



ШУРОВА Наталья Константиновна

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОТОКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В
УСЛОВИЯХ РОСТА ГРУЗОБОРОТА**

· Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС)».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Ли Валерий Николаевич

Официальные оппоненты:

Марикин Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Электроснабжение железных дорог», заведующий кафедрой;

Никифоров Михаил Михайлович, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», заместитель директора научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте ОмГУПС.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (СамГУПС)

Защита диссертации состоится «21» февраля 2020 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15 зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: www.usurt.ru.

Автореферат разослан «9» января 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тимухина
Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Электрифицированные железные дороги – одни из наиболее крупных потребителей электроэнергии в стране. Объем потребления электрической энергии составляет порядка 3,5% от всего объема генерируемой электрической энергии. Предстоящее увеличение объемов перевозок, которое запланировано «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», величина которого составит по минимальному варианту развития железнодорожного транспорта 146 %, а по максимальному – 158 % к уровню 2007 года, потребует усиления действующей системы тягового электроснабжения. Кроме того, рост грузооборота в 1,4 раза к уровню 2012 года предполагается по консервативному сценарию «Стратегии развития холдинга ОАО «РЖД» на период до 2030 года». Указанный рост грузооборота повлечет увеличение количества потребляемой электрической энергии, которое можно определить, используя приемы прогнозирования.

Помимо роста объемов потребляемой электрической энергии на тягу поездов, в Дальневосточном регионе планируется дополнительно электрифицировать две железнодорожные ветки: Волочаевка – Комсомольск-на-Амуре – Советская Гавань (932 км) и Комсомольск-на-Амуре – Хани (1975 км). Кроме того, на Дальнем Востоке создано 18 территорий опережающего развития (ТОР), имеется тенденция к увеличению промышленного производства на 8,6 % в год и вступила в силу программа «Дальневосточный гектар». Что также может потребовать изыскания дополнительных мощностей.

При этом, увеличение располагаемых мощностей энергосистемы требует больших временных, денежных и трудовых затрат, что не всегда целесообразно. Поэтому проектировать усиление действующей системы тягового электроснабжения необходимо, учитывая возможный дефицит электрической энергии.

Одним из вариантов усиления является установка компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения. Данное мероприятие позволит не только снизить потери напряжения, но и уменьшить нагрузку понижающих трансформаторов, а также системы внешнего электроснабжения. При этом необходимо учитывать изменение объемов перевозок.

Актуальность работы подтверждается необходимостью обеспечения эффективного функционирования системы тягового электроснабжения, а также удовлетворения возрастающей потребности в электрической энергии как со стороны тягового электроснабжения, так и со стороны промышленного производства с минимальными капитальными вложениями.

Степень разработанности темы. Вопросами компенсации реактивной мощности

занимались многие зарубежные и отечественные ученые, такие как Бадёр М.П., Бардушко В.Д., Бородулин Б.М., Герман Л.А., Ермоленко Д.В., Кордюков Е.И., Кулинич Ю.М., Мамошин Р.Р., Марквардт К.Г., Марквардт Г.Г., Марикин А.Н., Савина Н.В., Савоськин А.Н., Серебряков А.С., Сухов М.Ю., Шатнев О.И., F.O. Igbinovia, P.M. Saradva, Q. Li, G. Wei и другие. Вопросами прогнозирования электропотребления занимались такие ученые, как Евсеев О.В., Крюков А.В., Макоклюев Б.И., Меламед А.М., Митрофанов А.Н., Надтока И.И., Погосов В.Ю., Поляк Г.М., Черемисин В.Т., Kandil M.S., Mahmoud H.M., M. A. Bazaz и другие.

Цель работы заключается в обеспечении эффективной эксплуатации системы электроснабжения железных дорог переменного тока путем регулирования потоков реактивной мощности в условиях роста электропотребления за счет выбора рациональных параметров компенсирующих устройств.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи**:

1) произвести анализ структуры и величин потребления электрической энергии тяговыми подстанциями, составляющих сопряжения систем внешнего и тягового электроснабжения и токораспределения в питающих линиях системы внешнего электроснабжения на участке Дальневосточной железной дороги;

2) определить критерии для оценки технической эффективности эксплуатации системы электроснабжения железных дорог при применении в ней компенсирующих устройств;

3) сформировать усовершенствованную методику прогнозирования активного и реактивного электропотребления, позволяющей на близко-, средне- и долгосрочную перспективу определять нагрузку тяговых подстанций;

4) разработать методику определения требуемого усиления системы тягового электроснабжения применением компенсирующих устройств, учитывающую изменение электропотребления и воздействия на параметры режима питающей энергосистемы.

Объект исследования: устройства электроснабжения железных дорог.

Область исследования: системы электроснабжения железных дорог, улучшение эксплуатационных показателей устройств электроснабжения.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1) обоснована необходимость в дополнении существующих технических критериев для оценки эффективности использования компенсирующих устройств в тяговой сети такими критериями, как «запас мощности силовых трансформаторов», «величина снижения потерь напряжения» и «степень разгрузки питающих линий системы внешнего электроснабжения»;

2) впервые предложено использовать в методике прогнозирования потребления

электрической энергии дополнительно к основным характеристикам перевозочного процесса (грузооборот, количество поездов, средняя техническая скорость, средняя масса поезда) такие показатели, как средняя длина поезда, измеряемая количеством вагонов, и количество порожних поездов, измеряемое в процентах;

3) предложена методика определения требуемого усиления системы тягового электроснабжения применением компенсирующих устройств, устанавливаемых на тяговых подстанциях, учитывающая изменения электропотребления, воздействие на параметры режима систем тягового и внешнего электроснабжения.

