

На правах рукописи

Качин Сергей Ильич

**ВЫСОКОИСПОЛЬЗОВАННЫЕ КОЛЛЕКТОРНЫЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические
аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск - 2002

Работа выполнена на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок Томского политехнического университета.

Научный консультант - Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Сипайлов Г.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Авилов В.Д.,
доктор технических наук,
профессор Беспалов В.Я.,
доктор технических наук,
профессор Гусельников Э.М.

Ведущая организация - научно-производственный центр «Полюс»
(г. Томск)

Защита диссертации состоится «___»_____2002 года в ____ часов
на заседании диссертационного совета ДР 212.269.08 Томского
политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского
политехнического университета.

Автореферат разослан «___»_____2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В условиях постоянно возрастающего объема применения различного рода электроприводов во всех сферах современной человеческой жизнедеятельности все большее значение приобретают вопросы повышения коэффициента полезного действия электромеханических преобразователей электрической энергии, как одной из важнейших составных частей электропривода, снижения их массогабаритных показателей, улучшения функциональных характеристик данных устройств, увеличения их ресурса работы, а также снижения себестоимости изготовления.

В полной мере указанные проблемы относятся к коллекторным машинам постоянного и переменного токов, которые широко используются в регулируемых и высокоскоростных электроприводах, в бортовой аппаратуре, в качестве исполнительных двигателей роботов-манипуляторов, в бытовой технике и электроинструменте. Расширение объемов применения данного класса электрических машин во многом связано с тем обстоятельством, что коллекторно-щеточные узлы остаются непревзойденными преобразователями частоты по надежности, массогабаритным и стоимостным показателям и имеют перспективы их дальнейшего развития. Вместе с тем, основным фактором, препятствующим дальнейшему совершенствованию данного класса электрических машин, остается проблема повышения их коммутационной устойчивости. Главными причинами неудовлетворительного протекания коммутационных процессов в современных коллекторных машинах являются, во-первых, недостаточные коммутирующие свойства контактной пары щетка-медный коллектор и, во-вторых, ограниченные функциональные возможности применяемых конструкций коллекторно-щеточных узлов и активных элементов коллекторных машин, а также слабое обеспечение инженерного корпуса методиками и программами для осуществления оптимального проектирования всего многообразия рассматриваемого класса электрических машин. Решение указанных проблем является актуальной задачей и представляет научный и практический интерес.

Цель работы. Выполнение комплекса теоретических, конструкторских, технологических и экспериментальных исследований, направленных на создание высокоиспользованных коллекторных электрических машин малой мощности с повышенными эксплуатационными показателями.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- выявить зависимости контактных сопротивлений и коммутирующих свойств коллекторно-щеточного узла от физико-механических характеристик применяемых материалов, геометрических размеров контактных элементов и режимов работы узла токосъема в условиях нагруженного скользящего контакта;

- разработать методики расчета процесса коммутации и коммутационной устойчивости электрических машин, провести на их основе всесторонний

анализ влияния параметров коммутируемых контуров на коммутационные показатели машин и сформулировать основные направления совершенствования электрических машин малой мощности в коммутационном отношении с целью повышения их коммутационной надежности;

- создать новые материалы для контактных элементов, обладающие повышенными коммутирующими свойствами;

- разработать конструкции коллекторно-щеточных узлов, обеспечивающие механическую стабильность скользящего контакта и оптимальные условия для протекания коммутационных процессов, а также проработать технологические вопросы их изготовления;

- разработать диагностический комплекс нового поколения для оценки механического состояния коллекторно-щеточных узлов в статических и динамических режимах работы на основе сочетания аналоговой и цифровой электронной техники, а также создания специальных методик и расчетных программ для обработки получаемой информации с целью достижения максимальной точности измерений;

- создать аналитические методы расчета коммутационных процессов, адекватно отражающие эффект обмена энергией между одновременно коммутируемыми магнитосвязанными секциями якоря на всех этапах коммутационного процесса;

- выработать основные принципы оптимизации электрических параметров магнитосвязанных коммутируемых контуров и на их основе разработать принципиально новые конструкции активных элементов электрических машин, удовлетворяющие критериям оптимальности и обеспечивающие значительное повышение их коммутационной устойчивости;

- создать методику и универсальное программное обеспечение для расчета коммутационных процессов в машинах малой мощности с нетрадиционными конструкциями элементов их активной зоны, позволяющие наиболее эффективно использовать новые технические решения;

- экспериментально подтвердить выдвинутые теоретические положения на искусственных аппаратах и опытных образцах электрических машин;

- определить порядок применения созданных технических решений в соответствии с приоритетностью заданных эксплуатационных параметров электрических машин и оценить их экономическую эффективность.

