

На правах рукописи

ДЕЕВА ВЕРА СТЕПАНОВНА

АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛЯ
ПРОВОДИМОСТИ ЩЁТОЧНОГО КОНТАКТА

Специальность:
05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» на кафедре электропривода и электрооборудования Энергетического института.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Дементьев Юрий Николаевич

Официальные оппоненты:

Харламов Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор,
ГОУ ВПО Омский государственный университет путей сообщения (г. Омск),
профессор кафедры «Электрические машины и общая электротехника»;

Арсентьев Олег Васильевич, кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО Иркутский государственный технический университет (г. Иркутск),
заведующий кафедрой электропривода и электрического транспорта

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО Псковский государственный университет,
г. Псков.

Защита диссертации состоится 17 декабря 2013 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при ФГБОУ ВПО «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, аудитория 8–217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Национального исследовательского Томского политехнического университета».

Автореферат разослан «15» ноября 2013 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.269.11
к.т.н., доцент

Дементьев Ю.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Коллекторным электрическим машинам (КЭМ) свойственны хорошие регулировочные свойства, особенно важные для решения практических задач, требующих возможности изменения частоты вращения и способности выдерживания больших перегрузок. Наличие в КЭМ коллекторно-щёточного узла (КЩУ) с принципом скользящего токосъёма (СТ), обуславливает как достоинства, так и недостатки машин этого класса электромеханики.

Главная проблема КЭМ, нерешённая до сих пор и определяющая актуальность работы, – обеспечение устойчивости коммутации в широком интервале изменения режимов СТ. Нерешённость проблемы устойчивости, определяемой большим числом взаимосвязанных факторов, объясняется тем, что математическая формализация вероятностной задачи в многомерном динамическом поле проводимости (ДПП) контакта, его контроль и диагностика затруднены. Это одна из причин того, что её решение остаётся открытым до сих пор, несмотря на значительное число проведённых исследований. Важнейшими, с точки зрения наибольшей близости моделей к реальному случайному процессу передачи энергии щётчным контактом, являются исследования Лифшица П.С., Фридмана Г.И., Карасёва М.Ф., Плохова И.В., Харизмана Ю.Д., Скороспешкина А.И., Тарановского В.Р., Забоина В.Н., Авилова В.Д. и других, приведенных в библиографии диссертации.

Реализация на практике мер повышения надёжности, контроля и диагностики состояния КЭМ и их коммутационной устойчивости затруднена ввиду недостаточной проработанности анализа и отсутствия обобщающего подхода к исследованию физических явлений, протекающих в контактном ДПП вероятностного взаимодействия контактной пары КЩУ, основы функционирования электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов.

Анализ многих работ показывает: решение проблемы передачи энергии КЩУ в основном ведут детерминированным описанием процесса коммутации с «последующим экспериментальным уточнением и настройкой параметров». Практически речь идёт о детерминированном представлении передачи энергии скользящим контактом (СК) подвижных проводников.

Случайность проявления многообразия свойств взаимодействия элементов контактной пары КЩУ определяет вероятностное описание общей задачи и проблемы исследования передачи энергии подвижным контактом (коммутации энергии). Несмотря на богатую предысторию исследований СК, многие вопросы достижения безупречной устойчивости коммутации энергии в КЩУ остаются до сих пор нерешёнными. Анализ критериев оценки качества коммутации в КЩУ выявляет наличие противоречий именно из-за не детерминированной обусловленности (каузальности) причинно-следственных связей процессов. Они – случайны.

Эти факты указывают на необходимость новых исследований физики контактного взаимодействия элементов КЩУ для поиска новых путей их совершенствования, разработки математических моделей динамического

взаимодействия элементов КЩУ, уточняющих их описание для улучшения коммутации с учётом особенностей изменения свойств тел СК. Наличие факторов существенного влияния на живучесть элементов СК и качества передачи энергии, говорит о том, что задача повышения надёжности КЩУ требует уточнения свойств вероятностного взаимодействия элементов контактной пары токосъёма и использования этих решений, повышающих устойчивость работы КЩУ при проектировании и в эксплуатации, является актуальной и определяющей направление работы.

Выполнение диссертационной работы осуществлялось в соответствии с ФЦНТП «Основы политики Российской Федерации в области развития науки и технологий на период до 2010 года и дальнейшую перспективу (утв. Президентом РФ 30 марта 2002 г. № Пр–576)» и «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники», планом НИОКР ТПУ в рамках мероприятия 1.2 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук», направления 1 «Стимулирование закрепления молодёжи в сфере науки, образования и высоких технологий» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. Проведение части работ предусмотрено целевой комплексной программой «Электрооборудование» (п.01.05 и п.02.03), направлением 8.2 научно-технической программы «Повышение надёжности, экономичности и экологичности электроэнергетической системы России», заказами предприятий и Госзаказом «Наука» № 7.2826.2011.

Объект исследования: контактное пространство элементов КЩУ.

Предмет исследования: физические явления и структура динамического поля проводимости контакта элементов КЩУ.

