**Штанг Александр Александрович. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии : дис. ... кандидата технических наук : 05.09.03 / Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2006. - 202 с. РГБ ОД,**

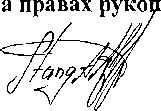
ГОСУДАРСТВННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ»

61**:**07**-**5/193

**Н иси**



ШТАНГ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: Д-р техн. наук, профессор Ворфоломеев Г ерман Николаевич

Новосибирск 2006

ВВЕДЕНИЕ 4

1. ЭНЕРГЕТИКА ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

В ПРОЦЕССЕ ТОРМОЖЕНИЯ 13

* 1. [Электрический транспорт как сложный электротехнический комплекс 13](#bookmark2)
  2. Анализ методов, характеризующих энергетику

движения электротранспортного средства 18

* 1. [Энергетический баланс и оценка энергии электрических торможений электроподвижного состава 31](#bookmark14)
  2. [Выводы 48](#bookmark63)

1. АНАЛИЗ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ И ОЦЕНКА ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ 49
   1. Критерии использования накопительных устройств

в электротранспортной системе 49

* 1. [Электрохимические накопители энергии 52](#bookmark21)
  2. [Механические накопители энергии 57](#bookmark23)
  3. [Электрические накопители энергии 65](#bookmark20)
  4. [Теплоэлектрические и гибридные накопители энергии 70](#bookmark24)
  5. [Конденсаторы двойного электрического слоя и их использование на транспорте 72](#bookmark33)
  6. [Выводы 84](#bookmark17)

1. [ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 86](#bookmark35)
   1. Распределение и использование энергии электрических

86

торможений

*Щ*

* 1. [Рекуперативный режим с активным потребителем на участке контактной сети 88](#bookmark37)
  2. Анализ методов определения величины избыточной

энергии 91

* 1. Варианты использования энергии электрических торможений 114
  2. [Применение накопителей энергии в системе тягового электроснабжения 120](#bookmark54)
  3. [Выводы 142](#bookmark34)

4. ПРИМЕНЕНИЕ БУФЕРНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО БЛОКА

КОНДЕНСАТОРОВ ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ НА ТРОЛЛЕЙБУСЕ 144

1. Варианты использования накопителей энергии на

троллейбусе 144

1. Метод расчета энергоемкости накопителя,

работающего в буферном режиме 147

1. Оптимизация энергетических показателей буферного накопителя энергии и оценка массогабаритных параметров 154
2. [Исследование режимов работы схемы регенеративного торможения троллейбуса с накопителем энергии на борту 164](#bookmark69)
3. Исследование режима тяги электроподвижного состава с использованием буферного накопителя энергии и определение величины автономного хода 177
4. Обобщенное схемное решение силовой цепи троллейбуса

с буферным накопителем энергии 184

1. [Стендовые испытания 187](#bookmark80)
2. [Выводы 191](#bookmark82)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 193

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 195

[ПРИЛОЖЕНИЯ 212](#bookmark83)

**Актуальность проблемы.** С общемировым ростом цен на энергоноси­тели проблема снижения потерь при преобразовании, распределении и по­треблении энергии становится стратегическим направлением приоритетного развития многих областей промышленности и секторов экономики, в том числе и транспортной индустрии. Важность решения данной проблемы под­тверждена и закреплена законодательно в Федеральной целевой программе № 796 «Энергоэффективная экономика на 2002-2005 годы и на перспективу до 2010 года», утвержденной Правительством России.

По данным Федеральной службы государственной статистики, сущест­венная доля в структуре пассажирооборота по видам транспорта общего пользования принадлежит городскому электрическому транспорту и состав­ляет 20,4%. Поэтому эффективное функционирование транспорта как базо­вой среды материального производства существенно влияет на темпы и рит­мичность социально-экономического развития страны. Его устойчивое и эф­фективное функционирование является необходимым условием высоких темпов экономического роста, повышения качества жизни населения, рацио­нальной интеграции России в мировую экономику.