Теоретическая и практическая ценность результатов исследования заключается в следующем:

1) предложены три дополнительных технических критерия для оценки эффективности применения компенсирующих устройств в тяговой сети, позволяющих оценить эффект как для тяговой сети, так и для системы внешнего электроснабжения;

2) рекомендован метод прогнозирования потребления активной и реактивной энергии с использованием корреляционно-регрессионного анализа, базирующийся на основных и предложенных в работе дополнительных факторах, оказывающих влияние на электропотребление, и позволяющий осуществлять прогнозирование электропотребления на тягу поездов в условиях ограниченного количества исходных данных с погрешностью не более 15 %;

3) разработана методика, позволяющая определять требуемое усиление системы тягового электроснабжения применением компенсирующих устройств с учетом изменения электропотребления и воздействия на параметры режима систем тягового и внешнего электроснабжения.

Методология и методы исследования. Поставленные задачи решались с использованием положений математической статистики, теории электрических цепей, теории графов, методов линейной алгебры. Для проведения расчетов применялись такие программные продукты, как Microsoft Excel 2010 и MathCad 15. При обучении искусственных нейронных сетей использовался пакет прикладных программ Neural Network Toolbox программного комплекса MatLab R2014a.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) три технических критерия для оценки эффективности применения компенсирующих устройств в тяговой сети, позволяющих оценить эффект как для тяговой сети, так и для системы внешнего электроснабжения;

2) усовершенствованная методика прогнозирования потребления активной и реактивной энергии, позволяющая повысить точность прогнозирования электропотребления в условиях ограниченного объема исходных данных;

3) методика определения требуемого усиления системы тягового электроснабжения применением компенсирующих устройств, устанавливаемых на тяговых подстанциях, позволяющая учитывать изменение электропотребления и воздействие на параметры режима систем тягового и внешнего электроснабжения.

Достоверность научных положений, выводов и полученных результатов подтверждается согласованностью расчетных данных с параметрами, полученными из опыта эксплуатации.

Реализация результатов работы. Разработанные на базе проведенных исследований инструктивно-методические указания «Прогнозирование электропотребления на тягу поездов» приняты к внедрению в АО «Дальневосточный проектно-изыскательский институт транспортного строительства».

Апробация работы. Основные положения работы обсуждались на 8-м и 9-м международных симпозиумах «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта» (Элтранс), г. Санкт-Петербург, 2015, 2017 г.; Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием «Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке», г. Хабаровск, 2015, 2016, 2017 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы», г. Хабаровск, 2015 г.; на 19-м краевом конкурсе молодых ученых и аспирантов «Молодые ученые – Хабаровскому краю», г. Хабаровск, 2017 г.; Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности», г. Омск, 2018 г.; Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Проблемы и перспективы управления развитием Дальнего Востока», г. Хабаровск, 2018 г.; расширенных заседаниях кафедры «Системы электроснабжения» ДВГУПС, г. Хабаровск, 2018, 2019 г.; расширенном заседании кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, г. Омск, 2018 г.; расширенном заседании кафедры «Электроснабжение транспорта» УрГУПС, г. Екатеринбург, 2019 г.

Публикации. Основные положения диссертации нашли отражение в 17 печатных работах, в том числе в 2 работах, опубликованных в журналах, входящих в базу данных Scopus и 3 работах в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 136 наименований, четыре приложения. Текст диссертационной работы изложен на 141 странице печатного текста, включает 13 таблиц, 34 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, элементы научной новизны, практической и теоретической ценности выполненной работы, изложены методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту.

В **первом разделе** произведен анализ динамики изменения грузооборота и электропотребления на тягу поездов (рисунок 1).

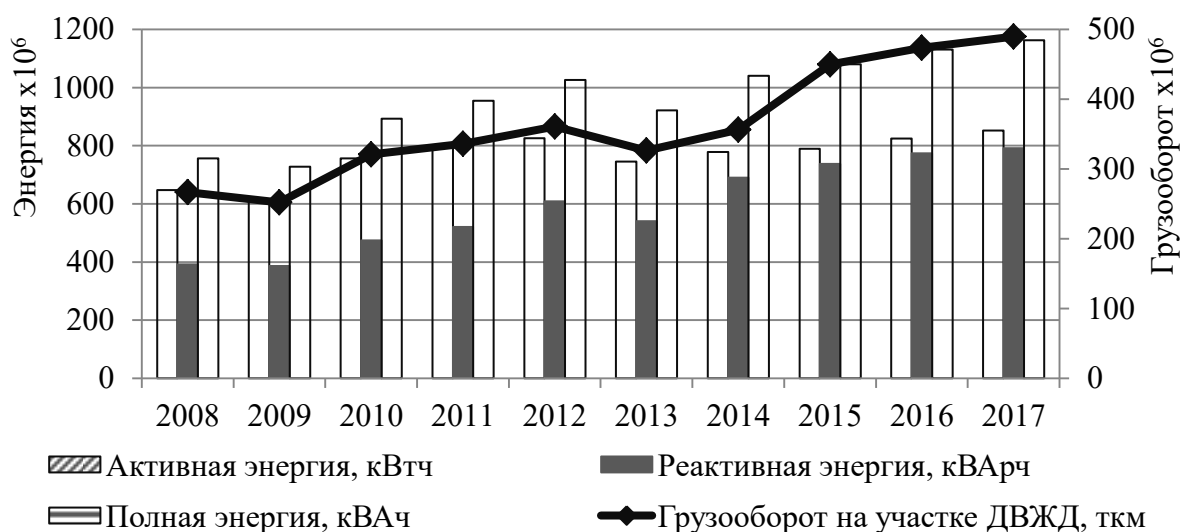


Рисунок 1 – Динамика изменения грузооборота и электропотребления

Рассмотрены основные показатели систем тягового и внешнего электроснабжения, на которые оказывает влияние увеличение грузооборота. Было отмечено, что с 2008 года рост грузооборота на участке Дальневосточной железной дороги составил 83,5 %, при этом потребление активной энергии на тягу поездов выросло на 32 %, а реактивной на 102 %. Кроме того, в системе внешнего электроснабжения выросли потери активной энергии на 138 %, а потери напряжения на 53 %. Было выявлено, что среднегодовая нагрузка понижающих трансформаторов тяговых подстанций не превышает 78 % от номинальной, а при включении трансформаторов на параллельную работу находится на уровне 10 – 39 %. Однако ограничивающим фактором является нагрузка в момент прохода грузового поезда повышенной массы (до 12000 тонн) по межподстанционной зоне. Пиковая нагрузка больше средней примерно в 2,7 раза. Ток в линиях электропередачи системы внешнего электроснабжения (СВЭ) не превышает наибольшего допустимого тока для проводов. Например, для тяговой подстанции Хабаровск II его величина не превышает 72,8 % от максимально допустимой.

