

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО

Кафедра физики твёрдого тела

**ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В МОЩНЫХ РЕАКТОРАХ ПОМЕХОПОДАВЛЕНИЯ**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 года обучения

направления 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Корнева Игоря Александровича

Научный руководитель
д. ф.-м. н., профессор,
заведующий кафедрой



Д.А. Усанов

19.06.18г.

Саратов

2018

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последние десятилетия все больше внимания уделяется проблемам энергосбережения, электромагнитной совместимости (ЭМС), нормированию и обеспечению минимально возможного уровня электромагнитных помех, побочных (паразитных) колебаний, снижения и подавления уровня нелинейных искажений, создаваемых различными электротехническими и электронными устройствами.

Несмотря на бурное продвижение усилительной и генераторной техники во все более и более коротковолновые диапазоны (включая миллиметровый и инфракрасный диапазоны), дефицит радиоканалов, каналов связи не уменьшается в связи с еще более быстрым развитием различных радиотехнических устройств.

Задача минимизации паразитных колебаний сегодня актуальна для всех без исключения участков частотного диапазона – от единиц кГц до сотен ГГц.

В этой связи, рассматриваемые в настоящей работе проблемы, связанные с анализом сильноточных процессов, возникающих при этом широкополосных паразитных электромагнитных колебаний высокой интенсивности, разработка методов их подавления представляются актуальными и практически значимыми.

Не менее актуальными представляются и разработанные в рамках настоящей работы теоретические и экспериментальные методы, позволяющие анализировать электродинамические и теплофизические процессы в устройствах подавления паразитных колебаний, и проектировать, разрабатывать на этой основе соответствующие устройства – мощные малогабаритные реакторы помехоподавления.

Не менее актуальной представляется и вторая группа задач, относящаяся к моделированию, расчету и экспериментальному исследованию других элементов силовой электрической схемы управления тяговым двигателем – блоков тормозных резисторов, позволяющих гасить энергию торможения различных электрических транспортных средств. Важными представляются также проведенные

в последней главе предварительные исследования, направленные на создание накопителей энергии, идущих в настоящее время на смену блокам силовых резисторов.

В проведенных в работе исследованиях важное место занимало компьютерное моделирование электродинамических и теплофизических процессов, а также разработка методик и проведение экспериментальных исследований. Они имеют самостоятельную актуальность и практическую значимость. В ходе описываемых в работе исследований созданы конкретные экспериментальные установки для измерения процессов насыщения магнитных экранов реакторов помехоподавления, теплофизических характеристик блоков тормозных резисторов и реакторов помехоподавления.

Целью данной работы является установление основных закономерностей, определяющих электродинамические и теплофизические характеристики данных устройств и разработка на этой основе рекомендаций по моделированию и проектированию устройств подавления паразитных колебаний и других элементов силовой электронной схемы управления двигателем.

Основными задачами данной работы являются:

1. Анализ источников паразитных электромагнитных колебаний в различных видах технических устройств, их основных частотных характеристик, сравнение их с нормативами по электромагнитной совместимости (ЭМС), определение основных требований к параметрам устройств, обеспечивающих подавление паразитных электромагнитных колебаний.

2. Разработка методов расчета электродинамических и теплофизических характеристик мощных реакторов помехоподавления (РПП) с магнитными экранами, позволяющих корректно оценивать эти характеристики при различных частотах сигнала, материалах экрана и величине тока подмагничивания.

3. Разработка оригинальных методик и основанных на них экспериментальных установок, позволяющих определить основные закономерности электродинамических и теплофизических процессов в мощных реакторах помехоподавления с магнитными экранами в условиях протекания по ним больших токов.

4. Разработка оригинальных методик экспериментального исследования и основанных на них экспериментальных установок, позволяющих определить основные закономерности протекания теплофизических процессов в этих устройствах, и осуществить поиск наиболее рациональных методов минимизации самих нагрузок и температурных режимов работы этих устройств.

