

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

**Исследование процессов генерации и разработка методов подавления
паразитных электромагнитных колебаний в силовых электро-
установках**

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

аспиранта 4 курса 401 группы
направления 03.06.01 «Физика и астрономия»
физического факультета

Тимофеева Антона Игоревича

Научный руководитель

д. ф.-м. н., профессор

_____ А. С. Шаповалов

Саратов

2018

Актуальность темы

Сильноточные процессы относятся к специальным разделам науки и техники, требующим достаточно глубоких исследований различных их характеристик, в первую очередь - анализа сопутствующих электродинамических явлений, переходных процессов, исследования их теплофизических и термодинамических характеристик.

Типичными представителями технических устройств, в которых специфика сильноточных процессов проявляется в наиболее полной мере, являются блоки тормозных и силовых (пуско-тормозных) резисторов и реакторов помехоподавления для подвижных средств городского и железнодорожного транспорта, крановой технике и множестве других используемых в промышленности механизмов.

В процессах ускорения и торможения, подъема и опускания, электродвигатели этих устройств подвергаются многоступенчатой коммутации с использованием специальных активных нагрузочных устройств – так называемых блоков тормозных и силовых резисторов. Так, протекающие в блоках тормозных и силовых резисторов и реакторов помехоподавления электрического транспорта теплофизические процессы зависят от множества параметров самого электрического подвижного средства - его массы, временных зависимостей ускорения и торможения, параметров электрического двигателя в режимах ускорения и торможения (в котором двигатель переходит в режим генерации).

Следует, однако, отметить, что до настоящего времени используемые во всех без исключения моделях отечественного электрического транспорта блоки тормозных и силовых резисторов были разработаны еще в середине прошлого века и по сегодняшним меркам характеризуются достаточно существенными недостатками. Во многом эти недостатки связаны с тем, что в это время еще не существовало достаточно адекватных методов их моделирования и экспериментального исследования, которые позволили бы разработать их с учетом ана-

лиза и последующей оптимизации их эксплуатационных теплофизических характеристик.

В этой связи актуальной представлялась задача разработки методов теплофизического расчета и экспериментального анализа температурных режимов этих конструкций. И уже на этой основе максимально усовершенствовать блоки тормозных и силовых резисторов, создать новые малогабаритные, хорошо охлаждаемые при движении транспортного средства изделия, характеризующиеся в рабочем режиме низкой температурой, как самих резисторов, так и их внешнего корпуса. Эта задача, на основе решения которой (по результатам проведенных исследований) были разработаны, запатентованы автором и поставлены на производство промышленные блоки тормозных и силовых резисторов имела и большое практическое значение.

Не менее актуальной представляется и вторая группа задач, относящаяся к моделированию, расчету и экспериментальному исследованию другого типа сильноточных устройств - мощных, сильноточных реакторов помехоподавления.

В изучении нуждаются, прежде всего, сами процессы возбуждения паразитных электромагнитных колебаний в электрических цепях рассматриваемых устройств, возникающих при этом паразитных колебаний высокой амплитуды, создающие электромагнитный фон в окружающей среде, существенно превышающий допустимые нормы по электромагнитной совместимости и препятствующих нормальному функционированию всех находящихся в зоне их существования электрических и электронных систем (систем связи, видеонаблюдения, телевизионных приемников и т. п.).

Не меньшую актуальность представляют и представленные в работе методы моделирования, расчета и экспериментального исследования собственно реакторов помехоподавления. А описанные в работе результаты приложения этих методов, созданные на их основе запатентованные автором конструкции, имеют реальную практическую значимость.

В проведенных в работе исследованиях важное место занимало компьютерное моделирование электродинамических и теплофизических процессов, а также разработка оригинальных методов экспериментального исследования. Они имеют самостоятельную актуальность и практическую значимость. Не меньшую актуальность и практическую значимость имеют и их реализация в конкретных экспериментальных установках для измерения процессов насыщения магнитных экранов реакторов помехоподавления, теплофизических характеристик блоков тормозных резисторов и реакторов помехоподавления.

Целью данной работы является установление основных закономерностей, определяющих ход электродинамических и теплофизических характеристик силовых процессов и разработка на этой основе рекомендаций по моделированию и проектированию устройств, в которых эти процессы протекают.

Основными задачами данной работы являются:

1. Разработка методов определения реальных режимов функционирования блоков тормозных и силовых 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.

2. Разработка оригинальных методик 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.

3. Разработка методов расчета электродинамических и теплофизических характеристик мощных силовых реакторов помехоподавления с магнитными экранами, позволяющих корректно оценивать эти характеристики в различных режимах протекания по ним больших токов.

4. 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.

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

Научная новизна работы:

1. Впервые показано, что выбор временных зависимостей изменения скорости и отрицательного ускорения транспортного средства в режиме его торможения (отдачи кинетической энергии) позволяет минимизировать максимально достижимую температуру резистивных элементов блока тормозных резисторов за счет нахождения соответствующего взаимного соотношения временных зависимостей выделения и отвода тепловой энергии при переходе электродвигателя транспортного средства в режим генерации.

