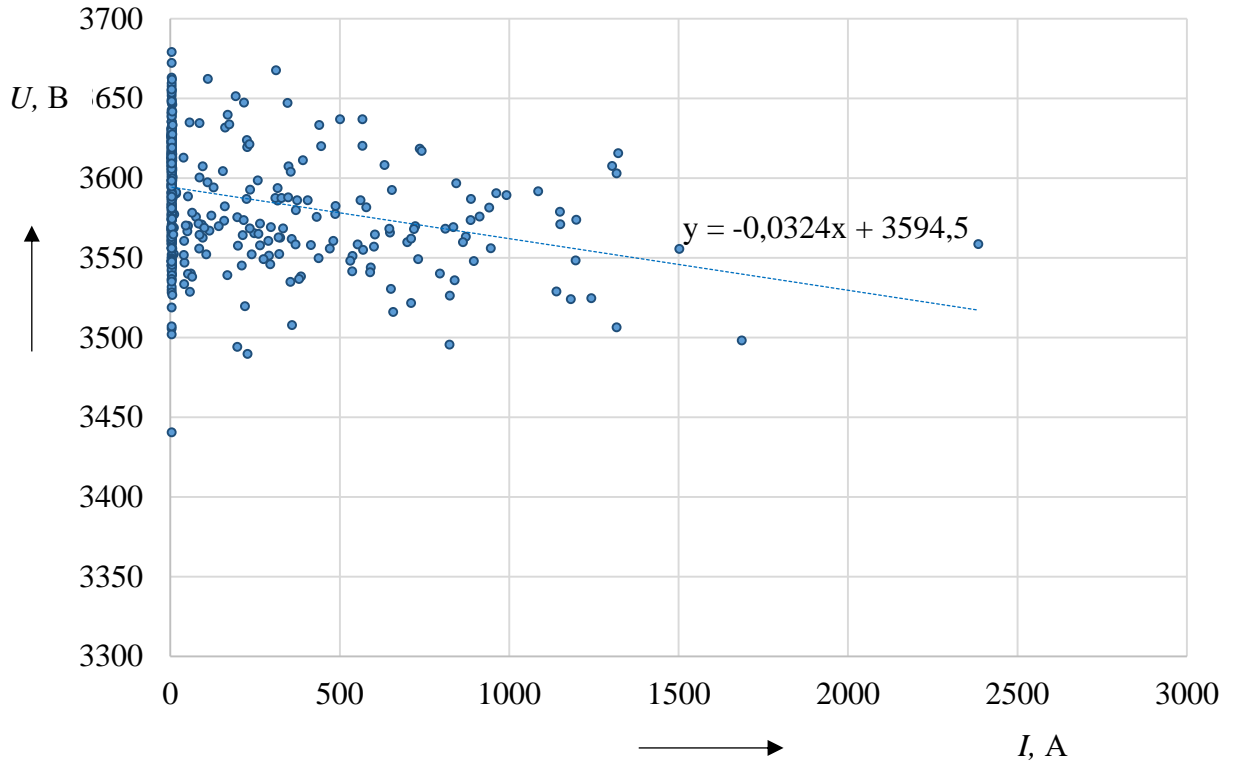


Рисунок 4.4 – Внешняя характеристика ПВА-4 тяговой подстанции Окружная

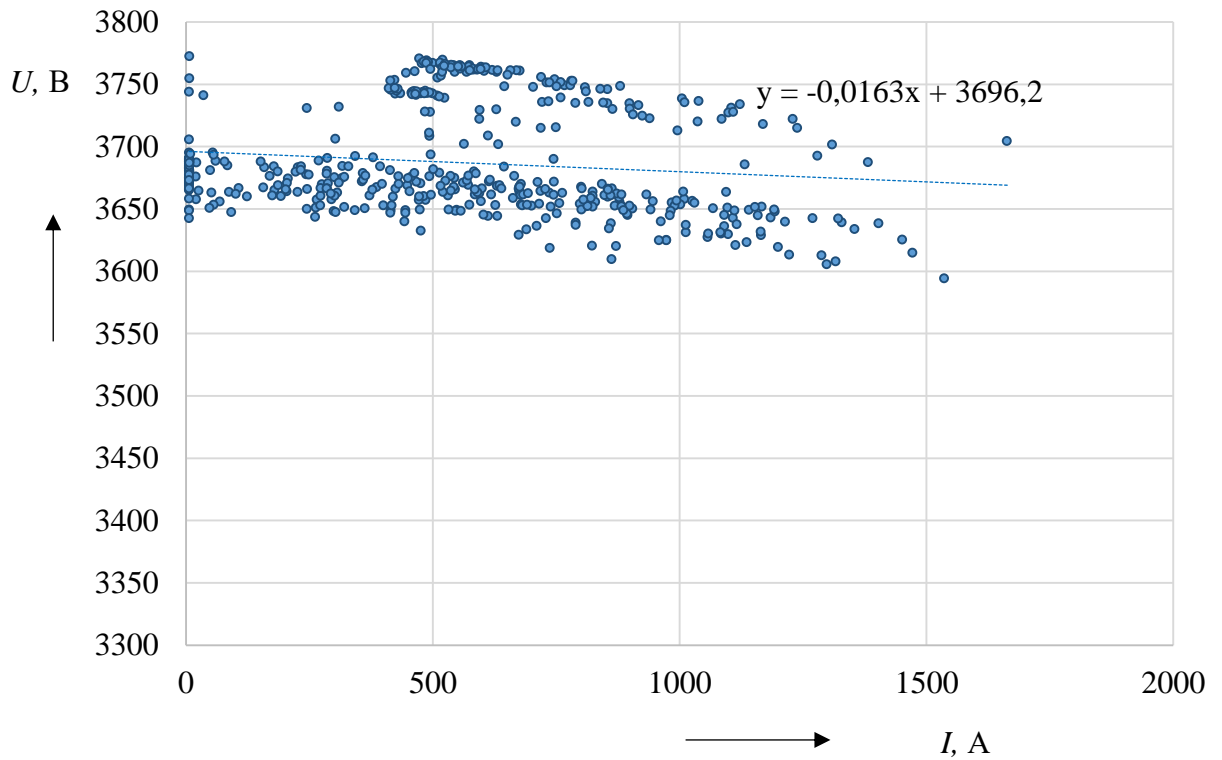


Рисунок 4.5 – Внешняя характеристика ПВА-5 тяговой подстанции Покровское-Стрешнево

Динамика изменения напряжения на шинах 3,3 кВ в течение расчетных суток 10.04.2019 г. для тяговых подстанций Андроновка, Белокаменная, Москва-Киевская, Окружная, Покровское-Стрешнево приведена на рисунках 4.6 – 4.10 соответственно.

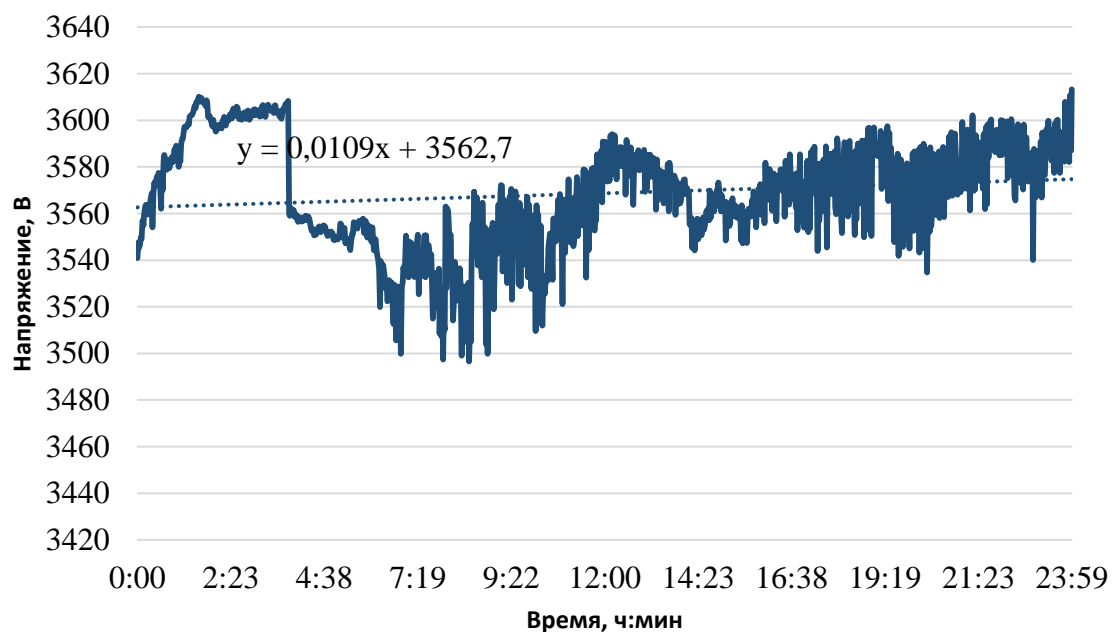


Рисунок 4.6 – График изменения напряжения на шинах 3,3 кВ тяговой подстанции Андроновка

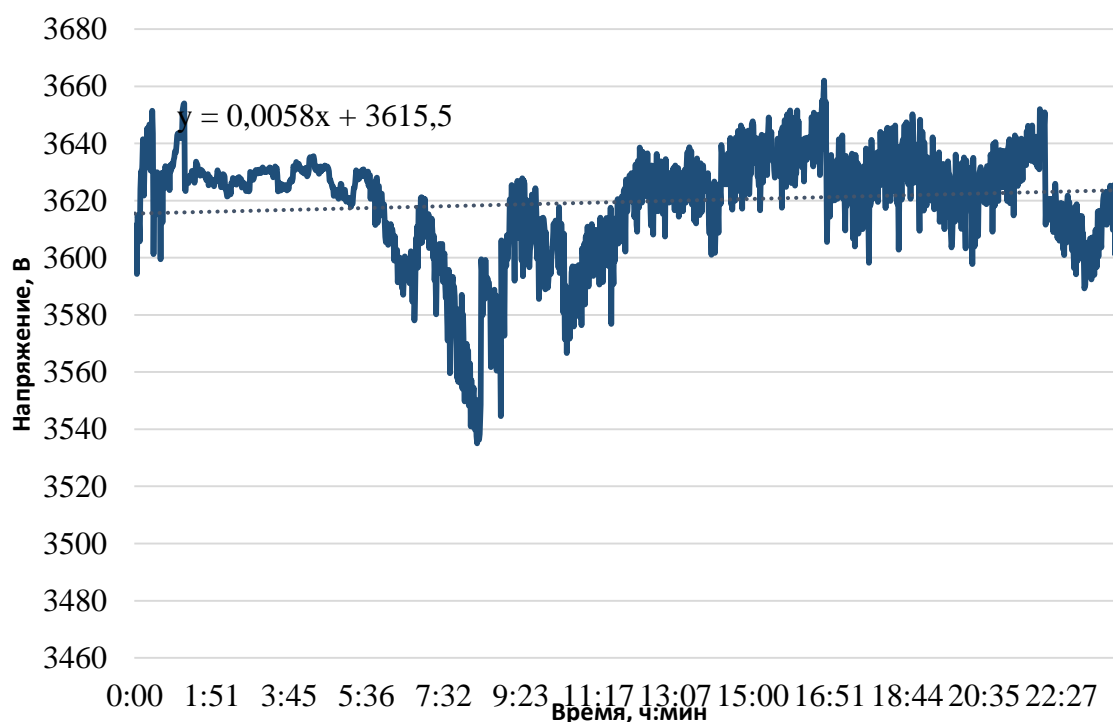


Рисунок 4.7 – График изменения напряжения на шинах 3,3 кВ тяговой подстанции Белокаменная

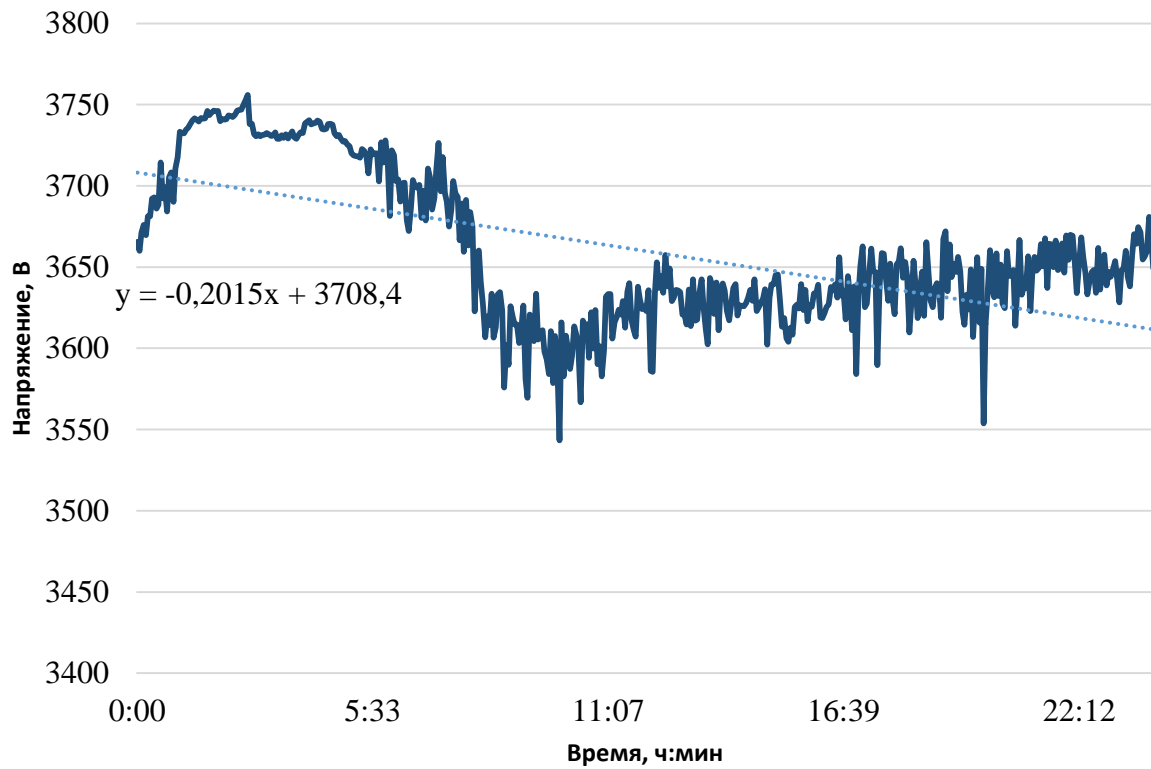


Рисунок 4.8 – График изменения напряжения на шинах 3,3 кВ тяговой подстанции Москва-Киевская

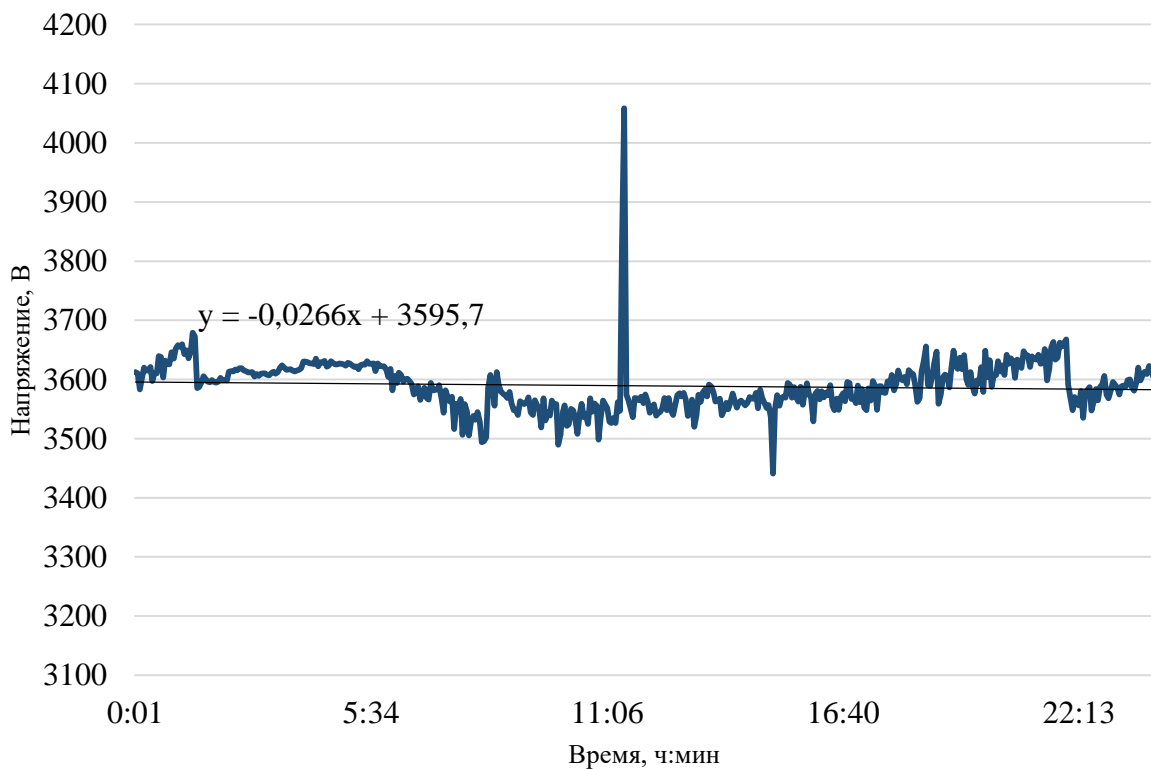


Рисунок 4.9 – График изменения напряжения на шинах 3,3 кВ тяговой подстанции Окружная

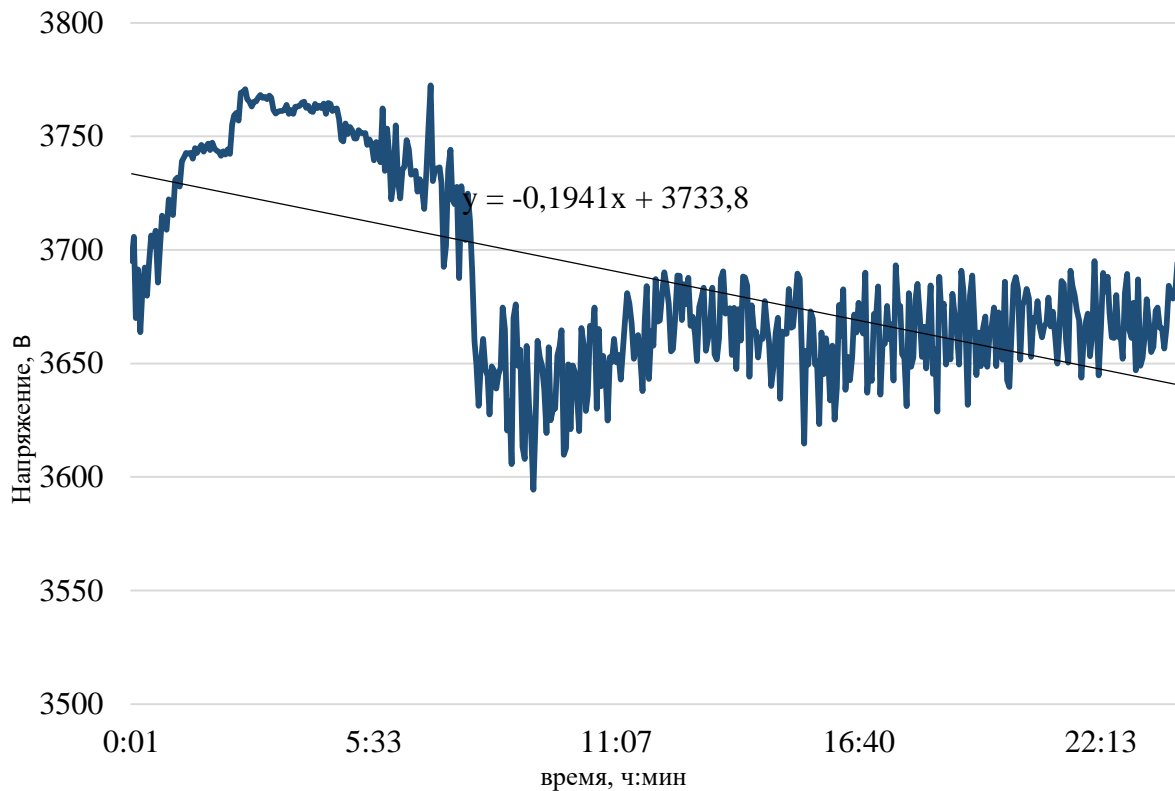


Рисунок 4.10 – График изменения напряжения на шинах 3,3 кВ тяговой подстанции Покровское-Стрешнево

Таким образом, 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. Коэффициент нагрузки выпрямителей тяговых подстанций за сутки 10.04.2019 г. не превышает значения 0,8.

4.2 Размещение накопителей электроэнергии на полигоне Московского центрального кольца

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 также анализа информационной системы ООО «НПО ТрансИнфоПроект». Выбор поездок производился следующим образом: по данным Аналитической системы оценки и контроля уровня небаланса электроэнергии и автоматизированной оценки удельного расхода электроэнергии электроподвижного состава на МЦК были определены средние значения расхода и рекуперации электроэнергии поездами за полный круг обращения за анализируемые сутки по обоим направлениям. Среди представленных файлов поездок из РПД МПСУиД были выбраны поездки с наиболее близкими к усредненным параметрам. Режимы вождения этих поездов легли в основу тяговых расчетов в КОРТЭС. По результатам тяговых расчетов на основании реально смоделированного графика движения поездов за анализируемые сутки был выполнен электрический расчет.

Аналогичные тяговые и электрические расчеты были выполнены для наиболее энергоэффективных поездок (по данным РПД МПСУиД).

Места размещения и энергоемкость накопителей электроэнергии определены по результатам расчета мгновенных схем для диапазона времени обращения пассажирских перевозок на МЦК, а именно с 5:40 до 24:00. Для данного времени получены графики электрических нагрузок и изменения напряжения на шинах тяговых подстанций и линейных устройств. Основой для расчетов по мгновенным схемам были усредненные тяговые расчеты и график исполненного движения на МЦК за указанное время суток.

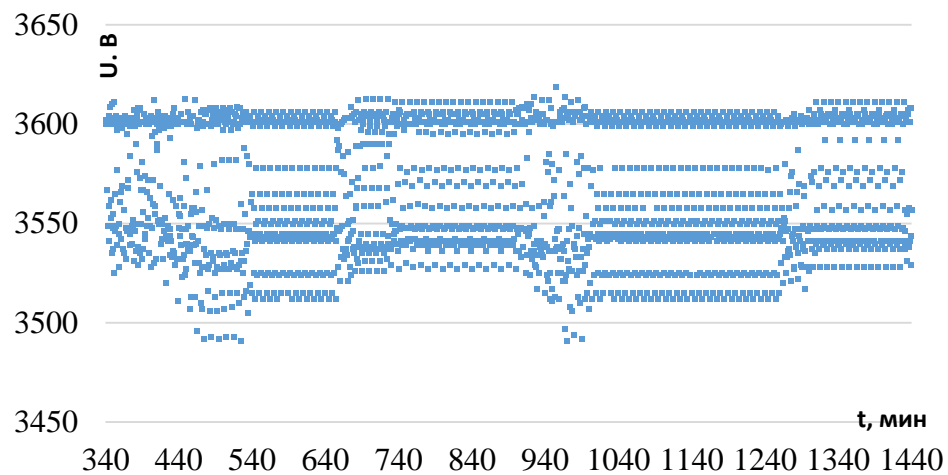
Одним из наиболее эффективных мест размещения накопителей электроэнергии является линейное устройство системы тягового электроснабжения (пост секционирования). Ключевыми условиями применения накопителей электроэнергии на постах секционирования является интенсивное применение электрического торможения электроподвижным составом и возможность подзаряда накопителя электроэнергии в режиме малых нагрузок тяговых подстанций [70].

Система тягового электроснабжения МЦК содержит четыре поста секционирования: ПСК 154 (Черкизово), ПСК 270 (27,1 км), ПСК 445 (44,95 км) и

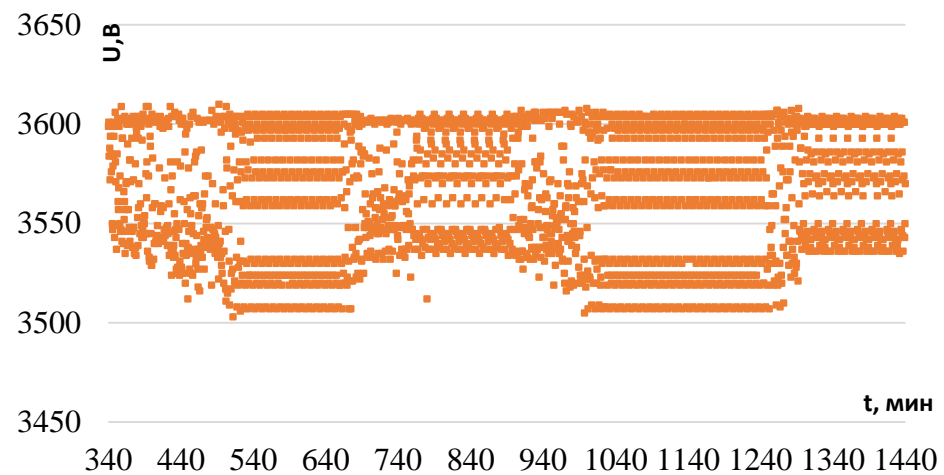
ПСК-1 (0,17 км). Имитационное моделирование работы накопителей электроэнергии выполняется на базе ПК КОРТЭС с помощью теории подобия в два этапа: 1-й этап – интервал графика движения с 340 мин до 1010 мин; 2-й этап – интервал графика движения с 1010 (на ГДП – 950) мин до 1440 (на ГДП – 1380) мин.

Графики изменения напряжения на шинах постов секционирования ПСК 154 (Черкизово), ПСК 270 (27,1 км), ПСК 445 (44,95 км) и ПСК-1 (0,17 км), полученные по результатам имитационного моделирования на основе графика исполненного движения от 10.04.2019 г. приведены на рисунке 4.11. Представленные результаты получены для уставок по напряжению для режимов заряда и разряда соответственно 3600 В и 3550 В.