5. Разработка инженерных методик расчета и экспериментального исследования этих устройств и основанных на них подходов к их проектированию и разработке.

6. Разработка методов определения реальных режимов функционирования блоков тормозных резисторов, методов моделирования и расчета теплофизических характеристик этих устройств в условиях протекания больших токов, и формирование на этой основе подходов к минимизации возникающих в них тепловых нагрузок.

7. Анализ проблем и основных тенденций, связанных с созданием мощных, эффективных, надежных накопителей электрической энергии, постановка задач их исследования и проектирования.

Объектом исследования являются процессы в мощных реакторах помехоподавления с магнитными экранами и сами эти устройства в режимах протекания по ним больших токов, а также аналогичные процессы в блоках тормозных резисторов электрических транспортных средств массового потребления.

Предмет исследования:

- методы подавления паразитных электромагнитных колебаний, анализ характеристик устройств для их подавления, формулирование основных требований к этим устройствам;

- процессы насыщения магнитных экранов, входящих в состав многослойных катушек индуктивности, составляющих основу мощных реакторов помехоподавления в зависимости от величины протекающих по ним токов;

- методы облегчения тепловых режимов в условиях протекания номинальных токов в реакторах помехоподавления;

- временные зависимости выделения мощности и эффективности теплосъёма в тормозных резисторах и методы снижения температуры резистивных элементов на протяжении одиночного и циклического торможения.

Методология и методы исследования.

В работе для расчетов и экспериментального исследования электродинамических и теплофизических характеристик использовались:

- интегро-дифференциальные уравнения (ИДУ) магнитостатики и построенная на их основе методика расчета многослойных катушек индуктивности с магнитными экранами;

- разработанная методика компенсационных измерений величины индуктивности многослойных катушек (в том числе – с магнитными экранами) в режиме протекания по ним постоянного тока подмагничивания;

- разработанная автором методика исследования тепловых режимов многослойных катушек индуктивности с магнитными экранами в условиях протекания номинальных токов;

- разработанные в рамках настоящей работы методы теоретического анализа тепловых режимов, в частности, математическая модель, описывающая нелинейную динамику теплопереноса в цилиндрических и сферических структурах.

- пакет программ Comsol.

Достоверность полученных результатов обеспечивается выбором методов расчета и корректностью задания числового материала при моделировании исследуемых процессов, хорошим совпадением полученных экспериментальных результатов с полученными расчетными данными, публикацией результатов расчетов и экспериментов, обсуждением их на научных и научно – практических конференциях.

Основным подтверждением достоверности полученных результатов является создание на их основе конкретных устройств, с характеристиками, обеспеченными на основании результатов проведенных в работе исследований.

Научная новизна работы:

1. Впервые разработана методика расчета многослойных катушек индуктивности с магнитными экранами, построенная на основе интегро-дифференциальных уравнений (ИДУ) магнитостатики.

2. Впервые показано, что увеличение индуктивности многослойных катушек за счет введения магнитных экранов в условиях протекания по ним больших токов не прямо связано с величиной магнитной проницаемости экранов, и существует обеспечивающий наибольший рост индуктивности диапазон значений магнитной проницаемости, определяемый конфигурацией катушки и экранов.

3. Впервые разработана методика компенсационных измерений величины индуктивности многослойных катушек индуктивности с магнитными экранами и на ее основе проведены исследования насыщения магнитных экранов многослойных катушек индуктивности при изменении величины протекающего по проводу катушки тока и проведены измерения, позволившие определить эти характеристики для различных конфигураций катушек, различных конфигураций магнитных экранов и различных частот сигнала.

4. Впервые разработана инженерная методика, построенная с использованием закона Био-Савара-Лапласа для расчёта индукции магнитного поля B в областях, расположенных во внутренних областях и вокруг катушки индуктивности. С помощью нее были рассчитана конфигурация магнитных полей рассеивания и определены наиболее приемлемые конфигурации магнитных экранов.