Произведен анализ основных неудовлетворительных вариантов в сопряжении систем внешнего и тягового электроснабжения. На рассматриваемом участке влияние оказывают транзит мощности в Приморскую энергосистему и различные классы высшего напряжения тяговых подстанций. В дальнейшем расчетах использованы показания счетчиков электрической энергии, в которых учтен уравнивающий ток.

В результате произведенного анализа предложено использовать критериальный подход к оценке эффективности усиления системы тягового электроснабжения применением компенсирующих устройств (КУ). Существующие критерии, такие как коэффициент мощности, уровень напряжения и потери мощности, не позволяют в должной мере оценить эффект от установки КУ при решении задачи снижения расхода электрической энергии. Поэтому были разработаны дополнительно три технических критерия: запас мощности силовых трансформаторов (МВА), величина снижения потерь напряжения (%) и степень разгрузки питающих линий СВЭ (МВА или %). Величины предлагаемых критериев определяются индивидуально для каждой тяговой подстанции с учетом параметров ее режима и конфигурации электрической цепи, а также запланированного в ОАО «РЖД» роста грузооборота. Для определения перспективных значений электропотребления, связанных с изменением грузооборота, предложено применять его прогнозирование.

По результатам произведенного в первом разделе исследования были сформулированы цели и задачи исследования.

Во **втором разделе** проанализирован ряд методов прогнозирования электропотребления. Подробно рассмотрены три наиболее распространенных способа, а именно: с использованием метода наименьших квадратов, искусственных нейронных сетей и корреляционно-регрессионного анализа.

Применение для прогнозирования методов экстраполяции данных, к которым можно отнести метод наименьших квадратов, нежелательно по причине высоких погрешностей (больше 30 %).

На основании результатов факторного анализа установлена взаимосвязь между электропотреблением и такими характеристиками перевозочного процесса, как грузооборот участка P_x , тыс. т·км брутто; количество поездов, проследовавших по участку N , поездов; средняя масса поездов M_{cp} , тонн; средняя техническая скорость движения V , км/ч. Коэффициент парной корреляции превышает 0,6.

Далее произведена оценка методов прогнозирования с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) и корреляционно-регрессионного анализа, которые основываются на характеристиках перевозочного процесса, на примере тяговой подстанции Хабаровск II.

При прогнозировании электропотребления с помощью ИНС производилось ее обу-

чение с применением пакета «Neural Network Toolbox» программного комплекса Matlab, в качестве входных данных для обучения использовались значения активного и реактивного электропотребления тяговой подстанцией Хабаровск II, а также объем грузооборота и количество поездов на участке, питаемом рассматриваемой подстанцией. При обучении ИНС для прогнозирования активной энергии приняты следующие параметры: сеть двухслойная с сигмовидной функцией активации, имеющая 32 нейрона на скрытом слое, принятый обучающий алгоритм – Байесовская регуляризация. Для прогнозирования реактивной энергии параметры аналогичные, но количество нейронов на скрытом слое равно 38.

Погрешность прогнозирования активной энергии на 2016 год составила 8 %, на 2017 – 16,7 %, а реактивной энергии – 7,8 % и 9,6 % соответственно. При этом средняя абсолютная ошибка составляет 1,9 % для активной и 2,1 % для реактивной энергии.

Для прогнозирования потребления электрической энергии рассматриваемой подстанцией с использованием корреляционно-регрессионного анализа были составлены прогностические уравнения для активной и реактивной энергии. В качестве исходных данных использовались значения электропотребления, грузооборота и количества проследовавших по участку поездов за 2008–2015 годы. Полученные уравнения имеют следующий вид:

$$W_A = 25842675,9 + 0,157 \cdot P_x + 944,8 \cdot N \quad (1)$$

$$W_p = -91818245,6 + 1,347 \cdot P_x + 1676,3 \cdot N \quad (2)$$

Средняя погрешность прогнозирования составляет 6,6 % для активной и 4,4 % для реактивной энергии. Погрешности прогнозирования активной энергии на 2016 и 2017 годы составляют 2,2 % и -2,9 % соответственно, а при прогнозировании реактивной энергии 5,3 % и 10,7 %.

Однако, для двух подстанций рассматриваемого участка располагаемый объем характеристик перевозочного процесса оказался недостаточным для выбора двух влияющих факторов. А с учетом того, что имеющийся объем статистической выборки ограничен небольшим количеством данных, метод повышения тесноты корреляционной связи за счет исключения из расчета «выбросов» – нетипичных значений признака не применим. По этой причине было принято решение дополнить выборку характеристик перевозочного процесса следующими характеристиками: средняя длина поезда, измеряемая количеством вагонов L , шт.; количество порожних поездов, проследовавших по участку E_c , %. При использовании дополнительно этих факторов погрешность прогнозирования электропотребления не превышает 15 % для всех рассматриваемых тяговых подстанций.

С учетом достигнутой точности и доступности программных средств для проведения дальнейших расчетов был принят метод прогнозирования с использованием кор-

реляционно-регрессионного анализа.