Методы исследования. Теоретические исследования скользящего контакта выполнялись на основе методик вычисления потенциальных полей, а также с использованием расчетных физических моделей контактных элементов. При комплексных экспериментальных исследованиях коллекторно-щеточных узлов использовались методы математической статистики и теория планирования эксперимента. Поиск количественных соотношений между исследуемыми параметрами выполнялся с помощью методов математического анализа. При создании универсального программного продукта для расчета коммутационных процессов в обобщенной электрической машине с нетрадиционными конструкциями ее

активной зоны широко использовались теория электрических машин, методы математического моделирования, методы расчета магнитных полей, численные методы решения дифференциальных уравнений. В процессе расчетов и анализа математических зависимостей применялись электронные таблицы Excel, а также специализированный пакет программ MathCAD. Разработка оригинальных программных продуктов осуществлялась в средах Visual C⁺⁺ и Delphi. Научно обоснованные рекомендации по проектированию коллекторных машин малой мощности с оптимизированной активной зоной формулировались на основе методологии оптимального проектирования и системного анализа. Экспериментальные исследования проводились на специально разработанных установках и опытных образцах электрических машин с использованием статистических методов обработки результатов измерений.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- разработаны основные принципы создания высокоиспользованных коллекторных электрических машин малой мощности на базе выполненных теоретических и экспериментальных исследований с использованием созданных принципиально новых материалов элементов скользящего контакта, конструкций коллекторно-щеточных узлов, обмоток якоря и индукторов, а также предложенных методов оптимизации параметров коммутлируемых контуров и активной зоны коллекторных электрических машин;

- разработана методика расчета коммутационных процессов высокоиспользованных электрических машин малой мощности на основе определения сопротивлений высоконагруженного скользящего контакта в зависимости от физико-механических характеристик используемых контактных материалов, геометрических размеров контактных элементов, условий работы коллекторно-щеточного узла и механического состояния профиля дорожки скольжения коллектора;

- предложена методика оптимизации параметров коммутлируемых контуров на базе расчетных зависимостей коммутационной устойчивости электрических машин малой мощности с учетом неидентичности коммутационных циклов электромагнитной и механической природы;

- выработаны основные принципы конструирования обмоток якорей с повышенными коммутлирующими свойствами на основе разработанного аналитического аппарата, описывающего эффекты взаимного демпфирования в магнитосвязанных коммутлируемых контурах на всех этапах коммутационного процесса;

- создана универсальная расчетная модель для исследования коммутационных процессов в машинах с различной электромагнитной архитектурой активной зоны, позволяющая рассчитывать основные коммутационные показатели коллекторных машин с различными конструкциями обмоток якоря при использовании индукторов с разной

степенью анизотропии магнитных свойств в машинах с дополнительными полюсами и без них;

- разработаны принципы построения диагностических систем для динамического контроля профиля коллекторов с применением компьютерной техники и специальных методик обработки получаемой информации для повышения точности результатов измерений;

- разработаны принципиально новые технические решения в области материалов для контактных элементов, конструкций коллекторно-щеточных узлов, якоре и индукторов коллекторных машин малой мощности с высокими коммутационными свойствами, новизна которых подтверждена авторскими свидетельствами и патентами;

- предложена методика оптимизации параметров активной зоны электрических машин малой мощности с демпфированными обмотками на якоре и анизотропной конструкцией индукторов, позволяющая достигать максимальных показателей их коммутационной устойчивости;

- выработаны принципы проектирования коллекторных электрических машин малой мощности с оптимизированной активной зоной, позволяющие осуществлять их совершенствование в направлениях повышения удельной мощности, надежности работы, увеличения ресурсных характеристик, снижения расхода активных материалов, повышения электромагнитной совместимости с внешними радиоэлектронными системами.