5. Впервые разработана расчетно-экспериментальная методика анализа тепловых режимов одиночного провода и многослойных катушек с магнитными экранами и теплоотводящими пластинами, на ее основе проведено моделирование и проектирование РПП.

Теоретическая и практическая полезность исследования:

1. Созданные в процессе выполнения работы методы теоретического и экспериментального исследования протекающих в данных типах изделий процессов, сопутствующих им электродинамических и теплофизических явлений, а

также основанные на них инженерные методики проектирования могут использоваться при разработке различных типов устройств, работающих при больших уровнях протекающих по ним токов. В частности, они были использованы автором настоящей работы при разработке параметрических рядов мощных РПП с магнитными экранами и блоков тормозных резисторов для городского электрического транспорта.

2. О практической значимости проведенного исследования непосредственно свидетельствуют и собственно многочисленные разработанные на их основе и внедренные в производство мощные реакторы помехоподавления и блоки тормозных резисторов, используемые в настоящее время в различных типах и моделях электрического транспорта.

3. Практическая значимость работы подтверждается 6 патентами, полученными автором на технические решения, разработанные на основе проведенных исследований и внедренные впоследствии в эти устройства.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Построенная на основе интегро-дифференциальных уравнений для магнитостатики математическая модель для исследования влияния магнитных экранов, частоты сигнала и силы протекающего тока на индуктивность многослойных катушек из изолированного провода.

2. Разработанный компенсационный метод и основанная на нем экспериментальная схема для исследования влияния протекающих по катушке индуктивности постоянных токов подмагничивания на величину ее индуктивности и параметров насыщения магнитных экранов.

3. Зависимость эффективности влияния магнитных экранов на увеличение индуктивности многослойных катушек и АЧХ подавления помех от величины магнитной проницаемости материала экранов имеет экстремум, положение которого определяется в зависимости от конфигурации катушки, экранов и величины индуктивности данной катушки в отсутствии экранов.

4. Модели, экспериментальные методики и результаты расчетов и экспериментального исследования тепловых характеристик индуктивных РПП, в частности, одномерная цилиндрическая тепловая задача без начальных условий и модель, описывающая нелинейную динамику теплопереноса в цилиндрических и сферических структурах.

Научно - квалификационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. В работе рассматриваются как описываемые подходы к моделированию и экспериментальному исследованию процессов, протекающих в этих устройствах, так и подходы к их конструктивному исполнению.

В первой главе работы проанализированы все основные источники паразитных колебаний в силовых схемах управления двигателем, проведена их классификация, изучены механизмы возникновения кондуктивных электромагнитных помех и радиопомех, возникающих при работе электронного оборудования. На оценочном уровне определены частотные характеристики интенсивности паразитных колебаний, их суммарные значения в различных частотных поддиапазонах, проведено сравнение этих зависимостей с действующими нормами по ЭМС.

На этой основе определены требования к устройствам, предназначенным для подавления паразитных колебаний, задана требуемая частотная зависимость коэффициента подавления паразитных колебаний.

Во второй главе работы на основе выдвинутой гипотезы о существенном увеличении индуктивности многослойной катушки за счет замыкания ее магнитных полей рассеивания с помощью специальных магнитных экранов, проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований.

Прежде всего, с использованием закона Био - Савара - Лапласа была написана программа для расчёта индукции магнитного поля B в областях, расположенных во внутренних областях и вокруг катушки индуктивности без экранов. С помощью нее были рассчитана конфигурация магнитных полей рассеивания и определены наиболее приемлемые конфигурации магнитных экранов, а затем рассчитаны, спроектированы и изготовлены образцы двух типов многослойных

катушек. На разработанной и изготовленной для этих целей экспериментальной установке измерены их индуктивности и частотные характеристики подавления (как без магнитных экранов, так и с несколькими вариациями этих экранов).