Вопрос, связанный со снижением энергозатрат путем создания высоко­технологичных образцов транспортных средств, является актуальным для го­родского электрического транспорта в целом, где энергетическая состав­ляющая в настоящее время достигает 30...50% от общих затрат предприятий. Несмотря на значительный научно-технический прогресс в транспортной сфере за последнее десятилетие, политика в России, направленная на разра­ботку энергосберегающих технологий, была недостаточно эффективной. Вследствие этого российские образцы техники, в ряде случаев, стали усту­пать мировым аналогам транспорта по расходу энергии на 20...30% и трудо­емкости обслуживания.

Создать конкурентоспособные образцы, как на внутреннем, так и на об­

щемировом рынках возможно за счет применения новейших технологий и разработок в элементной базе, с внедрением передовых методов информаци­онного управления процессом движения, с использованием современных ма­териалов на электроподвижном составе. Одним из таких направлений в по­следние годы является разработка новых типов эффективных источников вторичной энергии и преобразователей энергии, обладающих качественно новыми свойствами, которые позволяют эффективно использовать их в транспортной индустрии страны, снижая потери энергии, повышая эффек­тивность, увеличивая срок службы оборудования и надежность электро- транспортного комплекса в целом.

В связи со значительным прогрессом в информационных технологиях на рубеже XX и XXI веков появилась возможность быстро и эффективно произ­водить сложные и трудоемкие расчеты, создавать программные комплексы, моделирующие процессы движения транспортных средств. В частности, поя­вились методики, разрабатываемые различными научными школами, в том числе и коллективом кафедры «Электротехнические комплексы» НГТУ, по­зволяющие рассматривать многие идеализированные процессы движения не только на основе детерминированных факторов, но и с учетом случайных воздействий. В результате стало возможным значительно увеличить точность прогнозных расчетов, выявить и пересмотреть типовые мощности элементов системы, работающих в недогруженном или перегруженном режимах, более адекватно оценивать реальные режимы движения.

Значительный вклад в решение ряда обозначенных вопросов, таких как снижение энергопотребления на электрическом транспорте, применение на­копительных устройств, разработка методик, позволяющих более адекватно оценивать реальные процессы движения, внесли ученые: И.С. Ефремов, В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Г.В. Косарев, К.Г. Марквардт, J1.C. Байрыева, В.В. Шевченко, В.П. Феоктистов, Д.А. Бут, Н.В. Гулиа, Н.И. Щуров, В.И. Сопов и другие авторы [1,3-9,15,17,19, 20, 64, 68,116,119,121,136].

Известные работы, опубликованные на различных этапах развития на- учно-технического прогресса, в разных научных школах, не содержат ком­плексного подхода в исследованиях по применению накопителей энергии на неавтономном электроподвижном составе (ЭПС) с учетом случайных факто­ров, влияющих на формирование баланса энергии. Рассмотренный в диссер­тационной работе комплекс задач сформулирован в контексте проблемы вне­дрения накопителей энергии в системе электрического транспорта с учетом случайных факторов, оказывающих существенное влияние на процесс функ­ционирования электроподвижного состава.

**Цели и задачи научного исследования.** Цель диссертационной работы состоит в создании методов расчета параметров и определения энергетиче­ских характеристик накопительных устройств в системе городского электри­ческого транспорта, а также в разработке схемных решений, направленных на повышение эффективности использования энергии электрических тормо­жений с учетом влияния случайных факторов.

В соответствии с поставленной целью требовалось решить следующие задачи.

1. Провести комплексную оценку энергетического баланса электриче­ского транспорта с учетом влияния случайных факторов и взаимодействия отдельных звеньев системы.
2. Выполнить анализ существующих типов накопителей и сформулиро­вать требования, предъявляемые к ним системой городского электрического транспорта (ГЭТ).
3. Разработать методы и средства, позволяющие повысить эффектив­ность использования накопительных устройств в системе городского элек­трического транспорта.
4. Определить основные параметры накопительного устройства, отве­чающего требованиям использования его в системе электротранспорта, исхо­дя из количественной оценки электрической энергии, вырабатываемой в ре­жиме торможения.
5. Провести анализ электромагнитных процессов, разработать математи­ческую модель и создать программный комплекс модели на ЭВМ, позво­ляющий рассчитывать параметры тягового электропривода с накопителями энергии в режиме электрического торможения.
6. Разработать схемные решения накопительных устройств для приме­нения в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе, позволяющие значительно повысить эффективность использования энергии электрических торможений.