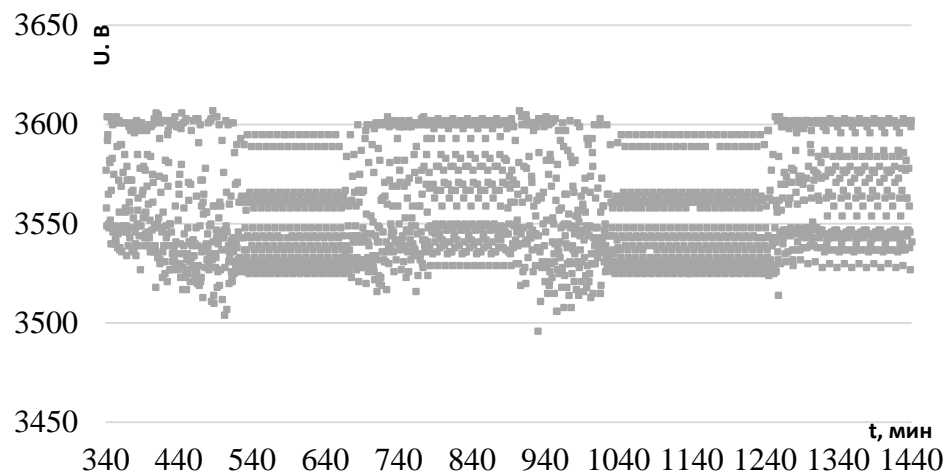
Частотное распределение для расчетных значений напряжения на шинах постов секционирования при размещении накопителей электроэнергии носит различный характер (рисунок Г.1 Приложения Г). Наименьшее значение среднего напряжения на шинах поста секционирования получено для условий работы накопителя электроэнергии на посту секционирования ПСК-1 (3555 В).



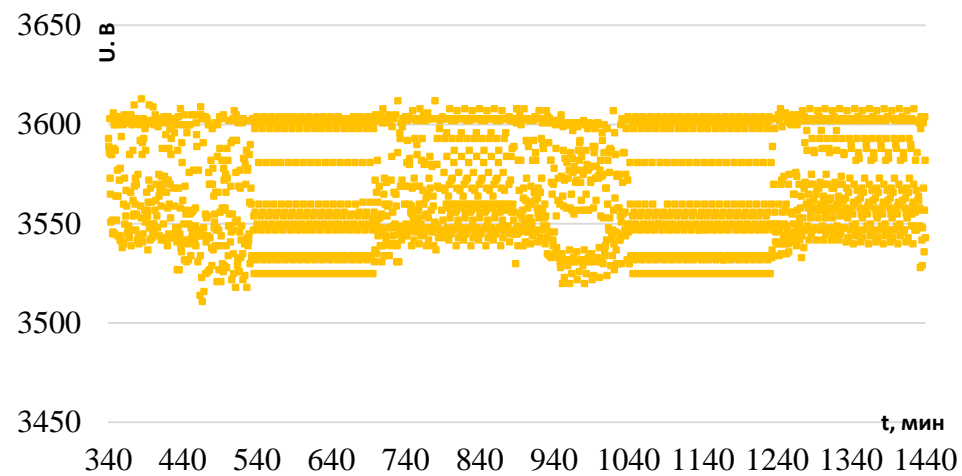
ПСК 270



ПСК 445



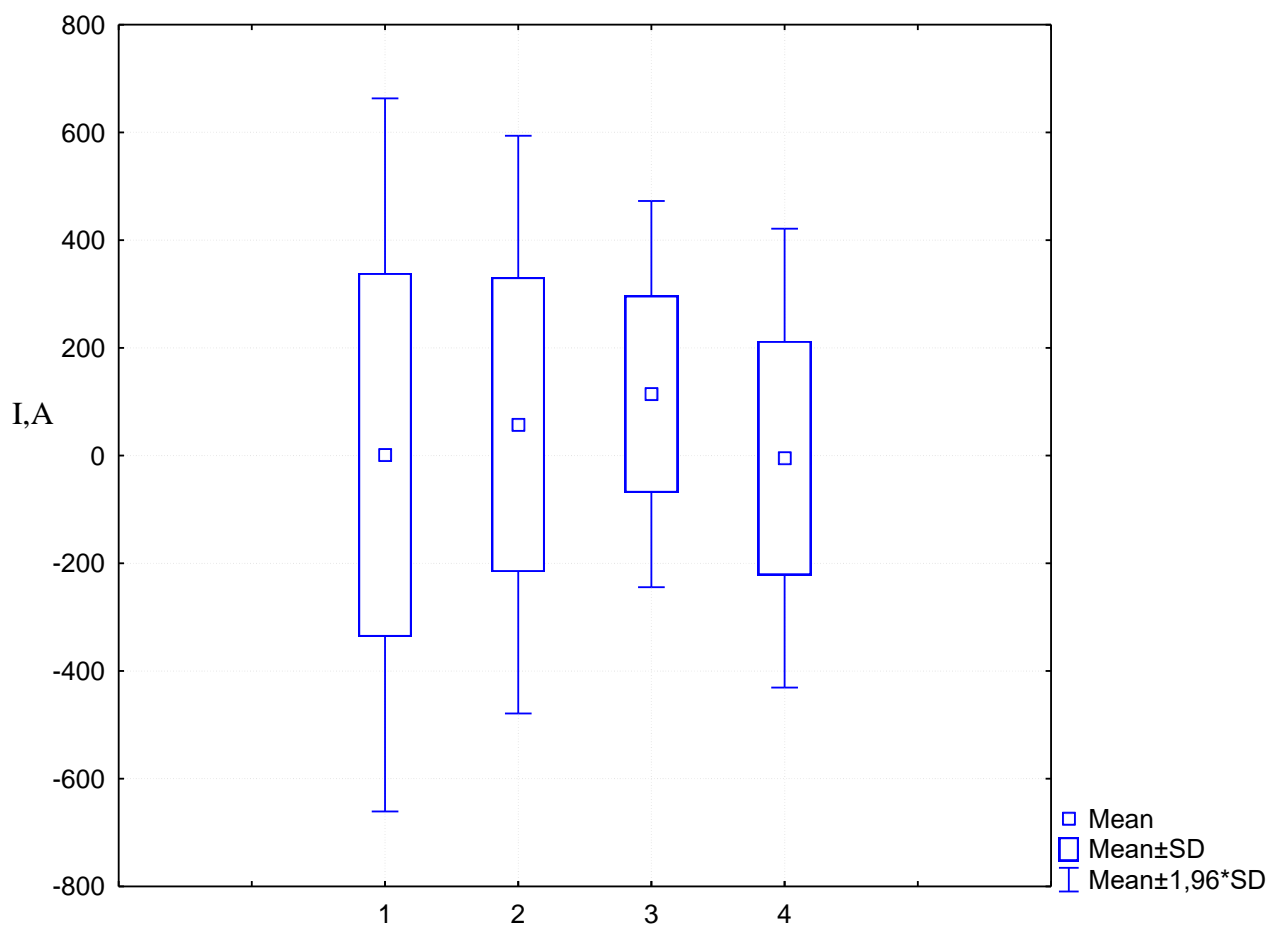
ПСК-1



ПСК Черкизово

Рисунок 4.11 – График изменения напряжения на шинах постов секционирования

Диапазоны изменения токов накопителей электроэнергии на постах секционирования приведены на рисунке 4.12.



1 – ПСК 270, 2 – ПСК 445, 3 – ПСК-1, 4 – ПСК Черкизово

Рисунок 4.12 – Диапазон изменения нагрузки накопителей электроэнергии на шинах постов секционирования

Расчетные характеристики для режимов разряда и заряда применительно к условиям работы накопителей на постах секционирования ПСК 270, ПСК 445, ПСК-1 и ПСК Черкизово представлены на рисунках 4.13 – 4.20.

Частотные гистограммы распределения объемов электроэнергии и продолжительности эпизодов разряда/заряда показывают неравномерный изменчивый характер потоков электроэнергии и характеризуются преобладанием кратковременных эпизодов. Их анализ позволяет сформировать количественную характеристику эпизодичности работы накопителей на постах секционирования.

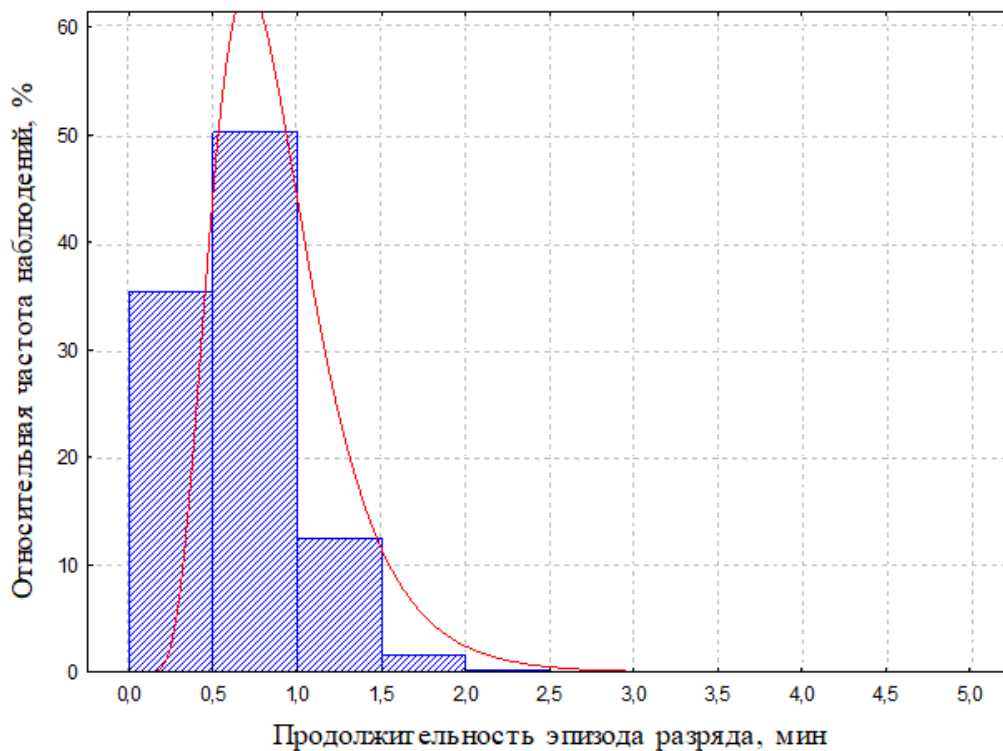
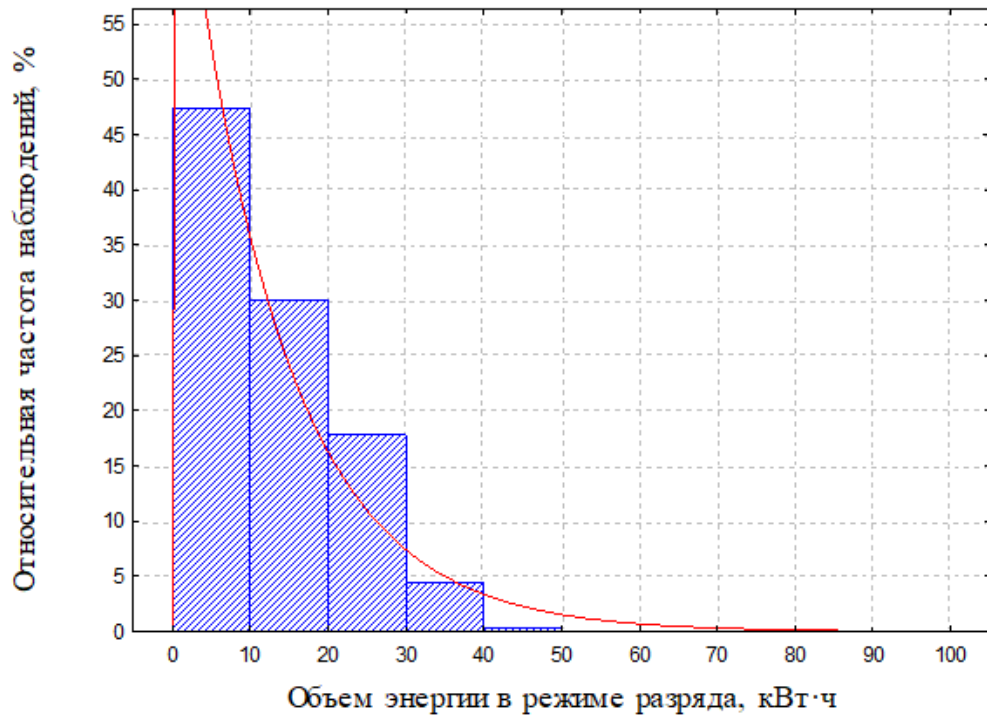


Рисунок 4.13 – Частотная гистограмма распределения объема электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме разряда для ПСК 270

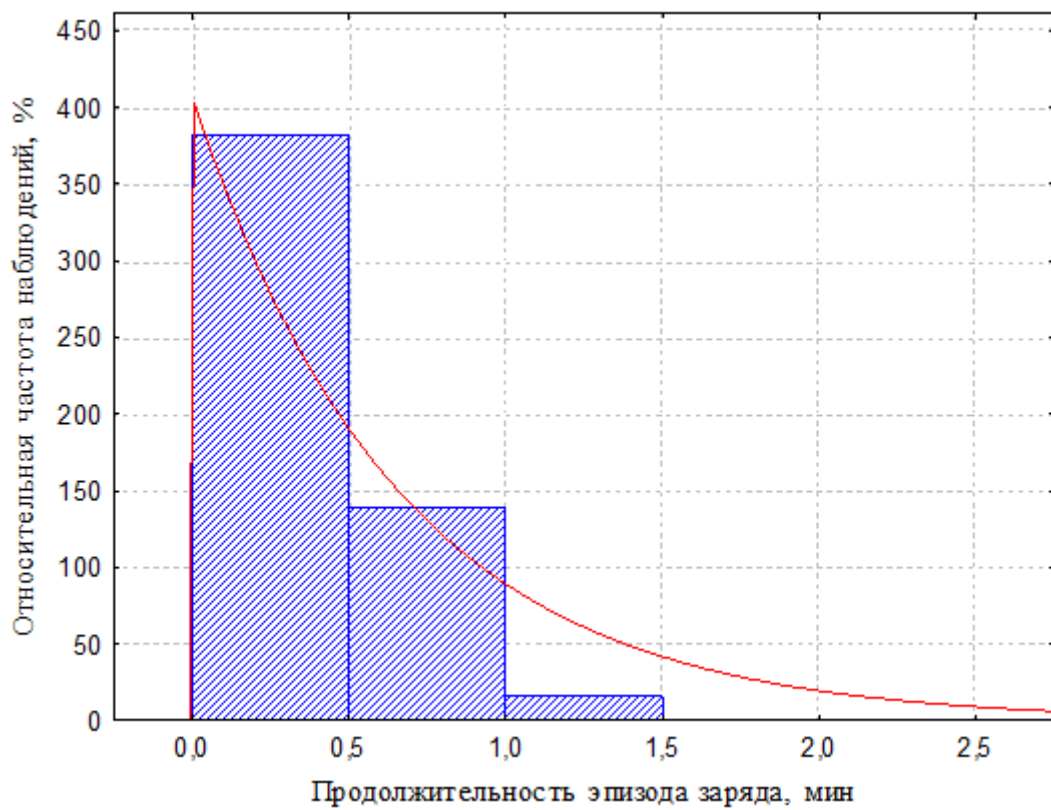
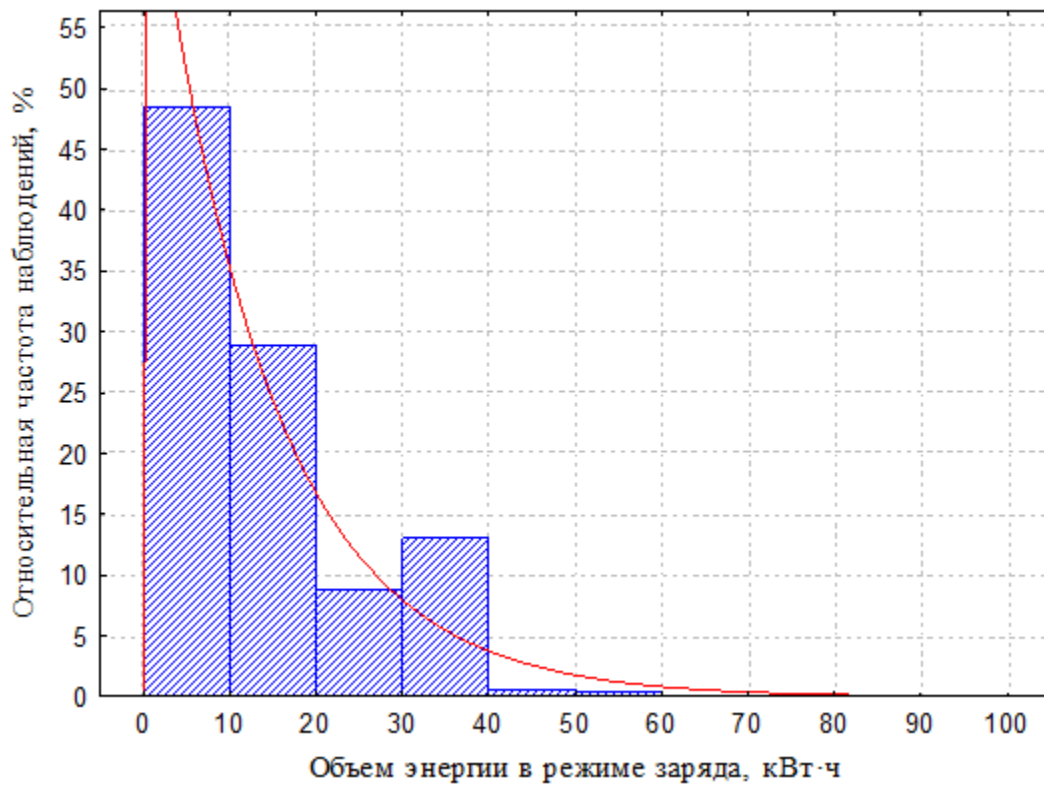


Рисунок 4.14 – Частотное распределение объема электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме заряда для ПСК 270

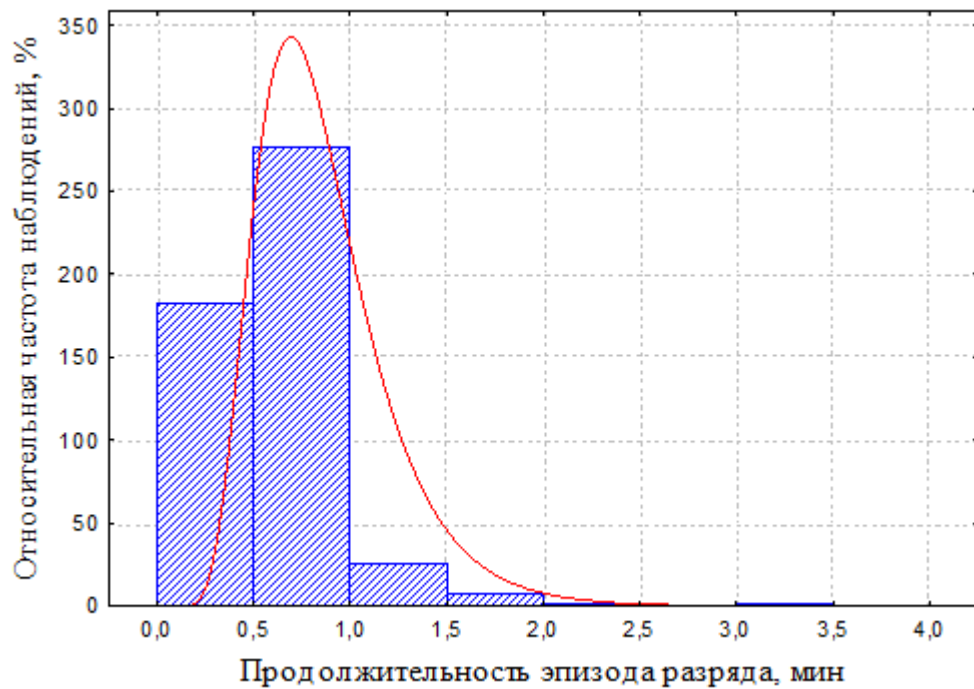
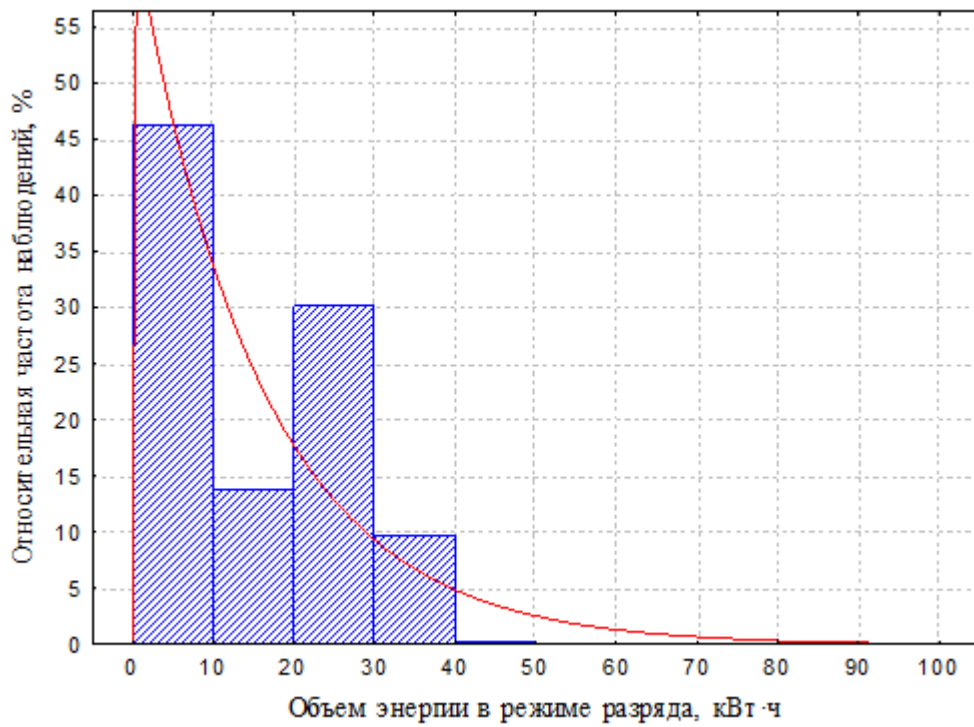


Рисунок 4.15 – Частотное распределение объема электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме разряда для ПСК 445

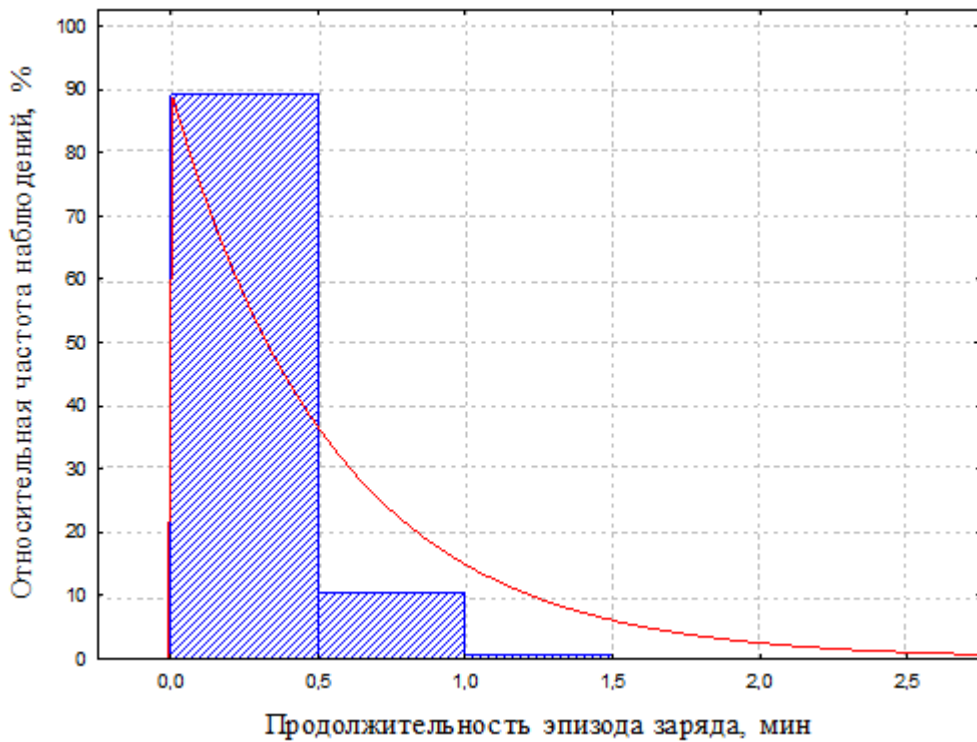
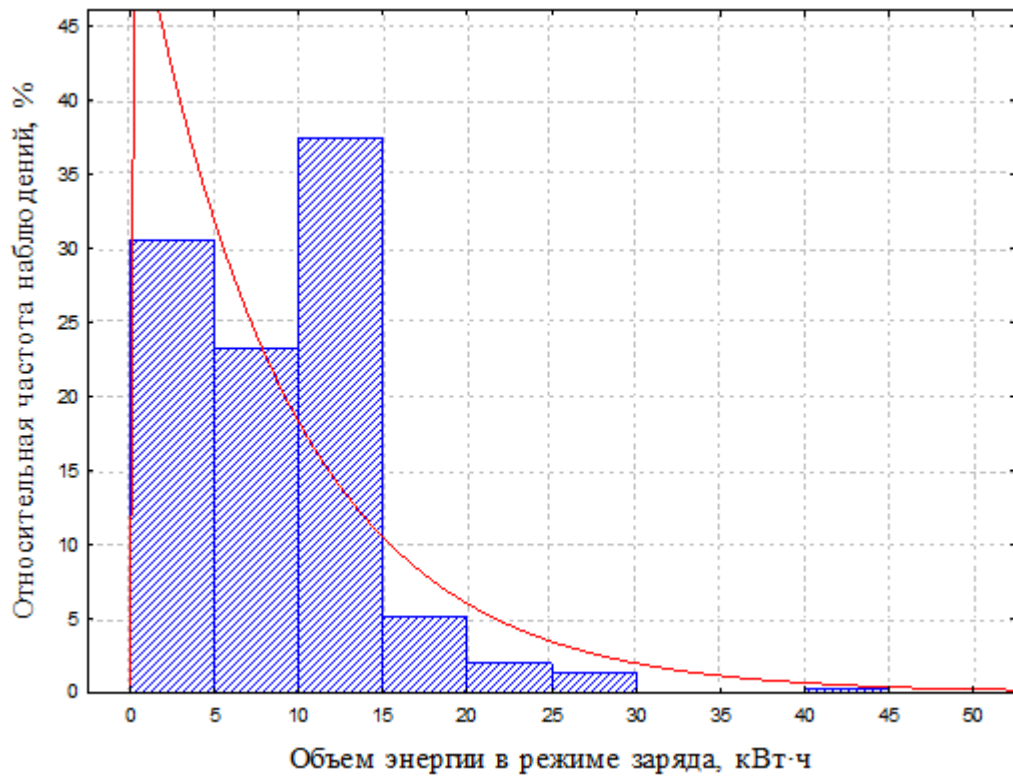