Очевидно, что при значительных токах, протекающих по токопроводу катушки, всегда будет иметь место насыщение материала экранов. Исходя из этого, ставилась задача поиска теоретических и экспериментальных методов оценки степени насыщения магнитных экранов, определения зависимости снижения уровня индуктивности от величины протекающего по катушке тока, и на этой основе - поиска характеристик материалов магнитных экранов, конфигурации экранов и самой катушки, позволяющих минимизировать снижение ее индуктивности с ростом рабочего тока.

Для проверки гипотезы о влиянии величины протекающего по проводу многослойной катушки тока на насыщение магнитных экранов и величину их индуктивности было проведено отдельное экспериментальное исследование этого эффекта. Были установлены основные закономерности зависимости АЧХ катушки индуктивности с экранами в зависимости от величины постоянного тока подмагничивания, частоты подаваемого сигнала, а также материала и конфигурации магнитного экрана.

Ввиду высокой важности для практики полученных результатов была предпринята попытка проверки полученных закономерностей с помощью строгого теоретического расчета. С этой целью была создан компьютерный алгоритм расчета, основанный на интегро-дифференциальных уравнениях магнитостатики для магнитного поля в случае наличия заданного стороннего магнитного поля, созданного постоянным соленоидальным током в проводнике (катушке), и присутствия магнитного тела со скалярной неоднородной магнитной проницаемостью, которая может быть нелинейной функцией поля. Уравнения определены внутри тела и на его поверхности. Они являются интегро-дифференциальными в том смысле, что под знаком интегрального оператора стоят неизвестные величины и их производные.

Модель строилась в предположении, что анализу будут подлежать только однородные и однородно намагниченные тела, для которых ($\mu(\mathbf{r})$ и $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ постоянны внутри тела), что является довольно грубым допущением, но позволяло тем не менее определить основные закономерности процессов в исследуемых объектах.

Результаты расчета по этой модели для различных вариантов магнитных экранов и материалов, из которых они изготавливаются (различных величин магнитной проницаемости) практически полностью подтвердили полученные ранее экспериментальные зависимости.

На основе проведенных в настоящей главе исследований были сделаны наиболее важные для настоящей работы основные выводы:

1. Использование магнитных экранов позволяет существенно (до десяти и более раз) увеличить индуктивность многослойной катушки.

2. С использованием теоретических и экспериментальных методов исследования показано, что с увеличением тока катушки с экранами в линейном приближении индуктивность падает, и при номинальных значениях тока для данного типа изделий не превышает L_0 более чем в два раза. Также индуктивность падает с частотой, и при частоте порядка 1 МГц и малом токе также не превышает L_0 более нескольких раз.

3. Важный и достаточно неожиданный практический вывод, полученный в результате проведенных в этой главе исследований, относится к выбору материала для магнитных экранов для многослойных катушек индуктивности. В результате проведенных исследований удалось доказать, что значительно лучшие результаты могут быть получены при использовании в качестве материала магнитных экранов не электротехнической (с высокими значениями магнитной проницаемости), а обычной стали. Это связано не с меньшими значениями ее магнитной проницаемости в отсутствие больших токов, а с меньшей крутизной зависимости магнитной проницаемости от величины поля.

В третьей главе решалась одна из наиболее тяжелых задач, возникающих при проектировании и разработке мощных РПП - задача обеспечения их нормального температурного режима, не приводящего к ускоренному выходу из строя в процессе эксплуатации. Особенно остро эта задача встала при расчете и моделировании мощного РПП для электропоездов, в котором номинальные значения протекающего по проводу тока превышали 1 кА.