**Методы исследования.** В основу теоретических исследований положен математический аппарат, включающий использование аналитических и чис­ленных методов решения дифференциальных уравнений, элементы теории ве­роятностей и математической статистики. Расчеты и математические модели выполнены как с использованием расчётно-программных комплексов, напи­санных в среде “Delphi”, так и с помощью математического моделирования в средах “Matlab” и “Mathcad”. Основные результаты диссертационной работы получены на базе фундаментальных законов и уравнений электродинамики и теории электрических цепей. Результаты теоретических исследований согла­суются с данными, полученными экспериментальным путём в ходе испытаний на электроподвижном составе, функционирующем в реальных условиях. Дос­товерность полученных результатов определяется сопоставлением результатов путем параллельного расчета различными методами и проведением испыта­ний с использованием соответствующих макетных образцов.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Необходимость и целесообразность создания и внедрения накопи­тельных устройств на основе конденсаторов двойного электрического слоя, позволяющих наиболее эффективно использовать энергию электрических торможений в системе ГЭТ.
2. Результаты экспериментальных исследований энергопотребления транспортной системы и определение выравнивающих функций распределе­ний удельных энергий тяги и электрических торможений троллейбуса.
3. Основные положения, обосновывающие наиболее эффективное ис­пользование накопительных устройств в системе тягового электроснабжения, математическое описание и моделирование процессов движения транспорт­ных средств, позволяющих определять характер распределения энергии элек­трических торможений и оценивать эффективность её использования с уче­том потерь энергии в системе электрического транспорта в целом.
4. Результаты расчетов вероятностного определения диапазона началь­ных скоростей торможения, определяющих энергетику этого процесса с уче­том изменяющейся массы транспортного средства и минимизации потерь электроэнергии в рассматриваемой системе городского электрического транспорта.

**Научная новизна диссертационной работы.**

1. Выполнен комплексный анализ и получены результаты, определяю­щие энергобаланс транспортного комплекса, оборудованного накопительны­ми устройствами как в системе тягового электроснабжения, так и на электро- подвижном составе. Дана количественная оценка снижения электропотреб­ления при установке накопителей энергии в различных звеньях рассматри­ваемой системы.
2. Определено рациональное размещение накопительного устройства и предложено его схемное решение при использовании в системе тягового электроснабжения. С использованием современных инструментальных средств создан моделирующий алгоритм, позволяющий описывать процесс функционирования системы тягового электроснабжения с накопителями энергии и определять величины избыточной энергии, экономии и потерь электроэнергии, изменения пропускной способности линии.
3. Разработаны схемные решения и создан метод расчета, позволяющий оценивать эффективность использования накопительного устройства на ЭПС и определять его параметры. Показана целесообразность использования и внедрения накопителей энергии непосредственно на электротранспортном средстве.
4. Создана математическая модель, реализованная на ЭВМ и позволяю­щая рассчитывать электрические процессы, протекающие в силовой цепи троллейбуса, оборудованного накопительным устройством.

**Практическая ценность результатов работы** заключается в решении актуальной комплексной задачи использования накопительных устройств, направленной на снижение электропотребления в системе ГЭТ. Разработаны инженерные методы расчетов, позволяющие проектировать эффективные по энергетическим показателям накопительные устройства. Создана физическая модель электротранспортного средства и проведены экспериментальные ис­следования процессов, протекающих в режимах электрического торможения. Совокупность теоретических и практических результатов позволяет в полной мере использовать энергию электрических торможений, получить автоном­ность хода и повысить динамические показатели транспортного средства в целом.