Рисунок 4.16 – Частотное распределение объема электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме заряда для ПСК 445

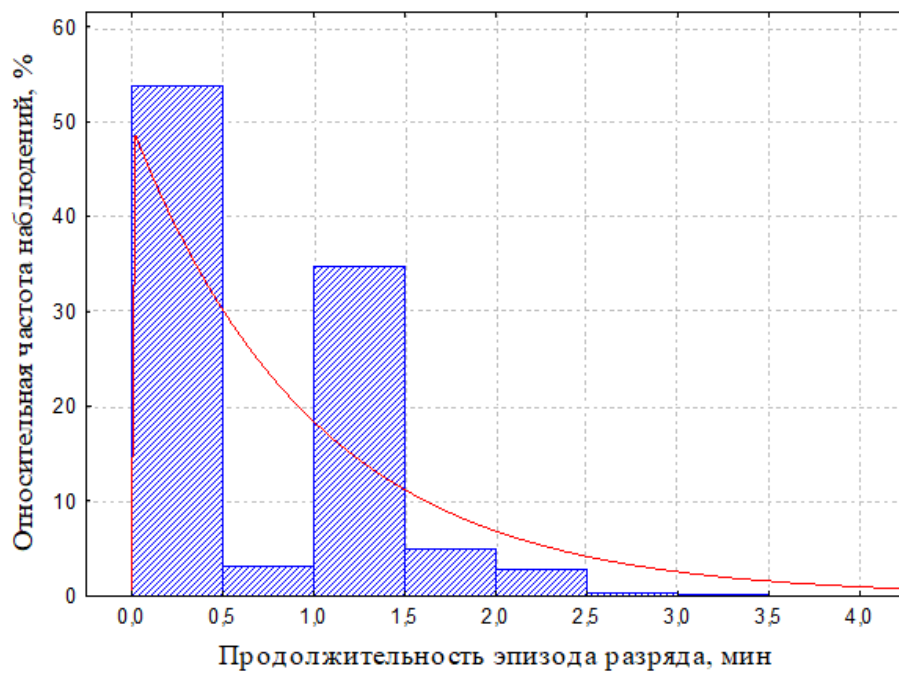
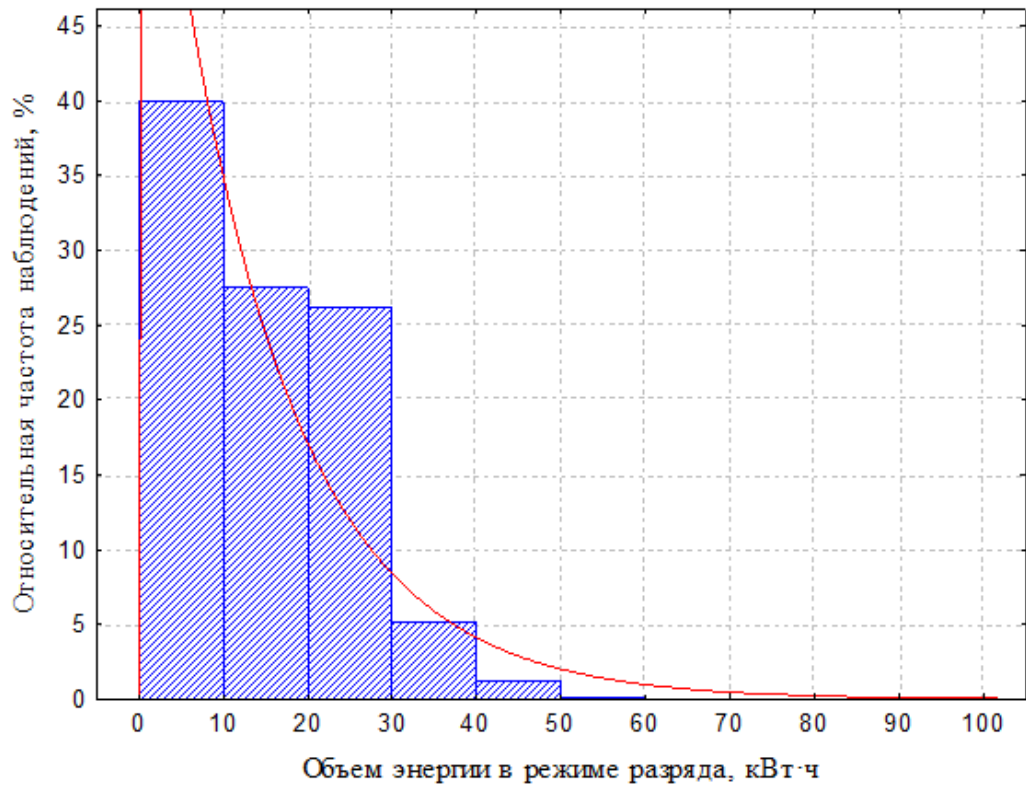


Рисунок 4.17 – Частотное распределение объема электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме разряда для ПСК-1

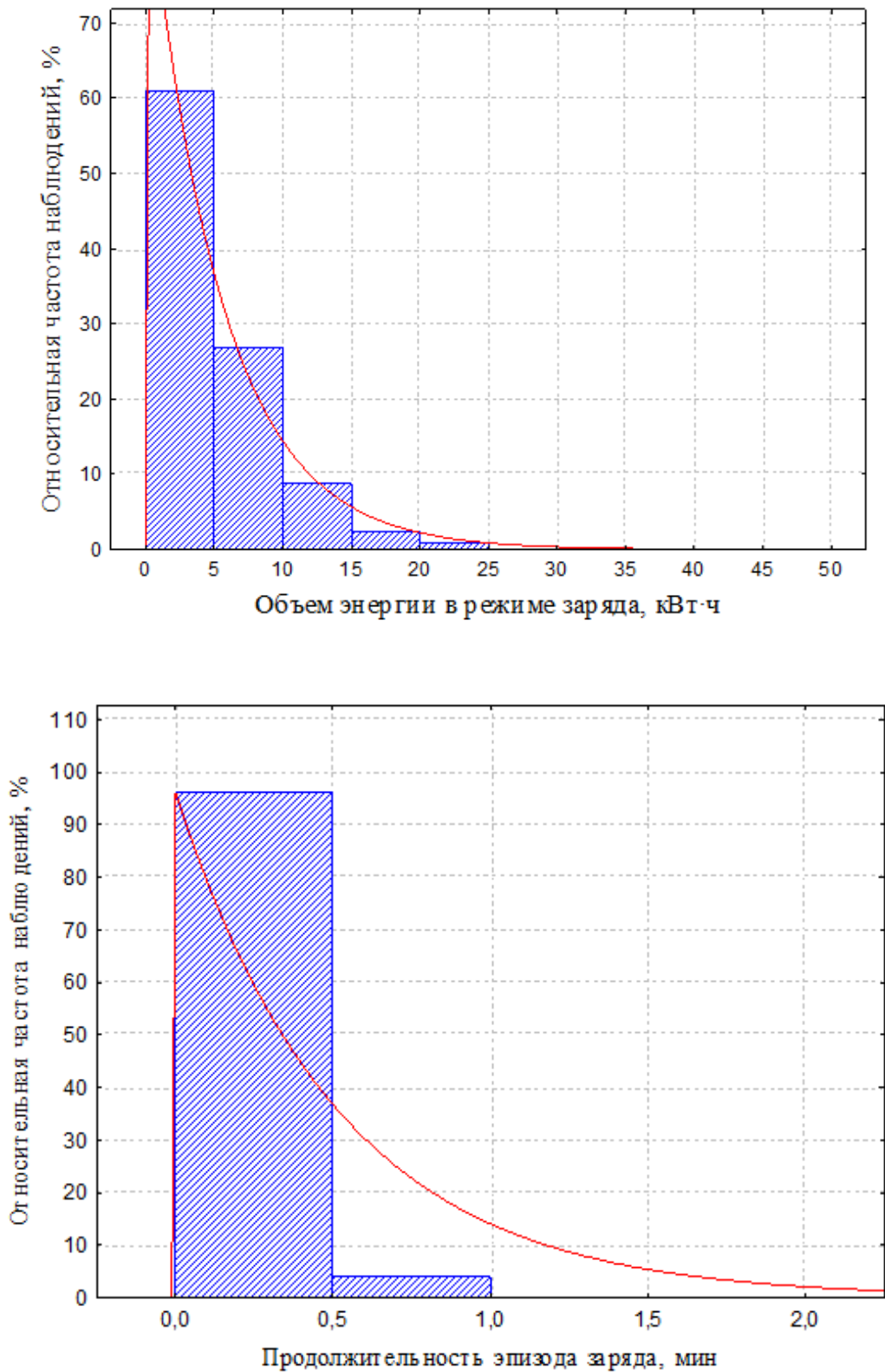


Рисунок 4.18 – Частотное распределение объема электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме заряда для ПСК-1

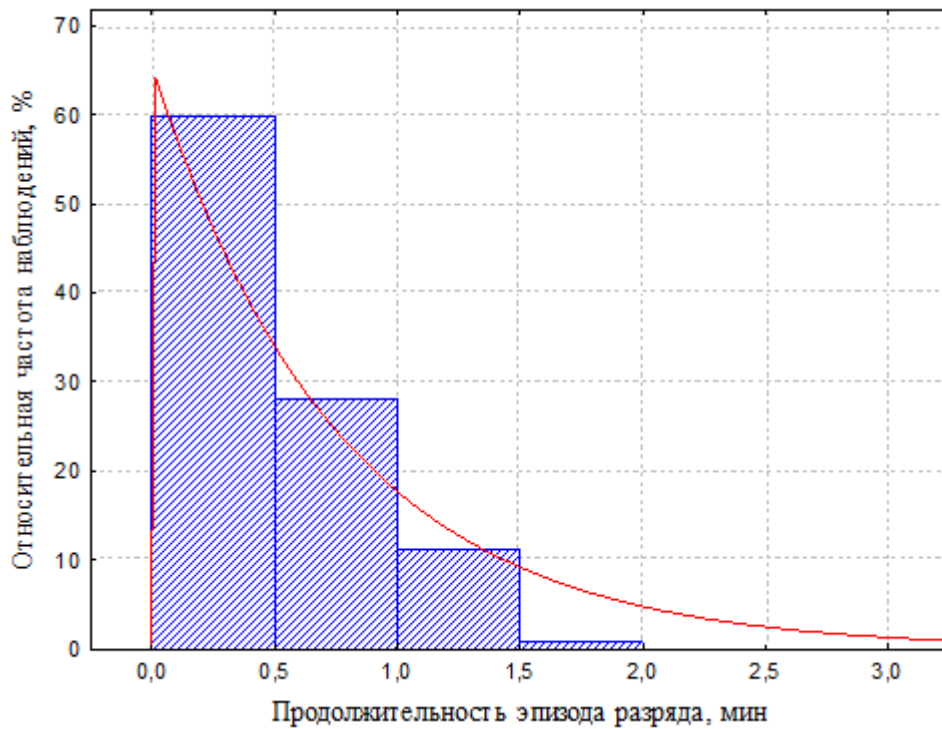


Рисунок 4.19 – Частотное распределение объема электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме разряда для ПСК Черкизово

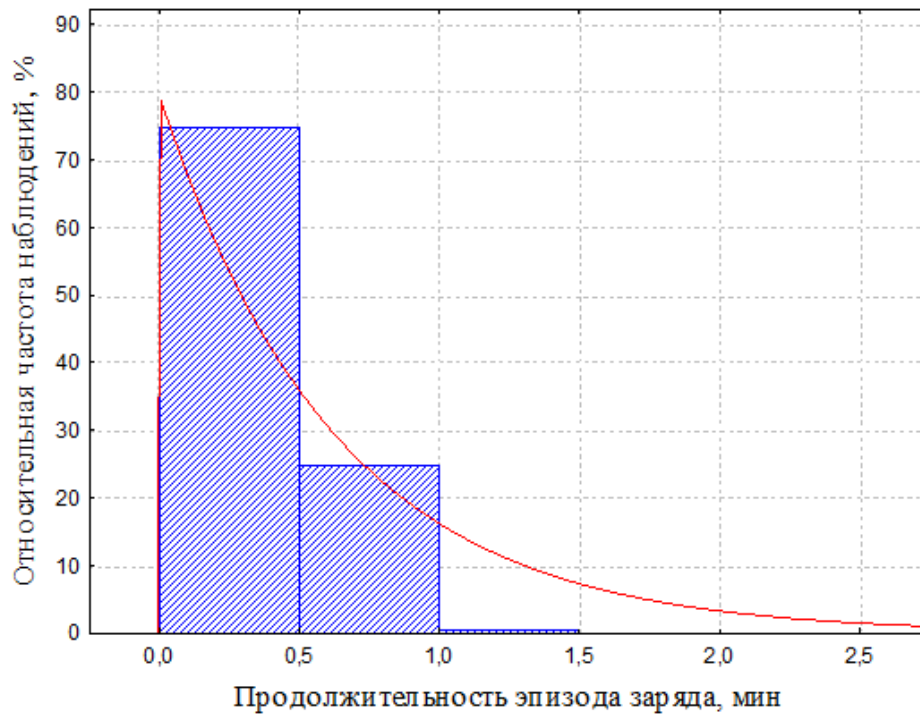
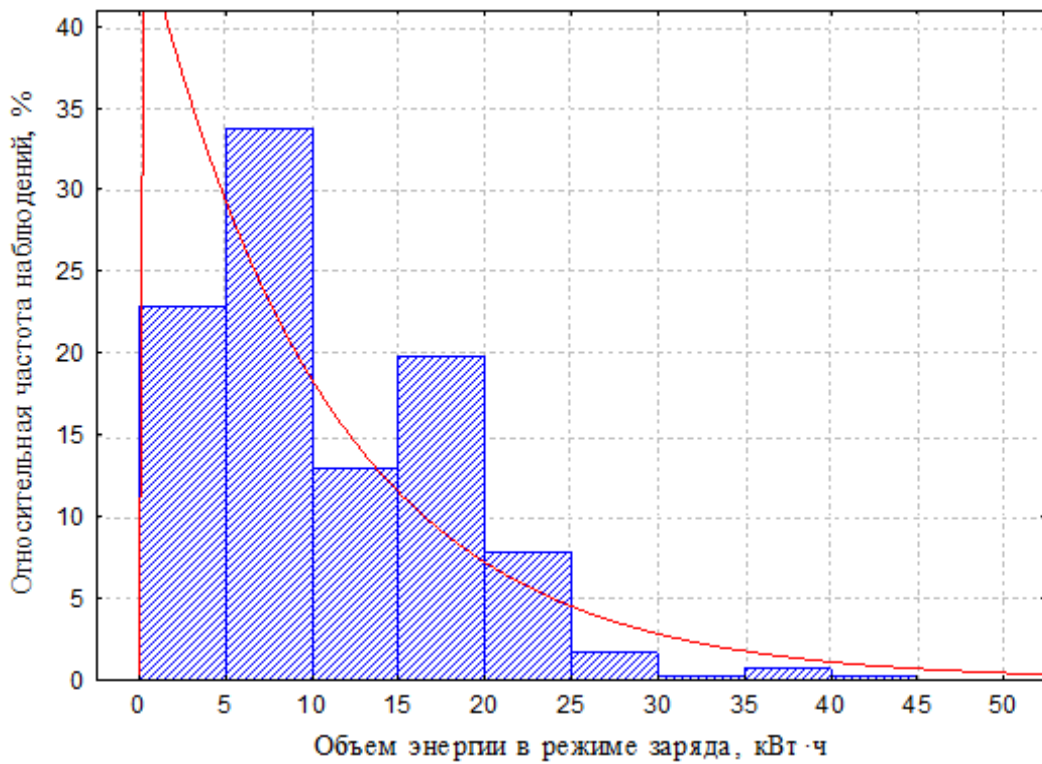


Рисунок 4.20 – Частотное распределение объема электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме заряда для ПСК Черкизово

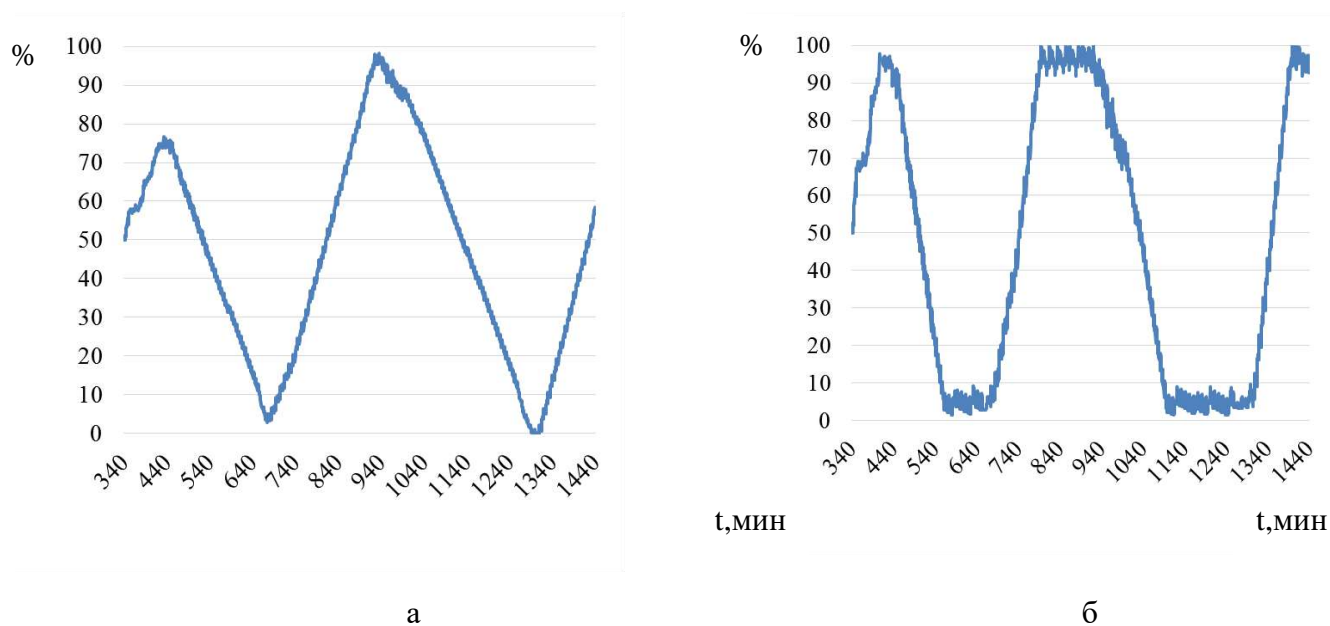
Среднее количество эпизодов работы для режима разряда составляет 542 эпизода, для режима заряда – 404 эпизода.

Таблица 4.2 – Количественная характеристика эпизодичности работы накопителей 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

Оценка энергоемкости выполняется для условий перехода накопителя в режим разряда при понижении уровня напряжения ниже 3550 В включительно, в режим заряда – 3600 В.

При отсутствии ограничений на значение энергоемкости накопителя электроэнергии для условий ПСК 270 требуемая полезная энергоемкость достигает 1185 кВт·ч. Применительно к полезной энергоемкости график изменения степени заряженности исходя из допущения того, что начальная степень заряженности $SOC_{нач} = 50\%$, приведен на рисунке 4.21.

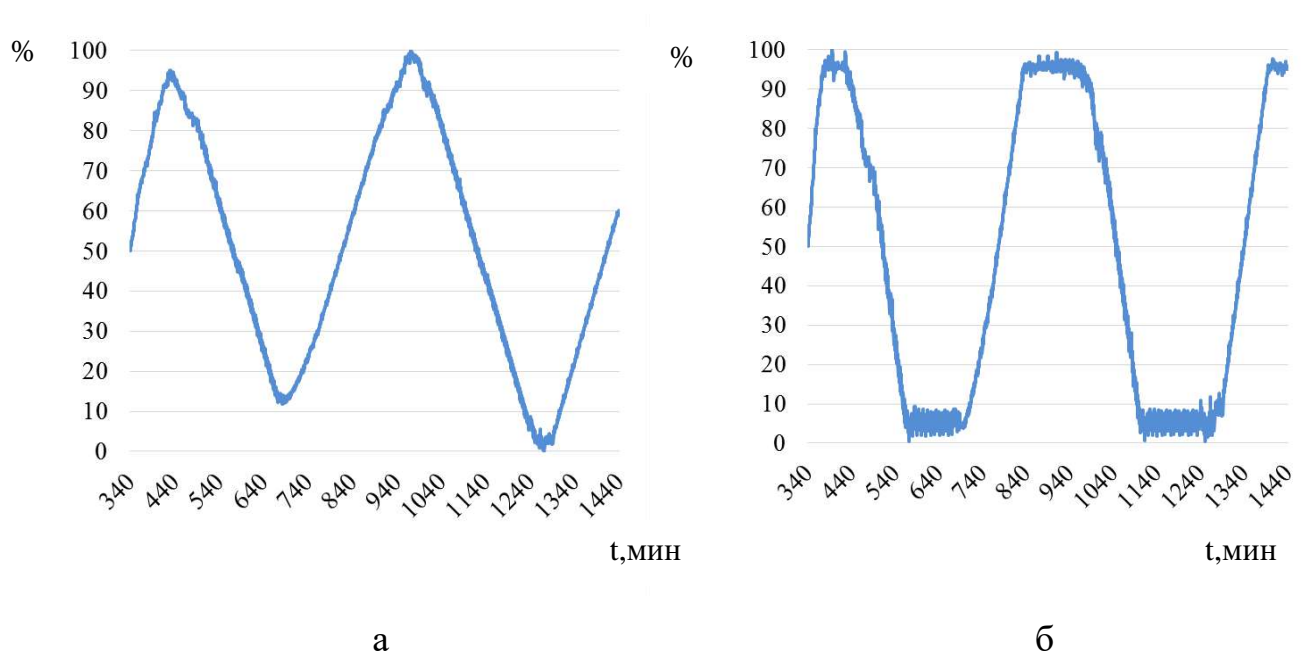


а – без ограничений на энергоемкость, б – с ограничением 500 кВт·ч

Рисунок 4.21 – График изменения SOC для накопителя на ПСК 270

При отсутствии ограничений на значение энергоемкости накопителя электроэнергии для ПСК 445 требуемая полезная энергоемкость достигает 1078 кВт·ч. В отличие от графика SOC для ПСК 270 в рассматриваемом случае график SOC не является уравновешенным, что связано с дефицитом мощности в режиме заряда. Анализ графика нагрузки тяговых подстанций и напряжения на шинах подстанций без применения накопителей электроэнергии показывает на имеющийся резерв мощности, который возможно использовать для подзаряда накопителя малыми токами в режиме ожидания. Для условий поста секционирования ПСК 445 ток подзаряда должен составлять 133 А, что эквивалентно отбору мощности от контактной сети в размере около 450 кВт.

График изменения степени заряженности исходя при допущении того, что начальная степень заряженности $SOC_{нач}=50\%$ приведена на рисунке 4.22, а. При введении ограничений на полезную энергоемкость в размере 500 кВт·ч график изменения SOC, при условии сохранения мощности подзаряда, не изменяет цикличность и существенно не меняет свой характер (рисунок 4.22, б).