Основные научные результаты и положения диссертации, представленные на защиту:

- методика расчета сопротивлений высоконагруженного скользящего контакта в зависимости от физико-механических характеристик используемых контактных материалов, геометрических размеров контактных элементов, условий работы коллекторно-щеточного узла и механического состояния профиля дорожки скольжения коллектора;

- методика оценки коммутационной устойчивости электрических машин малой мощности с учетом неидентичности коммутационных циклов электромагнитной и механической природы;

- созданный аналитический аппарат, описывающий эффекты взаимного демпфирования в магнитосвязанных коммутируемых контурах на всех этапах коммутационного процесса, позволяющий оптимизировать коммутационные параметры электрических машин на основе минимизации энергий искровых разрядов под щеткой на завершающей стадии переключения секций якоря;

- разработанная универсальная расчетная модель и программное обеспечение для исследования коммутационных процессов в машинах с различной электромагнитной архитектурой активной зоны, включая машины с нетрадиционными конструкциями якоре и индукторов;

- созданные электропроводящие материалы на основе углеродных волокон для элементов скользящего контакта с повышенными коммутационными свойствами, а также конструкции коллекторно-щеточных узлов, отличающиеся высокой прочностью, монолитностью и стабильностью скользящего контакта;

- принципы построения диагностических систем для динамического контроля профиля коллекторов с применением компьютерной техники и специальных методик обработки получаемой информации для повышения точности результатов измерений;

- созданные принципиально новые конструкции демпфированных обмоток якорей и индукторов с анизотропными магнитными свойствами, отличающиеся высокими функциональными возможностями;

- методика оптимизации параметров активной зоны электрических машин с демпфированными обмотками на якоре и анизотропной конструкцией индукторов;

- основные принципы создания коллекторных электрических машин малой мощности с оптимизированной активной зоной.

Практическая ценность работы определяется следующим:

- разработанные электропроводящие материалы на основе углеродных волокон для элементов токосяема с повышенными коммутационными свойствами обеспечивают увеличение ширины ОБР электрических машин в номинальном режиме в шесть и более раз;

- предложенные конструкции и технологические основы изготовления коллекторно-щеточных узлов, отличающихся высокой прочностью, монолитностью и стабильностью скользящего контакта в широком диапазоне частот вращения и в условиях вибраций, улучшают условия коммутации секций якоря;

- разработанные диагностические комплексы для дистанционного контроля профилей коллекторов в статических и динамических режимах их работы, отличающиеся высокой точностью измерений благодаря применению оригинальных конструкций токовых датчиков, цифровой обработке измеряемого сигнала на компьютере и использованию предложенного метода поэлементной базовой коррекции в процессе измерений, позволяют осуществлять отработку конструкций коллекторов и технологий их изготовления;

- созданные оригинальные конструкции демпфированных обмоток якорей открывают перспективное направление в развитии электрических машин и позволяют повысить коммутационную устойчивость машин с дополнительными полюсами в 2-3 раза, а в реверсивных режимах работы машин без дополнительных полюсов снизить максимальную энергию искрения секций в 20 – 30 раз, а также увеличить результирующий магнитный поток в нереверсивном режиме работы указанных машин более чем на 20 % ;

- разработанные конструкции индукторов с анизотропными магнитными свойствами обеспечивают снижение магнитного потока поперечной реакции якоря в 2-3 раза, а их использование в электрических машинах без дополнительных полюсов позволяет в 1,5 - 2 раза снизить суммарную энергию искрения секций паза якоря;

- созданное универсальное программное обеспечение позволяет рассчитывать основные коммутационные показатели коллекторных электрических машин с традиционными и нетрадиционными

конструктивными решениями элементов их активной зоны, что обуславливает ее практическое применение для решения широкого круга задач при проектировании электрических машин малой мощности.

Высокие коммутрующие свойства предложенных конструкций демпфированных обмоток якорей и анизотропных индукторов электрических машин малой мощности открывают такие направления их совершенствования, как повышение КПД для ряда типов машин на 25 %, сокращение расхода обмоточного провода якоря или индуктора на 30 %, увеличение ресурса работы контактных элементов в 2- 30 раз, снижение уровня радиопомех на 2-6 дБ в диапазоне частот от 0,15 до 2 МГц и на 6-20 дБ в диапазоне частот от 2 до 30 МГц.