Цель работы: анализ и исследование СК КЩУ с разработкой методов и алгоритмов, обеспечивающих повышение надёжности, эффективности контроля и диагностики функционирования элементов токосъёма и КЩУ в процессе эксплуатации.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Выявить физические явления, лежащие в основе принципа действия скользящего токосъёма существующих электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов.
2. Разработать на основании теоретических исследований физическую модель скользящего контактного взаимодействия элементов КЩУ.
3. Разработать модель процесса деструкции элементов контактной пары скользящего щётчного токосъёма.
4. Разработать подход контроля и диагностики контактного ДПП КЩУ и щётчного токосъёма как вероятностного динамического процесса.
5. Разработать пути совершенствования щётчного токосъёма.

Методы исследования. Для решения задач применялись теоретические, численные и экспериментальные методы исследования. Теоретические исследования – с применением фундаментальных основ математического анализа, векторной алгебры, дифференциальных уравнений, механики среды,

теорий вероятности, случайных процессов, динамических систем и моделирования с экспериментом в лабораторных условиях и эксплуатации.

Достоверность и обоснованность научных положений, результатов и выводов диссертационной работы подтверждается экспериментальной проверкой, верификацией методами теории подобия и сходимостью результатов автора с опубликованными данными экспериментов других исследователей.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Разработаны модели динамического контакта, позволяющие на основе знания свойств материалов элементов контактной пары КЩУ определить параметры многомерного случайного поля проводимости, образующегося при их динамическом взаимодействии.
2. Создана модель физического процесса деструкции элементов контактной пары, позволяющая учесть особенности щётчного контакта КЩУ для повышения их надёжности и эффективности.
3. Установлены закономерности изменения параметров динамического поля проводимости контакта элементов КЩУ.
4. Предложены решения на основе выявленных особенностей формирования динамического поля проводимости щётчного контакта КЩУ, повышающие живучесть и устойчивость токосъёма и позволяющие проводить контроль и диагностику с эффективной оценкой параметров вероятностного состояния щётчного элемента КЩУ.

Практическая и теоретическая ценность работы.

На основании анализа и предложенных методов, обеспечивающих повышение надёжности контроля и диагностики состояния токосъёма:

- разработаны подход, методы и алгоритмы, обеспечивающие в реальном времени контроль и диагностику СК в процессе эксплуатации;
- разработана математическая модель и проведены теоретические исследования, позволяющие определить основные параметры деструкции щётчного элемента контактной пары, необходимые для улучшения работы, повышения живучести и устойчивости КЩУ;
- выработаны рекомендации для совершенствования подвижного токосъёма на основе исследования физических явлений в динамическом контактном поле проводимости в узлах, использующих принцип СТ;
- апробирована методика, позволяющая проводить контроль и диагностику для качественной и количественной оценки состояния элементов контактной пары и живучести токосъёма в реальном времени.

Реализация результатов работы. Результаты исследований прошли апробацию в ООО "СибургеоНефтеГаз" и внедрены в НПК «Изотермик» (г. Москва) и ООО «СибургеоНефтеГаз» (г. Москва) и учебном процессе кафедр-ры электропривода и электрооборудования Томского политехнического университета для создания лабораторной работы по дисциплине «Электрооборудование промышленности» при подготовке студентов по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника», что подтверждается актами.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод оценки и описания физических явлений контактного взаимодействия элементов СК КЦУ, позволяющий в реальном времени определять живучесть наиболее чувствительного к деструкции элемента – щётки.

2. Модель физического процесса деструкции элементов КЦУ, учитывающая стохастические особенности явлений контактного взаимодействия, позволяющая повысить эффективность токосъёма КЦУ.

3. Физическая модель случайного динамического поля проводимости контакта элементов КЦУ.

4. Подходы, методы и решения, повышающие надёжность, устойчивость и ресурс работы щётки в КЦУ в реальном времени.

5. Методика расчёта и оценки параметров состояния динамического поля проводимости щёточного контакта.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы, были представлены и обсуждались на 14 международных и российских конференциях и школах-семинарах, в том числе: II-й Международной Интернет-конференции «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика» (InnoTech 2010, Пермь); 16-й Всероссийской научно-технической конференции (НТК) «Энергетика: экология, надёжность, безопасность» (Energy–2010, Томск); 2-й Всероссийской школе-семинаре «Функциональные наноматериалы для энергетики» (Москва: МИФИ, 2011); XVII-й и XVIII-й Международных НПК «Современные техника и технологии» (СТТ–2011, 2012, Томск); IX-й Всероссийской НПК «Молодёжь и современные информационные технологии» (Томск, 2011); 2-й Всероссийской школе-семинаре «Функциональные наноматериалы для космической техники» (Москва: МИЭМ, 2011); Российско-монгольской конференции молодых ученых по математическому моделированию, вычислительно-информационным технологиям и управлению [Иркутск (Россия)–Ханх (Монголия), 2011]: Институт динамики систем и теории управления СО РАН–Институт национального развития Монгольской АН; Всероссийской конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве» (Воронеж, 2011); V Юбилейной международной конференции памяти Г.А. Сипайлова «Электро–механические преобразователи энергии» (Томск, 2011); VIII Всероссийской НТК «Молодёжь и наука», посвящённой 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского (Красноярск, 2012); III международной НТК «Энергетика глазами молодёжи» (Екатеринбург, 2012); VI Международной школе «Физическое материаловедение» (Новочеркасск, 2013), семинарах кафедры «Электропривод и электрооборудование» Томского политехнического университета.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, выборе методов их решения, проведении всех экспериментов и обобщении результатов исследований. Все основные положения диссертации разработаны автором лично.