В **третьем разделе** рассмотрены основные работы, посвященные определению мест установки и мощности компенсирующих устройств в тяговой сети. Выявлено, что утвержденная ОАО «РЖД» методика предполагает определение мест установки и мощности КУ, исходя из минимального уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, и главным образом ориентирована на установку КУ на посту секционирования. Данный подход оптимален при необходимости определения мощности КУ с целью повышения напряжения в тяговой сети, но не дает необходимых результатов при решении задач создания резерва мощности в системе электроснабжения. Предложено в разработанной методике вместо величин напряжения использовать расходы электрической энергии тяговыми подстанциями, что позволяет определять величину мощности КУ при условии установки устройств на тяговой подстанции в одну или две фазы, с определением их эффективности при помощи трех, предложенных в первом разделе диссертации, технических критериев. Разработанная методика представлена в виде блок-схемы алгоритма на рисунке 2.

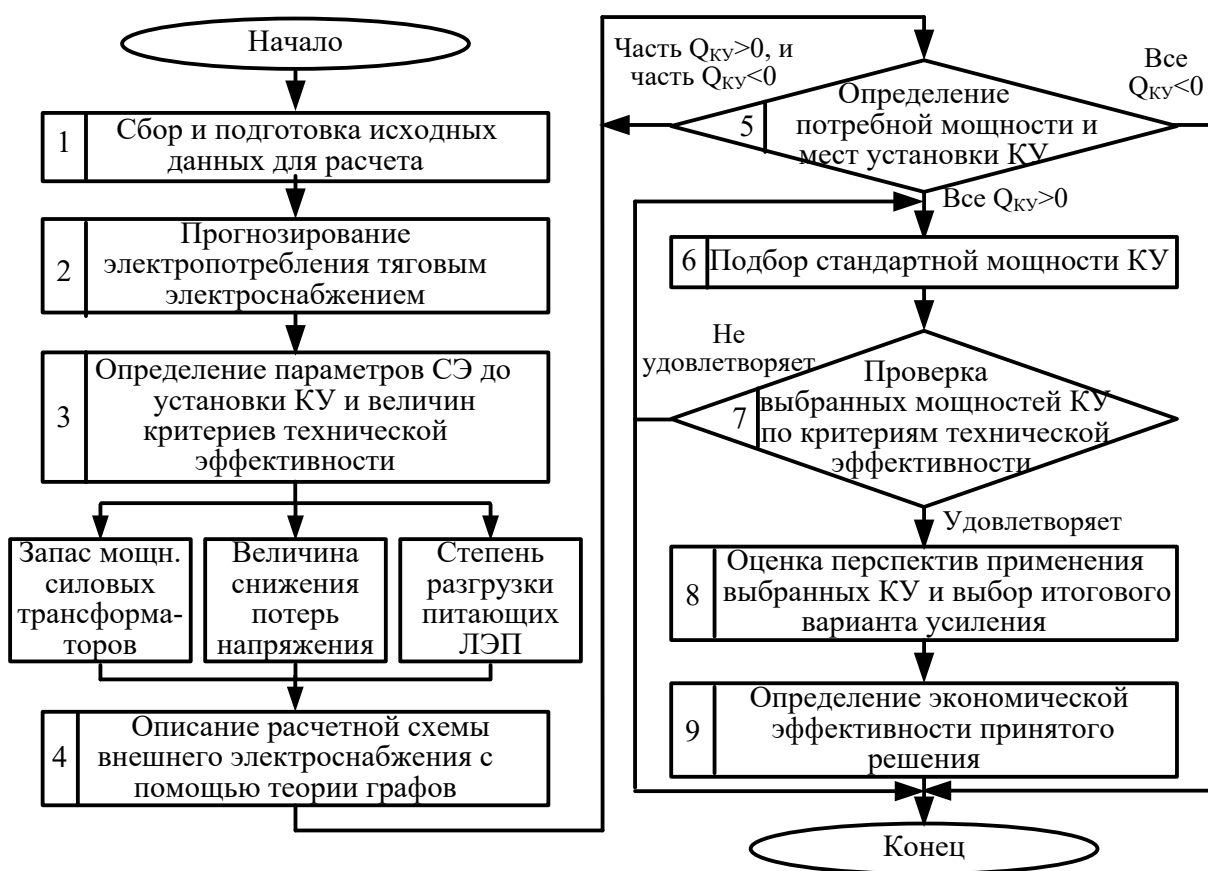


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма определения необходимой мощности КУ в условиях роста грузооборота

Для расчета по разработанной методике собирается информация о схемах внешнего электроснабжения тяговых подстанций; статистические выборки величин потребляемой активной и реактивной электроэнергии тяговыми подстанциями, а также характеристик перевозочного процесса для рассматриваемых участков железной дороги. Рекомендуемый шаг дифференциации статистической выборки – полгода или год, объем – от 10 интервалов.

Далее производится прогнозирование электропотребления тяговым электроснабжением (отдельно активной и реактивной энергии) методом корреляционно-регрессионного анализа по формуле

$$W_{oi} = (B' \cdot B)^{-1} \cdot B' \cdot W_T \cdot B_0, \quad (3)$$

где B – матрица влияющих факторов; B' – транспонированная матрица; $(B' \cdot B)^{-1}$ – обратная матрица; W_T – матрица электропотребления; B_0 – матрица влияющих факторов на прогнозный период. Матрицы электропотребления и влияющих факторов принимают следующий вид:

$$W_T = \begin{bmatrix} W_{T1} \\ W_{T2} \\ \dots \\ W_{Tn} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & B_{11} & B_{21} \\ 1 & B_{12} & B_{22} \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & B_{1n} & B_{2n} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Рассчитывается режим до установки КУ с определением величин критериев технической эффективности на основе данных о фактическом и прогнозируемом электропотреблении тяговыми подстанциями.