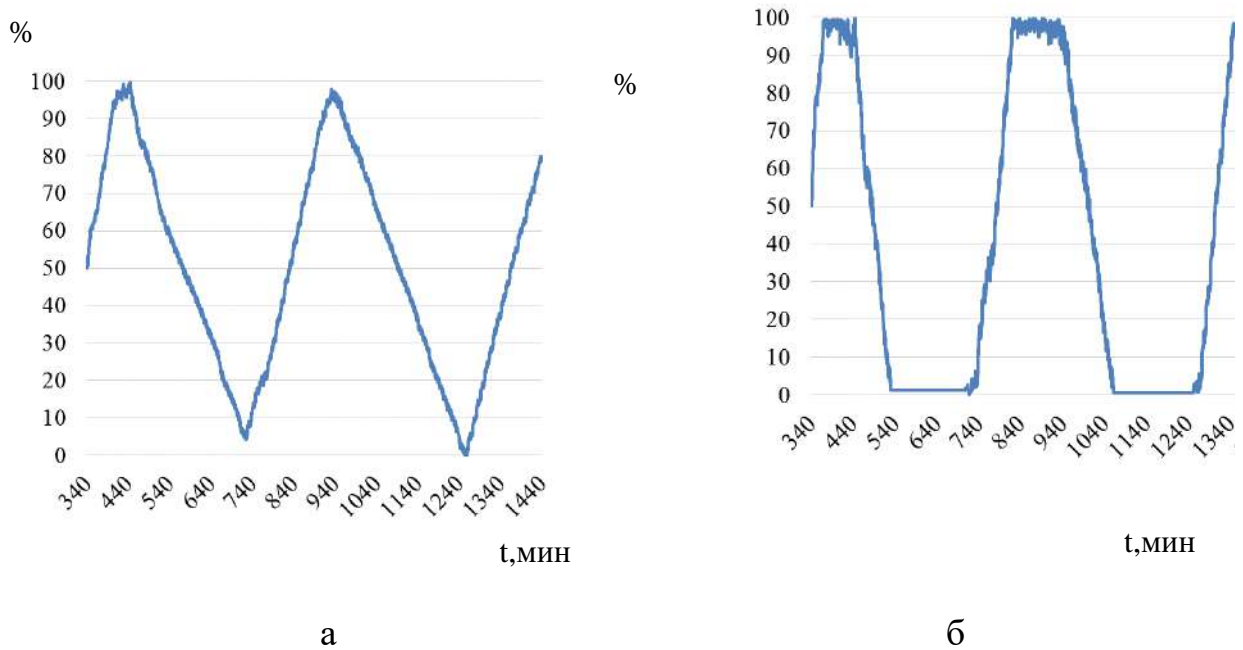
а – без ограничений на энергоемкость, б – с ограничением 500 кВт·ч

Рисунок 4.22 – График изменения SOC для накопителя на ПСК 445

Суммарный объем электроэнергии за сутки в режиме разряда во втором случае падает относительно первого с 7612 кВт·ч до 6198 кВт·ч, то есть на 18,6 %, в режиме заряда за счет подзаряда увеличивается – 6427 кВт·ч против 3982 кВт·ч, то есть на 61,4 %. При введении ограничений на энергоемкость до 300 кВт·ч и 200 кВт·ч наблюдается снижение объемов для режима разряда на 25,3 % и 28,7 % соответственно, увеличение объемов для режима заряда – на 46,0 % и 38,4 % соответственно.

При отсутствии ограничений на значение энергоемкости накопителя электроэнергии для ПСК-1 требуемая полезная энергоемкость достигает 1286 кВт·ч. Условия работы предполагают обеспечение уравновешенного режима путем подзаряда в режиме ожидания. Для условий поста секционирования ПСК-1 требуемый ток подзаряда составляет 315 А, что эквивалентно мощности 1000 кВт. Питающими подстанциями для рассматриваемой межподстанционной зоны выступают тяговые подстанции Покровское-Стрешнево и Белокаменная. Для обеих тяговых подстанций нагрузочная способность выпрямителей не превышает 50 %. Не является критичным и минимальное значение напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, как это будет показано далее. В связи с этим увеличение нагрузки на указанные подстанции за счет возникновения тока подзаряда в периоды, когда напряжение на посту секционирования находится в диапазоне от 3550 В до 3600 В, представляется целесообразным, и при двухстороннем питании не несет рисков в части возникновения критических значений показателей нагрузочной способности системы тягового электроснабжения на рассматриваемой межподстанционной зоне.

График изменения степени заряженности при допущении того, что начальная степень заряженности $SOC_{нач}=50\%$, приведен на рисунке 4.23, а.



а – без ограничений на энергоёмкость, б – с ограничением 500 кВт·ч

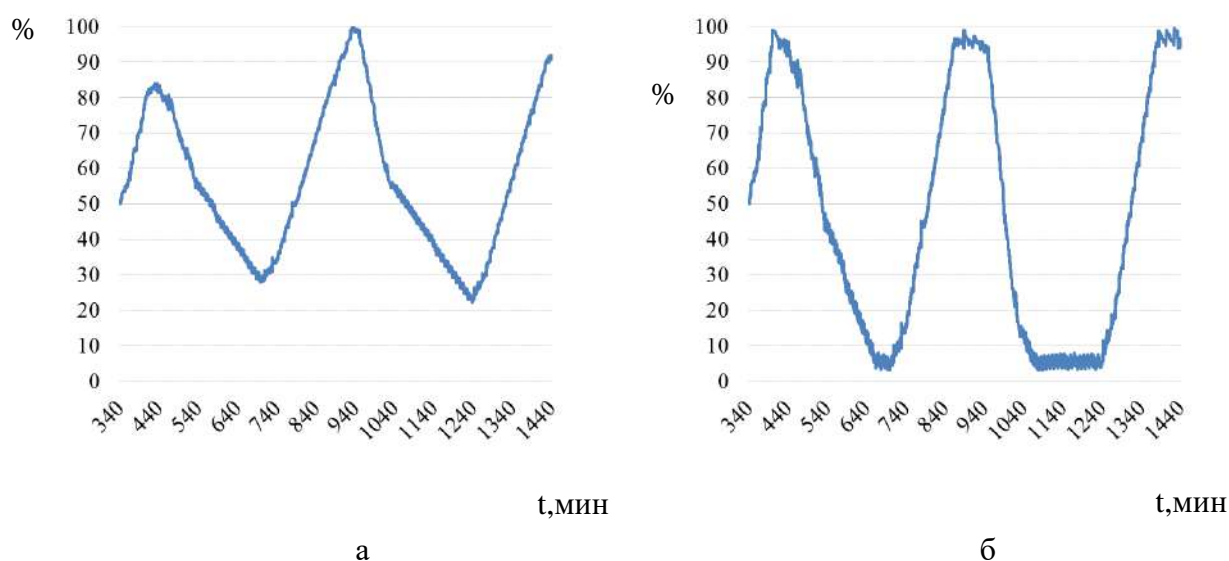
Рисунок 4.23 – График изменения SOC для накопителя на ПСК-1

При введении ограничений на полезную энергоёмкость в размере 500 кВт·ч график изменения SOC при условии сохранения мощности подзаряда не изменяет цикличность и свой характер (рисунок 4.23, б). Суммарный объем электроэнергии за сутки в режиме разряда во втором случае падает относительно первого с 8240 кВт·ч до 4227 кВт·ч, то есть на 48,7 %, в режиме заряда за счет подзаряда увеличивается – 4467 кВт·ч против 1079 кВт·ч, то есть более, чем в три раза. При введении ограничений на энергоёмкость до 300 кВт·ч и 200 кВт·ч наблюдается снижение объемов электроэнергии для режима разряда на 59,8 % (3316 кВт·ч) и 65,9 % (2811 кВт·ч) соответственно и увеличение объемов для режима заряда – более чем в три (3453 кВт·ч) и в два (2894 кВт·ч) раза соответственно.

При отсутствии ограничений на значение энергоёмкости накопителя электроэнергии для ПСК Черкизово требуемая полезная энергоёмкость достигает 950 кВт·ч. График SOC для условий поста секционирования ПСК Черкизово является уравновешенным, подзаряд в режиме ожидания работы накопителя не требуется. Питающими подстанциями для рассматриваемой межподстанционной зоны выступают тяговые подстанции Белокаменная и Андроновка.

Для обеих тяговых подстанций нагрузочная способность выпрямителей не превышает 40 %. Не является критичным и минимальное значение напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, как это будет показано далее. В связи с этим увеличение нагрузки на указанные подстанции за счет возникновения тока подзаряда в периоды, когда напряжение на посту секционирования находится в диапазоне от 3550 В до 3600 В, представляется целесообразным и при двухстороннем питании не несет рисков в части возникновения критических значений показателей нагрузочной способности системы тягового электроснабжения на рассматриваемой межподстанционной зоне.

График изменения степени заряженности исходя при допущении того, что начальная степень заряженности $SOC_{нач}=50\%$ приведена на рисунке 4.24, а. При введении ограничений на полезную энергоемкость в размере 500 кВт·ч график изменения SOC сохраняет свой характер (рисунок 4.24, б).



а – без ограничений на энергоемкость, б – с ограничением 500 кВт·ч

Рисунок 4.24 – График изменения SOC для накопителя на ПСК Черкизово

4.3 Результаты оценки энергоемкости для условий работы накопителя

По результатам оценки энергоемкости для накопителей электроэнергии на постах секционирования МЦК можно сделать 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.

4.4 Оценка влияния внедрения накопителей электроэнергии на режимы работы системы тягового электроснабжения

Размещение накопителей электроэнергии на постах секционирования позволяет улучшить показатели нагрузочной способности системы тягового электроснабжения и повысить энергетическую эффективность перевозочного процесса [71].

Ранее отмечалось, что высокий уровень напряжения холостого хода существенно снижает эффективность рекуперативного торможения. При размещении на подстанциях указанный уровень напряжения делает нецелесообразным применение как выпрямительно-инверторных преобразователей, так и накопителей электроэнергии. В указанном случае высокий уровень напряжения холостого хода на уровне 3650 В и выше является избыточным по причине отсутствия высокой загрузки силового оборудования подстанций и отсутствия проблем с низким уровнем напряжения в контактной сети. В тоже время для систем накопления электроэнергии целесообразным представляется уровень напряжения холостого хода на уровне 3550 – 3600 В.

Рассмотрим результаты расчета показателей нагрузочной способности для базового варианта, в качестве которого принимается существующий вариант, в котором отсутствуют системы накопления электроэнергии или другие приемники энергии рекуперативного торможения электроподвижного состава [70].

В качестве исходных условий, по причинам, указанным выше, принимается, что высокий уровень напряжения холостого хода на тяговых подстанциях в диапазоне 3600 – 3750 В исключен и заменен уровнем 3550 – 3600 В.

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

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

$$k_{н.вт} = \frac{I_{dt}}{\sum I_{в ном} \cdot k_{доп в т}}, \quad (4.5)$$

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) [70]

Результаты расчета коэффициентов нагрузки выпрямителей тяговых подстанций МЦК для базового варианта (баз) и варианта (вар), для которого накопители электроэнергии расположены на постах секционирования, приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Коэффициенты нагрузки выпрямителей подстанций МЦК

Наименование подстанции	Интервал усреднения									
	0,25 мин.		2 мин.		15 мин.		30 мин.		средн.	
	баз	вар	баз	вар	баз	вар	баз	вар	баз	вар
Андроновка	0,42	0,31	0,20	0,16	0,14	0,11	0,13	0,10	0,07	0,05
Окружная	0,60	0,46	0,32	0,25	0,21	0,17	0,21	0,17	0,11	0,09
Москва-Киевская	0,45	0,39	0,24	0,22	0,17	0,15	0,17	0,15	0,08	0,07
Покровско-Стрешнево	0,65	0,42	0,33	0,25	0,26	0,19	0,25	0,18	0,12	0,10
Белокаменная	0,34	0,27	0,20	0,19	0,13	0,11	0,13	0,11	0,07	0,06

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

$$\Delta k_{н.в.т} = \frac{k_{н.в.т}^{баз} - k_{н.в.т}^{вар}}{k_{н.в.т}^{баз}} \cdot 100, \quad (4.6)$$

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.

Результаты расчета изменения коэффициентов нагрузки выпрямителей тяговых подстанций МЦК приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчета изменения коэффициентов нагрузки выпрямителей

Наименование подстанции	Снижение коэффициента по интервалам усреднения, %				
	0,25 мин	2 мин	15 мин	30 мин	средн.
Андроновка	26,2	20,0	21,4	23,1	28,6
Окружная	23,3	21,9	19,0	19,0	18,2
Москва-Киевская	13,3	8,3	11,8	11,8	12,5
Покровское-Стрешнево	35,4	24,2	26,9	28,0	16,7
Белокаменная	20,6	5,0	15,4	15,4	14,3

Оценка объемов электроэнергии в режимах разряда и заряда проводится для условий размещения накопителей электроэнергии на постах секционирования МЦК. Результаты расчета объема энергии в режимах разряда и заряда за сутки приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Оценка объемов электроэнергии накопителей электроэнергии на постах секционирования

Наименование поста секционирования	Объем электроэнергии по режимам работы, кВт·ч	
	разряд	заряд
ПСК 270	9028	12100
ПСК 445	9222	3866
ПСК-1	9113	1522
ПСК Черкизово	3663	4372

Наибольшее сокращение коэффициента нагрузки выпрямителей отмечено на тяговых подстанции Покровское-Стрешнево и Андроновка, снижение уровня

коэффициента нагрузки выпрямителей составляет свыше 25 % и 35 % соответственно (рисунок 4.25).

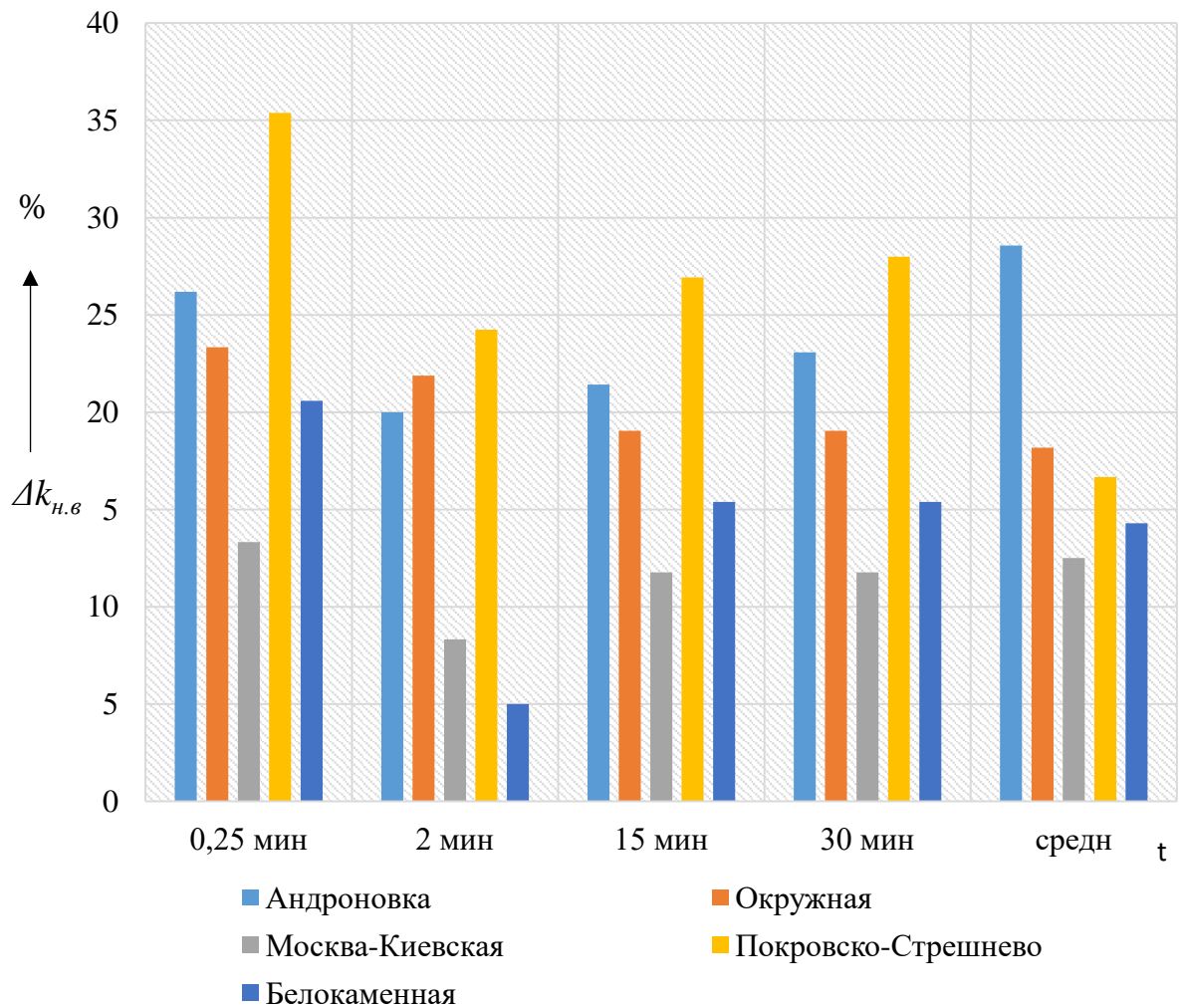


Рисунок 4.25 – Гистограмма минимальных напряжений на токоприемнике по перегонам МЦК для рассматриваемых вариантов

Сравнение объемов электроэнергии накопителя $W_{нээ}$ по постам секционирования показывает необходимость балансировки объемов электроэнергии (рисунок 4.26). Как было показано выше, это достигается за счет реализации подзаряда в режиме ожидания при напряжениях на шинах поста секционирования близких напряжению холостого хода тяговых подстанций [70].

Результаты расчетов минимального трехминутного напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, выполненные на основе

имитационного моделирования, свидетельствуют об отсутствии проблем с понижением напряжения ниже допустимого уровня. Применение накопителей электроэнергии на постах секционирования позволяет поднять уровень минимального напряжения.

С целью оценки эффекта накопителя по стабилизации напряжения на шинах поста секционирования выполним сравнение вариантов по величине минимального и одноминутного напряжения. Результаты расчетов минимального одноминутного напряжения для базового варианта (существующий вариант реализации системы тягового электроснабжения МЦК) приведены в таблице 4.6 [71].

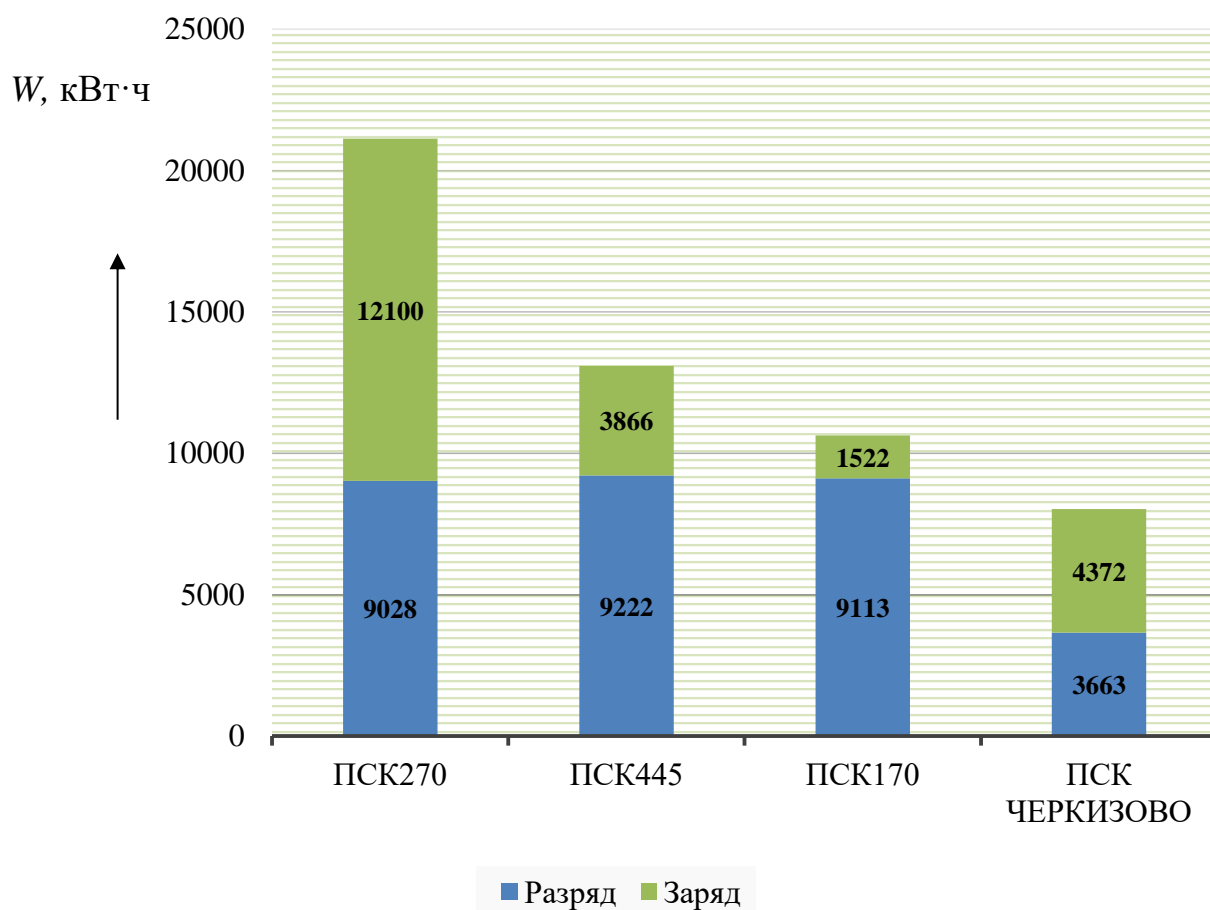


Рисунок 4.26 – Гистограмма объемов электроэнергии накопителей электроэнергии по режимам работы

Таблица 4.6 – Значения минимального напряжения по перегонам МЦК для базового варианта

Участок	Путь	$U_3, В$		Поезд, №, ордината, км
		мин	1-мин	
Андроновка – ПСК 270	1-й	3345	3397	№ 239, 24,88
	2-й	3346	3416	№ 214, 23,51
ПСК 270 – Окружная	1-й	3367	3452	№ 227, 29,10
	2-й	3365	3425	№ 56, 27,30
Окружная – Москва-Киевская	1-й	3471	3498	№ 53, 36,99
	2-й	3452	3481	№ 34, 34,40
Москва-Киевская – ПСК 445	1-й	3396	3436	№ 209, 43,75
	2-й	3401	3435	№ 24, 42,26
ПСК 445 – Покровское-Стрешнево	1-й	3405	3442	№ 129, 46,14
	2-й	3399	3449	№ 230, 46,35
Покровско-Стрешнево – ПСК-1	1-й	3402	3458	№ 33, 52,24
	2-й	3415	3455	№ 44, 52,07
ПСК-1 – Белокаменная	1-й	3375	3415	№ 215, 60,40
	2-й	3383	3434	№ 56, 58,27
Белокаменная – ПСК Черкизово	1-й	3448	3487	№ 51, 68,84
	2-й	3462	3491	№ 58, 67,35
ПСК Черкизово – Андроновка	1-й	3436	3465	№ 25, 71,25
	2-й	3447	3479	№ 60, 72,27
Минимальные значения	–	3345	3397	–

Результаты расчетов для варианта, в котором на постах секционирования МЦК расположены накопители, представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Значения минимального напряжения по перегонам МЦК

Участок	Путь	$U_3, В$		Поезд, №, ордината, км
		мин	1-мин	
Андроновка – ПСК 270	1-й	3433	3455	№ 239, 24,88
	2-й	3442	3463	№ 214, 23,51
ПСК 270 – Окружная	1-й	3477	3501	№ 227, 29,10
	2-й	3479	3499	№ 56, 27,30
Окружная – Москва-Киевская	1-й	3448	3501	№ 53, 36,99
	2-й	3448	3480	№ 24, 34,78
Москва-Киевская – ПСК 445	1-й	3412	3485	№ 209, 43,75
	2-й	3417	3488	№ 24, 42,26
ПСК 445 – Покровское-Стрешнево	1-й	3483	3500	№ 61, 46,14
	2-й	3487	3503	№ 230, 46,35

Участок	Путь	U_3 , В		Поезд, №, ордината, км
		мин	1-мин	
Покровско-Стрешнево – ПСК-1	1-й	3463	3492	№ 33, 52,24
	2-й	3457	3488	№ 44, 52,07
ПСК-1 – Белокаменная	1-й	3425	3443	№ 215, 60,40
	2-й	3421	3460	№ 56, 58,27
Белокаменная – ПСК Черкизово	1-й	3496	3513	№ 33, 67,15
	2-й	3502	3514	№ 62, 67,35
ПСК Черкизово – Андроновка	1-й	3477	3494	№ 25, 71,25
	2-й	3482	3499	№ 60, 72,27
Минимальные значения	–	3412	3443	–

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 4.27.

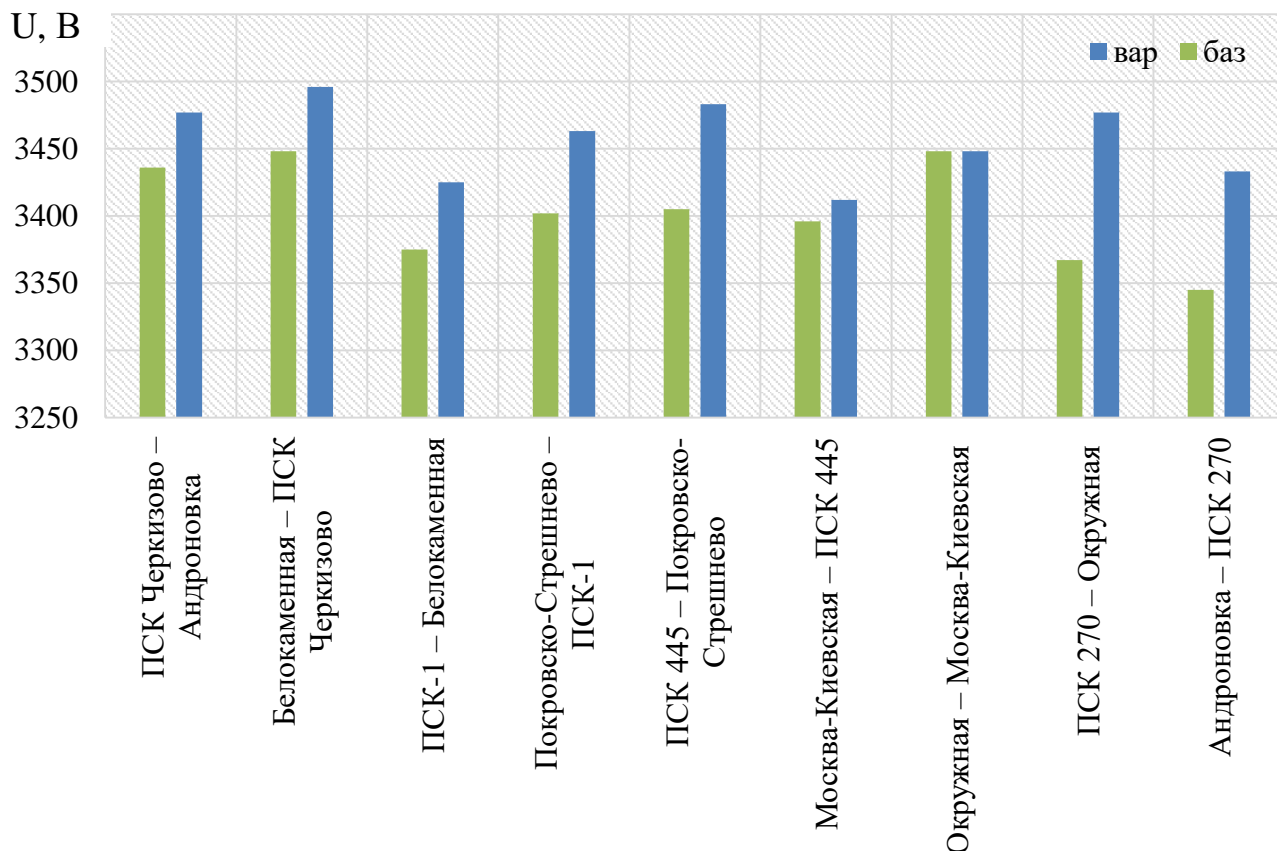


Рисунок 4.27 – Гистограмма минимальных напряжений по перегонам МЦК для базового и варианта с накопителями на постах секционирования (I путь)

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 [70].