Реализация результатов работы. Выполнение диссертационной работы осуществлялось в соответствии с научно-исследовательскими работами по заданию предприятий, а также с грантом 75Гр-98 по фундаментальным исследованиям в области энергетики и электротехники Минобразования РФ. Теоретические, конструкторские и технологические проблемы решались применительно к изделиям специального назначения, а также к электродвигателям для бытовой техники и электроинструмента на предприятиях и в научных организациях России и зарубежной компании. В частности, на Томском электротехническом заводе внедрены партии электрических машин ПО-550, 8ЛО4П, Д-550, Д-28, ОП-120 с коллекторами на основе углеродных материалов, а также электрических машин Д-550, ПК-58, ЭМУ-5ПМБ, Д-59 с демпфированными обмотками на якоре. Электродвигатели Д-59, Д-52, Д-550 с новыми конструкциями обмоток якоря внедрены на Красноярском машиностроительном заводе. Разработанные коллекторно-щеточные узлы с повышенной прочностью нашли применение в электродвигателях Д-52, Д-59, Д-550 на Предприятии специального технологического машиностроения г. Красноярска. Диагностический комплекс для контроля профиля коллекторов в динамических режимах работы внедрен в Сибирском НИИ технологии машиностроения г. Красноярска. Разработанный программный продукт для расчета коммутации электрических машин малой мощности применяется в Пермской научно-производственной приборостроительной компании. Техническая документация о конструкциях демпфированных обмоток якорей и индукторов с анизотропными магнитными свойствами, а также методика и программное обеспечение для оптимизации основных конструктивных параметров электрических машин переданы Российской ассоциации производителей электроинструмента для внедрения на профильных предприятиях России. Предложенная методика оптимизации нажатия на щетки в машинах, работающих в двух основных режимах, позволила достичь максимума ресурса работы щеток при заданном временном соотношении основных режимов работы на предприятии германской фирмы SPARKY ELTOS AG (г. Ловеч, Болгария).

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и получили одобрение на I Всесоюзной конференции по композиционным полимерным материалам и их применению в народном хозяйстве (Ташкент,

1980); на VI Всесоюзной научно-технической конференции “Новые технологические процессы и оборудование для производства электрических машин малой мощности” (Москва, 1983); на Республиканской научно-технической конференции “Коммутация электрических машин” (Харьков, 1984); на научно-технической конференции “Исследование специальных электрических машин и машинно-вентильных систем” (Томск, 1984); на научно-технической конференции “Электромашинные и машинно-вентильные источники импульсной мощности” (Томск, 1987); на научно-технической конференции “Автоматизация электроприводов и оптимизация режимов электропотребления” (Красноярск, 1988); на V Всесоюзной научно-технической конференции “Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов” (Каунас, 1988); на второй Дальневосточной региональной научно-практической конференции “Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышл. предприятий” (Комсомольск-на-Амуре, 1989); на VI Всесоюзной научно-технической конференции по коммутации электрических машин (Бишкек, 1991); на научно-технической (подотраслевой) конференции “Проблемы электромашиностроения” (Ленинград, 1991); на Республиканской научно-технической конференции “Электромеханические преобразователи и машинно-вентильные системы” (Томск, 1991); на IV научно-технической конференции “Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных машин постоянного тока” (Омск, 1993); на Всероссийской научно-технической конференции “Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири” (Иркутск, 1994); на первой Международной конференции по электромеханике и электротехнологии (Суздаль, 1994); на региональной научно-технической конференции “Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири” (Иркутск, 1995); на XV научно-технической конференции “Электронные и электромеханические системы и устройства” (Томск, 1996); на II Международной конференции по электромеханике и электротехнологии (Крым, 1996); на III Международной конференции по электромеханике и электротехнологии (Клязьма, 1998); on the third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology (Novosibirsk, 1999); на Всероссийском электротехническом конгрессе с международным участием “На рубеже веков, итоги и перспективы” (Москва, 1999); на XVI научно-технической конференции “Электронные и электромеханические системы и устройства” (Томск, 2000); на IV международной конференции “Электротехника, электромеханика и электротехнологии” (Клязьма, 2000); on the 5th Korean-Russian International Symposium on Science and Technology (Tomsk, 2001); на научно-технической конференции “Электромеханика и управляемые электромеханические системы” (Екатеринбург, 2000); на международной научно-технической конференции “Электромеханические преобразователи энергии” (Томск, 2001); на научных семинарах кафедр “Электрические машины и аппараты” и “Электропривод и автоматизация промышленных установок” Томского политехнического университета.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 84 печатных работы автора, в том числе 29 авторских свидетельств и 4 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести основных разделов, заключения, выполнена на 251 странице машинописного текста, содержит 118 страниц иллюстраций, 14 страниц таблиц, список используемой литературы из 241 наименования и приложений на 36 страницах. Общий объем диссертации составляет 438 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дана общая характеристика научной проблемы, определены основные цели исследований, представлена научная новизна, практическая ценность, апробация и реализация выполненных исследований, а также приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе выполнены исследования электрических свойств высоконагруженного скользящего контакта (СК) и выработана методика расчета сопротивлений подобного СК в зависимости от физико-механических характеристик используемых контактных материалов, геометрических размеров контактных элементов и условий работы коллекторно-щеточного узла.