2. Впервые установлено взаимное соотношение временных зависимостей выделения и отвода тепловой энергии, при котором реализуется минимальное температурное поле резистивных элементов при протекании по ним больших токов.

3. Впервые по разработанной методике расчета синтезирован закон изменения скорости движения транспортного средства под уклон и соответствующий ему закон снижения запаса его потенциальной энергии, позволяющий минимизировать максимально достижимую температуру резистивных элементов блока тормозных резисторов.

4. Впервые на основе проведенных расчетов и экспериментальных исследований определена зона соотношений площади токопроводящего сечения и площади эффективного теплосъема резистивных элементов, обеспечивающих наиболее облегченный тепловой режим резистивных элементов.

5. Впервые разработана экспериментальная методика 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 и различных конфигураций магнитных экранов.

Практическая значимость результатов:

1. Созданные в процессе выполнения работы методы теоретического и экспериментального исследования сильноточных 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 сильноточных реакторов помехоподавления с магнитными экранами и блоков тормозных и силовых резисторов.

2. Найденная корреляция температурных режимов резистивных элементов и динамики выделения тепловых нагрузок позволила определить режимы работы разрабатываемых устройств этого типа, при которых возможна минимизация их теплового режима, и использовать эти соотношения для проектирования и разработки блоков тормозных и силовых резисторов.

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

4. 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. Минимизация значений предельно достигаемой температуры резистивных элементов блока тормозных резисторов при инъекции в них кинетической энергии торможения транспортного средства достигается за счет выбора закона изменения его скорости и отрицательного ускорения (подбора взаимного соотношения временных зависимостей выделения отвода тепловой энергии при переходе электродвигателя в режим генерации).

2. Выбор закона изменения скорости движения транспортного средства под уклон (снижения запаса его потенциальной энергии, сопровождаемого переходом электродвигателя в режим генерации) также позволяет минимизировать предельно достигаемую температуру резистивных элементов блока тормозных резисторов за счет нахождения взаимного соотношения временных зависимостей выделения и отвода тепловой энергии.

3. Оптимизация теплового режима резистивных элементов блока тормозных резисторов (минимизация ее максимально достижимой температуры) должна основываться на выборе соотношения площади токопроводящего сечения и нормированной площади эффективного теплосъема. В зависимости от режимов выделения тепловой энергии и параметров хладагента это соотношение должно быть в пределах от 0,3 до 0,5 раз.

4. Модели, экспериментальные методики и схемы измерительных установок, результаты расчетов и экспериментов тепловых характеристик резистивных элементов блока тормозных резисторов и индуктивных реакторов помехоподавления, в частности, методика и схема измерения параметров насыщения магнитных экранов многослойных катушек индуктивности в режиме больших токов, протекающих по катушке.

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

По теме диссертации опубликовано 15 работ (из них 6 патентов).

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в проведении расчетов и экспериментов по исследованию электрических, электродинамических и теплофизических процессов в сильноточных блоках тормозных резисторов и реакторов помехоподавления, разработке и модификации экспериментальных установок, обработке и интерпретации экспериментальных результатов. Постановка исследовательских задач осуществлялась профессором, д.ф.-м.н. А.С. Шаповаловым (СГУ им. Чернышевского), обсуждение полученных результатов проводилось на научно-технических советах ООО НПФ «ЭТНА».

Структура и объем работы

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

В первой главе проводится анализ физических процессов, протекающих в электрических цепях при переходе электродвигателя в режим генерации. Выделяемая при этом энергия «гасится» в тормозных резисторах, включаемых в таких режимах в качестве электрической нагрузки двигателя. Проводится

расчет временных характеристик импульсов тока, выделяемых в тормозных резисторах в различных режимах электрического торможения, а, соответственно и выделяемой в них мощности.

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

Теоретическому анализу теплофизических процессов, протекающих в блоках тормозных резисторов и их тепловых режимов, посвящена вторая глава. Для корректной оценки температурных полей резисторов в режиме торможения проводится анализ корреляции конфигурации импульсов мощности, выделяемой в тормозных резисторах, и скорости снимающего с резисторов тепловую нагрузку потока хладагента. В материалах главы приводятся разработанные математической модели для приближенного расчета нестационарных тепловых процессов в резисторах, обусловленных их теплоемкостью и конвективным теплосъемом протекающего через них хладагента (воздуха). С использованием этой модели проводится оценочный анализ нестационарных тепловых процессов в резисторах, обусловленных их теплоемкостью и конвективным теплосъемом протекающего через них хладагента (воздуха). Там же проводится учет поправки температурных полей спиралей за счет кондуктивного теплоотвода от резисторов на корпус изделия. С учетом полученных зависимостей делаются рекомендации по улучшению теплоотвода за счет введения в конструкцию концентратора воздушного потока и значительного увеличения за счет него скорости снимающего тепло с резисторов потока хладагента. Предлагается конструкция концентратора, существенно увеличивающего эффективность теплосъема, и всего блока тормозных резисторов в целом.