4.5 Экономический расчет и оценка объема инвестиций

Наибольший объем использования энергии рекуперации достигается при реализации накопителей электроэнергии на постах секционирования ПСК 270 и ПСК Черкизово. Полезная энергоемкость накопителей электроэнергии для постов секционирования оценивается в диапазоне 950 – 1300 кВт·ч. Объемы энергии, реализуемые накопителями электроэнергии на постах секционирования МЦК для режимов заряда и разряда, по эпизодам работы, как правило, не превышают 50 кВт·ч.

Для проведения оценки технико-экономической эффективности применения накопителей электрической энергии также используются дисконтированные денежные потоки, которые отражают притоки и оттоки денежных средств в процессе установки и эксплуатации объекта. Баланс денежных средств для каждого периода корректируется с учетом коэффициента приведения.

В качестве основного показателя эффективности мероприятий принимается чистый дисконтированный доход (ЧДД) [44].

В связи с тем, что стоимость внедрения накопителя электрической энергии, в том числе стоимость самого оборудования, монтажных и пуско-наладочных работ, в настоящее время неизвестна, расчет будет производиться от заданного срока окупаемости [48].

В соответствии с [48] для определения предельной стоимости накопителя электроэнергии, необходимо решить уравнение ЧДД, приравняв левую часть к нулю, а в правой учесть участвующие притоки и оттоки денежных средств:

$$0 = \sum_0^T \frac{(\Delta C_{\text{ээ}} + A)}{(1+E)^t} - Z_{\text{м}} - C_{\text{н}} \quad (4.7)$$

где $\Delta C_{\text{ээ}}$ – стоимость электроэнергии, сэкономленной на тягу поездов, руб.;

A – амортизационные отчисления за каждый год, руб.;

$Z_{\text{р}}$ – расходы по операционной деятельности, связанные с освоением дополнительного объема перевозок, руб.;

$Z_{\text{м}}$ – затраты на строительные-монтажные и пусконаладочные работы, руб.;

$C_{\text{н}}$ – стоимость накопителя электрической энергии, руб.;

E – ставка дисконтирования.

Учитывая особенности рассматриваемого полигона в рамках работы не ожидается эффекта от повышения пропускной способности. Таким образом, в работе не учитываются величина доходных поступлений при реализации потенциала повышения пропускной способности и расходы по операционной деятельности, связанные с освоением дополнительного объема перевозок [48].

В результате преобразований в уравнении (4.7) получится следующий вид:

$$C_{\text{н}} = \sum_0^T \frac{(\Delta C_{\text{ээ}} + A)}{(1+E)^t} \quad (4.8)$$

При сроке службы накопителя T лет амортизационные отчисления за каждый год составят, тыс. руб.:

$$A = \frac{C_{\text{н}}}{T} \quad (4.9)$$

Основная доля в стоимости накопителя электрической энергии приходится на цену преобразовательного агрегата – инвертора, так как в настоящее время отсутствуют серийные модели с подходящими параметрами.

В результате решения уравнения (4.8) при сроке окупаемости инвестиций 20 лет и ставке дисконтирования, равной 0,1, предельная стоимость установки накопителя, в том числе покупки оборудования, строительные-монтажные и пусконаладочные работы, будет равна:

$$C_{\text{н}} = 32\,264\,747 \text{ руб.}$$

4.6 Выводы по разделу 4

1 Соотношение уровней напряжения на тяговых подстанциях МЦК приводит к ухудшению условий применения рекуперативного торможения. Представляется целесообразным выравнивание напряжения на всех подстанциях МЦК на уровне 3600 В.

2 Наиболее эффективными местами размещения накопителей электрической энергии в рамках рассматриваемого полигона определены линейные устройства секционирования.

3 В рамках рассматриваемого полигона МЦК следует применять гибридные накопители или суперконденсаторы.

4 Полезная энергоемкость накопителей электроэнергии для постов секционирования МЦК определена в диапазоне 950 – 1300 кВт·ч.

5 Рассчитано, что сокращение полезной энергоемкости до 200 – 300 кВт·ч приводит к потере объема энергии при рекуперативном торможении на величину около 30 %;

6 Определено, что выбор предпочтительного варианта размещения приемников энергии рекуперации ввиду отсутствия ограничивающих элементов системы тягового электроснабжения для заданных размеров и объемов перевозок и наличия резерва мощности следует осуществлять по ожидаемым показателям энергетической эффективности рассматриваемых устройств в рамках технико-экономического обоснования.

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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСКУЭ – автоматизированная система контроля и учета электроэнергии

ВИП – вентильно-инверторный преобразователь

МВПС – моторвагонный подвижной состав

МЦК – Московское центральное кольцо

ПВА – преобразовательный агрегат

ПК – программный комплекс

ПС – пост секционирования

РПД МПСУ и Д – бортовые регистраторы параметров движения

РУ – распределительное устройство

Система – Аналитическая система оценки и контроля уровня небаланса электроэнергии и автоматизированной оценки удельного расхода электроэнергии электроподвижного состава на Московском центральном кольце

СТЭ – система тягового электроснабжения

СУ – сглаживающее устройство

ТП – тяговая подстанция

ЧДД – чистый дисконтированный доход

ЭПС – электроподвижной состав

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Алиевский, С. Р. Накопители энергии. Учебное пособие / С.Р. Алиевский. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 400 с. – Текст : непосредственный.
- 2 Астахов, Ю. Н. Накопители энергии в электрических системах. Учебное пособие для электроэнергетических специальностей вузов/ Ю. Н. Астахов, В. А. Веников, А. Г. Тер-Газарян. – Москва : Высшая школа, 1989. – 159с. – Текст : непосредственный.
- 3 Бадер, М. П. Основные направления технического развития системы тягового электроснабжения постоянного тока и адаптация её для высокоскоростного движения / М. П. Бадер // Электротехника. – 2019. – № 9. – С. 13-19. – Текст : непосредственный.
- 4 Бадер, М. П. Тенденции повышения энергоэффективности электротехнического оборудования метрополитена / М. П. Бадер, В. В. Лобынцев, Н. Б. Сидоров // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2019. – № 6. – С. 12-17. – Текст : непосредственный.
- 5 Бадер, М. П. Энергосберегающие технологии интеллектуального железнодорожного транспорта / М. П. Бадер, Ю. М. Иньков, Е. Н. Розенберг // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 4. – С. 36-43. – Текст : непосредственный.
- 6 Баранов, М. И. Ретроспектива, современное состояние и перспективы развития исследований в области создания электроустановок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии /М. И. Баранов // Электротехника и электромеханика. – 2007.– №5. с. 1-5. – Текст : непосредственный.
- 7 Баринов, И. А. Обзор перспектив повышения энергетической эффективности и надёжности рекуперативного торможения на электроподвижном составе / И. А. Баринов, Д. А. Яговкин, В. С. Иванов [и др.] // Электропривод на транспорте и в промышленности : труды II Всероссийской научно-практической

конференции (20–21 сентября 2018 г.) / Дальневосточный государственный университет путей сообщения – Хабаровск, 2018. – С. 150-156. – Текст : непосредственный.

8 Беспалов, В. Я. Электрические машины : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. 140600 "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец – Москва : Academia, 2006. – (Высшее профессиональное образование. Электротехника). – ISBN 5769522283. – Текст : непосредственный.

9 Богинский, С.А. Повышение эффективности использования электромагнитной энергии, запасенной в цепи выпрямленного тока электровоза с целью выполнения полезной работы / С. А. Богинский, О. В. Мельниченко // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава : труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Красноярск, 24–25 марта 2020 года : под редакцией И.К. Лакина / Акционерное общество "Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги" – Красноярск: 2020. – С. 151-159. – Текст : непосредственный.

10 Булатов, Ю. Н. Использование ветрогенераторов и накопителей энергии в системах электроснабжения / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков, В. Х. Нгуен, З. Х. Чан // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 21–24 апреля 2020 года/ Иркутский национальный исследовательский технический университет . – Иркутск, 2020. – С. 45-50. – Текст : непосредственный.

11 Булатов, Ю. Н. Исследование работы прогностических регуляторов установки распределенной генерации в системе электроснабжения с мощным накопителем электроэнергии / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков, К. В. Суслов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2021. – Т. 14. – № 4. – С. 448-458. – DOI 10.17516/1999-494X-0325. – Текст : непосредственный.

12 Быкадоров, А. Л. Моделирование работы системы тягового электроснабжения постоянного тока с накопителем энергии / А. Л. Быкадоров, Т. А. Заруцкая // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 5(77). – С. 7-13. – Текст : непосредственный.

13 Быкадоров, А.Л. Моделирование работы системы тягового электроснабжения постоянного тока с накопителем энергии / А. Л. Быкадоров, Т. А. Заруцкая // Практическая силовая электроника. – 2020. – № 2(78). – С. 47-51. – Текст : непосредственный.

14 Быкадоров, А. Л. Применение сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии для повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения постоянного тока / А. Л. Быкадоров, Т. А. Заруцкая // Практическая силовая электроника. – 2020. – № 1(77). – С. 49-52. – Текст : непосредственный.

15 Веников, В. А. Энергетика в современном мире / В. А. Веников, В. Г. Журавлев, Т. А. Филиппова – Москва: Знание, 1986. – 191 с. – Текст : непосредственный.

16 Вильгельм, А. С. Разработка имитационной модели работы системы тягового электроснабжения Московского центрального кольца для оценки потенциала повышения энергоэффективности тяги поездов /А. С. Вильгельм // Транспорт Урала. – 2019. – № 4 (63). – С. 58-63. – Текст: непосредственный.

17 Вильгельм, А. С. Пути повышения энергоэффективности на Малом кольце Московской железной дороги с использованием инверторов / А. С. Вильгельм // Транспорт Урала. – 2014. – № 3(42). – С. 90–94. – Текст: непосредственный.

18 Вильгельм, А. С. Влияние энергии рекуперации на уровень потерь в системе тягового электроснабжения / А. С. Вильгельм // Транспорт Урала. – 2017. – № 2 (53). – С. 55–60. – Текст: непосредственный.

19 Виссарионов, В. И. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии и гидроэлектроэнергетика : Учебное пособие /В.И. Виссарионов. – Москва : Издательство МЭИ. – 1997. – 378 с. – Текст: непосредственный

20 Гаранин, М. А. Учет электрической связи между тяговыми подстанциями при расчете пропускной способности электрифицированных железных дорог / М. А. Гаранин, А. Н. Митрофанов, Е. В. Добрынин // Электротехника. – 2017. – № 3. – С. 35-39. – Текст: непосредственный.

21 Гольденберг, В. Возобновляемая энергия на железнодорожном транспорте / В. Гольденберг // Мир транспорта. – 2017. – Т. 15. – № 1(68). – С. 64-74. – Текст: непосредственный.

22 ГОСТ 32895-2014. Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 40 с. – Текст: непосредственный.

23 Гулия, Н. В. Накопители энергии / Н. В. Гулия – Москва : Наука, 1980. – 150 с. – Текст: непосредственный.

24 Деньщиков, К. К. Пути повышения энергетических характеристик суперконденсаторов / К. К. Деньщиков, М. Ю. // Конференция ОИВТ РАН «Результаты фундаментальных исследований в области энергетики и их практическое значение» 24 -26 марта 2008 г./ – Москва: 2008. – Текст: непосредственный.

25 Дудко, К. С. Опыт применения систем накопления электроэнергии на основе аккумуляторных батарей в распределительных электрических сетях 0,4 КВ / К. С. Дудко, Д. А. Прасол // Инновационные решения в агроинженерии в XXI веке: материалы Национальной научно-практической конференции, Майский, 16 декабря 2020 года / – Майский, 2021. – С. 200-204. – Текст: непосредственный.

26 Дудко, К. С. Применение систем накопления электроэнергии для повышения эффективности генераторных установок в автономных энергосистемах с резкопеременной нагрузкой / К. С. Дудко, Д. А. Прасол // Инновационные решения в агроинженерии в XXI веке : материалы Национальной научно-практической конференции, Майский, 16 декабря 2020 года/ – Майский, 2021. – С. 204-209. – Текст: непосредственный.

27 Евланов, Л. Г. Экспертные оценки в управлении/ Л.Г. Евланов, В.А. Кутузов // – Москва : Экономика, 1978. – 133 с. – Текст: непосредственный.

28 Желтиков, В. П. Современные электрохимические системы аккумулирования энергии / В. П. Желтиков // Электротехнические комплексы и системы : Международная научно-практическая конференция, Уфа, 27–30 октября 2020 года / Уфимский государственный авиационный технический университет – Уфа, 2021. – С. 229-235. – Текст: непосредственный.

29 Иванов, В. С. Теоретическое исследование электромагнитных процессов инвертора на базе тиристоров и IGBT-транзисторов электропоезда переменного тока в режиме рекуперативного торможения / В. С. Иванов, О. В. Мельниченко // Известия Транссиба. – 2018. – № 3(35). – С. 28-44. – Текст: непосредственный.

30 Иванов, А. М. Молекулярные накопители электрической энергии на основе двойного электрического слоя / А. М. Иванов // Электричество. – 1991. – № 8 – С. 16 -19. – Текст: непосредственный.

31 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.

32 Косарев, А. Б. Научное обеспечение роста энергоэффективности и экологической безопасности железнодорожного транспорта. Подходы и потенциал / А. Б. Косарев // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2015. – № 5. – С. 1-15. – Текст: непосредственный.

33 Косарев, А. Б. Оценка эффективности внедрения многофункционального вольтодобавочного трансформатора для повышения напряжения в тяговой сети / А. Б. Косарев, Д. В. Сербиненко, М. В. Алексеенко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 4. – С. 2-6. – Текст: непосредственный.

34 Косарев, А. Б. Обеспечение электробезопасности систем электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока для линий ВСМ / А. Б. Косарев, А. В. Барч, Е. Н. Розенберг // Вестник научно-

исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – Т. 77. – № 6. – С. 337-346. – DOI 10.21780/2223-9731-2018-77-6-337-346. – Текст: непосредственный.

35 Косарев, А. Б. Повышение энергетической эффективности тягового электроснабжения переменного тока с силовыми многофункциональными вольтодобавочными трансформаторами / А. Б. Косарев, Б. И. Косарев // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76. – № 2. – С. 67-73. – Текст: непосредственный.

36 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.

37 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.

38 Левшов, А. В. Развитие научных исследований в области интеллектуальных энергосистем / А.В. Левшов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2011.– № 11. С. 241-245. – Текст: непосредственный.

39 Магай, Г. С. Оптимизация параметров устройств электроснабжения участков переменного тока / Г. С. Магай, Т. В. Комякова, В. Е. Марский // Улучшение качества и снижение потерь электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог: межвузовский тематический сборник научных трудов / Министерство путей сообщений Российской Федерации; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск. – 2001. – С. 13-16. – Текст: непосредственный.

40 Магай, Г. С. Оптимизация уровней напряжения в тяговой сети / Г. С. Магай, Т. В. Комякова, Е. Ю. Салита, В. Е. Марский // Новые технологии - железнодорожному транспорту: подготовка специалистов, организация перевозочного процесса, эксплуатация технических средств : Сборник научных статей с международным участием (в 4 частях) : под редакцией Галиева И.И. / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск. – 2000. – С. 43-47. – Текст: непосредственный.

41 Марский, В. Е. Определение пропускной способности железнодорожных участков по устройствам тягового электроснабжения / В. Е. Марский // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2014. – № 1. – С. 40-46. – Текст: непосредственный.

42 Мельниченко, О. В. Выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава с высоким коэффициентом мощности в режиме рекуперативного торможения / О. Мельниченко, А. Линьков, Ю. Газизов, И. Полянский // Силовая электроника. – 2016. – Т. 5. – № 62. – С. 94-97. – Текст: непосредственный.

43 Методика определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования, утвержденная приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 18 июля 2018 года N 266.

44 Митрофанов, А. Н. Оценка экономической эффективности инвестиционных проектов в хозяйстве электрификации и электроснабжения / А. Н. Митрофанов, А. С. Слугин, С. А. Митрофанов, К. К. Утарбаев // Наука и образование транспорту. – 2018. – № 1. – С. 265-268. – Текст: непосредственный.

45 Никифоров, М. М. Влияние технической и участковой скорости на эффективность использования энергии рекуперации / М. М. Никифоров // Известия Транссиба. – 2018. – № 2 (34). – С. 95–106. – Текст: непосредственный.

46 Никифоров, М. М. Влияние параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения на эффективность использования энергии

рекуперации / М. М. Никифоров // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 74–83. – Текст: непосредственный.

47 Никифоров, М. М. Повышение энергетической эффективности Московского центрального кольца в условиях применения рекуперативного торможения и накопителей электрической энергии/ М. М. Никифоров // Материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки: «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» / Омский гос. ун-т путей сообщ. – Омск, 2018. – С. 286–293. – Текст: непосредственный.

48 Никифоров, М. М. Расчет предельной стоимости внедрения накопителя электрической энергии для системы тягового электроснабжения постоянного тока / М. М. Никифоров, А. П. Шатохин // Омский научный вестник. – 2017. – № 1(151). – С. 54-56. – Текст: непосредственный.

49 Патент RU 2259284 Российская Федерация, кл. С2 В 60 М 3/06, В 60 L 7/12. Тяговая подстанция постоянного тока со сверхпроводниковым индуктивным накопителем энергии : (RU) № 2003104912 : опубликовано 27.08.2005 / А. Л. Быкадоров, Т. А. Заруцкая, А. Д. Петрушин, Е. П. Фигурнов – Текст: непосредственный.

50 Петров, В. В. Избранные труды по электричеству. / В.В. Петров, Т. Гроттгус, Ф. Ф. Рейс, П. И. Страхов, А. Т. Болотов, В. Д. Телепнев – Москва : Гостехиздат, 1956. – 107 с. – Текст: непосредственный

51 Петров, В. В. Известие о гальвани-вольтовых опытах / В.В. Петров – Санкт-Петербург: Типография Государственной медицинской коллегии, 1803. – 209 с. – Текст: непосредственный

52 Алексеева, Т. Л. Повышение эффективности рекуперации электрической энергии в электрические сети переменного тока / Т. Л. Алексеева, Н. Л. Рябченко, Л. А. Астраханцев [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 2 (62). – С. 86-97. – DOI 10.26731/1813-9108.2019.2(62).86-97. – Текст: непосредственный.

53 Полишкина, И. И. Обеспечение электромагнитной безопасности многопроводных систем тягового электроснабжения железнодорожного транспорта : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Полишкина Ирина Игоревна. – Москва, 2003. – 175 с. – Текст : непосредственный.

54 Рамазанова, Р. И. Энергоэффективность систем накопления энергии на базе аккумуляторных батарей / Р. И. Рамазанова, А. Г. Логачева // Технологическое предпринимательство, коммерциализация результатов интеллектуальной деятельности и трансфер технологий : материалы I всероссийской научно-практической конференции, Пермь, 12 ноября 2020 года. / Пермский национальный исследовательский политехнический университет – Пермь, 2021. – С. 482-487. – Текст : непосредственный.

55 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.

56 Евстафьев, А. М. Совершенствование тягового подвижного состава на основе современных технологий энергосбережения / А. М. Евстафьев, Д. Е. Кирюшин, В. В. Никитин, О. Е. Пудовиков [и др.] // Электротехника. – 2021. – № 2. – С. 2-6. – Текст : непосредственный.

57 Слипченко, Н. И. Исследование режимов работы АКБ и суперконденсатора в системе энергообеспечения электромобиля. / Н. И. Слипченко, В. А. Письменецкий, М. Ю. Гуртовой // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 4. – С.81-85. – Текст: непосредственный.

58 Сошников, А. Г. Накопители энергии в электроэнергетических системах. Учебное пособие. – Волгоград : ВолгГТУ, 2007. – 106 с. – Текст : непосредственный.

59 Томилов, В. С. Совершенствование силовой цепи электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения /В. С. Томилов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23. – № 2 (145). – С. 346-355. – DOI 10.21285/1814-3520-2019-2-346-355. – Текст : непосредственный.

60 Томилов, В. С. Как повысить надежность режима рекуперативного торможения электровозов переменного тока / В. С. Томилов, О. В. Мельниченко, Т. В. Волчек // Локомотив. – 2020. – № 7(763). – С. 20-22. – Текст : непосредственный.

61 Томилов, В. С. Анализ способов и технических решений повышения коэффициента мощности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / В. С. Томилов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2018. – Т. 2. – С. 448-452. – Текст : непосредственный.

62 Устинов, Р. И. Повышение безопасности движения поездов при использовании ресурсосберегающего режима - рекуперативного торможения /Р. И. Устинов // Безопасность транспорта и сложных технических систем глазами молодежи : материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Иркутск, 10–13 апреля 2018 года. / Иркутский государственный университет путей сообщения. – Иркутск, 2018. – С. 208-212. – Текст : непосредственный.

63 Устинов, Р. И. Способ повышения работоспособности ВИП электровоза переменного тока при пропуске импульсов управления в режиме рекуперативного торможения / Р. И. Устинов, О. В. Мельниченко // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2016. – № 12. – С. 64-67. – Текст : непосредственный.

64 Ушаков, С. Ю. Оценка эффективности использования электроэнергии на тягу поездов в границах полигона Московского центрального кольца / С. Ю.

Ушаков // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 5 (77). – С. 40-50. – Текст : непосредственный.

65 Черемисин, В. Т. Методика оценки использования энергии рекуперации / В. Т. Черемисин // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 1 (74). – С. 34–45. – Текст : непосредственный.

66 Черемисин, В. Т. Методика расчета экономической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации / В. Т. Черемисин // Транспорт Урала. – 2016. – № 3 (50). – С. 95–99. – Текст : непосредственный.

67 Черемисин, В. Т. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации / В. Т. Черемисин // Известия Транссиба. – 2016. – № 1 (25). – С. 60–70. – Текст : непосредственный.

68 Черемисин, В. Т. Эффективность использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного и переменного тока / В. Т. Черемисин. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – 216 с. – Текст : непосредственный.

69 Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения на полигоне постоянного тока: монография / В. Т. Черемисин – Омск : Омский гос. унт путей сообщения, 2016. – 176 с. – Текст : непосредственный

70 Черемисин, В. Т. Перспективы применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак. // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – № 2. – С. 33-44. – Текст: непосредственный.

71 Черемисин, В. Т. Эффективность применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак. // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17. – № 5 (84). – С. 58-77. – Текст: непосредственный.

72 Шевлюгин, М. В. О применении накопителей энергии в системе электроснабжения мегаполиса на примере Москвы / М. В. Шевлюгин, А. Н.

Стадников, А. С. Юдин // Электропитание. – 2020. – № 1. – С. 7-31. – Текст : непосредственный.

73 Шевлюгин, М. В. Опытная эксплуатация накопителей энергии неуправляемого типа на тяговых подстанциях Московского метрополитена / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына, А. Н. Стадников // Электропитание. – 2019. – № 4. – С. 51-60. – Текст : непосредственный.

74 Шевлюгин, М. В. Повышение надежности электроснабжения собственных нужд тяговых подстанций метрополитена с помощью накопителей энергии / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына, М. Н. Белов, Д. С. Плетнев // Электротехника. – 2020. – № 9. – С. 26-31. – Текст : непосредственный.

75 Шевлюгин, М. В. Стационарные накопители энергии управляемого типа для метрополитена / М. В. Шевлюгин, М. Н. Белов, И. В. Вуйченко // Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий. Инфраструктура и подвижной состав метрополитена : Сборник трудов Международной выставки-конференции, Москва, 12–14 декабря 2019 года / под общей редакцией Т. В. Шепитько, А. А. Сидракова / Российский университет транспорта – Москва, 2019. – С. 90-94. – Текст : непосредственный.

76 Шевлюгин, М. В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шевлюгин Максим Валерьевич ; Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ. – Москва, 2014. – Текст : непосредственный.

77 Mitrofanova I. V., Voropayev D. E., Mitrofanov A. N., Kozlova N. S. A review of the energy efficiency improvement in DC railway systems *Наука и образование транспорту*, 2020, no 1, pp. 345-349.

78 Barinov I. A., Melnichenko O. V. Power IGBTs application in AC-wire DC-motor locomotive thyristor-based power circuit for regenerative brake energy efficiency increase, *2019 International Conference on Industrial Engineering*,

Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019, Sochi, 25–29 march 2019 Sochi, 2019, p. 8742933. – DOI 10.1109/ICIEAM.2019.8742933.

79 Benjamin L. Norris NAS® Battery Demonstration at American Electric Power. A Study for the DOE Energy Storage Program. SANDIA REPORT. SAND2006-6740. Unlimited Release. Printed March 2007

80 Chen Junyu An Energy Storage System for Recycling Regenerative Braking Energy in High-Speed Railway. *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1-1. 10.1109/TPWRD.2020.2980018.