Основные публикации. По теме диссертации опубликовано 32 работы, включая 10 статей в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования научных результатов диссертаций, и 22 – в трудах конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов работы и заключения, выполнена на 115 страницах машинописного текста, содержит 1 таблицу, 45 рисунков, список литературы из 280 наименований и приложение на 3 страницах. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты в области исследований (п.1 и п.5): «Анализ и исследование физических явлений, лежащих в основе функционирования электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов, с разработкой подходов, методов и алгоритмов, обеспечивающих надёжность, контроль и диагностику в процессе их функционирования».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведена краткая характеристика работы, обоснована актуальность темы, указаны цели, задачи и методы исследования, дан краткий обзор задач, рассматриваемых в работе, отмечена теоретическая значимость и практическая ценность решаемых проблем и разработанных математических моделей, определены научная новизна и защищаемые положения, перечислены результаты реализации и внедрения диссертации.

В **первой главе**, посвящённой анализу физических явлений, лежащих в основе функционирования КЩУ электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов, дан краткий анализ проблем СК КЩУ и подходов их решения. Кратко рассмотрена сущность физических явлений при передаче (коммутации) энергии элементами СК КЩУ. Определено, что основной проблемой КЭМ является нестабильность передачи энергии. Показано, что сильное влияние на передачу энергии и её устойчивость оказывает состояние ДПП щётчного контакта. Обосновано: ДПП контакта элементов КЩУ не является детерминированным. По протекающим в нём многомерным многофакторным процессам и явлениям контактное поле КЩУ соответствует понятию случайного. С учётом динамики взаимодействия контактных элементов КЩУ оно является динамическим вероятностным с физическими аспектами, присущими понятию таких структур.

Поэтому в первой главе основное внимание уделено подходам, методам и алгоритмам повышения надёжности и улучшения диагностики и контроля взаимодействия элементов КЩУ при эксплуатации, как динамической вероятностной системы со случайным контактным взаимодействием при передаче энергии. Как показывают исследования многих авторов, без адекватной физической и математической модели ДПП моделирование и качественное обеспечение устойчивости передачи энергии с высокой корректностью при эксплуатации невозможны. Исследователи говорят о типах и различии механизмов протекания тока в КЩУ, но при разработке методик или конкретном решении принимают во внимание какой-то один, превалирующий фактор при передаче энергии элементами токосъёма. В вероятностной структуре СК важно знание совместного действия факторов, т.к. на границе устойчивости процесса передачи энергии, действие даже слабого фактора ведёт к развитию процесса хаотической динамики и срыву устойчивой коммутации.

Это говорит о важности более полного учёта вероятностной динамики и случайности проявления физических свойств ДПП щёточного контакта (рис. 1).

Во **второй** главе с учётом различия механизмов прохождения тока в СК для анализа принята модель ДПП щётки однородной структуры с меняющейся удельной плотностью этого поля согласно динамики движения, изменения свойств фракций деструкции тел и других факторов в СК (рис. 2). Чаще КЩУ присущ стационарный процесс скольжения элементов с постоянной областью взаимодействия. При неравновесной динамике параметры потока фракций СК не постоянны. Они функции времени и координат.

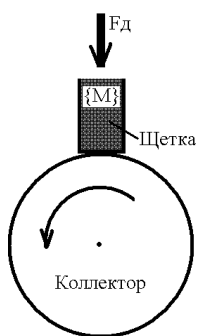


Рис. 1.

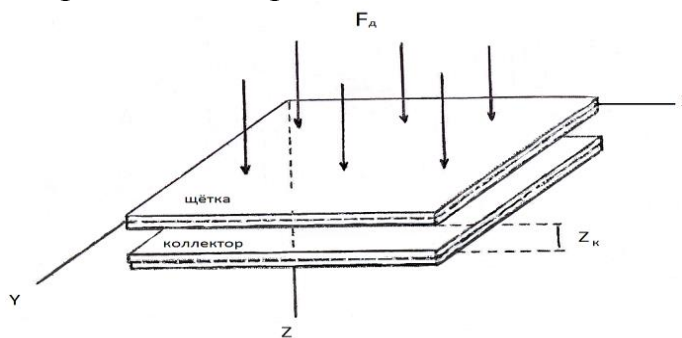


Рис. 2.