Многочисленные экспериментальные исследования и весь опыт эксплуатации электрических машин постоянного тока доказывают, что совокупность свойств контактных материалов влияет на протекание коммутационного процесса как с точки зрения обеспечения безотрывной, устойчивой работы скользящего контакта, так и в плане непосредственного воздействия на распределение тока под набегавшей и сбегавшей частями щетки. В практике электромашиностроения принято оценивать коммутационные свойства электрощеточных материалов по величине переходного падения напряжения в скользящем контакте ($2\Delta U$), а также по величине их удельного электрического сопротивления (ρ). Причем при использовании контактных материалов с повышенным удельным электросопротивлением и в условиях работы с большими плотностями тока под щеткой, а также с высокими линейными скоростями скользящего контакта зависимость коммутающих свойств коллекторно-щеточного узла от ρ становится явно выраженной, поскольку роль сопротивления окисных пленок в контакте существенно снижается, и преобладают сопротивления по телу контактных элементов. Поэтому расчет контактных сопротивлений в современных высоконагруженных электрических машинах малой мощности в первом приближении может быть сведен к расчету сопротивлений по телу контактных элементов.

Для отыскания сопротивлений по телу контактных элементов были построены расчетные модели щетки (рис. 1) и коллекторной пластины (рис. 2), которые условно можно разделить на перекрытые (часть А) и неперекрытые (часть В) контртелом части. В электрическом отношении неперекрытые части контактных элементов однозначно характеризуются схемой замещения на рис. 3.

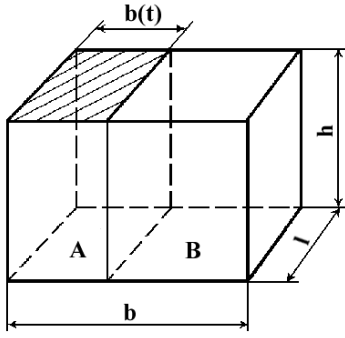


Рис. 1. Модель щетки

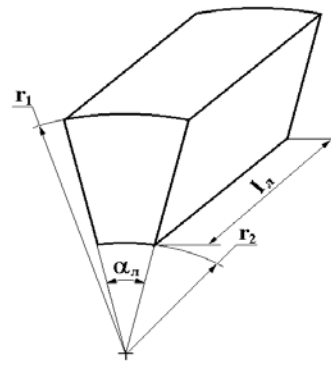


Рис. 2. Модель ламели

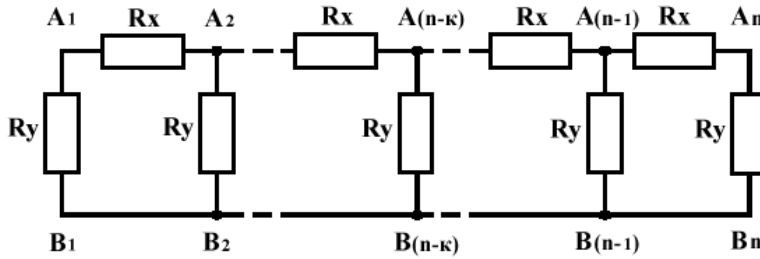


Рис. 3. Схема замещения

На основании представленных расчетных моделей и схемы замещения получены простые аналитические выражения (1), (2) для определения сопротивлений по телу щетки и ламели коллектора в процессе коммутации.