Критерий «запас мощности силовых трансформаторов» (МВА) показывает величину резерва мощности, которые необходимо получить в трансформаторах каждой тяговой подстанции при подключении КУ для того, чтобы отложить установку дополнительного понижающего трансформатора или постановку существующих трансформаторов на параллельную работу. Данный критерий определяется по формуле

$$\delta S = \sqrt{P_{ТП}^2 + Q_{ТП}^2} - k_{пер} \cdot S_T, \quad (5)$$

где $P_{ТП}$ и $Q_{ТП}$ – активная и реактивная мощности, потребляемые тяговой подстанцией; $k_{пер}$ – коэффициент перегрузки силового трансформатора при движении поезда повышенной

массы по межподстанционной зоне, принимается равным 1,6 в соответствии с ГОСТ 14209-85; S_T – мощность понижающего трансформатора.

Расчет критерия «величина снижения потерь напряжения» (%) на шинах тяговой подстанции производится по упрощенной формуле, приведенной ниже:

$$\delta U \cong \frac{Q_c \cdot X_\Sigma}{U_n^2} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где Q_c – мощность КУ, кВАр; X_Σ – эквивалентное реактивное сопротивление линий электропередачи и трансформаторов, Ом; U_n – номинальное напряжение сети потребителя (железной дороги), кВ.

«Степень разгрузки питающих линий СВЭ» (МВА или %) показывает, какую мощность имеется возможность зарезервировать в СВЭ для группы тяговых подстанций. Величина данного критерия определяется по формуле

$$\delta S_{\text{ЛЭП},i} = \frac{\sqrt{P_{\text{ЛЭП},i}^2 + Q_{\text{ЛЭП},i}^2} - I_{\text{доп}} \cdot U}{I_{\text{доп}} \cdot U} \cdot 100 \%, \quad (7)$$

где $P_{\text{ЛЭП},i}$ и $Q_{\text{ЛЭП},i}$ – активная и реактивная мощности i -го участка ЛЭП, которые определяются из расчета режима до установки КУ; $I_{\text{доп}}$ – допустимый ток ЛЭП; U – напряжение системы внешнего электроснабжения. В случае если ток в ЛЭП не превышает допустимый, то данный коэффициент для головных участков ЛЭП принимается равным 10 %.

Затем производится описание схемы внешнего электроснабжения с помощью теории графов. Расчетные графы получают путем декомпозиции электрической сети. В последующем расчете графы учитываются с помощью весовых коэффициентов, которые численно равны коэффициентам токораспределения по линиям электропередачи системы внешнего электроснабжения, и их сопротивлениями, которые имитируют ветви графов. Коэффициенты токораспределения для схем с двусторонним питанием определяются по формуле

$$C_{ij} = \frac{R_{ij}}{R_\Sigma}, \quad (8)$$

где R_{ij} – активное сопротивление участка $i-j$ системы внешнего электроснабжения; R_Σ – активное сопротивление всего расчетного участка системы внешнего электроснабжения.

Следующим шагом является определение места установки и мощности КУ в тяговой сети, определение которых предложено осуществлять решением системы уравнений, представленной в матричной форме:

$$[R_{\Sigma}] \cdot [Q_{KV}] = [X], \quad (9)$$

где $[R_{\Sigma}]$ – матрица активных сопротивлений, зависящая только от конфигурации сети; $[Q_{KV}]$ – матрица неизвестных мощностей КУ; $[X]$ – матрица, объединяющая коэффициенты A и известные величины реактивной мощности каждого элемента сети, определяемые во процессе расчета параметров режима до установки КУ.

Коэффициенты A_n включают технические и экономические характеристики проектируемых КУ. Расчет осуществляется по формуле

$$A_n = \frac{[(E+a) \cdot K_0 + \Delta P_{yd} \cdot c_0 \cdot T] \cdot U^2}{2 \cdot c_0 \cdot T}, \quad (10)$$

где K_0 – расходы на генерацию 1 кВАр реактивной мощности; E – ставка дисконтирования; $a = \alpha_{экс} + 1/T_{сл}$ – коэффициент, величина которого определяется амортизационными отчислениями на эксплуатационные расходы ($\alpha_{экс}$) и сроком эксплуатации КУ ($T_{сл}$); ΔP_{yd} – удельные диэлектрические потери в конденсаторах, кВт; c_0 – стоимость электрической энергии, руб/кВтч; T – время работы КУ, ч/год; U – величина напряжения в питающей энергосистеме.

Далее подбираются типовые мощности КУ. Установка устройств может осуществляться либо в одну, либо в две фазы в зависимости от величины требуемой мощности и мощности устройств, выпускаемых промышленностью. После чего производится проверка технической эффективности устанавливаемых КУ по ранее определенным критериям. Далее проверяется перспективность подобранных типовых КУ, которые удовлетворяют заданным критериям технической эффективности, по прогнозируемому увеличению потребляемой мощности тяговыми подстанциями, и делается заключение о необходимости применения КУ подобранной мощности. После чего производится оценка экономической эффективности принятого решения.

В четвертом разделе произведена практическая реализация разработанной методики выбора эффективного варианта усиления системы тягового электроснабжения. Схема расчетного участка представлена на рисунке 3.