В главе приняты параметры в виде средних центрированных значений характеристик фракций ДПП. Для полного учёта динамики образования ДПП КЩУ уравнения математической модели изоморфного контактного слоя сведены в систему уравнений движения, баланса массы потока – уравнение неразрывности потока и состояния. Её решение при стационарном движении ДПП в изотермических условиях имеет вид уравнения с разделяющимися переменными. Исследование решения выявило влияние пространственной ориентации поля токосъёма на свойства и динамику ДПП. В частности, найдены закономерности изменения коэффициентов в решении системы уравнений: коэффициента a , зависящего только от ориентации поля – $a = (2g \cos \alpha_{\perp}) / \eta_p R_p T$ (рис. 3, слева) и $b = 1 + \frac{\alpha_T \ell_{\vartheta}}{R_v \ell_z} \ln \frac{2\ell_{\vartheta} g \cos \alpha_{\perp} + R_v \ell_z v_{\ell}^2}{2\ell_{\vartheta} g \cos \alpha_{\perp} + R_v \ell_z v_0^2}$ (рис. 3, справа) – отражающего изменения скорости, физические свойства среды и ориентацию ДПП.

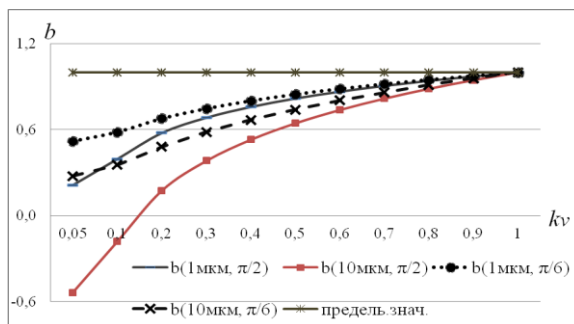
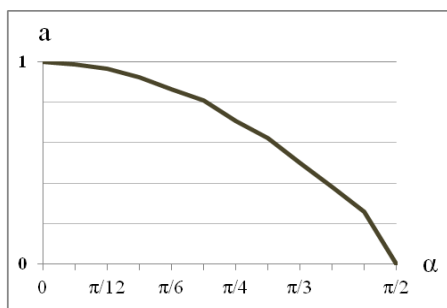


Рис. 3.

Здесь: $g=9,8 \text{ м/с}^2$; $\alpha_{\perp}$ – отклонение поля от горизонтали; T – температура поля; η_p – упругость; $\ell_{\vartheta} = 2\sqrt{xy}/\pi$ – эффективный размер поля; R_v – сопротивление ДПП движению; x и y – размеры поля; v_0 – скорость фракций при отрыве ($z=0$), в области второй стенки зазора $z = \ell_z$ (поверхность скольжения) – v_{ℓ} .

Определено, что для горизонтального ДПП превалирует гравитационная составляющая; вертикальная ориентация приводит к гравитационному ускорению при совпадении с вектором движения поля и, к замедлению движения при противофазных векторах движения и гравитации. Объясняется это действием 1-го и 2-го законов Ньютона.

Выявленный фактор при эксплуатации ведёт к различной живучести щёток КЩУ в зависимости от их расположения (справа или слева) от оси вращения контактного кольца или коллектора. Наблюдаемое на практике явление позволяет сформулировать рекомендации – метод парного обмена щётками КЩУ, расположенных по разные стороны оси вращения (в средней части ресурса), позволяющий более чем в 1,25 раза продлить гарантированный ресурс жизни щёток.

Третья глава посвящена анализу и исследованию основных физических явлений, сопровождающих неравновесную динамику существования ДПП щёточного контакта – основы работы КЩУ электрических машин и аппаратов.

Модель ДПП КЩУ позволяет улучшить известные и создать новые подходы, методы и алгоритмы, повысить надёжность диагностики и контроля преобразователей. Случайность скользящего взаимодействия элементов КЩУ с прилегающим к поверхности вращения воздухом (рис. 4) – диэлектриком относится к неизученным, труднодоступным для контроля процессам. Воздушный поток в ДПП щёточного контакта КЩУ содержит фракции деструкции тел. На их движение влияет электромагнитное поле тока коммутации.

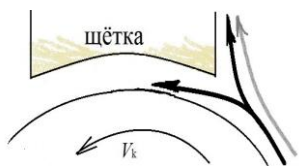


Рис. 4.

Рассмотрены основные виды движения разных типов контактного ДПП, изменение его динамики, размеров и физических эффектов, влияющих на передачу энергии через вероятностное ДПП. Создана модель ДПП щётки с учётом увлекаемого коллектором воздуха, и выполнена оценка вариаций давления этого слоя воздуха. Показаны ограничения и специфика решений уравнений, осложнённых трудностями аналитического описания случайного контакта элементов КЩУ. Нестабильность их поведения затрудняет оценку текущего состояния ДПП. Это влечет применение приближённых методов решения с необходимостью оценок сходимости решений и эффективной погрешности.