В этой связи в главе проводится анализ теплофизических характеристик, тепловых режимов различных конфигураций катушки и магнитных экранов, созданы необходимые для этого методы расчета и экспериментальных исследований. Проводится моделирование тепловых процессов в реакторах помехоподавления, теоретическое и экспериментальное исследование их теплофизических характеристик, для чего разработаны необходимые для проведения этих исследований методы расчета и экспериментальных исследований. Представлены подходы к моделированию тепловых процессов в реакторах, результаты их теоретического анализа.

Предложены оригинальные методики их экспериментального исследования, описана разработанная и собранная экспериментальная установка, представлены результаты экспериментального исследования, достаточно хорошо совпавшие с предшествующим им теоретическим расчетом.

В заключительной части главы представлены результаты проектирования и разработки РПП новой компактной конструкции, использующих магнитные экраны для минимизации магнитных полей рассеивания.

В четвертой главе проводится анализ физических процессов, протекающих в мощных тормозных резисторах. В электрических цепях различных механизмов, в том числе электрических транспортных средств, при торможении электродвигатель переходит в режим генерации, выделяемая при этом энергия «гасится» в тормозных резисторах, включаемых в таких режимах в качестве электрической нагрузки двигателя.

Для оценки выделяемой мощности производится расчет интегралов энергии, выделяемой в течение импульса торможения, либо за счет снижения потенциальной энергии, выделяемой на затяжном спуске с учетом КПД генерации двигателя. Эти характеристики, наряду с параметрами съема тепла с резисторов и их теплоёмкостью, определяют их температурные режимы и являются исходными данными для анализа возможности обеспечения требуемых электрических и теплофизических параметров этих устройств, их надежности и долговечности.

В материалах главы приводятся разработанная математическая модель, основанная на решении уравнения теплопроводности с использованием поправочных эмпирических коэффициентов, учитывающих поправки температурных полей резистивных элементов за счет кондуктивного теплоотвода от них на корпус изделия. С использованием этой модели проводится приближенный расчет нестационарных тепловых процессов в резисторах, обусловленных их теплоемкостью и конвективным теплосъемом протекающего через них хладагента (воздуха).

Во второй части четвертой главы проводится обзорное изучение других устройств для приема энергии генерации двигателей и ряда других практических применений – мощных накопителей электрической энергии на основе суперконденсаторов (ионисторов). Значительных и важных для практики научных результатов в этой части работы пока не получено, однако заложены основы для дальнейшего исследования.

В выводах по главам обобщаются основные полученные в них результаты, обосновывается их новизна и практическая значимость.

Полный объем работы 138 страниц, включая 65 иллюстраций и 5 таблиц. Список использованной литературы и собственных работ аспиранта содержит 65 наименований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы по данной работе заключаются в следующем:

1. На основе проведенного анализа определены все основные источники паразитных электромагнитных колебаний, возбуждаемых в различных технических устройствах, проведена их классификация, изучены механизмы возникновения кондуктивных электромагнитных помех и радиопомех, возникающих при работе электронного оборудования.
2. Написана программа для расчёта индукции магнитного поля B в пространстве вокруг катушки индуктивности, основанная на использовании закона Био-Савара-Лапласа. С помощью нее рассчитана конфигурация магнитных полей рассеивания многослойных катушек индуктивности и определены наиболее приемлемые конфигурации магнитных экранов для двух типов многослойных катушек.
3. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для измерения индуктивности и частотных характеристик катушек, с её помощью проведены исследования образцов катушек индуктивности – и без магнитных экранов, и с несколькими вариациями этих экранов.
4. Разработана оригинальная методика компенсационных измерений величины индуктивности катушек в условиях протекания по ним больших токов, разработана и изготовлена основанная на этой методике экспериментальная установка.
5. На основе разработанной экспериментальной методики исследования насыщения магнитных экранов многослойных катушек индуктивности при изменении величины протекающего по проводу катушки тока и проведенных по этой методике измерений, удалось определить эти характеристики для различных конфигураций катушек и различных конфигураций магнитных экранов, и материалов, из которых они выполнены (с различными значениями магнитной проницаемости) и выбрать из них наиболее подходящие для практических целей.