**Реализация результатов работы.** Результаты выполненных НИР в рамках хоздоговорных работ, направленных на исследование и развитие энергосберегающих технологий, позволили создать систему мониторинга по­требления электроэнергии в различных подсистемах электрического транс­порта. НИР нашли практическое применение на электротранспортных пред­приятиях городов Новосибирска и Барнаула. На базе проведенных исследо­ваний создана моделирующая программа, отображающая и описывающая процесс функционирования электротранспортных средств, используемая управлением пассажирских перевозок при организационном структурирова­нии перевозочного процесса в г. Барнауле.

Создана физическая модель, представляющая интерес для дальнейших исследований в области совместной работы накопительных элементов и ма­шины постоянного тока.

Материалы диссертации, касающиеся анализа и расчета электромагнит­ных процессов электрического торможения и тяги, используются в создан­ном программном комплексе «Тяговый расчет»; а также при построении и описании математических моделей с учетом случайных факторов для более полной оценки реальных режимов движения ЭПС, используются в ряде учебных дисциплин для студентов по направлению 140600 - «Электротехни­ка, электромеханика и электротехнологии» и специальности 140606 - «Элек­трический транспорт» Новосибирского государственного технического уни­верситета.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: IX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, МЭИ, 2003); Y международной конференции «Элек­тромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение» (Крым, г. Алушта, МКЭЭЭ-2003); Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы» (г. Томск, ТПУ, 2003); Международной научно-технической конференции «Электро­энергия и будущее цивилизации», (г. Томск, 2004); Межвузовской научно­студенческой конференции «Современные проблемы технических наук: Ин­теллектуальный потенциал Сибири» (г. Новосибирск, НГАСУ, 2004); Все­российской научно-технической конференции «Наука. Технологии. Иннова­ции.» (г. Новосибирск, НГТУ, 2004); II международной научно-технической конференции «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт», (г. То­больск, 2004); II международной научно-технической конференции «Транс­портные системы Сибири» (г. Красноярск, КГТУ, 2004).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 работ, в числе ко­торых: 1 статья, входящая в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 5 научных статей в сборниках научных трудов и 7 докладов на международных и всероссийских конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка библиографических источников из 164 наименова­ний и приложений. Общий объем диссертации 211 страниц основного текста, включая 76 рисунков и 19 таблиц.

**Основной материал диссертации изложен в четырех главах.**

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

**В первой главе** рассмотрен электрический транспорт как сложный элек­тротехнический комплекс, в котором выделены две основные подсистемы: электроснабжение и электроподвижной состав. Представлен энергобаланс поезда с учетом использования энергии электрических торможений. Прове­ден анализ методов, определяющих энергетику движения электротранспорт- ного средства. Представлен ряд экспериментальных исследований, прове­денных для установления математических зависимостей удельных величин энергий тяги и электрического торможения. Дана оценка соотношения ба­ланса энергий в силовых цепях электроподвижного состава. Показано значи­тельное недоиспользование энергии электрических торможений, что сни­жает эффективность транспортной системы в целом.

**Во второй главе** выполнен анализ различных видов накопителей энергии: электрохимических, индуктивных, сверхпроводящих, теплоэлектрических, пневмо-, гидроаккумуляторов, механических, электромеханических, гибрид­ных видов накопителей, емкостных, конденсаторов с двойным электриче­ским слоем и гибридных электрохимических конденсаторов. В результате проведенного анализа установлено, что наиболее перспективным и удовле­творяющим основным требованиям для внедрения в электротранспортный комплекс является накопительный элемент на базе конденсаторов двойного электрического слоя. Данный вид накопительных элементов способен обес­печить при малых массах и размерах высокие энергетические показатели, не­обходимые для реализации электродвигателями заданных тяговых характе­ристик.

**В третьей главе** проведен анализ различных способов перераспределе­ния и накопления энергии, вырабатываемой ТЭД в режиме электрического торможения. Выполнен анализ существующих методов, направленных на ус- \* тановление величины избыточной энергии рекуперации. Создана программа,

позволяющая определять вероятность совпадения режимов тяги и торможения в зависимости от количества ЭПС. Проведены расчеты, направленные на уста­новление режимов работы и параметров накопителей энергии, и их влияния на систему тягового электроснабжения в целом. Предложена комбинированная схема автоматического поста секционирования и накопителя энергии. Прове­дена оценка изменения энергопотребления в системе городского электриче­ского транспорта с учетом внедрения накопительных устройств.