Дифференциальное уравнение поля давления p с функцией движения $f(x)$ горизонтального ДПП в пространстве контакта щётки имеет общее решение вида $p(x, t) = p_c(x, t) + \sum_{i=1}^{\infty} A_i(t) \sin(\omega t + \phi)$, затрудняющее получение наглядных числовых оценок. Применение преобразования Лапласа и аппроксимации Бубнова–Галёркина для малого размера щёточного контакта даёт простую функцию общего решения уравнения давления ДПП $p(x, t) \cong 1 - 2,5\bar{x}e^{-10\tau}$ (где $\bar{x}$

и τ – координаты сечения ДПП). Абсолютная погрешность аппроксимации в области набегающего края щётки ($x \ll 1$) составит: $\Delta p(x, t) = 2,5x e^{-10\tau} (1 - 0,8e^{0,1\tau})$. Относительная погрешность оценки – функция времени (неявно размера ДПП): $\Delta_p(x, t) \cong 1 - 0,8e^{0,1\tau}$. В интервале τ (0...1) относительная погрешность равна 0,2...0,12. Видим, что методология Бубнова–Галёркина оценки давления в контактном ДПП щётки даёт результаты близкие к точному решению. Наилучшее совпадение численных оценок – на набегающем крае щётки, а зависимость расхождения оценок с точным решением – линейна. С ростом τ , и понижением скорости ДПП, погрешность аппроксимации стремится к нулю, т.е. к точному решению (рис. 5).

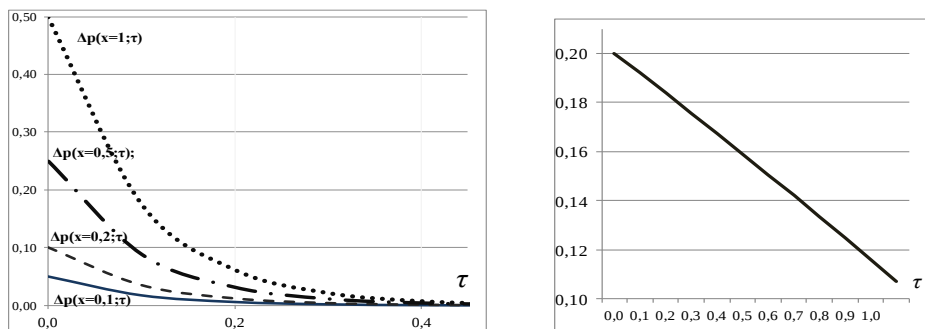


Рис. 5

Анализ термодинамики ДПП с проявлением эффекта Джоуля–Томсона выявил, что термодинамика ДПП щётки КЩУ неоднозначна из-за изменения теплофизических и упругих свойств: щётки стоящие справа и слева относительно центра вращения коллектора (или кольца) работают в разных термо– и аэро– условиях; щётки стоящие сверху и снизу – в одинаковых.

Исследовано влияние образованных фракциями перегородок щели набегающей грани щёток на проникновение воздуха и влияние акта эмиссии фракции на динамику ДПП, как оценки внезапного искажения поля. Влияние фракций изотропно, однородность поля проводимости сохраняется (рис. 6).

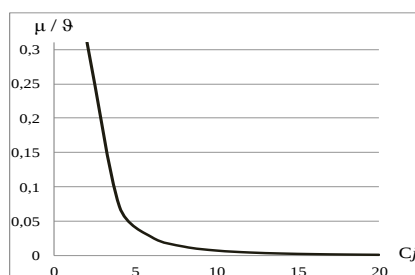


Рис. 6.

Четвёртая глава посвящена решению важной задачи передачи энергии через динамическое пространство щёточного контакта – оценке параметров ДПП. А именно, интенсивности износа щётки, определению меры эмиссии фракций в ДПП КЩУ, анализу основных физических явлений, условий и динамики движения ДПП щёточного контакта, выяснению связи объёма и числа фракций в поле от особенностей деструкции щётки КЩУ.

Глава содержит исследование возможностей марковского подхода для оценки и прогноза состояния ДПП щёточного контакта в реальном времени. Проведён краткий анализ особенностей контактных множеств в ДПП щёточного контакта (рис.7).



Рис. 7.

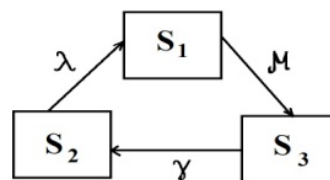


Рис. 8.

Рассмотрена динамика периодического контакта, учитываемая моделью ДПП. Подробно излагается сущность модели ДПП и контактных множеств, их пространственная и временная структура (рис. 7 и 8). Дано физическое обоснование подхода, положенного в основу физической и математической моделей взаимосвязанных бинарного и троичного контактных множеств фрактального ДПП. На основе созданных моделей рассмотрены сценарии смены состояний ДПП и контактных множеств. Выполнены оценки предельной мощности ДПП КЩУ (рис. 9). Проведён анализ смены состояний контактного множества в ламельном цикле СК.

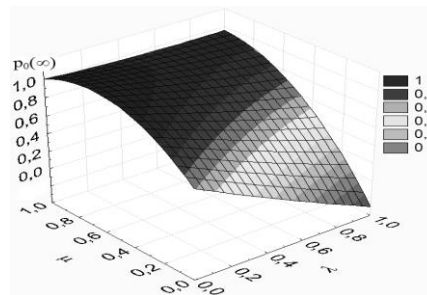
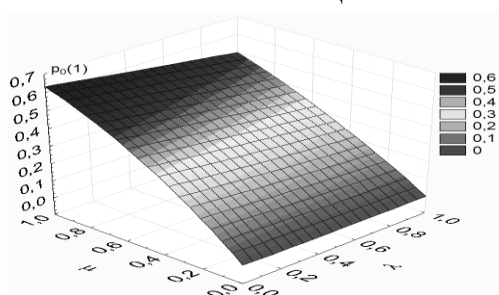


Рис. 9

Показана эргодичность ДПП СК и объяснен физический смысл понятия предельной вероятности состояния контактного множества. Исследовано изменение состояния ДПП щётчного контакта кольцевого токосъёма. Для подвижного контакта щётки с кольцевым токосъёмом оценена живучесть контактной пары в характерных ситуациях СК при эксплуатации.