6. Разработана программа расчета полей многослойных катушек индуктивности с магнитными экранами, построенная на основе интегро-дифференциальных уравнений (ИДУ) магнитостатики. По этой программе проведено теоретическое исследование насыщения магнитных экранов многослойных катушек индуктивности при изменении величины протекающего по проводу катушки тока. Основные результаты расчетов показали хорошее совпадение с результатами проведенных экспериментальных исследований.

7. В результате проведенных исследований удалось доказать, что значительно лучшие результаты по увеличению за счет магнитных экранов индуктивности и АЧХ многослойных катушек могут быть получены при использовании в качестве материала магнитных экранов не электротехнической (с высокими значениями магнитной проницаемости), а обычной стали. Это связано с меньшей крутизной зависимости магнитной проницаемости от величины протекающего по многослойной катушке тока.

8. С помощью теоретических и экспериментальных методов исследованы температурные поля мощных РПП. Теоретическое исследование тепловых режимов этих конструкций основано на решении уравнений теплопроводности в одномерных и двумерных структурах с учётом локализации в пространстве источников тепла. На основе этих расчетов определены пути наиболее рационального отвода тепла при высоких тепловых нагрузках этих устройств.

9. Исследованы теплофизические характеристики и температурные поля мощных блоков тормозных резисторов. С помощью разработанных теоретических и экспериментальных методов исследования определена корреляция температурных режимов резистивных элементов и динамики выделения тепловых нагрузок, что позволило определить режимы работы устройств этого типа, при которых возможна минимизация их теплового режима, и использовать эти соотношения для проектирования и разработки блоков тормозных и силовых резисторов.

10. Изучены требования, предъявляемые конструкцией и задачами энергосбережения на транспорте к мощным накопителям энергии, которые в

настоящее время приходят на смену тормозным резисторам в наиболее передовых средствах общественного транспорта. Это сделано с целью создания основы для дальнейших исследований, направленных на разработку путей повышения энергоэффективности схемы управления тяговым электродвигателем транспортного средства.

11. К важным итогам проведенной работы следует отнести и инженерные методики проектирования, которые могут использоваться при разработке различных типов устройств, работающих при больших уровнях протекающих по ним токов. В частности, они были использованы и самим автором настоящей работы при разработке параметрических рядов мощных реакторов помехоподавления с магнитными экранами и блоков тормозных резисторов.

12. По результатам проведенных исследований и разработок автором получено 6 патентов и подано еще две заявки на технические решения, разработанные на их основе и внедренные впоследствии в эти устройства.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались:

- на XIX студенческой международной научно-практической конференции. – Новосибирск, 2014 г.,
- на 4-х научно - технических советах (НТС) предприятий ООО НПФ «ЭТНА» (г. Саратов), ООО ПК «Транспортные системы» (г. Москва) в 2015, 2016 и 2017 г. г.,
- на конференциях «Электротранс-2016» и «Электротранс-2017» (г. Москва).

Публикации автора по теме диссертации:

1. Давидович М.В., Корнев И.А., Тимофеев А.И., Явчуновский В.Я. Одномерная цилиндрическая тепловая задача без начальных условий // Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 22. 2015. С. 35-37.
2. Давидович М.В., Корнев И.А., Тимофеев А.И. Нелинейная динамика теплопереноса в цилиндрических и сферических структурах // Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 22. 2015. С. 93-98.

3. Давидович М.В., Явчуновский В.Я., Корнев И.А., Тимофеев А.И. О влиянии магнитных экранов, частоты и силы тока на индуктивность. // Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 21. 2014. С. 4-10.