**В четвертой главе** показано, что наиболее эффективно использовать накопительное устройство на электроподвижном составе, с целью оператив­ного использования энергии электрических торможений с аккумулировани­ем, кратковременным хранением и реализаций в режиме тяги. На основе про- ^ граммного комплекса проведен расчет и выявлен диапазон наиболее вероят­

ных начальных скоростей торможения с учетом минимизации энергопотреб­ления электроподвижным составом. Разработан метод расчета энергетиче­ских характеристик накопительного устройства, учитывающий параметры подвижного состава и потери при преобразовании энергии электрических торможений. Предложены схемные решения силовой цепи троллейбуса с на­копительным элементом. Выполнен анализ различных режимов работы и электромагнитных процессов, протекающих в силовой цепи электроподвиж- ного состава, оборудованного накопительным устройством. Создана модель, реализованная на ЭВМ, позволяющая проводить расчеты процесса электри­ческого торможения. Определены массогабаритные параметры накопитель­ного устройства. Установлена величина автономного хода. Создана физиче­ская модель привода с накопителем энергии, подтверждающая результаты математического моделирования.

1. Выводы
2. Показано, что наиболее эффективно энергия электрического тормо­жения используется в электротехническом комплексе при установке накопи­тельного устройства на электроподвижном составе.
3. Выполнена вероятностная оценка возможного диапазона скоростей начала электрических торможений и проведены расчеты энергетических па­раметров накопительного устройства троллейбуса на основе конденсаторов двойного электрического слоя.
4. Разработана силовая схема троллейбуса с накопительным устройст­вом и выполнен анализ электромагнитных процессов в ней. Создана матема­тическая модель, позволяющая рассчитывать энергетические характеристики и выбирать параметры основных элементов силовой цепи троллейбуса для режимов тяги и электрического торможения.
5. Установлено, что накопительное устройство имеет массу, не превы­шающую 3% от массы ненагруженного троллейбуса, позволяет в полной мере использовать энергию электрических торможений, обеспечивает запас авто- I номного хода до 200 метров и позволяет исключить потери энергии по срав­

нению с размещением накопительного устройства в системе тягового элек­троснабжения.

*»*

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие ос­новные результаты:

1. Проведенный анализ методов энергетических расчетов электротранс- портного комплекса показал, что практически все они не учитывают влияние случайных факторов на характер движения городского электрического транспорта и вносят существенную погрешность при определении энергии транспортного средства в процессе движения. Выполненные эксперимен­тальные исследования по оценке энергобаланса транспортной единицы по­зволили получить среднестатистическую величину энергии электрических торможений, обосновать выравнивающие функции распределений удельных энергий режимов тяги и торможения.
2. Сравнительный анализ существующих накопителей энергии позволил выработать требования, предъявляемые к накопительным устройствам го­родского электрического транспорта и выбрать в качестве такого устройства конденсаторы двойного электрического слоя, позволяющие наиболее рацио­нально использовать энергию электрических торможений транспортных средств.
3. Рассмотрены различные варианты схемных реализаций и использова­ния накопительных устройств, проведено обоснование рационального их внедрения в систему городского электрического транспорта. В результате выполненных расчетов показано, что наибольшая эффективность использо­вания энергии электрических торможений достигается при внедрении нако­пительных устройств на электроподвижном составе, что также повышает ди­намические и энергетические показатели транспортного средства в целом, и позволяет получить автономность хода до 200 метров.
4. Предложен метод и проведены расчеты по выбору основных парамет­ров накопительного устройства электроподвижного состава. Выполнен ана­лиз, направленный на выявление рациональной величины энергоемкости на­

копителя с учетом изменения массы транспортного средства и вероятностного диапазона начальных скоростей торможения. Разработана принципиальная электрическая схема силовых цепей троллейбуса с накопи­тельным устройством.