В **пятой** главе проведён анализ особенностей движения фракций в ДПП. Выявлена связь между объёмом потока фракций деструкции и скоростью ДПП, возникновение которой обусловлено тангенциальной компонентой скорости вращения контактного кольца и коллектора.

Физическая интерпретация образования ДПП КЩУ представлена моделью плавной деструкции. В случайном образовании ДПП интенсивность износа – средняя скорость эмиссии фракций деструкции щётки – параметр закона и плотности распределения вероятности частиц в пространстве СК. Средний размер фракций, образующих ДПП, равен математическому ожиданию их распределения по размерам. Экспериментальные данные по этому вопросу приведены в книге П.С. Лифшица. Высота ДПП в стационарном режиме принята соизмеримой с размером фракций в поле. Модель плавной деструкции щётки принята гипотетической (близкой к реальной), дающей в первом приближении описание процесса образования ДПП, который соответствует установившемуся процессу передачи энергии или стационарному процессу коммутации тока СК.

В математической постановке: относительный размер щётки c/α – в направлении движения x и l/α – по вертикальной оси z бесконечно большой так, что $c/\alpha \rightarrow \infty$ и $l/\alpha \rightarrow \infty$. Предположение плотной упаковки означает, что

среда щётки, скользя по контактной поверхности, под действием касательных напряжений, обусловленных силами трения и адгезии к поверхности, приходит в виртуальное движение, покрывая её тонким слоем. Уравнение стационарного движения такого ДПП имеет вид $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$ с граничными условиями при движении с v_c – относительной скоростью фракций размера a_3 контакта щётки с плоскостью скольжения: $u = 0$, при $y = 0$ и $y = a_3$, $0 < z < \infty$ и $u = v_c$, при $z = 0$, $0 < y < a_3$. Это уравнение континуальной модели физического процесса скольжения щётки, краевые условия которого описывают взаимодействие щётки со средой подвижной контактной поверхности (рис. 10).



Рис. 10.

В однородных граничных условиях ($y=0$ и $y=a_3$) и исключении больших скоростей при $z \rightarrow \infty$ (в плоскости верхней грани щётка неподвижна), решение уравнения – закон распределения скорости фракций деструкции:

$$u(y, z) = \frac{4v_c}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \exp(-n\pi z / a_3) \sin(n\pi y / a_3), \quad n = 1, 3, 5, \dots, \infty. \text{ Упрощение даёт}$$

оценку ДПП в сечении сбегающей грани щётки: $V_i(x, y, z) \cong 0,3094 a_3^2 v_c$.

Оценка сечения ДПП в плоскости выходной грани щётки, сбегающей с контактного кольца или коллектора, даёт линейную зависимость размера сечения от скорости поля и квадратичную от дисперсности – меры плотности упаковки щётки, определяющей толщину ДПП и зазора грани сбегающего края щётки (щели над поверхностью скольжения). Средняя высота ДПП, определяемая фракциями размера a_3 , равна средней толщине z_k потока фракций, покидающих ДПП. При шарообразной и цилиндрической форме фракций $a_3 = 2r_{фэ}$, получим соотношение: $\langle z_k \rangle \cong 0,3094 a_3 = 0,6188 r_{фэ}$.

Вывод: деструкция определяется дисперсностью структуры щётки и в свободном скольжении пропорциональна трети размера фракций плотности упаковки тела щётки. Это означает: дисперсность щётки играет определяющую роль в износе, деструкции, живучести и других показателях.

Получены соотношения, позволяющие найти размерность эффективного объёма ячейки, занимаемой фракцией. Для элементарной ячейки единичного объёма в ДПП принятой прямоугольной кратной диаметру фракции упаковки соотношение её сторон $x \times y \times z$ составит 10:3,2:1. Это соотношение определяет плотность упаковки ДПП и наглядно отражает плоскостность структуры СК. Структура ДПП ячеистая, вытянутая со средним размером фракции деструкции щётки равным $\langle a_3 \rangle$. Среднее число фракций щётки для оценки живучести даст отношение размеров щётки к статистическому размеру

фракции, определяющему высоту ячейки ДПП $\langle z_k \rangle \cong 0,3094 \langle a_3 \rangle$: $\langle m \rangle = \sup \{ abc / \langle z_k \rangle^3 \}$. Дисперсность материала щётки определяет число фракций и живучесть щётки в стационарном режиме эксплуатации.

Живучесть, определяемая скоростью изнашивания щётки – функция скорости движения ДПП соразмерно скорости взаимодействия элементов КЩУ. Чем выше скорость контактного взаимодействия, тем меньше долговечность эксплуатации контактной пары.