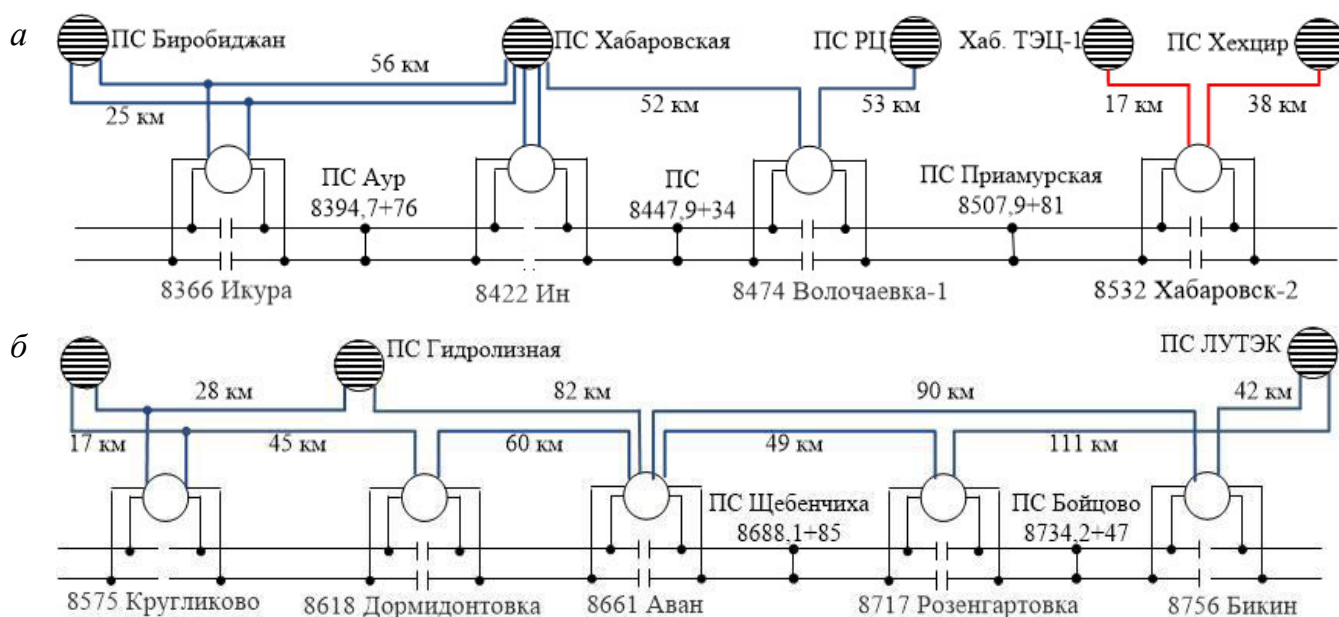


Рисунок 3 – Схема внешнего электроснабжения тяговых подстанций с сечением сталеалюминевых проводов: а – 300 мм², б – 400 мм².

В таблице 1 представлены прогностические уравнения для реактивной энергии, значения коэффициента детерминации и средняя погрешность аппроксимации для каждой подстанции рассматриваемого участка.

Таблица 1 – Прогностические уравнения для реактивной энергии

Подстанция	Прогностическое уравнение	Коэф. детерминации	Ср. погр. аппрокс., %
Икура	$W = 222319391 + 2520,4 \cdot N_{\text{неч}} - 2805840,8 \cdot L_{\text{неч}}$	0,732	-2,89
Ин	$W = 153825416,7 + 0,295 \cdot P_x - 1799660,2 \cdot V_{\text{ср.чет}}$	0,921	-0,18
Волочаевка	$W = -60362762,9 + 2,1 \cdot P_{\text{х.чет}} + 2327093,1 \cdot V_{\text{ср.неч}}$	0,821	-0,59
Хабаровск	$W = -75237979,3 + 1,7 \cdot P_{\text{х.неч}} + 4631,5 \cdot N_{\text{неч}}$	0,846	-0,72
Кругликово	$W = -2316148,9 + 2,6 \cdot P_{\text{х.чет}} - 625831,8 \cdot V_{\text{ср.неч}}$	0,770	-14,9
Дормидонтовка	$W = 97209592,3 - 846,7 \cdot N_{\text{чет}} - 1780,8 \cdot N$	0,686	-6,3
Аван	$W = 64658672,4 + 1,5 \cdot P_x - 8156473,6 \cdot E_{\text{с.чет}}$	0,787	-2,58
Розенгартовка	$W = 148403637,4 + 1340,1 \cdot N_{\text{чет}} - 2547942,8 \cdot V_{\text{ср}}$	0,855	-7,0
Бикин	$W = -40200864,2 + 3,3 \cdot P_x - 1954,4 \cdot N_{\text{неч}}$	0,940	-4,3

Определены критерии технической эффективности. Критерий «запас мощности силовых трансформаторов» для тяговой подстанции Хабаровск-II равен 11 МВА (что со-

ставляет 27,5 % от номинальной мощности трансформатора), для остальных подстанций пиковая нагрузка трансформатора не превышает допустимой величины. Значения критериев «величина снижения потерь напряжения» и «степень разгрузки питающих линий СВЭ» представлены на рисунке 4.

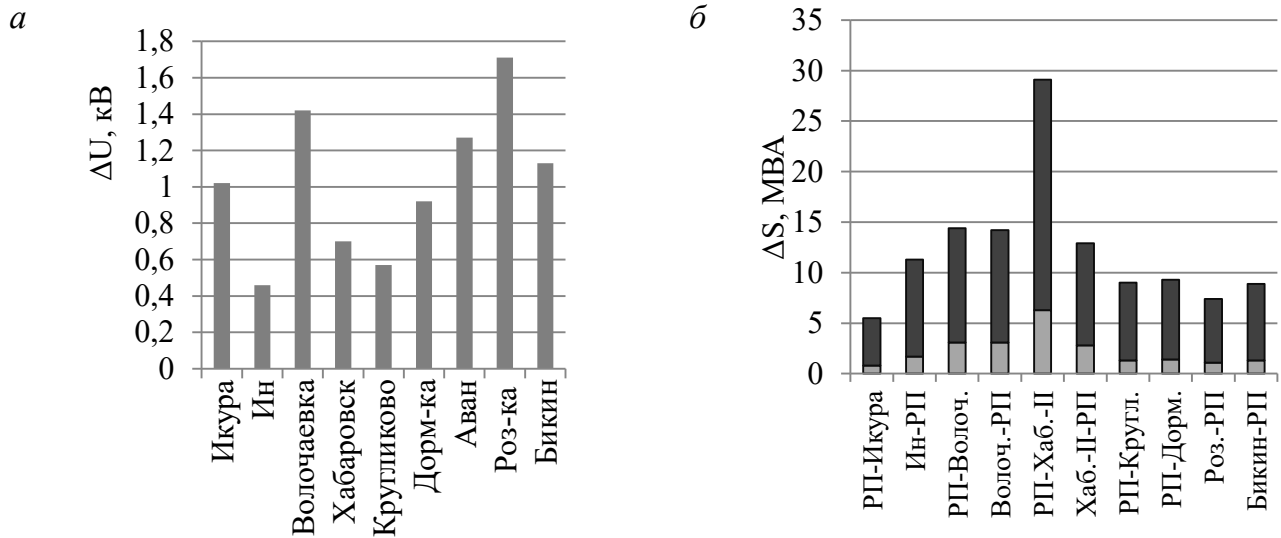


Рисунок 4 – Критерии для оценки технической эффективности применения КУ: *a* – величина снижения потерь напряжения, *б* – степень разгрузки питающих линий СВЭ