81 Illés B., Véha A., Vida L. New ideas for inland intermodal transport, *Transport Problems*, 2020., vol. 15, no 1, pp. 117-130.

82 Ivanov V., Ustinov R., Melnichenko O. Increasing Energy Efficiency and Reliability of Electric Multiple Unit Re-generative Braking, *Advances in Intelligent Systems and Computing (см. в книгах)*, 2020, vol. 1115 AISC, pp. 420-426. – DOI 10.1007/978-3-030-37916-2_41.

83 Jefimowski Włodzimierz Stationary energy storage system in a 3 kV DC – the conception comparison. MATEC Web of Conferences. 180. 02013. 10.1051/matecconf/201818002013.

84 Jung Hosung An Optimal Charging and Discharging Scheduling Algorithm of Energy Storage System to Save Electricity Pricing Using Reinforcement Learning in Urban Railway System. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 10.1007/s42835-021-00881-8.

85 Khodaparastan M., Mohamed A. A study on super capacitor wayside connection for energy recuperation in electric rail systems, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Chicago, IL, 16–20 July 2017, Chicago, IL, 2018., pp. 1-5. – DOI 10.1109/PESGM.2017.8273915.

86 Khodaparastan M., Mohamed A., Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, vol. 20, no 8, pp. 2831-2847. – DOI 10.1109/TITS.2018.2886809.

- 87 Ko Rakkyung Energy Storage System Capacity Sizing Method for Peak-Demand Reduction in Urban Railway System with Photovoltaic Generation, *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 14. 10.1007/s42835-019-00203-z.
- 88 Kotz R. Principles and applications of electrochemical capacitors, *Electrochimica Acta*, 2000, 45, pp. 2483-2498.
- 89 Liu Xuan Energy Storage Devices in Electrified Railway Systems, *A Review. Transportation Safety and Environment*, 2. 10.1093/tse/tdaa016.
- 90 Morais Vítor Towards Smart Railways: A Charging Strategy for Railway Energy Storage Systems. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*. 8. 168136. 10.4108/eai.14-1-2021.168136.
- 91 Othman Ahmed Resilient interconnected microgrids (IMGs) with energy storage as integrated with local distribution networks for railway infrastructures. 170-174. 10.1109/SEGE.2016.7589520.
- 92 Ovalle Villamil Energy storage sizing methodology for mass-transit direct-current wayside support: Application to French railway company case study. *Applied Energy*. 230. 1673 - 1684. 10.1016/j.apenergy.2018.09.035.
- 93 Pizzo A. A method for “design to range” energy storage systems in catenary free operations of light railway vehicles. 761-766. 10.1109/ICCEP.2015.7177578.
- 94 Qu Kai Optimization research on hybrid energy storage system of high-speed railway. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 15. 10.1049/gtd2.12217.
- 95 Ratniyomchai Tosaphol A Demonstration Project for Installation of Battery Energy Storage System in Mass Rapid Transit. *Energy Procedia*. 138. 93-98. 10.1016/j.egypro.2017.10.065.
- 96 Rajender Kumar Beniwa Introduction to Energy Storage Systems. 10.1002/9781119760375.ch1.
- 97 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/mateconf/201823901057. – EDN RZYYRF.

98 Roch Dupré Optimal Location and Sizing of Energy Storage Systems in DC-Electrified Railway Lines Using a Coral Reefs Optimization Algorithm with Substrate Layers. *Energies*. 14(16). 10.3390/en14164753.

99 Roch Dupré Simulation-based assessment of the installation of a Reversible Substation in a railway line, including a realistic model of large traffic perturbations, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 115. 10.1016/j.ijepes.2019.105476.

100 Sumpavakup Chaiyut Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy, *Journal of Modern Transportation*, 25. 10.1007/s40534-017-0146-6.

101 Sumpavakup Chaiyut Peak Demand Cutting Strategy with an On-Board Energy Storage System in Mass Rapid Transit, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*. 42. 10.1007/s40998-018-0048-6.

102 Susan M. Schoenung Long vs. Short-Term Energy Storage: Sensitivity Analysis. A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. SAND REPORT.SAND2007-4253. Unlimited Release Printed July 2007.

103 Wu Chaoxian A Two-Step Method for Energy-Efficient Train Operation, Timetabling and On-Board Energy Storage Device Management. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. PP. 1-1. 10.1109/TTE.2021.3059111.

104 Wu Chaoxian Train Speed Trajectory Optimization With On-Board Energy Storage Device. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 1-11.

105 Yang Zhihong Improved control strategy of energy storage system considering train operation states. 1-6. 10.1109/ITSC.2017.8317623.

106 Zhimin Wang Distributed storage capacity reservations for residential PV generation utilization and LV network operation Zhimin Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE Year: 2015 Pages: 1 - 5

ПРИЛОЖЕНИЕ А

УСРЕДНЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОЕЗДОК ПО ДАННЫМ РАСШИФРОВКИ ДАННЫХ С РЕГИСТРАТОРОВ РПД МПСУ И Д

Таблица А.1 – Усредненные показатели поездок по данным расшифровки данных с регистраторов РПД МПСУ и Д (нечетное направление)

Участок	Длина участка, км	Поезд 62 (6173)				Поезд 48 (6227)			
		средняя скорость, км/ч	расход, кВт·ч	рекуперация, кВт·ч	удельный расход, кВт·ч/км	средняя скорость, км/ч	расход, кВт·ч	Рекуперация, кВт·ч	удельный расход, кВт·ч/км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Андроновка - Нижегородская	1,86	31	9,38	2,77	3,6	34,5	10,58	2,72	4,23
Нижегородская - Новохоловская	1,13	37,6	12,81	7,18	5,0	36,4	12,13	4,7	6,58
Новохоловская - Угрешская	1,32	38	17,27	9,74	5,7	36,3	11,33	6,59	3,59
Угрешская - Дубровка	1,37	39,3	17,51	9,25	6,0	36,9	12,55	6,16	4,66
Дубровка - Автозаводская	1,16	39,23	16,94	11,6	4,6	41,5	17,43	10,24	6,20
Автозаводская - ЗИЛ	1,37	38,21	16,35	9,77	4,8	37,16	12,34	5,17	5,23
ЗИЛ - Верхние Котлы	2,04	44,45	25,62	10,25	7,5	42,76	17,8	6,1	5,74
Верхние Котлы - Крымская	0,88	34	17,63	6,5	12,6	32,97	14,23	4,06	11,56
Крымская - Пл. Гагарина	2,26	44	29,64	12,77	7,5	48,29	25,42	8,04	7,69
Пл. Гагарина - Лужники	2,36	47,2	21,93	10,81	4,7	40,08	10,88	6,57	1,83
Лужники - Кутузовская	2,6	40,8	28,07	11,28	6,5	39,4	30,45	12,81	6,78
Кутузовская - Деловой центр	0,87	34,4	15,68	6,63	10,4	35,8	18,74	8,43	11,85
Деловой центр - Шелепиха	1,1	37,4	19,75	10,32	8,6	39,6	22,78	12,81	9,06
Шелепиха - Хорошево	2,48	42,6	25,24	9,75	6,2	43,18	27,87	10,74	6,91
Хорошево - Зорге	1,19	43,97	22,03	9,67	10,4	34,84	18,4	7,03	9,55
Зорге - Панфиловская	1,29	46,77	25,31	9,07	12,6	34,56	12,73	3,66	7,03
Панфиловская - Стрешнево	1,79	45,07	24,23	9,37	8,3	45,49	27,45	11,63	8,84
Стрешнево - Балтийская	1,54	38,9	18,01	8,76	6,0	43,17	19,41	8,24	7,25
Балтийская - Коптево	2,11	45,56	23,07	9,94	6,2	41,78	17,1	6,56	5,00

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Продолжение Таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Коптево - Лихоборы	2,1	38,7	13,48	7,18	3,0	39,2	12,92	5,94	3,32
Лихоборы - Окружная	1,32	36,3	12,88	10,29	2,0	39,08	10,9	9,16	1,32
Окружная - Владыкино	1,36	36,3	11,92	7,12	3,5	45,24	22,78	13,42	6,88
Владыкино - Ботанический Сад	2,95	52,3	33,02	18,9	4,8	56,31	38,72	16,04	7,69
Ботанический Сад - Ростокино	1,82	43,6	23,4	8,76	8,0	38,45	13,25	5,05	4,51
Ростокино - Белокаменная	2,5	46,3	26,89	14,77	4,8	48,29	25,07	10,51	5,82
Белокаменная Бульвар Рокосовского	2,5	46,9	30,02	14,79	6,1	49,75	28,05	11,22	6,73
Бульвар Рокосовского - Локомотив	1,66	43,2	22,76	11,15	7,0	47,12	26,71	14,2	7,54
Локомотив - Измайлово	1,58	39	19,24	4,77	9,2	38,03	13,09	4,68	5,32
Измайлово - Соколинная гора	2,03	46,7	28,55	10,89	8,7	43,89	21,64	7,87	6,78
Соколинная гора - Шоссе Энтузиастов	1,42	38,4	17,71	8,77	6,3	40,4	13,25	5,87	5,20
Шоссе Энтузиастов - Андроновка	1,39	34,7	8,7	7,1	1,2	44,84	19,67	14,36	3,82

Таблица А.2 – Усредненные показатели поездок по данным расшифровки данных с регистраторов РПД МПСУ и Д (четное направление)

Участок	Длина участка, км	Поезд 66 (6172)				Поезд 80 (6180)			
		средняя скорость, км/ч	расход, кВт·ч	рекуперация, кВт·ч	удельный расход, кВт·ч/км	средняя скорость, км/ч	расход, кВт·ч	Рекуперация, кВт·ч	удельный расход, кВт·ч/км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Андроновка - Нижегородская	1,86	39,1	16,65	8,37	4,45	36,5	12,99	5,98	3,77
Нижегородская - Новохоловская	1,13	40,08	22,8	9,98	11,35	43,38	24,9	10,53	12,72
Новохоловская - Угрешская	1,32	40,58	21,89	7,69	10,76	41,76	24,32	8,77	11,78
Угрешская - Дубровка	1,37	38,36	19,11	9,99	6,66	38,15	16,85	4,5	9,01

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Продолжение Таблицы А.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дубровка - Автозаводская	1,16	34,53	16,45	5,59	9,36	34,95	15,05	3,78	9,72
Автозаводская - ЗИЛ	1,37	37,63	18,95	7,94	8,04	37,76	15,57	7,16	6,14
ЗИЛ - Верхние Котлы	2,04	41,72	17,66	9,68	3,91	45,09	20,75	10,63	4,96
Верхние Котлы - Крымская	0,88	35,04	14,76	9,97	5,44	37,14	14,17	9,11	5,75
Крымская - Пл. Гагарина	2,26	35,39	17,52	8,64	3,93	33,34	13,55	6,58	3,08
Пл. Гагарина - Лужники	2,36	37,51	20,49	4,07	6,96	34,28	16,15	1,73	6,11
Лужники - Кутузовская	2,6	51,77	33,79	11,63	8,52	56,35	51,37	10,73	15,63
Кутузовская - Деловой центр	0,87	34,06	15	9,43	6,40	51,58	26,25	9,38	19,39
Деловой центр - Шелепиха	1,1	38,87	21,78	11,71	9,15	34,6	12,92	8,55	3,97
Шелепиха - Хорошево	2,48	39,76	15,8	3,43	4,99	38,9	19,64	12,41	2,92
Хорошево - Зорге	1,19	38,75	19,47	10,87	7,23	44,1	18,63	9,26	7,87
Зорге - Панфиловская	1,29	42,2	20,73	13,31	5,75	42,14	19,02	11,34	5,95
Панфиловская - Стрешнево	1,79	43,14	1,3	5,36	-2,27	42,78	19,86	11,2	4,84
Стрешнево - Балтийская	1,54	44,25	0,44	6,84	-4,16	44,14	19,27	9,53	6,32
Балтийская - Коптево	2,11	42,8	25,37	14,13	5,33	41,2	21,96	9,99	5,67
Коптево - Лихоборы	2,1	41,58	23,55	21,61	0,92	49,03	26,2	10,81	7,33
Лихоборы - Окружная	1,32	38,33	22,23	7,89	10,86	40,1	17,46	6,5	8,30
Окружная - Владыкино	1,36	35,13	13,96	5,4	6,29	33,67	15,85	3,03	9,43
Владыкино - Ботанический Сад	2,95	56,58	43,59	12,47	10,55	27,4	7,67	1,52	2,08
Ботанический Сад - Ростокино	1,82	39,79	16,72	9,38	4,03	40,23	17,77	2,34	8,48
Ростокино - Белокаменная	2,5	42,85	23,77	9,68	5,64	41,9	23,03	12,89	4,06
Белокаменная - Бульвар Рокосовского	2,5	49,12	32,83	16,18	6,66	44,66	27,53	12,93	5,84
Бульвар Рокосовского - Локомотив	1,66	46,23	26,79	10,8	9,63	54,48	40,05	16,97	13,90
Локомотив - Измайлово	1,58	47,56	25,36	13,18	7,71	40,66	24,94	9,65	9,68
Измайлово - Соколинная гора	2,03	48,11	27,74	16,49	5,54	49	23,73	12,95	5,31
Соколинная гора - Шоссе Энтузиастов	1,42	44,8	23,91	11,82	8,51	47,45	25,2	14,39	7,61
Шоссе Энтузиастов-Андроновка	1,39	39,8	23,1	8,95	10,18	43,18	19,89	10,78	6,55

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

РАСХОД И РЕКУПЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОЕЗДАМИ МЦК ПО ДАННЫМ РПМ МПСУИД

Таблица Б.1 – Расход электроэнергии поездами МЦК нечетного направления по данным РПМ МПСУИД

№ поезда	6117	6119	6123	6125	6129	6137	6141	6145	6149	6153	6155	6157	6159	6161	6165	6173	6177	6189	6191	6193	6195	6197	6227	Средний расход	
	№ МВПС	83	48	65	51	75	62	84	52	55	77	48	56	65	51	75	62	84	77	48	56	65	51		48
Остановочный пункт/ перегон	Расход электроэнергии, кВт·ч																								
АНДРОНОВКА	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
АНДРОНОВКА- Нижегородская	4,5	10,0	0,0	0,0	0,0	3,0	3,7	4,0	5,4	4,3	5,9	8,5	0,0	7,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	5,2	
Нижегородская	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,2	
Нижегородская- Новохохловская	17,1	14,0	8,8	0,0	0,0	10,8	16,0	14,8	12,4	11,3	22,2	22,4	9,7	16,8	21,3	14,0	12,2	17,5	16,0	18,5	12,2	19,7	13,2	15,3	
Новохохловская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	0,0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1	
Новохохловская- О.П. Угрешская	18,9	10,8	9,7	0,0	0,0	15,4	18,4	19,7	20,5	14,3	22,0	20,7	14,8	17,2	23,1	18,9	31,3	18,3	13,1	14,5	14,4	18,4	12,2	17,5	
О.П. Угрешская	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	
О.П. Угрешская- Дубровка	17,5	17,5	10,3	0,0	0,0	16,4	20,9	22,3	25,1	24,7	27,7	24,3	15,2	14,7	28,7	19,1	24,0	25,0	15,3	17,2	15,2	19,4	13,7	19,7	
Дубровка	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	
Дубровка- Автозаводская	17,8	13,8	10,5	0,0	0,0	14,1	16,9	17,7	20,9	22,1	17,5	22,6	10,4	17,1	24,9	18,5	16,6	19,2	15,8	15,1	14,4	14,3	18,9	17,1	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.1

№ поезда	6117	6119	6123	6125	6129	6137	6141	6145	6149	6153	6155	6157	6159	6161	6165	6173	6177	6189	6191	6193	6195	6197	6227	Средний расход
	№ МВПС	83	48	65	51	75	62	84	52	55	77	48	56	65	51	75	62	84	77	48	56	65	51	
Остановочный пункт/ перегон	Расход электроэнергии, кВт·ч																							
Автозаводская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Автозаводская-ЗиЛ	18,0	14,1	11,2	0,0	0,0	12,6	19,0	21,1	21,8	21,6	25,0	14,7	11,6	9,3	25,2	17,9	20,7	23,8	14,5	24,8	14,0	24,0	13,5	18,0
ЗИЛ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
ЗиЛ-Верхние Котлы	22,2	20,6	17,0	0,0	0,0	19,5	26,2	25,0	28,6	33,9	35,2	25,0	17,7	21,4	27,6	28,0	28,6	29,7	20,0	22,8	20,4	26,0	19,4	24,5
Верхние Котлы	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	0,0	0,2	0,1	0,0	0,5	0,0	0,0	0,2
Верхние Котлы-Крымская	18,4	15,9	14,2	0,0	0,0	15,3	17,1	18,7	17,4	24,6	22,4	18,0	17,3	10,9	25,6	19,2	23,2	23,5	23,0	16,9	16,6	16,8	15,5	18,6
Крымская	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,4	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
Крымская-Площадь Гагарина	27,3	24,3	20,0	0,0	0,0	21,5	25,6	25,8	28,0	29,3	28,2	28,4	23,6	27,0	53,5	32,4	28,9	29,0	29,6	27,8	22,8	28,1	27,8	28,0
Площадь Гагарина	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Площадь Гагарина-Лужники	12,4	11,8	6,7	0,0	0,0	11,3	10,6	14,3	22,3	26,1	12,8	12,4	10,2	12,6	25,4	24,0	21,6	21,8	38,4	13,2	23,7	22,0	11,9	17,4
Лужники	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,7	0,1	0,2	0,0	0,0	0,2
Лужники-КУТУЗОВСКАЯ	23,2	19,4	15,5	0,0	0,0	18,8	22,5	19,9	31,1	32,5	13,8	30,6	16,0	32,4	30,4	30,7	30,0	29,4	40,5	27,0	23,9	34,2	33,3	26,4
КУТУЗОВСКАЯ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	1,0	0,1	0,3	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.1

№ поезда	6117	6119	6123	6125	6129	6137	6141	6145	6149	6153	6155	6157	6159	6161	6165	6173	6177	6189	6191	6193	6195	6197	6227	Средний расход	
№ МВПС	83	48	65	51	75	62	84	52	55	77	48	56	65	51	75	62	84	77	48	56	65	51	48		
Остановочный пункт/ перегон	Расход электроэнергии, кВт·ч																								
КУТУЗОВСКАЯ - Деловой центр	11,0	11,1	8,6	0,0	0,0	9,2	8,6	14,6	15,9	20,3	18,9	10,4	15,8	14,4	22,4	17,1	15,3	23,3	22,7	16,9	15,4	14,6	20,5	15,6	
Деловой центр	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	
Деловой центр- Шелепиха	17,6	20,8	16,7	0,0	0,0	15,8	20,4	19,1	26,3	26,2	23,1	27,0	17,1	16,2	22,1	21,6	21,8	26,6	28,0	23,8	24,4	19,7	24,9	21,9	
Шелепиха	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	
Шелепиха- Хорошево	21,4	23,2	16,7	0,0	0,0	21,7	22,2	25,9	25,3	26,2	25,3	27,7	20,1	23,0	24,7	27,6	26,9	27,9	30,5	26,6	26,9	28,5	30,4	25,2	
Хорошево	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	
Хорошево-Зорге	23,5	21,6	19,2	0,0	0,0	21,9	25,5	23,6	26,9	28,5	23,5	27,1	20,1	27,4	26,7	24,1	27,4	25,3	28,1	23,8	25,9	21,6	20,1	24,4	
Зорге	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	
Зорге-Панфиловская	25,3	16,8	17,0	0,0	0,0	22,8	25,6	17,9	25,9	29,0	23,9	16,0	17,5	29,6	26,7	27,6	26,6	22,5	33,1	20,3	21,8	26,8	13,9	23,2	
Панфиловская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	
Панфиловская- Стрешнево	25,2	29,0	27,4	0,0	0,0	19,7	26,6	27,8	33,5	29,2	25,9	31,0	17,4	26,5	29,1	26,5	27,7	27,1	31,1	24,3	25,7	28,5	30,0	27,1	
Стрешнево	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Стрешнево- Балтийская	22,0	16,3	19,5	0,0	0,0	15,9	22,0	21,3	23,3	25,0	20,6	19,8	18,6	21,5	23,7	19,7	22,4	22,6	20,1	19,2	17,8	22,4	21,2	20,7	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.1

№ поезда	6117	6119	6123	6125	6129	6137	6141	6145	6149	6153	6155	6157	6159	6161	6165	6173	6177	6189	6191	6193	6195	6197	6227	Средний расход	
№ МВПС	83	48	65	51	75	62	84	52	55	77	48	56	65	51	75	62	84	77	48	56	65	51	48		
Остановочный пункт/ перегон	Расход электроэнергии, кВт·ч																								
Балтийская	0,0	0,3	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	0,0	0,4	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	
БРАТЦЕВО парк Н	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
БРАТЦЕВО парк Н- Балтийская	0,0	0,0	0,0	5,5	7,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7
Балтийская-Коптево	22,2	23,3	16,8	26,4	27,7	19,7	26,9	21,2	30,2	32,9	24,5	24,8	17,8	24,7	30,2	25,2	26,1	25,4	19,8	21,6	22,4	21,8	18,7	23,9	
Коптево	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	
Коптево-О.П. Лихоборы	16,2	16,5	12,4	24,9	18,8	16,2	23,3	15,0	17,3	30,9	16,6	54,1	14,6	16,6	19,2	14,7	22,3	20,5	14,3	16,3	16,6	16,5	14,1	19,5	
О.П. Лихоборы	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,3	0,1	
О.П. Лихоборы- Окружная	12,1	8,8	6,5	15,9	21,8	7,4	12,3	13,2	15,2	23,6	11,6	9,3	30,4	15,3	18,2	14,1	8,8	13,9	11,8	7,9	9,8	16,4	11,9	13,7	
Окружная	0,2	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	
Окружная- ВЛАДЫКИНО	20,4	18,7	12,6	22,2	21,8	12,5	17,9	17,7	22,9	26,8	20,4	23,8	14,6	20,2	22,8	13,0	16,8	22,5	25,2	21,4	17,1	18,1	24,9	19,8	
ВЛАДЫКИНО	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	
ВЛАДЫКИНО- Ботанический Сад	34,8	28,3	16,9	30,3	42,2	31,1	28,4	37,2	43,8	48,6	34,9	25,2	18,2	26,6	42,7	36,1	29,0	43,3	42,9	26,2	26,8	25,6	42,3	33,1	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.1

№ поезда	6117	6119	6123	6125	6129	6137	6141	6145	6149	6153	6155	6157	6159	6161	6165	6173	6177	6189	6191	6193	6195	6197	6227	Средний расход	
	№ МВПС	83	48	65	51	75	62	84	52	55	77	48	56	65	51	75	62	84	77	48	56	65	51		48
Остановочный пункт/ перегон	Расход электроэнергии, кВт·ч																								
Ботанический Сад	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Ботанический Сад- О.П. Ростокино	26,5	23,2	18,3	22,7	33,7	27,5	23,6	23,3	31,4	33,2	25,1	20,4	19,0	31,0	33,8	25,6	22,9	24,0	15,2	19,8	15,5	23,5	14,5	24,1	
О.П. Ростокино	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	
О.П. Ростокино- БЕЛОКАМЕННАЯ	33,8	32,9	19,8	32,7	38,4	25,8	33,8	30,3	41,4	35,0	31,6	24,2	27,2	32,9	39,1	29,4	29,3	32,0	27,4	23,8	25,3	30,1	27,4	30,6	
БЕЛОКАМЕННАЯ (О.П. Белокаменная)	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	
БЕЛОКАМЕННАЯ- Б-р Рокоссовского	39,1	39,9	19,3	35,8	41,8	33,6	34,1	38,3	48,0	51,4	40,4	42,6	27,2	43,4	44,3	32,8	35,4	41,1	32,5	32,5	24,3	40,8	30,6	36,9	
Б-р Рокоссовского	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,2	
Б-р Рокоссовского- ЛОКОМОТИВ	23,9	15,0	16,3	18,9	34,0	20,4	23,9	26,7	32,0	24,5	22,7	24,4	17,0	26,8	33,9	24,8	25,3	25,6	30,0	21,0	15,8	22,8	29,2	24,1	
ЛОКОМОТИВ	0,0	0,0	0,2	0,0	0,4	0,0	0,1	0,0	0,3	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,2	
ЛОКОМОТИВ Измайлово	20,1	15,2	17,4	20,6	36,8	21,1	25,1	22,8	27,4	8,6	17,8	20,4	18,4	28,9	34,6	21,0	18,5	26,4	15,0	18,4	12,6	21,4	14,3	21,0	
Измайлово	0,3	0,1	0,3	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,6	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.1

№ поезда	6117	6119	6123	6125	6129	6137	6141	6145	6149	6153	6155	6157	6159	6161	6165	6173	6177	6189	6191	6193	6195	6197	6227	Средний расход	
№ МВПС	83	48	65	51	75	62	84	52	55	77	48	56	65	51	75	62	84	77	48	56	65	51	48		
Остановочный пункт/ перегон	Расход электроэнергии, кВт·ч																								
Измайлово-Соколиная гора	31,0	25,1	23,4	31,2	46,2	33,6	38,5	34,9	42,6	40,8	26,6	23,1	25,0	33,5	46,3	31,2	24,1	30,1	20,8	26,8	29,1	28,7	23,6	31,1	
Соколиная гора	0,1	0,0	0,0	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,3	0,0	0,0	0,2	
Соколиная гора-Шоссе Энтузиастов	19,6	19,1	15,1	17,9	25,1	17,6	25,4	20,0	28,0	24,4	2,6	19,6	16,5	19,6	24,5	19,3	20,1	22,5	14,0	18,8	17,3	18,9	14,5	19,1	
Шоссе Энтузиастов	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,2	
Шоссе Энтузиастов-О.П. Андроновка	8,1	8,5	8,5	14,3	13,7	11,3	20,0	16,5	15,4	21,9	18,6	17,5	14,4	18,0	18,7	9,5	10,9	17,2	19,5	13,0	11,7	16,4	21,5	15,0	
О.П. Андроновка	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	
О.П. Андроновка-АНДРОНОВКА	12,3	9,1	19,5	12,5	13,0	10,2	11,2	14,3	12,8	20,6	21,3	13,3	18,0	16,7	20,4	14,9	11,3	21,6	11,5	9,7	10,0	15,6	5,3	14,1	
Суммарный расход электроэнергии за поездку	666,2	595,5	473,1	333,2	424,5	573,8	695,3	685,3	822,2	852,7	710,0	731,2	553,7	701,5	893,6	699,3	708,8	781,3	722,6	631,0	592,0	701,8	635,6		