Изложенный в работе подход позволяет решить несколько задач. Во-первых, определить в стационарном режиме среднюю статистическую высоту ДПП щётки; во-вторых, уточнить верхнюю грань мощности контактного множества и меру живучести щётки в стационарном состоянии; в-третьих, установить взаимосвязь параметров ДПП и деструкции щётки со скоростью контактного взаимодействия.

В главе выполнены оценки влияния дробности ДПП на изменение сечения, сопротивления, плотности тока и тепловых потерь передачи энергии контактным множеством, образованным случайного размера фракциями деструкции. Выявлено, что ДПП служит аккумулятором энергии тепловых потерь СК. Большой уровень поглощаемой энергии резко меняет свойства фракций деструкции в ДПП. Это служит причиной развития в контактных множествах ДПП неустойчивой термодинамики – образованию множеств с высокой температурой (рис. 11).

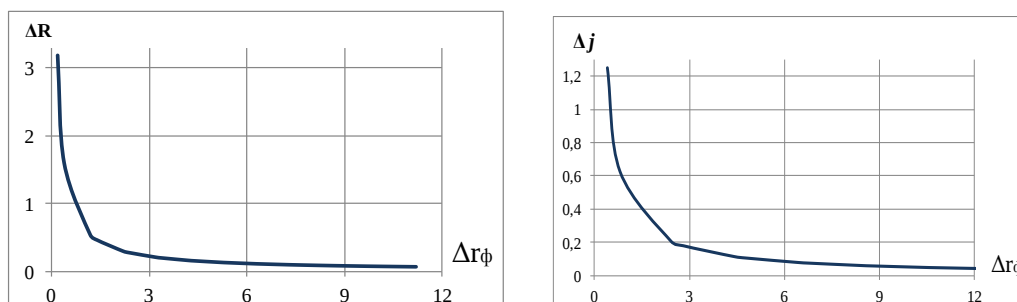


Рис.11

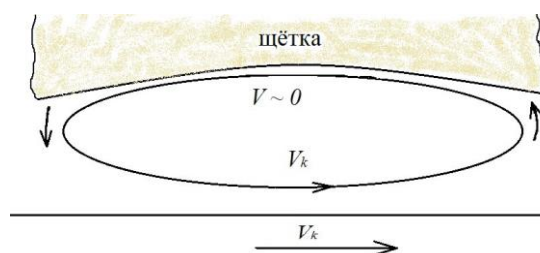


Рис. 12

Особенности СК приводят к тому, что связь скорости движения фракции в ДПП с тангенциальной скоростью вращения коллектора не линейна. Фракция, зажата между щёткой и поверхностью вращения кольца или коллектора, приобретает момент вращения (рис. 12).

Рассмотрено контактное взаимодействие разных форм фракций и траекторий качения. При наличии вращения фракций деструкции в ДПП КЩУ расход фракций в сечении сбегającego края щётки будет, как минимум, в $4/\pi$ раз ниже, чем при их скольжении. Иначе говоря, при наличии качения фракций

в ДПП живучесть элементов контактной пары КЩУ будет выше, как минимум, в $4/\pi$ или $\approx 1,27$ раз.

Исследование физических процессов передачи энергии элементами СК КЩУ говорит следующее. Во-первых, процесс взаимодействия элементов КЩУ является многопараметрическим вероятностным процессом. Во-вторых, анализ, синтез и исследование возможности создания оптимальных структуры и алгоритмов управления СК КЩУ являются необходимым действием. Апробирован принцип интеллектуализации КЩУ путём управления компенсацией воздействий в реальном времени. Практическая реализация адаптивного подхода к управлению КЩУ показала возможность десятикратного снижения дисперсии искажений передачи энергии ДПП КЩУ.

В завершение изложения проведенных в главе исследований дано обобщение анализа качения и особенностей движения фракций в контактном ДПП неподвижной щётки по поверхности подвижного контактного кольца.

В **заключении** приводятся основные результаты настоящей работы и технические предложения по совершенствованию устройств.

Основные научные и практические результаты работы:

1. Проведён анализ физических явлений, лежащих в основе СК электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов, который позволил выявить ряд подходов и методов, дающих возможность существенного (в 1,25 раза и более) повышения надёжности, эффективности контроля и диагностики состояния элементов КЩУ.
2. Разработаны модели формирования динамического поля проводимости контактного взаимодействия элементов КЩУ, учитывающие случайность многообразия проявления физических свойств и явлений, лежащих в основе принципа действия электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов, и позволяющие на основе знания совокупного влияния случайных факторов на СК КЩУ определить свойства многомерного ДПП, образуемого элементами КЩУ.
3. Разработана математическая модель процесса износа щётки КЩУ электрических машин и аппаратов, которая позволила выявить влияние гравитации, приводящей к различной живучести элементов КЩУ в зависимости от их расположения (справа или слева) от оси вращения коллектора или контактного кольца.
4. На основе выявленных закономерностей формирования ДПП щётчного контакта разработаны предложения совершенствования КЩУ, повышающие его живучесть и устойчивость.
5. Разработаны подходы для проведения контроля и диагностики ДПП КЩУ, позволяющие оценивать параметры их вероятностного состояния для улучшения функционирования КЩУ.