Далее было произведено определение мест установки и мощности КУ в тяговой сети с последующим выбором типовых мощностей КУ, выпускаемых промышленностью. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Мощности КУ

Подстанция	Мощность КУ расчетная, кВАр	Мощность типовых КУ, МВАр
Хабаровск	13342	2х6,9
Кругликово	4152	4,6
Аван	1979	–
Розенгартовка	429	–
Бикин	3095	3,7

В результате получено, что при установке КУ выбранной мощности на тяговых подстанциях Кругликово и Бикин нагрузки трансформаторов не превысят номинальной мощности вплоть до 2030 года. Нагрузка трансформатора тяговой подстанции Хабаровск II в 2030 году превысит допустимую перегрузку. Увеличение мощности КУ в этом случае не повлияет в

требуемом объеме на загрузку

трансформатора. Поэтому после 2020 года рекомендуется контролировать нагрузку трансформатора и при необходимости включить второй трансформатор на параллельную работу.

Результаты расчетов снижения потерь напряжения при установке КУ на шинах 27,5

кВ, мощности которых определены с учетом перспектив электропотребления, приведены на рисунке 5. Величина разгрузки питающих линий СВЭ после установки КУ представлена на рисунке 6.

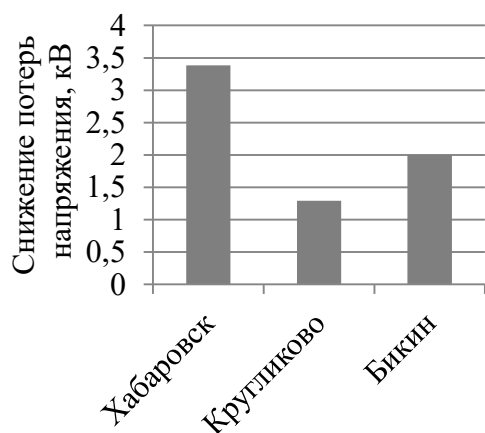


Рисунок 5 – Величина снижения потерь напряжения при установке КУ

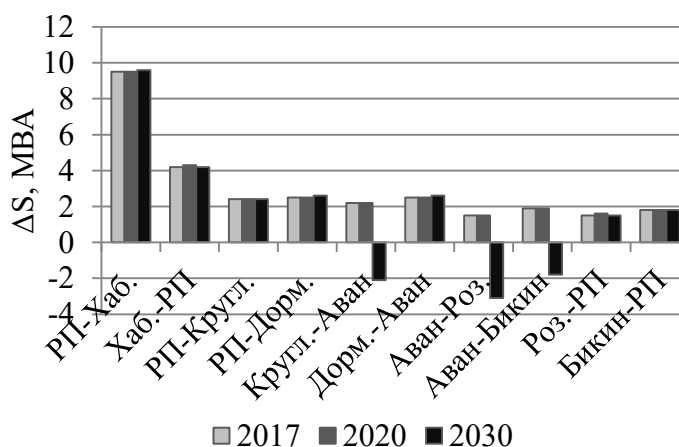


Рисунок 6 – Величина разгрузки питающих ЛЭП при установке КУ

Потребная мощность КУ для тяговой подстанции Хабаровск II превышает максимальную величину мощности типового КУ. По этой причине рекомендуется установка устройств в отстающую и опережающую фазы. Для тяговых подстанций Кругликово и Бикин рекомендована установка КУ в отстающую фазу.

Экономический эффект предлагаемых мероприятий определен в виде чистого дисконтированного дохода. На рассматриваемом участке Дальневосточной железной дороги рассчитанный чистый дисконтированный доход составит 10,6 млн. рублей, срок окупаемости не превышает 8 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложено в качестве дополнительных критериев для оценки эффективности применения КУ в тяговой сети использовать такие, как «запас мощности силовых трансформаторов», «величина снижения потерь напряжения» и «степень разгрузки питающих линий СВЭ». Применение указанных критериев для оценки эффективности применения КУ следует осуществлять не только на текущий момент, но и учитывая перспективные изменения объемов перевозок.

2. Усовершенствован метод прогнозирования электропотребления с использованием корреляционно-регрессионного анализа введением в него дополнительных характеристик перевозочного процесса, что позволяет повысить точность прогнозных значений на величину до 15 % в условиях ограниченного объема исходных данных.

3. Разработана методика определения необходимых для усиления системы тягового электроснабжения мощностей КУ, позволяющая рассчитывать величину мощности КУ при условии установки устройств на тяговой подстанции, с определением эффективности их применения при помощи трех, предложенных в диссертации, технических критериев, с учетом перспективного роста объемов перевозок.

4. Расчеты по предложенной методике показали, что подобранные типовые мощности КУ для усиления системы тягового электроснабжения, удовлетворяют заданным критериям технической эффективности, и перспективному увеличению потребляемой мощности тяговыми подстанциями.

5. Предложены варианты усиления системы тягового электроснабжения участка Дальневосточной железной дороги применением КУ, который позволит снизить среднегодовую нагрузку силовых трансформаторов на величину 22,6 – 62,3 %, потери напряжения на величину 1,3 – 3,4 кВ, зарезервировать мощности в питающей энергосистеме в размере 4,2 – 9,5 МВА для тяговой подстанции Хабаровск II, и 1,5 – 2,5 МВА для участка Кругликово – Бикин. Чистый дисконтированный доход от установки КУ для всех тяговых подстанций рассматриваемого участка за весь срок эксплуатации составит 10,6 млн. рублей, срок окупаемости не превышает 8 лет.