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Таблица Б.2 – Рекуперация электроэнергии поездами МЦК нечетного направления по данным РПМ МПСУиД

№ поезда	6117	6119	6123	6125	6129	6137	6141	6145	6149	6153	6155	6157	6159	6161	6165	6173	6177	6189	6191	6193	6195	6197	6227	Средняя рекуперация	
№ МВПС	83	48	65	51	75	62	84	52	55	77	48	56	65	51	75	62	84	77	48	56	65	51	48		
Остановочный пункт/ перегон	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																								
АНДРОНОВКА	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
АНДРОНОВКА- Нижегородская	0,2	3,1	2,5	0,0	0,0	0,9	1,5	0,8	0,8	0,0	5,3	6,0	9,2	4,3	4,8	3,0	3,7	4,2	4,3	6,1	5,4	3,4	3,0	3,0	3,5
Нижегородская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Нижегородская- Новохохловская	6,0	9,5	6,0	0,0	0,0	2,1	6,4	4,3	2,8	2,8	13,1	14,0	6,3	10,1	7,6	7,8	6,4	11,3	8,7	12,4	7,5	10,9	5,1	7,7	
Новохохловская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Новохохловская- О.П. Угрешская	7,3	8,0	7,9	0,0	0,0	10,1	6,3	14,0	13,6	9,5	13,1	12,3	9,9	11,5	10,7	10,6	11,3	10,7	7,3	10,0	7,1	12,6	7,2	10,0	
О.П. Угрешская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
О.П. Угрешская- Дубровка	5,5	6,1	4,8	0,0	0,0	3,7	11,5	13,4	12,7	13,8	13,5	13,8	7,1	7,0	13,3	10,1	13,9	11,3	6,1	6,4	7,6	9,3	6,7	9,4	
Дубровка	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Дубровка- Автозаводская	12,5	7,7	9,1	0,0	0,0	3,2	12,9	13,6	12,6	14,8	10,5	14,1	7,7	9,7	15,5	12,6	12,4	13,6	9,0	12,3	9,4	10,1	11,2	11,2	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.2

№ поезда	6117	6119	6123	6125	6129	6137	6141	6145	6149	6153	6155	6157	6159	6161	6165	6173	6177	6189	6191	6193	6195	6197	6227	Средняя рекуперация	
№ МВПС	83	48	65	51	75	62	84	52	55	77	48	56	65	51	75	62	84	77	48	56	65	51	48		
Остановочный пункт/ перегон	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																								
Автозаводская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Автозаводская-ЗиЛ	10,8	7,2	6,1	0,0	0,0	7,7	11,9	14,2	14,2	13,2	14,0	9,4	6,8	10,4	12,1	10,6	12,3	12,8	1,7	13,2	7,2	14,0	5,6	10,3	
ЗиЛ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
ЗиЛ-Верхние Котлы	8,2	7,6	5,3	0,0	0,0	6,9	10,6	10,7	12,2	14,8	12,5	10,2	5,2	7,6	9,9	11,2	12,4	12,1	6,7	9,4	7,0	7,7	6,6	9,3	
Верхние Котлы	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Верхние Котлы-Крымская	2,6	5,1	4,1	0,0	0,0	5,1	5,9	7,4	8,0	11,6	10,1	6,8	4,9	2,7	9,5	7,1	9,6	1,6	8,0	6,4	5,1	3,8	4,4	6,2	
Крымская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Крымская-Площадь Гагарина	12,4	10,6	7,0	0,0	0,0	9,1	10,3	10,1	10,5	12,8	13,3	13,4	10,2	12,4	11,5	13,9	11,0	12,0	8,9	11,9	8,3	10,4	8,8	10,9	
Площадь Гагарина	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Площадь Гагарина-Лужники	9,0	9,3	6,4	0,0	0,0	8,7	8,2	11,4	15,8	19,1	3,4	9,9	7,5	9,6	2,2	11,8	9,4	14,7	16,0	10,7	13,7	14,0	7,2	10,4	
Лужники	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Лужники-КУТУЗОВСКАЯ	4,9	6,7	3,5	0,0	0,0	5,8	7,4	7,2	12,9	12,3	3,7	13,9	4,3	14,2	8,6	12,3	12,7	11,3	17,0	10,9	9,0	15,3	14,0	9,9	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.2

№ поезда	6117	6119	6123	6125	6129	6137	6141	6145	6149	6153	6155	6157	6159	6161	6165	6173	6177	6189	6191	6193	6195	6197	6227	Средняя рекуперация	
№ МВПС	83	48	65	51	75	62	84	52	55	77	48	56	65	51	75	62	84	77	48	56	65	51	48		
Остановочный пункт/ перегон	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																								
КУТУЗОВСКАЯ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
КУТУЗОВСКАЯ - Деловой центр	3,2	4,1	2,5	0,0	0,0	0,0	1,9	6,9	6,7	9,8	10,2	3,7	7,5	6,4	9,9	7,2	6,4	10,4	9,6	8,3	6,1	5,6	9,2	6,8	
Деловой центр	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Деловой центр - Шелепиха	8,7	10,7	8,5	0,0	0,0	7,8	11,3	11,1	14,5	13,9	12,1	14,8	8,8	8,0	11,8	11,2	12,4	12,9	12,6	12,4	10,3	9,8	14,0	11,3	
Шелепиха	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Шелепиха - Хорошево	7,0	8,8	4,9	0,0	0,0	8,0	7,6	10,9	10,1	6,3	10,1	13,1	6,4	8,4	9,6	10,6	10,7	10,6	13,5	11,8	10,1	12,0	11,7	9,6	
Хорошево	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Хорошево-Зорге	9,7	8,9	7,0	0,0	0,0	8,8	11,4	11,2	28,8	13,5	10,4	13,1	6,8	12,2	11,5	10,5	12,5	9,2	10,3	8,8	9,5	8,9	7,7	11,0	
Зорге	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Зорге-Панфиловская	11,6	6,1	6,5	0,0	0,0	10,7	11,7	7,0	11,5	14,3	12,0	5,8	6,6	12,5	11,5	9,9	12,9	9,0	12,1	8,5	8,7	11,3	4,0	9,7	
Панфиловская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Панфиловская - Стрешнево	10,9	7,6	12,6	0,0	0,0	7,4	11,3	14,0	7,1	14,2	12,1	15,5	5,7	11,8	13,3	10,2	12,3	11,7	12,2	11,1	9,5	12,9	12,7	11,2	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.2

№ поезда	6117	6119	6123	6125	6129	6137	6141	6145	6149	6153	6155	6157	6159	6161	6165	6173	6177	6189	6191	6193	6195	6197	6227	Средняя рекуперация	
	83	48	65	51	75	62	84	52	55	77	48	56	65	51	75	62	84	77	48	56	65	51	48		
№ МВПС	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																								
Остановочный пункт/ перегон																									
Стрешнево	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Стрешнево-Балтийская	12,5	8,1	11,0	0,0	0,0	8,6	11,6	12,8	10,6	15,0	10,4	11,7	8,9	12,0	11,4	9,5	12,0	11,0	9,5	10,9	8,8	12,2	9,0	10,8	
Балтийская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
БРАТЦЕВО парк Н	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
БРАТЦЕВО парк Н-Балтийская	0,0	0,0	0,0	1,1	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2
Балтийская-Коптево	9,5	10,5	6,2	6,7	8,6	8,4	12,0	10,1	15,7	18,0	11,1	12,3	6,7	11,3	14,7	10,8	12,0	10,2	7,0	10,7	9,2	9,6	7,2	10,4	
Коптево	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Коптево-О.П.																									
Лихоборы	8,7	9,1	6,6	12,3	8,5	8,5	13,3	8,2	9,9	16,3	9,6	8,6	7,8	9,0	10,8	7,8	13,5	10,1	7,1	9,7	9,1	8,7	6,5	9,5	
О.П. Лихоборы	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
О.П. Лихоборы-Окружная	10,7	8,7	7,9	10,0	14,1	7,7	10,1	12,7	13,3	18,0	10,7	9,7	8,6	11,7	14,6	11,2	8,5	10,5	9,6	8,2	7,7	12,6	10,0	10,7	
Окружная	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.2

№ поезда	6117	6119	6123	6125	6129	6137	6141	6145	6149	6153	6155	6157	6159	6161	6165	6173	6177	6189	6191	6193	6195	6197	6227	Средняя рекуперация	
№ МВПС	83	48	65	51	75	62	84	52	55	77	48	56	65	51	75	62	84	77	48	56	65	51	48		
Остановочный пункт/ перегон	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																								
Окружная-ВЛАДЫКИНО	12,7	10,2	8,0	12,0	10,9	7,8	11,5	14,5	12,8	18,0	12,6	12,7	9,3	12,5	12,9	7,8	10,1	10,1	14,0	13,0	10,3	11,4	14,6	11,7	
ВЛАДЫКИНО	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
ВЛАДЫКИНО-Ботанический Сад	23,9	17,3	9,8	16,0	23,2	12,2	16,0	22,6	14,8	20,8	22,4	17,3	11,1	14,8	22,6	20,6	13,4	18,5	18,5	18,3	16,5	16,2	17,5	17,6	
Ботанический Сад	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Ботанический Сад-О.П. Ростокино	4,5	10,7	7,0	9,5	17,2	11,0	10,7	11,6	15,4	15,4	12,0	9,7	7,6	13,5	14,4	9,5	10,1	10,5	5,5	9,5	6,0	11,2	5,5	10,4	
О.П. Ростокино	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
О.П. Ростокино-БЕЛОКАМЕННАЯ	18,9	18,4	9,1	14,8	18,4	12,1	18,6	18,7	20,5	17,6	18,7	14,1	12,7	16,5	10,0	16,1	16,0	16,5	13,2	13,2	12,4	16,9	11,5	15,4	
БЕЛОКАМЕННАЯ (О.П. Белокаменная)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
БЕЛОКАМЕННАЯ-Б-р Рокоссовского	20,1	20,1	7,6	18,6	17,7	13,6	18,1	20,6	20,4	26,7	21,3	20,9	8,3	21,5	20,4	16,1	19,5	18,1	12,6	15,6	11,6	20,9	12,2	17,5	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.2

№ поезда	6117	6119	6123	6125	6129	6137	6141	6145	6149	6153	6155	6157	6159	6161	6165	6173	6177	6189	6191	6193	6195	6197	6227	Средняя рекуперация	
	№ МВПС	83	48	65	51	75	62	84	52	55	77	48	56	65	51	75	62	84	77	48	56	65	51		48
Остановочный пункт/ перегон	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																								
Б-р Рокоссовского	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Б-р Рокоссовского-ЛОКОМОТИВ	15,5	10,5	9,7	11,6	19,4	13,8	15,9	18,4	14,7	15,4	13,6	12,1	10,0	13,7	18,3	12,2	16,4	15,4	15,3	13,1	9,9	15,0	15,5	14,1	
ЛОКОМОТИВ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
ЛОКОМОТИВ Измайлово	9,3	6,4	7,2	8,7	14,7	8,2	11,7	12,2	12,4	13,4	8,0	10,1	6,9	13,3	18,3	5,2	7,8	13,2	5,8	8,3	4,6	10,6	5,1	9,6	
Измайлово	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Измайлово-Соколиная гора	13,7	10,6	6,8	13,1	18,2	6,6	18,9	15,9	16,1	18,5	2,1	9,2	9,4	15,1	20,1	11,9	8,9	11,8	7,4	12,2	9,8	12,6	8,6	12,1	
Соколиная гора	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Соколиная гора-Шоссе Энтузиастов	10,8	10,0	6,0	9,3	12,5	9,5	14,8	12,2	12,3	13,3	15,0	10,9	8,4	10,9	11,3	9,6	10,2	10,7	6,9	10,7	8,9	9,8	6,4	10,5	
Шоссе Энтузиастов	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Шоссе Энтузиастов-О.П. Андроновка	5,5	6,5	6,8	11,4	12,4	9,8	15,7	13,2	11,0	15,4	14,2	13,9	10,9	14,0	13,2	7,7	9,7	13,6	12,2	11,4	9,6	13,1	15,7	11,6	
О.П. Андроновка	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.2

№ поезда	6117	6119	6123	6125	6129	6137	6141	6145	6149	6153	6155	6157	6159	6161	6165	6173	6177	6189	6191	6193	6195	6197	6227	Средняя рекуперация
№ МВПС	83	48	65	51	75	62	84	52	55	77	48	56	65	51	75	62	84	77	48	56	65	51	48	
Остановочный пункт/ перегон	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																							
О.П. Андроновка-АНДРОНОВКА	4,4	0,0	0,0	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,1	0,0	0,0	0,0	4,2	5,4	0,5	0,0	10,2	0,0	2,5	0,5	0,0	1,4	4,0
Суммарный расход электроэнергии за поездку	311,0	284,2	214,3	159,6	199,1	243,8	346,9	371,9	405,7	444,7	380,7	367,0	247,6	352,6	407,6	327,3	350,5	369,9	308,8	337,9	276,4	352,9	285,4	

Таблица Б.3 – Расход электроэнергии поездами МЦК четного направления по данным РПМ МПСУиД

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средний расход	
№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76	46		
Остановочный пункт/ перегон	Расход электроэнергии, кВт·ч																						
Андроновка	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.3

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средний расход	
	№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76		46
Остановочный пункт/ перегон	Расход электроэнергии, кВт·ч																						
Андроновка-О.П.																							
Андроновка	0,0	0,0	14,0	0,0	0,0	0,0	4,8	0,0	0,0	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	23,2	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,0	
О.П. Андроновка	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,3	0,0	0,2	
О.П. Андроновка- Шоссе Энтузиастов																							
Шоссе Энтузиастов	0,0	0,0	22,0	0,0	0,0	0,0	27,3	20,4	26,9	27,8	24,7	28,4	25,2	28,6	21,7	27,8	23,6	21,2	22,9	26,2	21,5	24,8	
Шоссе Энтузиастов	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	
Шоссе Энтузиастов- Соколиная гора																							
Соколиная гора	0,0	22,0	24,9	0,0	0,0	0,0	21,9	28,4	26,7	25,7	25,1	27,5	26,1	28,9	27,5	29,4	32,0	24,5	25,6	22,7	19,0	25,8	
Соколиная гора- Измайлово																							
Измайлово	30,4	41,6	33,3	0,0	0,0	0,0	37,8	29,5	33,5	40,0	36,7	31,8	30,3	38,1	25,9	47,6	38,3	39,9	40,8	35,4	37,1	36,0	
Измайлово	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,6	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,6	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	
Измайлово- Локомотив																							
Локомотив	25,7	35,8	27,1	0,0	0,0	0,0	24,0	22,3	28,6	24,5	23,2	26,1	27,7	33,2	27,2	36,8	29,7	34,5	21,6	26,5	26,7	27,8	
Локомотив	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4	0,0	0,4	0,2	
Локомотив-Б-р Рокоссовского																							
Рокоссовского	26,0	32,0	32,6	0,0	0,0	0,0	25,9	20,5	33,4	30,5	26,4	32,7	29,2	35,3	43,7	38,5	31,0	31,3	27,3	26,1	30,9	30,7	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.3

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средний расход
	№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76	
Остановочный пункт/ перегон	Расход электроэнергии, кВт·ч																					
Б-р Рокоссовского	0,1	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,6	0,2
Б-р Рокоссовского- Белокаменная	31,7	45,0	38,8	0,0	0,0	0,0	40,5	33,4	41,2	43,0	39,6	39,7	35,8	47,6	30,1	49,4	39,7	46,7	40,4	32,8	39,8	39,7
Белокаменная	0,1	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	0,6	0,0	0,2
Белокаменная-О.П. Ростокино	27,2	26,1	28,8	0,0	0,0	0,0	31,3	27,6	25,9	26,1	26,9	33,4	26,0	35,1	25,1	38,1	23,9	30,4	12,0	29,6	25,9	27,8
О.П. Ростокино	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2
О.П. Ростокино- Ботанический Сад	21,4	35,4	10,4	0,0	0,0	0,0	25,5	28,7	29,8	27,0	23,6	37,0	18,3	34,9	19,4	40,1	25,2	38,4	26,1	30,3	16,5	27,1
Ботанический Сад	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Ботанический Сад- Владыкино	23,6	24,5	25,3	0,0	0,0	0,0	24,6	39,4	19,4	20,5	22,7	46,5	47,6	37,6	8,4	37,9	23,7	34,0	25,1	31,2	22,3	28,6
Владыкино	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
Владыкино- Окружная	10,0	6,4	15,1	0,0	0,0	0,0	7,9	16,8	11,3	15,7	9,6	23,8	15,2	19,1	17,3	19,5	9,0	9,3	12,4	11,8	11,0	13,4
Окружная	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
Окружная-О.П. Лихоборы	19,8	19,5	16,6	0,0	0,0	0,0	18,7	20,7	15,9	22,2	18,9	24,7	24,3	26,0	19,1	20,5	22,2	19,1	21,3	20,0	18,9	20,5

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.3

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средний расход
	№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76	
Остановочный пункт/ перегон	Расход электроэнергии, кВт·ч																					
О.П. Лихоборы	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1
О.П. Лихоборы- Коптево	21,6	12,6	25,2	0,0	0,0	0,0	17,8	27,7	27,9	26,0	21,8	37,1	25,7	29,9	28,6	26,5	25,5	21,1	23,4	22,8	24,0	24,7
Коптево	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2
Коптево-Балтийская	19,8	21,4	25,6	0,0	0,0	0,0	25,0	23,9	23,7	23,7	26,3	27,9	27,7	27,8	24,0	21,4	21,7	27,1	21,3	21,9	23,7	24,1
Балтийская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1
Братцево парк Ч	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Братцево парк Ч- Балтийская	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3
Балтийская- Стрешнево	22,7	19,6	25,5	0,0	27,6	28,0	23,5	22,4	19,5	21,7	21,0	25,9	0,5	23,5	21,0	27,4	20,5	20,6	21,5	20,4	19,9	21,6
Стрешнево	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
Стрешнево- Панфиловская	32,9	20,1	22,5	0,0	21,3	29,6	22,8	23,9	17,2	24,0	22,9	29,1	1,4	28,1	21,7	30,0	21,2	21,3	21,0	23,9	26,5	23,1
Панфиловская	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	0,0	0,2	0,0	0,1	0,2
Панфиловская-Зорге	22,6	23,9	23,9	22,9	24,9	17,4	22,1	16,6	20,1	19,3	23,4	25,3	22,6	21,8	20,8	25,6	25,8	18,8	23,9	29,4	24,9	22,7
Зорге	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1
Зорге-Хорошево	20,6	21,2	19,2	19,2	18,4	21,5	19,3	15,4	22,1	20,7	20,9	24,0	21,3	20,4	20,3	21,1	19,4	17,8	18,4	22,0	18,6	20,1

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.3

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средний расход
	№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76	
Остановочный пункт/ перегон	Расход электроэнергии, кВт·ч																					
Хорошево	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Хорошево-Шелепиха	21,2	19,0	19,7	15,3	16,6	19,1	18,7	17,9	18,0	18,1	20,0	20,2	17,2	18,6	21,4	22,9	18,3	17,3	18,2	20,2	17,4	18,8
Шелепиха	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1
Шелепиха-Деловой центр	22,8	24,9	21,7	24,9	22,3	23,1	21,9	24,8	23,2	25,9	17,3	30,0	23,8	23,6	14,1	26,6	19,6	21,3	14,8	19,3	18,7	22,1
Деловой центр	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4	0,0	0,1
Деловой центр-Кутузовская	17,2	18,7	14,6	19,1	15,3	19,1	17,4	17,9	17,7	14,1	21,8	21,4	16,4	18,3	28,7	19,3	15,0	12,9	13,9	18,2	14,8	17,7
Кутузовская	1,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,3
Кутузовская-Лужники	32,4	25,9	28,2	26,2	36,8	36,1	25,3	28,4	38,0	39,5	29,1	34,7	36,9	37,2	56,1	26,1	26,2	27,4	37,5	21,6	23,7	32,1
Лужники	0,1	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
Лужники-Площадь Гагарина	19,3	22,1	21,7	19,8	21,2	15,8	21,5	21,6	21,8	22,5	19,2	29,4	22,4	22,2	17,6	20,5	18,0	21,2	19,2	20,5	29,6	21,3
Площадь Гагарина	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Площадь Гагарина-Крымская	24,5	17,0	14,5	15,2	16,2	16,1	6,4	13,8	23,7	22,9	6,2	26,2	19,1	18,7	14,8	11,3	7,7	13,9	21,5	11,2	10,3	15,8

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.3

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средний расход
	№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76	
Остановочный пункт/ перегон	Расход электроэнергии, кВт·ч																					
Крымская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Крымская-Верхние Котлы	14,2	19,4	15,5	18,7	15,9	14,9	9,7	16,5	15,5	14,0	18,6	16,8	16,1	18,4	15,5	10,0	12,4	12,9	12,3	12,8	12,7	14,9
Верхние Котлы	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Верхние Котлы-ЗиЛ	20,8	23,9	25,0	22,3	19,2	29,8	17,6	19,0	26,2	29,7	23,3	23,9	19,3	25,4	22,6	20,0	20,2	26,1	22,0	21,1	24,6	23,0
ЗиЛ	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
ЗиЛ-Автозаводская	21,0	12,1	19,6	20,6	19,5	23,0	18,4	18,7	23,5	12,9	14,8	24,5	20,7	18,9	17,0	20,8	13,5	19,6	11,8	16,8	23,4	18,6
Автозаводская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1
Автозаводская- Дубровка	17,4	12,9	23,3	23,3	19,3	22,7	23,9	22,0	24,3	15,4	18,9	24,8	18,0	23,5	16,5	21,7	15,4	23,3	13,7	21,4	16,1	19,9
Дубровка	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Дубровка-О.П. Угрешская	25,1	26,1	21,9	28,4	20,6	24,4	24,2	21,9	23,0	21,2	23,4	25,3	20,9	24,9	18,4	30,2	17,6	26,0	19,7	29,7	23,5	23,6
О.П. Угрешская	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
О.П. Угрешская- Новохохловская	23,2	20,6	21,7	27,0	24,9	23,5	25,2	26,0	25,3	27,1	25,7	27,4	23,9	25,9	26,5	25,9	24,7	26,8	25,6	27,0	30,5	25,4
Новохохловская	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.3

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средний расход
	№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76	
Остановочный пункт/ перегон	Расход электроэнергии, кВт·ч																					
Новохоловская- Нижегородская	21,3	0,0	23,7	25,0	23,1	27,5	13,6	22,4	22,6	25,9	21,3	26,3	24,9	26,0	27,2	24,8	23,0	22,3	19,7	28,0	27,8	23,8
Нижегородская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,1
Нижегородская- Андроновка	17,4	0,0	20,4	17,5	17,7	17,8	38,3	0,4	15,0	17,1	16,1	17,3	18,1	18,0	14,2	17,4	13,6	16,3	16,3	15,4	18,4	17,1
Суммарный расход электроэнергии за поездку	658,7	649,8	728,0	345,5	385,8	413,7	704,3	690,0	741,4	752,3	693,2	870,1	702,5	836,1	737,6	855,0	679,2	744,3	672,4	719,0	701,2	

Таблица Б.4 – Рекуперация электроэнергии поездами МЦК четного направления по данным РПМ МПСУиД

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средняя рекуперация
	№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76	
Остановочный пункт/ перегон	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																					
Андроновка	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.4

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средняя рекуперация	
	№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76		46
Остановочный пункт/ перегон	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																						
Андроновка-О.П.																							
Андроновка	0,0	0,0	5,8	0,0	0,0	0,0	2,5	7,5	9,8	3,2	0,1	6,8	8,5	4,6	8,9	9,7	6,2	2,1	9,0	2,3	6,5	5,8	
О.П. Андроновка	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
О.П. Андроновка- Шоссе Энтузиастов	0,0	0,0	5,8	0,0	0,0	0,0	6,6	7,3	11,1	6,8	10,0	10,9	9,7	11,8	11,7	9,4	9,0	3,0	7,8	9,8	7,3	8,6	
Шоссе Энтузиастов	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,2	0,0		
Шоссе Энтузиастов- Соколиная гора	0,0	10,5	11,5	0,0	0,0	0,0	11,9	15,0	15,5	13,8	13,6	12,6	12,8	15,5	15,6	10,3	7,7	13,9	11,2	13,2	9,7	12,6	
Соколиная гора	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0		
Соколиная гора- Измайлово	16,6	15,5	13,5	0,0	0,0	0,0	24,9	15,7	22,4	19,7	23,8	19,5	17,9	24,0	14,0	22,1	21,5	26,6	21,6	21,3	19,0	20,0	
Измайлово	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Измайлово- Локомотив	13,5	14,9	10,8	0,0	0,0	0,0	11,5	12,5	17,4	11,2	11,7	15,1	14,3	15,5	10,5	15,3	13,7	17,3	13,6	10,4	15,1	13,6	
Локомотив	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.4