4. Носачев В.М., Корнев И.А., Тимофеев А.И., Явчуновский В.С.. Анализ электромагнитных процессов в многослойных катушках индуктивности с магнитными экранами. Часть 1. Теоретическое и экспериментальное исследование распределения магнитных полей и влияния экранов на величину индуктивности катушки и ее частотную характеристику подавления. // Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 21. 2014. С. 10-14.

5. Носачев В.М., Корнев И.А., Тимофеев А.И.. Анализ электромагнитных процессов в многослойных катушках индуктивности с магнитными экранами. Часть 2. Экспериментальное исследование влияния экранов на величину индуктивности катушки и ее частотную характеристику подавления при подмагничивании протекающими по ней большими постоянными токами. // Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 21. 2014. С. 15-18.

6. Якунин А.Н., Корнев И.А., Тимофеев А.И.. Исследование теплофизических процессов в сильноточных реакторах помехоподавления. Часть 1. Расчётно – экспериментальное исследование токового нагружения изолированного провода. // Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 21. 2014. С.19-23.

7. Якунин А.Н., Корнев И.А., Тимофеев А.И.. Исследование теплофизических процессов в сильноточных реакторах помехоподавления. Часть 2. Теоретический анализ теплофизических процессов в многослойной катушке из изолированного провода при протекании по ней больших токов. // Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 21. 2014. С.23-26.

8. «Научная дискуссия: вопросы технических наук. №4(17)»: Сборник статей по материалам XXI международной заочной научно-практической конференции. – М., Изд. «Международный центр науки и образования», 2014. С.122-131.

9. «Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки»: электронный сборник статей по материалам XIX студенческой международной

научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд. «СибАК». – 2014. - №4 (19)/ [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: [http://www.sibac.info/archive/Technic/4\(19\).pdf](http://www.sibac.info/archive/Technic/4(19).pdf).

Список патентов по теме диссертации:

1. Устройство нагрева воздуха: пат. на изобретение № И32557875 Рос. Федерация/ Безрукавный С.В., Корнев И.А., Тимофеев А.И.; патентообладатель ООО НПФ «Этна», заявл. 29.04.2014, выд. 30.06.2015, опубл. 27.07.2015, Бюл. 21.

2. Устройство для создания воздушно-тепловой завесы вагона электро-транспорта: пат. на полезную модель № ПМ143153 Рос. Федерация/ Безрукавный С.В., Корнев И.А., Тимофеев А.И.; патентообладатель ООО НПФ «Этна», заявл. 29.04.2014, выд. 29.06.2014, опубл. 20.07.2014, Бюл. 20.

3. Блок нагнетания и нагрева воздуха: пат. на полезную модель № ПМ143310 Рос. Федерация/ Безрукавный С.В., Корнев И.А., Тимофеев А.И.; патентообладатель ООО НПФ «Этна», заявл. 29.04.2014, выд. 29.06.2014, опубл. 20.07.2014, Бюл. 20.

4. Реактор помехоподавления для электротранспорта (4 варианта): патент на промышленный образец № ПО93004 Федерация/ Безрукавный С.В., Корнев И.А., Тимофеев А.И., Григорьян С. В.; патентообладатель ООО НПФ «Этна», заявл. 29.04.2014, опубл. 27.07.2015, Бюл. 21.

5. Блок самовентилируемых резисторов для электрического общественного транспорта пат. на изобретение № И32570923 Рос. Федерация/ Явчуновский В.Я., Козлов И.А., Тимофеев А.И., Григорьян С. В.; патентообладатель ООО НПФ «Этна», заявл. 8.07.2014, выд. 18.11.2015, опубл. 20.12.2015, Бюл. № 35

6. Блок резисторов для общественного транспорта пат. на полезную модель № ПМ145666 Рос. Федерация/ Явчуновский В.Я., Козлов И.А., Тимофеев А.И.; патентообладатель ООО НПФ «Этна», заявл. 8.07.2014, выд. 21.08.2014, опубл. 10.10.2014, Бюл. № 21.

19.06.2018 Корнев И.А. 