Список работ, опубликованных по теме диссертационного исследования

а) научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Ли, В. Н. Выбор мощности и мест установки компенсирующих устройств в системе тягового электроснабжения в условиях неопределенности / В. Н. Ли, Н. К. Шурова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – Р-н/Д : Изд-во РГУПС, 2015. – № 2(58). – С. 129–132.

2. Ли, В. Н. Особенности выбора компенсирующих устройств в тяговой сети по критериям оптимальности / В. Н. Ли, Н. К. Шурова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 38–44.

3. Шурова Н. К. Усиление системы тягового электроснабжения переменного тока применением компенсирующих устройств в условиях пропуска поездов повышенной массы / Н. К. Шурова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4 (36). – С. 106–112.

б) научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus и Web of Science

4. Li, V. N. On the method of determining optimal electricity consumption from an electric traction network / V. N. Li, N. K. Shurova // Russian electrical engineering. – 2016. – V. 87, no 2. – pp. 42–44. DOI: 10.3103/S1068371216020127.

5. Shurova, N. Increase of energy efficiency of electric power distribution networks by adjustment of reactive energy consumption in a traction network / N. Shurova, V. Li // Siberian Transport Forum – TransSiberia 2018. – 2018. – V. 239. Access mode: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/ref/2018/98/matecconf_ts2018_01049/matecconf_ts2018_01049.html(accessed 25.02.2019). DOI: 10.1051/matecconf/201823901049.

в) патенты на изобретения и полезные модели, свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613338 (РФ). Расчет критериев для оценки эффективности применения компенсирующих устройств в системе электроснабжения железных дорог переменного тока с учетом перспективы изменения объемов перевозок / Шурова Н. К., Ли В. Н. ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения». - № 2019613338 ; заявл.20.02.2019 ; опубл. 13.03.2019. – 1 с.

г) научные работы, опубликованные в других изданиях

7. Шурова, Н. К. Использование метода интервальной регрессии для долгосрочного прогнозирования электропотребления / Н. К. Шурова, В. Н. Ли // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 52 – 56.

8. Ли, В. Н. Усовершенствованная методика выбора компенсирующих устройств в тяговой сети / В. Н. Ли, Н. К. Шурова // Тезисы докладов VIII международного симпозиума «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта» (Элтранс-2015). – СПб, 2015. – С. 48.

9. Шурова, Н. К. Расчетные параметры системы тягового электроснабжения при условии нестационарности характеристик перевозочного процесса / Н. К. Шурова, В. Н. Ли // Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы : труды Всероссийской научно-практической конференции 19–20 ноября 2015 г. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 113–118.

10. Ли, В. Н. Методические подходы к определению оптимального потребления электрической энергии из питающей энергосистемы / В. Н. Ли, Н. К. Шурова // Электротехника. – 2016. – № 2. – С. 42–44.

11. Шурова, Н. К. Рациональное потребление электрической энергии системой тягового электроснабжения из питающей энергосистемы в условиях роста грузооборота / Н. К. Шурова // Молодые ученые – Хабаровскому краю : материалы XIX краевого кон-

курса молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 13–20 января 2017 года. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2017. – С. 202 – 206.

12. Шурова, Н. К. Регулирование токораспределения в питающей сети применением компенсирующих устройств в системе тягового электроснабжения / Н. К. Шурова, В. Н. Ли // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием. – Хабаровск : ДВГУПС, 2017. – С. 119–123.

13. Ли, В. Н. Влияние тяговой сети переменного тока на энергетические параметры питающих линий системы внешнего электроснабжения / В. Н. Ли, Н. К. Шурова // Тезисы докладов IX международного симпозиума «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта» (Элтранс-2017). – СПб, 2017. – С. 48.

14. Гавшин, Р. С. Прогнозирование электропотребления на тягу поездов с помощью нейросетей / Р. С. Гавшин, В. Н. Ли, Н. К. Шурова // Научно-техническому и социально-экономическому развитию Дальнего Востока России – инновации молодых: тезисы докладов 76-й юбилейной студенческой научно-практической конференции (20–22 марта 2018 г.). Том 1. – Хабаровск : Издательство ДВГУПС, 2018. – С. 129.

15. Шурова, Н. К. Повышение энергоэффективности распределительных электрических сетей регулированием потребления реактивной энергии в тяговой сети / Н. К. Шурова, В. Н. Ли // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности, Омск, 4–5 октября 2018. Материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием. Омск : Изд-во ОмГУПС, 2018. – С. 9–15.

16. Ли, В. Н. Обеспечение возрастающей потребности в электрической энергии предприятий железнодорожного транспорта и промышленности ДВ с минимальными затратами / В. Н. Ли, Н. К. Шурова // Проблемы и перспективы управления развитием Дальнего Востока, Хабаровск, 25–26 октября 2018. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2018. – С. 99–103.

17. Ли, В. Н. Влияние тяговой сети переменного тока на энергетические параметры питающих линий системы внешнего электроснабжения / В. Н. Ли, Н. К. Шурова // Прорывные технологии электрического транспорта: материалы Девятого Международного симпозиума «Элтранс-2017» («Eltrans-2017»), посвященного 130-летию основания Г. К. Мерчингом электротехнической школы в России, 18-20 октября 2017 г., СПб : Изд-во ООО «ИПК «НП-Принт», 2019. – С. 249–254.

ШУРОВА НАТАЛЬЯ КОНСТАНТИНОВНА

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОТОКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ
РОСТА ГРУЗОБОРОТА**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

Подписано в печать 17.12.2019

Формат 60 x 84 1/16 Объем 1,1 п.л.

Заказ 910 Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИПЦ ИБК УрГУПС
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова,66