Результаты теоретических исследований выявленных и неизученных ранее физических явлений случайного поведения ДПП щётчного контакта, приведённые в работе, являются новыми. Рекомендации и разработанная методика расчета направлены на совершенствование щётчного контакта в КЭМ и аппаратах.

В целом выполненная диссертация является законченной научной квалификационной работой, в которой решена задача исследований и анализа физических явлений в ДПП СК, оптимальности проектирования и повышения надежности КЩУ, имеющая важное практическое значение для расчета, проектирования и эксплуатации различных систем токосъема.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Деева В.С. Траекторное рассеяние фракций скользящего контакта // Доклады ТУСУРа. – 2010. – №2(22). Ч.1. – С. 249–254.
2. Деева В.С. Детектор двумерных смещений / В.С. Деева, М.С. Слободян, С.М. Слободян // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – №5. – С. 166–167.
3. Деева В.С. Динамика изоморфного разрушения скользящего токосъёма / В.С. Деева, С.М. Слободян // Энергетик. – 2011. – №9. – С. 36–38.
4. Деева В.С. Вероятностная оценка живучести ламельного токосъёма / В.С. Деева, С.М. Слободян // Энергетик. – 2012. – №10. – С. 53–56.
5. Деева В.С. Метод покрытия кластерного пространства наблюдения // Доклады ТУСУРа. – 2012. – №1(25). Ч.1. – С. 253–258.
6. Деева В.С. Модель периодического скользящего токосъёма / В.С. Деева, М.С. Слободян, С.М. Слободян // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2012. – Т. 129. №4. – С. 9–14.
7. Деева В.С. Деструкция скользящего ламельного контакта / В.С. Деева, С.М. Слободян // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. №2. – С. 72–78.
8. Деева В.С. Физическая модель пространства скользящего взаимодействия сред / В.С. Деева, С.М. Слободян // Известия Алтайского государственного университета. – 2013. – № 1/1(77). – С. 157–162.
9. Деева В.С. Живучесть щёточного контакта электрических машин / В.С. Деева, М.С. Слободян, С.М. Слободян // Электричество. – 2013. – №4. – С. 45–49.
10. Деева В.С. Живучесть контакта прерываемого скольжения / В.С. Деева, М.С. Слободян, С.М. Слободян // Контроль. Диагностика. – 2013. – №6. – С. 50–54.

Другие научные публикации по теме диссертации

11. Деева В.С. Изоморфизм скользящего контакта конденсированных сред // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика: труды II международной Интернет-конференции. – Пермь, 2010. С. 120–121.
12. Деева В.С. Модель гидродинамики распада контактного тела скольжения // Энергетика: экология, надежность, безопасность (Energy-2010): труды 16-й Всероссийской научно-практической конференции (НПК). – Томск, 2010. С. 17–18.
13. Деева В.С. Динамика контактного скольжения наноструктур // Функциональные наноматериалы для энергетики: труды 2-й Всероссийской школы-семинара аспирантов и молодых ученых. – Москва: МИФИ, 2011.
14. Деева В.С. Модель динамического контакта наноструктур / В.С. Деева, М.С. Слободян // Функциональные наноматериалы для космической техники: труды 2-й Всероссийской школы-семинара аспирантов и молодых ученых. – Москва: МИЭМ, 2011. С. 65–69.

15. Деева В.С. Метод покрытия пространства контроля физического эксперимента // Современные техника и технологии: труды XVII международной НПК студентов и молодых ученых: Томск, 2011. С. 220–221.
16. Деева В.С. Метод распознавания состояний динамического контактного пространства тел // Современные техника и технологии (СТТ–2012): труды XVIII международной НПК студентов и молодых ученых: Томск, 2012. С. 320–321.
17. Деева В.С. Оптимальное покрытие вероятностного кластерного пространства градиентной системой наблюдения // Молодёжь и наука: VIII Всероссийской НТК, посвящённой 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского. – Красноярск, 2012. С. 116–117. сайт <http://conf.sfu-kras.ru/mn2012/>
18. Деева В.С. Плотность вероятности срыва градиентного слежения // Молодёжь и наука: материалы VIII Всероссийской НТК, посвящённой 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского. – Красноярск, 2012. С. 118–119. сайт. <http://conf.sfu-kras.ru/mn2012/>
19. Деева В.С. Динамика трибологического поля проводимости скользящего токосъёма / В.С. Деева, С.М. Слободян // Физическое материаловедение: труды VI Международной школы. – Новочеркасск, 2013. С. 111–113. Сайт: [http:// VIfm-school@yandex.ru/mn2013/](http://VIfm-school@yandex.ru/mn2013/)

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, выборе методов их решения, проведении всех экспериментов и обобщении результатов исследований. Все основные положения диссертации разработаны автором лично. Девять работ [1,5,11–13,15–18] (~65% из общего объёма) написаны автором единолично, в том числе две в изданиях перечня ВАК РФ. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: [2] – аналитическое описание, формулирование граничных условий и требований к электромагнитным, механическим и тепловым случайным воздействиям; [3, 6, 8–10] – разработка моделей; [7, 19] – выполнены расчёты и получены закономерности поведения физических процессов; [4, 14] – проведён анализ полученных результатов.