$$R_{\text{щс}} = \frac{R_{\text{Ac}} R_{\text{Bc}}}{R_{\text{Ac}} + R_{\text{Bc}}} \quad (1)$$

где $R_{\text{Ac}} = \frac{K_2 \rho_y h_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}} l_{\text{щ}}} \left(\frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{к}} - t} \right)$; $b_{\text{щ}}$, $l_{\text{щ}}$, $h_{\text{щ}}$ - геометрические размеры щетки;

$$R_{\text{Bc}} = \frac{K_2 (K_1 \rho_x \rho_y)^{0,5}}{l_{\text{щ}}} \text{cth} \left[\frac{b_{\text{щ}}}{h_{\text{щ}}} \left(\frac{K_1 \rho_x}{\rho_y} \right)^{0,5} \left(\frac{t}{T_{\text{к}}} \right) \right] ; \rho_x, \rho_y - \text{удельные}$$

электросопротивления материала в поперечном и продольном направлениях; K_1 - коэффициент, зависящий от анизотропии электрических свойств материала и действительной площади контакта; K_2 - коэффициент, учитывающий эффект стягивания линий тока; $T_{\text{к}}$ - период коммутации.

$$R_{\text{лс}} = \frac{R_{\text{лAc}} R_{\text{лBc}}}{R_{\text{лAc}} + R_{\text{лBc}}} \quad (2)$$

где $R_{\text{лAc}} = \frac{K_2 \rho_r \ln r_2 / r_1}{l_{\text{л}} \alpha_{\text{л}}} \left(\frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{к}} - t} \right)$; r_1 , r_2 , $l_{\text{л}}$, $\alpha_{\text{л}}$ - геометрические разме-

ры ламели; ρ_r , ρ_{φ} - удельные электросопротивления материала в радиальном и тангенциальном направлениях;

$$R_{\text{лBc}} = \frac{K_2 (K_1 \rho_{\varphi} \rho_r)^{0,5}}{l_{\text{л}}} \text{cth} \left[\frac{\alpha_{\text{л}}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \left(\frac{K_1 \rho_{\varphi}}{\rho_r} \right)^{0,5} \left(\frac{t}{T_{\text{к}}} \right) \right] .$$

Коэффициенты K_1 и K_2 определяются экспериментально. Зависимости коэффициента K_2 от основных параметров работы коллекторно-щеточного узла в кодированных значениях (x_1 - давление в контакте, x_2 - температура окружающей среды, x_3 - плотность тока в контакте) для контактных пар ЭГ74-М1 и ЭГ74-углепластик (УГП) описываются уравнениями регрессии (3) и (4).

пара ЭГ74-М1

$$K_2 = 8,1278 - 3,24 \cdot x_1 - 3,4644 \cdot x_2 - 5,22 \cdot x_3 + 1,4778 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2,74 \cdot x_1 \cdot x_3 + 2,8889 \cdot x_2 \cdot x_3 - 1,2978 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 . \quad (3)$$

пара ЭГ74-УГП

$$K_2 = 9,0094 - 1,9184 \cdot x_1 - 2,1809 \cdot x_2 - 4,9542 \cdot x_3 + 1,7896 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2,0039 \cdot x_2 \cdot x_3 . \quad (4)$$

Результаты экспериментального определения зависимостей K_1 от K_2 для щеточного материала ЭГ74 и углепластика представлены выражениями (5), (6).

$$K_1^{0,5} = -3,5502 + 5,8839 \cdot K_2 \quad \text{для ЭГ74.} \quad (5)$$

$$K_1^{0,5} = -11,3042 + 17,6133 \cdot K_2 \quad \text{для УГП.} \quad (6)$$

Таким образом, зная зависимость коэффициента K_2 от параметров работы скользящего контакта, а также его связь с коэффициентами K_1 для применяемых электропроводящих материалов, можно на основании уравнений (1) и (2) рассчитать контактные сопротивления исследуемой контактной пары.

Анализ полученных расчетных выражений для материала ЭГ74 показывает, что при сбегании щетки с контртела сопротивления отдельных частей щетки и ее результирующее сопротивление в значительной степени зависят от удельного электрического сопротивления материала в поперечном направлении и от высоты щетки, которые имеют характер, представленный на рис. 4, 5.