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средняя рекуперация
	№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76	
Остановочный пункт/ перегон	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																					
Локомотив-Б-р Рокоссовского	11,3	13,1	12,5	0,0	0,0	0,0	10,7	8,2	13,9	11,1	11,8	14,7	11,7	14,7	18,4	15,4	13,8	18,2	10,2	11,3	11,5	12,9
Б-р Рокоссовского	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Б-р Рокоссовского- Белокаменная	13,5	17,7	16,5	0,0	0,0	0,0	19,8	18,8	18,7	16,9	19,0	17,9	17,6	23,7	14,0	22,4	20,7	26,7	17,6	15,9	17,1	18,6
Белокаменная	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Белокаменная-О.П. Ростокино	11,7	10,9	11,4	0,0	0,0	0,0	13,7	14,2	11,5	9,8	13,4	13,5	10,5	18,0	14,0	18,5	10,8	13,7	12,7	13,3	9,4	12,8
О.П. Ростокино	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
О.П. Ростокино- Ботанический Сад	12,9	18,4	16,9	0,0	0,0	0,0	15,6	16,0	18,8	12,5	13,0	19,5	10,2	12,8	2,5	17,0	11,1	19,3	12,1	17,0	9,0	14,1
Ботанический Сад	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ботанический Сад- Владыкино	5,5	5,5	6,0	0,0	0,0	0,0	5,9	14,4	2,6	3,0	4,5	16,7	13,5	13,5	1,6	14,1	5,6	10,7	5,5	7,3	4,6	7,8
Владыкино	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Владыкино- Окружная	2,9	1,2	5,5	0,0	0,0	0,0	1,7	7,1	3,3	6,9	2,4	10,6	5,9	8,7	3,3	7,4	2,7	1,0	4,5	3,4	4,1	4,6

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.4

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средняя рекуперация
	№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76	
Остановочный пункт/ перегон	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																					
Окружная	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Окружная-О.П. Лихоборы	6,2	6,1	3,7	0,0	0,0	0,0	4,9	6,0	2,9	7,3	4,6	7,8	8,6	9,7	7,1	6,0	7,5	4,3	6,5	5,1	6,4	6,1
О.П. Лихоборы	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
О.П. Лихоборы- Коптево	9,6	4,5	11,8	0,0	0,0	0,0	6,7	13,8	12,1	13,0	9,5	15,1	23,4	13,4	11,7	12,3	9,9	8,2	10,6	9,2	10,5	11,4
Коптево	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Коптево-Балтийская	10,9	11,1	16,0	0,0	0,0	0,0	12,7	14,4	13,8	13,2	14,8	12,4	15,3	15,9	10,8	11,8	10,4	11,9	12,3	11,9	15,1	13,0
Балтийская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Братцево парк Ч	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Братцево парк Ч- Балтийская	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8
Балтийская- Стрешнево	11,1	10,0	14,2	0,0	4,4	12,7	10,3	11,2	10,0	11,2	10,4	11,5	7,4	11,8	10,3	13,7	9,4	10,7	10,8	9,1	10,5	10,5
Стрешнево	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Стрешнево- Панфиловская	17,1	12,1	15,9	0,0	10,5	17,9	11,8	13,5	11,4	12,3	12,4	14,7	5,8	15,1	12,2	11,2	9,0	11,7	9,2	11,5	11,8	12,4

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.4

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средняя рекуперация
	№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76	
Остановочный пункт/ перегон	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																					
Панфиловская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Панфиловская-Зорге	14,7	13,6	17,7	15,2	12,8	11,4	10,2	11,2	12,0	14,2	16,2	14,2	14,4	15,1	12,3	13,9	17,2	13,0	12,5	15,0	13,8	13,8
Зорге	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Зорге-Хорошево	15,4	15,2	14,0	15,0	13,0	15,2	13,3	10,7	14,1	15,9	15,3	13,4	11,8	15,3	10,0	13,2	12,1	12,7	13,7	14,0	13,7	13,7
Хорошево	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Хорошево-Шелепиха	13,1	9,2	3,6	9,0	9,6	10,3	9,9	10,7	10,8	10,8	11,5	14,0	3,7	11,1	13,5	14,1	10,4	9,5	9,5	11,6	10,6	10,3
Шелепиха	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Шелепиха-Деловой центр	13,8	12,9	13,8	16,0	12,6	14,8	12,7	13,2	14,4	14,1	9,4	14,8	12,7	15,3	9,3	13,6	10,5	13,3	8,1	10,9	7,7	12,6
Деловой центр	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Деловой центр-Кутузовская	10,6	10,7	7,1	11,4	9,4	7,3	10,2	9,7	11,2	9,2	9,6	12,4	10,2	11,3	10,2	10,5	8,8	7,3	8,5	10,8	8,4	9,8
Кутузовская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Кутузовская-Лужники	14,9	13,1	16,0	13,9	13,8	16,7	11,7	14,0	17,2	14,1	14,2	11,1	12,6	19,0	12,1	14,3	12,3	12,2	14,7	10,0	13,4	13,9
Лужники	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.4

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средняя рекуперация
	№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76	
Остановочный пункт/ перегон	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																					
Лужники-Площадь Гагарина	3,6	4,8	4,6	3,1	4,5	3,3	4,5	4,3	4,0	4,5	2,6	10,2	4,4	3,7	1,9	3,5	2,4	3,3	3,4	3,3	9,6	4,3
Площадь Гагарина	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Площадь Гагарина-Крымская	13,4	8,7	7,7	8,1	8,0	7,8	5,8	6,6	12,0	6,5	2,2	12,0	9,4	9,2	7,1	5,5	4,5	5,9	12,2	5,2	5,4	7,8
Крымская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Крымская-Верхние Котлы	8,1	13,8	12,9	13,7	12,5	12,6	8,6	10,3	11,1	7,6	10,1	12,7	10,8	13,8	9,9	9,1	9,4	9,5	10,3	9,7	10,0	10,8
Верхние Котлы	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Верхние Котлы-ЗИЛ	10,8	13,7	15,9	12,7	9,9	16,8	8,2	10,7	12,0	13,7	12,5	6,8	10,5	16,2	11,5	12,2	12,5	12,6	7,3	13,0	13,1	12,0
ЗИЛ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ЗИЛ-Автозаводская	9,8	4,5	9,7	10,2	9,3	11,3	6,7	9,0	5,1	4,9	6,5	12,2	8,6	8,4	7,8	10,6	4,1	9,3	4,4	7,3	10,2	8,1
Автозаводская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Автозаводская-Дубровка	9,5	3,2	10,6	9,9	6,0	9,9	11,0	9,2	9,6	4,8	7,6	10,9	6,1	9,9	4,1	9,9	5,2	7,6	3,7	9,0	5,3	7,8
Дубровка	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение Таблицы Б.4

№ поезда	6116	6118	6120	6128	6136	6140	6144	6146	6154	6156	6160	6164	6172	6176	6180	6182	6184	6190	6192	6196	6220	Средняя рекуперация
	№ МВПС	61	58	86	54	66	72	80	61	86	64	76	54	66	72	80	61	46	86	64	76	
Остановочный пункт/ перегон	Рекуперация электроэнергии, кВт·ч																					
Дубровка-О.П. Угрешская	13,4	15,8	12,6	14,2	10,5	12,6	8,7	12,3	12,1	8,9	12,2	15,4	10,8	14,6	4,9	16,2	11,9	15,8	7,7	17,3	8,8	12,2
О.П. Угрешская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
О.П. Угрешская- Новохохловская	10,9	7,3	8,5	12,2	9,6	9,9	10,0	10,9	10,1	12,2	11,9	13,4	8,3	11,9	9,5	12,3	11,5	12,4	9,9	12,8	11,2	10,8
Новохохловская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Новохохловская- Нижегородская	9,5	0,0	16,3	10,6	9,6	12,4	6,7	11,2	10,5	12,5	9,4	12,6	9,7	11,7	11,4	9,5	9,2	10,3	8,2	13,0	12,4	10,8
Нижегородская	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Нижегородская- Андроновка	0,8	0,0	0,6	0,0	0,0	9,6	23,9	0,0	5,2	0,0	6,2	0,5	0,0	4,5	0,0	9,2	0,0	1,7	7,8	7,2	5,2	6,4
Суммарный расход электроэнергии за поездку	315,0	298,3	349,3	175,2	168,1	213,9	334,1	376,1	366,5	325,7	332,2	406,1	337,3	419,8	302,2	394,1	311,3	355,7	318,8	358,2	326,2	

ПРИЛОЖЕНИЕ В
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА РАСХОДА И РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
ПОЕЗДАМИ

Таблица В.1 – Результаты расчета расхода и рекуперации электроэнергии поездами МЦК в период с 7:00 до 12:00 10.04.2019 года

№ поезда	№ ЭПС	Станция отправления	Станция назначения	Время начала поездки	Время окончания поездки	Расход электроэнергии с 7:00 до 12:00, кВт·ч	Рекуперация с 7:00 до 12:00, кВт·ч
6115	63	О.П. Угрешская	Андроновка	5:42	7:06	29,1	15,6
6117	83	Андроновка	Андроновка	5:42	7:17	116,1	59,2
6119	48	Андроновка	Андроновка	5:55	7:26	186,7	93,2
6121	56	Братцево парк Н	Андроновка	6:47	7:31	222,6	131,3
6123	65	Андроновка	Андроновка	6:05	7:36	194,6	92,4
6125	51	Братцево парк Н	Андроновка	6:57	7:40	326,8	158,5
6127	57	Андроновка	Андроновка	6:15	7:45	380,6	189,4
6129	75	Братцево парк Н	Андроновка	7:06	7:50	424,5	199,2
6131	59	Андроновка	Андроновка	6:26	7:55	453,3	219,7
6133	67	Братцево парк Н	Андроновка	7:18	8:00	332,8	167,3
6135	73	Андроновка	Андроновка	6:35	8:05	517,2	247,7
6137	62	Андроновка	Андроновка	6:40	8:10	466,8	204,2
6139	60	Андроновка	Андроновка	6:45	8:15	600,0	280,0
6141	84	Андроновка	Андроновка	6:49	8:20	636,2	321,4
6143	49	Андроновка	Андроновка	6:55	8:25	678,1	325,3
6145	52	Андроновка	Андроновка	7:00	8:30	685,3	372,0
6147	63	Андроновка	Андроновка	7:06	8:35	698,5	336,4
6149	55	Андроновка	Андроновка	7:09	8:40	822,1	405,8
6151	83	Андроновка	Андроновка	7:17	8:45	698,5	336,4
6153	77	Андроновка	Андроновка	7:21	8:51	852,7	444,8
6155	48	Андроновка	Андроновка	7:27	8:55	709,9	380,8
6157	56	Андроновка	Андроновка	7:31	9:00	731,2	367,1
6159	65	Андроновка	Андроновка	7:36	9:06	553,7	247,7
6161	51	Андроновка	Андроновка	7:41	9:11	698,5	336,4
6163	57	Андроновка	Андроновка	7:46	9:16	698,5	336,4
6165	75	Андроновка	Андроновка	7:51	9:21	893,6	407,7
6167	59	Андроновка	Андроновка	7:56	9:26	698,5	336,4
6169	67	Андроновка	Андроновка	8:01	9:31	698,5	336,4

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В

Продолжение Таблицы В.1

№ поезда	№ ЭПС	Станция отправления	Станция назначения	Время начала поездки	Время окончания поездки	Расход электроэнергии с 7:00 до 12:00, кВт·ч	Рекуперация с 7:00 до 12:00, кВт·ч
6171	73	Андроновка	Андроновка	8:06	9:36	698,5	336,4
6173	62	Андроновка	Андроновка	8:11	9:41	699,3	327,4
6175	60	Андроновка	Андроновка	8:16	9:46	698,5	336,4
6177	84	Андроновка	Андроновка	8:21	9:51	708,8	350,5
6179	49	Андроновка	Андроновка	8:26	9:56	698,5	336,4
6181	52	Андроновка	Андроновка	8:31	10:01	698,5	336,4
6183	63	Андроновка	Андроновка	8:36	10:06	698,5	336,4
6185	55	Андроновка	Андроновка	8:41	10:11	698,5	336,4
6187	83	Андроновка	Андроновка	8:46	10:16	698,5	336,4
6189	77	Андроновка	Андроновка	8:51	10:21	781,2	370,0
6191	48	Андроновка	Андроновка	8:56	10:26	722,5	308,9
6193	56	Андроновка	Андроновка	9:01	10:31	609,1	338,2
6195	65	Андроновка	Андроновка	9:06	10:36	591,9	276,4
6197	51	Андроновка	Андроновка	9:11	10:41	701,8	353,0
6199	57	Андроновка	Андроновка	9:16	10:46	698,5	336,4
6201	75	Андроновка	Андроновка	9:21	10:51	829,5	390,0
6203	59	Андроновка	Андроновка	9:26	10:56	698,5	336,4
6205	67	Андроновка	Андроновка	9:31	11:01	698,5	336,4
6207	73	Андроновка	Андроновка	9:36	11:06	698,5	336,4
6209		Андроновка	Андроновка	9:41	11:11	698,5	336,4
6211	60	Андроновка	Андроновка	9:46	11:16	698,5	336,4
6213	84	Андроновка	Андроновка	9:51	11:21	698,5	336,4
6215	49	Андроновка	Андроновка	9:56	11:26	698,5	336,4
6217	52	Андроновка	Андроновка	10:01	11:31	698,5	336,4
6219	63	Андроновка	Андроновка	10:06	11:36	698,5	336,4
6221	55	Андроновка	Андроновка	10:11	11:41	698,5	336,4
6223	83	Андроновка	Андроновка	10:16	11:46	698,5	336,4
6225	77	Андроновка	Андроновка	10:21	11:51	698,5	336,4
6227	48	Андроновка	Андроновка	10:26	11:56	635,6	285,4
6229	56	Андроновка	Андроновка	10:31	12:01	691,5	334,4
6231	65	Андроновка	Андроновка	10:36	12:06	669,4	320,9

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В

Продолжение Таблицы В.1

№ поезда	№ ЭПС	Станция отправления	Станция назначения	Время начала поездки	Время окончания поездки	Расход электроэнергии с 7:00 до 12:00, кВт·ч	Рекуперация с 7:00 до 12:00, кВт·ч
6235	57	Андроновка	Андроновка	10:46	12:16	574,0	274,6
6237	75	Андроновка	Андроновка	10:51	12:21	534,0	254,0
6239	59	Андроновка	Братцево парк Ч	10:56	11:47	372,4	171,3
6241	67	Андроновка	Андроновка	11:01	12:31	447,3	211,7
6243	73	Андроновка	Братцево парк Ч	11:06	11:57	372,4	171,3
6245	62	Андроновка	Андроновка	11:11	12:41	365,7	169,1
6247	60	Андроновка	Братцево парк Ч	11:16	12:07	318,9	148,1
6249	84	Андроновка	Андроновка	11:21	12:51	272,0	127,0
6251	49	Андроновка	Панфиловская	11:26	12:09	244,0	115,0
6253	52	Андроновка	Андроновка	11:31	13:01	206,0	97,0
6255	63	Андроновка	Андроновка	11:36	13:07	176,0	83,0
6257	55	Андроновка	Андроновка	11:41	13:11	135,9	67,5
6259	83	Андроновка	Панфиловская	11:46	12:29	92,8	52,0
6261	77	Андроновка	Андроновка	11:51	13:21	57,6	30,6
6116	61	Соколиная гора	Андроновка	5:45	7:08	56,9	31,8
6118	58	Шоссе Энтузиастов	Андроновка	5:52	7:18	97,1	53,9
6120	86	Андроновка	Андроновка	5:58	7:28	190,6	91,6
6122	69	Андроновка	Андроновка	6:08	7:38	468,7	224,7
6124	76	Панфиловская	Андроновка	7:00	7:43	262,4	120,7
6126	45	Андроновка	Андроновка	6:18	7:48	381,7	187,8
6128	54	Панфиловская	Андроновка	7:10	7:53	316,6	161,6
6130	53	Андроновка	Андроновка	6:28	7:58	451,0	218,4
6132	82	Братцево парк Ч	Андроновка	7:10	8:03	386,0	189,6
6134	85	Андроновка	Андроновка	6:38	8:08	513,0	240,5
6136	66	Братцево парк Ч	Андроновка	7:20	8:13	353,4	155,0
6138	70	Андроновка	Андроновка	6:48	8:18	622,6	291,0

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В

Продолжение Таблицы В.1

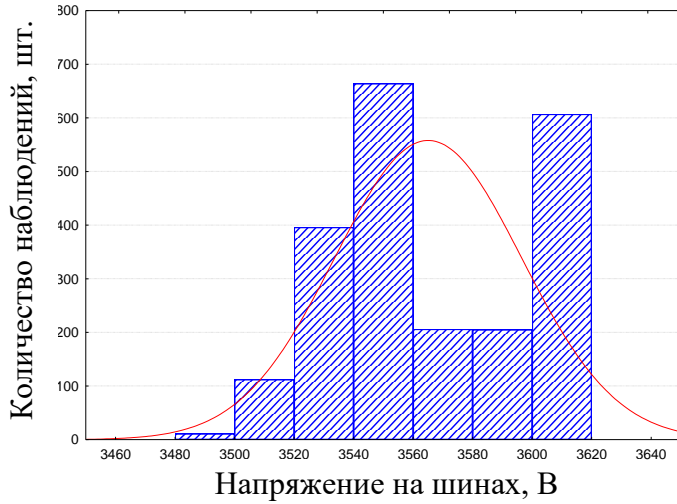
№ поезда	№ ЭПС	Станция отправления	Станция назначения	Время начала поездки	Время окончания поездки	Расход электроэнергии с 7:00 до 12:00, кВт·ч	Рекуперация с 7:00 до 12:00, кВт·ч
6140	72	Братцево парк Ч	Андроновка	7:30	8:23	379,0	197,3
6142	78	Андроновка	Андроновка	6:58	8:28	737,0	345,8
6144	80	Андроновка	Андроновка	7:01	8:33	645,6	308,0
6146	61	Андроновка	Андроновка	7:08	8:38	632,1	346,8
6148	46	Андроновка	Андроновка	7:11	8:43	750,0	351,6
6150	58	Андроновка	Андроновка	7:18	8:48	750,0	351,6
6152	50	Андроновка	Андроновка	7:21	8:53	750,0	351,6
6154	86	Андроновка	Андроновка	7:28	8:58	679,2	338,0
6156	64	Андроновка	Андроновка	7:31	9:03	689,2	300,3
6158	69	Андроновка	Андроновка	7:38	9:08	750,0	351,6
6160	76	Андроновка	Андроновка	7:43	9:13	635,0	306,3
6162	45	Андроновка	Андроновка	7:48	9:18	750,0	351,6
6164	54	Андроновка	Андроновка	7:53	9:23	797,1	374,5
6166	53	Андроновка	Андроновка	7:58	9:28	750,0	351,6
6168	82	Андроновка	Андроновка	8:03	9:33	750,0	351,6
6170	85	Андроновка	Андроновка	8:08	9:38	750,0	351,6
6172	66	Андроновка	Андроновка	8:13	9:43	643,6	311,0
6174	70	Андроновка	Андроновка	8:18	9:48	750,0	351,6
6176	72	Андроновка	Андроновка	8:23	9:53	765,9	381,1
6178	78	Андроновка	Андроновка	8:28	9:58	750,0	351,6
6180	80	Андроновка	Андроновка	8:33	10:03	675,7	278,6
6182	61	Андроновка	Андроновка	8:38	10:08	783,2	363,4
6184	46	Андроновка	Андроновка	8:43	10:13	622,2	287,1
6186	58	Андроновка	Андроновка	8:48	10:18	750,0	351,6
6188	50	Андроновка	Андроновка	8:53	10:23	750,0	351,6
6190	86	Андроновка	Андроновка	8:58	10:28	681,7	328,0
6192	64	Андроновка	Андроновка	9:03	10:33	616,0	294,0
6194	69	Андроновка	Андроновка	9:08	10:38	750,0	351,6
6196	76	Андроновка	Андроновка	9:13	10:43	658,7	330,3
6198	45	Андроновка	Андроновка	9:18	10:48	750,0	351,6
6200	54	Андроновка	Андроновка	9:23	10:53	750,0	351,6

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В

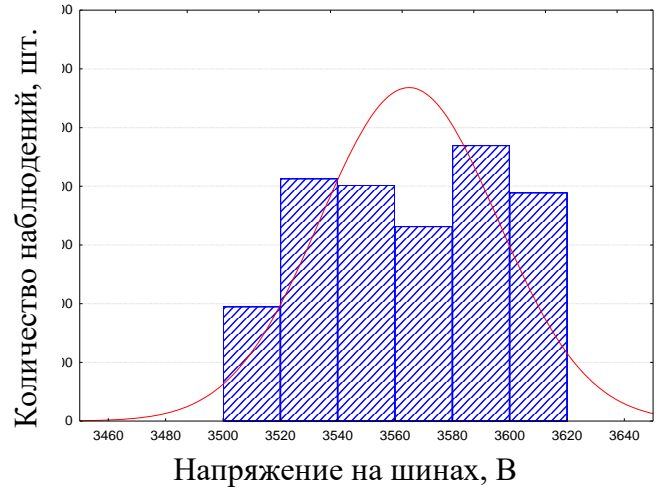
Продолжение Таблицы В.1

№ поезда	№ ЭПС	Станция отправления	Станция назначения	Время начала поездки	Время окончания поездки	Расход электроэнергии с 7:00 до 12:00, кВт·ч	Рекуперация с 7:00 до 12:00, кВт·ч
6202	53	Андроновка	Андроновка	9:28	10:58	750,0	351,6
6204	82	Андроновка	Андроновка	9:33	11:03	750,0	351,6
6206	85	Андроновка	Андроновка	9:38	11:08	750,0	351,6
6208	66	Андроновка	Андроновка	9:43	11:13	750,0	351,6
6210	70	Андроновка	Андроновка	9:48	11:18	750,0	351,6
6212	72	Андроновка	Андроновка	9:53	11:23	750,0	351,6
6214	78	Андроновка	Андроновка	9:58	11:28	750,0	351,6
6216	80	Андроновка	Андроновка	10:03	11:33	750,0	351,6
6218	61	Андроновка	Канатчиково	10:08	11:17	576,0	269,0
6220	46	Андроновка	Андроновка	10:13	11:43	642,3	300,0
6222	58	Андроновка	Пресня	10:18	11:11	466,0	220,0
6224	50	Андроновка	Андроновка	10:23	11:53	750,0	351,6
6226	86	Андроновка	Пресня	10:28	11:21	466,0	220,0
6228	64	Андроновка	Андроновка	10:33	12:03	742,0	340,0
6230	69	Андроновка	Братцево парк Н	10:38	11:23	368,4	163,8
6232	76	Андроновка	Андроновка	10:43	12:13	646,0	306,0
6234	45	Андроновка	Братцево парк Н	10:48	11:33	368,4	163,8
6236	54	Андроновка	Андроновка	10:53	12:23	567,8	265,0
6238	53	Андроновка	Братцево парк Н	10:58	11:43	368,4	163,8
6240	82	Андроновка	Андроновка	11:03	12:33	520,0	240,0
6242	85	Андроновка	Братцево парк Н	11:08	11:53	368,4	163,8
6244	66	Андроновка	Андроновка	11:13	12:43	413,1	186,7
6246	70	Андроновка	Братцево парк Н	11:18	12:03	364,0	162,1
6248	72	Андроновка	Андроновка	11:23	12:53	327,9	143,0
6250	78	Андроновка	Братцево парк Н	11:28	12:13	294,7	131,5
6252	80	Андроновка	Андроновка	11:33	13:03	266,3	123,9
6254	46	Андроновка	Андроновка	11:43	13:13	185,9	86,1
6256	50	Андроновка	Андроновка	11:53	13:23	63,6	27,1
ИТОГО				7:00	12:00	82160,2	39173,5

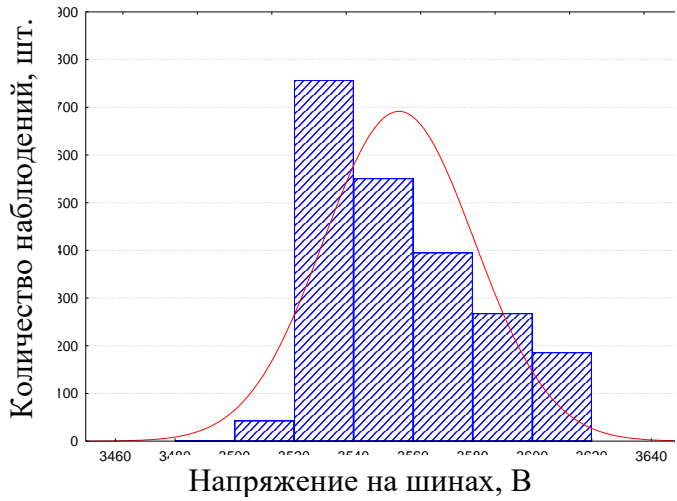
ПРИЛОЖЕНИЕ Г
ЧАСТОТНЫЕ ГИСТОГРАММЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА
ШИНАХ ПОСТОВ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ



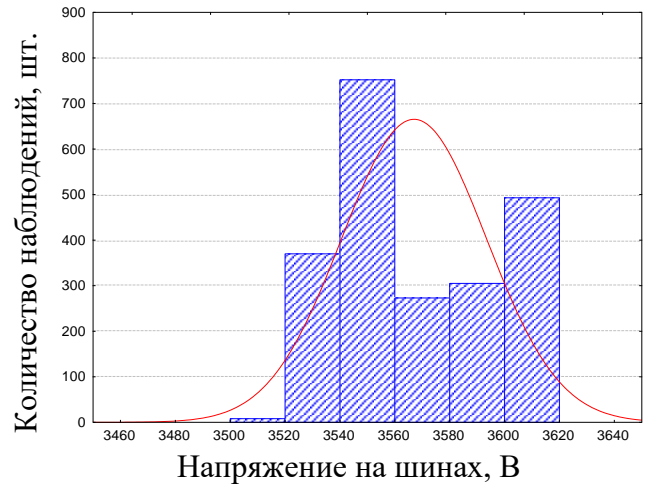
ПСК 270



ПСК 445



ПСК-1



ПСК Черкизово

Рисунок Г.1 - частотные гистограммы распределения для напряжения на шинах постов
 секционирования