1. Выполнен анализ электромагнитных процессов и получено математи­ческое описание процессов электрического торможения транспортного сред­ства, оборудованного накопительным устройством. Реализация математиче­ской модели на ЭВМ позволила проводить расчеты с высокой степенью точ­ности и рассчитывать энергетические процессы электрического торможения.
2. Создана физическая модель электротранспортного средства и проведе­ны экспериментальные исследования процессов, протекающих в накопитель­ных устройствах в режимах электрического торможения. Полученные экспе­риментальные данные подтверждают результаты выполненных теоретиче­ских исследований.
3. Использование накопительных устройств на электроподвижном соста­ве может дать суммарную экономию электроэнергии от 14 до 22% в системе городского электрического транспорта в целом и составить, как показывают расчеты для г. Новосибирска *1*7 *ГВт-ч* ежегодно.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ефремов, И.С. Теория и расчет электрооборудования подвижного состава городского транспорта [Текст] / И.С. Ефремов, Г.В. Косарев. - М. : Высшая школа, 1976. - 473 с.
2. Слепцов М.А. Основы электрического транспорта [Текст] / Слепцов М.А., Долаберидзе Т.П., Прокопович А.В., Савина Т.И. [и др.]; учеб. для студ. высш. учеб. заведений /под общ. ред. М.А. Слепцова. - М. : Изд. центр «Академия», 2006. - 464 с.
3. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст]; учеб. для вузов ж.д. трансп. - М.: Транспорт, 1982 - 528 с.
4. Розенфельд, В.Е. Электрические железные дороги [Текст] / В.Е. Розенфельд, Н.Н. Сидоров, С.Е. Кузин, И.И. Власов. - М. : ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ, 1957. - 432 с.
5. Сопов, В.И. Энергосберегающие мероприятия при эксплуатации трамваев и троллейбусов [Текст] / В.И. Сопов, Ю.А. Прокушев, А.А. Штанг ; под. ред. В.Н. Аносова; Автоматизированные электромеханические системы. Коллективная монография. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - с. 253 - 263.
6. Щуров, Н.И. Исследование энергетических показателей троллейбусов [Текст] / Н.И. Щуров, В.И. Сопов, Ю.А. Прокушев, А.А. Штанг; Совершенствование технических средств электрического транспорта: Сб. научн. тр. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - с.142 - 153.
7. Сопов, В.И. Мониторинг и нормирование расходов электрической энергии в системе «Электрический транспорт» [Текст]: 4.2 / В.И. Сопов, Н.И. Щуров, Ю.А. Прокушев, А.А. Штанг; Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение, МКЭЭЭ - 2003: Tp. V междунар. конф., Крым, Алушта, 2003. - М.: Изд-во МЭИ (ТУ), 2003. - с. 199 - 202.
8. Исследование и разработка энергосберегающих технологий эксплуатации электрического транспорта г. Новосибирска [Текст]: отчет о НИР (заключ.): 01-01/ Новосиб. гос. техн. ун-т. Каф. ЭТр; рук. Щуров Н.И.;

исполн.: Сопов В .И., Штанг А.А., Прокушев ЮА. [и др.]. - Новосибирск: 2002. -121 с.

1. Феоктистов, В.П. Анализ энергозатрат в перевозочном процессе на железнодорожном транспорте методом энергобаланса [Текст]: В сб. обзорной информации Транспорт: наука, техника, управление. - М. : ВИНИТИ 1992, №10.-с. 23-26.
2. Современное тормозное оборудование [Текст]. - Железные дороги мира 2003, №5 - с. 44 - 48.
3. Зоне, С. Повышение эффективности электрического торможения [Текст]. - Железные дороги мира 2003, №8 - с. 54 - 58.
4. Исследование и разработка энергосберегающих технологий эксплуатации электрического транспорта г. Барнаула [Текст]: отчет о НИР (заключ.): 02-01/ Новосиб. гос. техн. ун-т. Каф. ЭТр; рук. Щуров Н.И.; исполн.: Сопов В.И., Штанг А.А., Прокушев Ю.А. [и др.]. - Новосибирск:
5. - 117 с.