В третьей главе описано экспериментальное исследование электрических и теплофизических процессов в блоках тормозных и силовых резисторов. Приводится, описание оригинальной экспериментальной методики и схемы для анализа теплофизических характеристик резисторов в различных режимах их нагружения. Приводятся результаты экспериментального исследования динамики процессов, экспериментального исследования токовых и тепловых режимов групп резисторов, сравнение полученных экспериментальных данных с результатами расчетов. В заключительных разделах третьей главы предложены 2 концепции создания этих устройств с использованием в качестве резистивных элементов открытых спиралей и ленточных резисторов, защищенные 4 патентами, и результаты разработки этих устройств.

В четвертой главе работы исследуются физические процессы, протекающие в другом типе сильноточных устройств - так называемых реакторах помехоподавления. Начинается эта часть исследования с изучения процессов возбуждения паразитных электромагнитных колебаний в электрических цепях транспортных средств и при их взаимодействии с контактными сетями. Возникающие при этом паразитные колебания создают электромагнитный фон в окружающей среде, многократно превышающий допустимые нормы по электромагнитной совместимости, и препятствуют нормальному функционированию различных электронных систем - систем связи, видеонаблюдения, телевизионных приемников и т. п.

В качестве устройств, снижающих уровень паразитных электромагнитных колебаний рассматриваются мощные, рассчитанные на большие значения протекающего тока индуктивные реакторы помехоподавления. Одной из основных задач при их создании является задача снижение массогабаритных характеристик этих устройств без ущерба для их надежности и долговечности. С этой целью в работе был рассмотрен наиболее перспективный вариант такого устройства, максимальная индуктивность которого при минимальных габаритах и массе обеспечивалась за счет экранирования создаваемых многослойной катушкой внешних магнитных полей рассеивания.

Однако при сильных токах, протекающих по токопроводу катушки, имело 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, позволяющей минимизировать снижение ее индуктивности с ростом рабочего тока.

Одновременно в главе проводится анализ теплофизических характеристик, тепловых режимов различных конфигураций катушки и магнитных экранов, для чего разработаны необходимые для проведения этих исследований методы расчета и экспериментальных исследований. Представлены подходы к моделированию электромагнитных и тепловых процессов в реакторах, результаты их теоретического анализа. Предложены оригинальные методики их экспериментального исследования, описана разработанная и собранная экспериментальная установка, представлены результаты экспериментального исследования.

В заключительной части главы представлены результаты проектирования, разработки и исследования характеристик реакторов, в том числе миниатюризированных конструкций, использующих магнитные экраны для минимизации магнитных полей рассеивания.

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

Полный объем работы 156 страниц, включая 82 иллюстрации и 17 таблиц. Список использованной литературы и собственных работ аспиранта содержит 58 наименований.

Основные результаты работы:

1. Были исследованы теплофизические характеристики и температурные поля мощных сильноточных блоков тормозных и силовых 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.

2. В процессе проведения этих исследований установлено, в частности, что выбор временных зависимостей изменения скорости и отрицательного ускорения транспортного средства в режиме его торможения (отдачи кинетической энергии) позволяет минимизировать максимально достижимую температуру резистивных элементов блока тормозных резисторов. Это реализуется за счет нахождения соответствующего взаимного соотношения временных зависимостей выделения и отвода тепловой энергии при переходе электродвигателя транспортного средства в режим генерации.

3. Установлено также взаимное соотношение временных зависимостей выделения и отвода тепловой энергии, при котором реализуется минимальное температурное поле резистивных элементов при протекании по ним больших токов.

4. К важным результатам, полученным по разработанной методике расчета, следует отнести синтезированный закон изменения скорости движения транспортного средства под уклон и соответствующий ему закон снижения запаса его потенциальной энергии, позволяющий минимизировать максимально достижимую температуру резистивных элементов блока тормозных резисторов.

5. На основе проведенных расчетов и экспериментальных исследований определена зона соотношений площади токопроводящего сечения и площади эффективного теплосъема резистивных элементов, обеспечивающих наиболее облегченный тепловой режим резистивных элементов и разработаны инженерные подходы к реализации этих соотношения

6. 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 выбрать из них наиболее подходящие для практических целей.

7. К важным итогам проведенной работы следует отнести и созданные в процессе ее выполнения работы методы теоретического и экспериментального исследования сильноточных процессов, сопутствующих им электродинамических и теплофизических явлений, а также экспериментальные методики и схемы измерительных установок. Важными для практических целей являются и основанные на них инженерные методики проектирования, которые могут использоваться при разработке различных типов устройств, работающих при больших уровнях протекающих по ним токов. Так, они были использованы автором настоящей работы при разработке параметрических рядов мощных сильноточных реакторов помехоподавления с магнитными экранами и блоков тормозных и силовых резисторов.

8. 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.

Список работ, опубликованных автором 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. -

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.