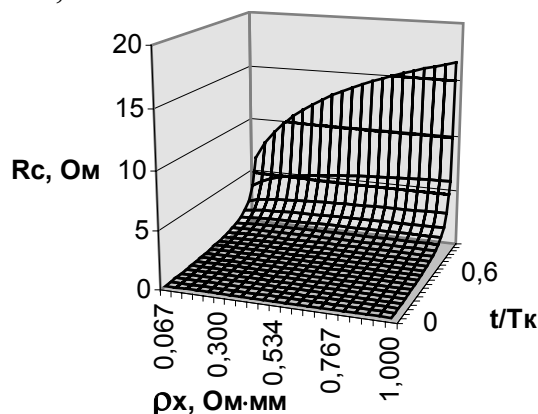


Рис. 4. Сопротивления щетки при вариации ρ_x

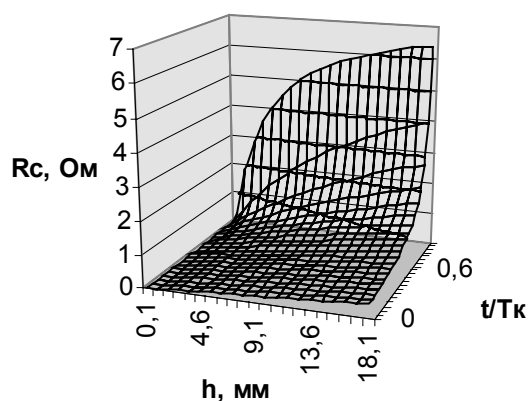


Рис. 5. Сопротивления щетки при вариации h

С целью проверки правомерности использования полученных выражений для расчета контактных сопротивлений в условиях работы скользящего контакта с искрением были проведены экспериментальные исследования на специальной установке. Осциллограмма тока под щеткой и падения напряжения в контакте при искрении в СК до $1\frac{1}{2}$ балла, а также расчетная кривая изменения контактного сопротивления в сбегающем крае щетки для данного режима работы представлены на рис. 6, 7.

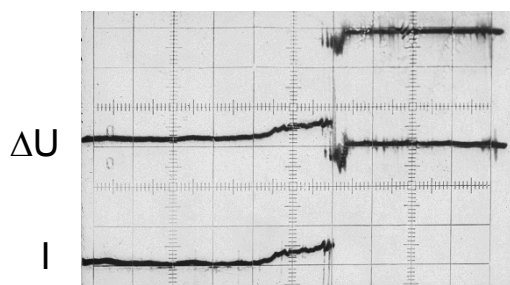


Рис. 6. $\Delta U, I = f(t)$

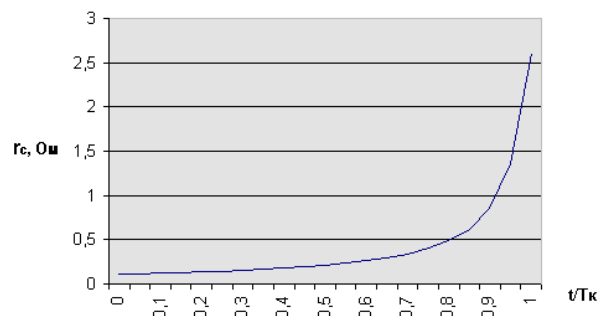


Рис. 7. Расчетная зависимость r_c

Исследования показали, что при повышенных токовых нагрузках СК, приводящих к искрению под щеткой, происходит сокращение активной ширины щетки до зоны непосредственного, устойчивого контакта. При этом величины контактных сопротивлений в течение периода непосредственного контактирования щетки с ламелями коллектора достаточно точно рассчитываются по найденным ранее зависимостям (1) - (6), о чем свидетельствует хорошая сходимость расчетных и экспериментальных значений контактных сопротивлений (погрешность расчетов не более 10 %).

Во втором разделе осуществлен анализ коммутационных процессов в высоконагруженных электрических машинах малой мощности на базе разработанного математического аппарата.

Принимая во внимание, что сумма сопротивлений набегающего и сбегающего краев щетки у СК, работающего с искрением, изменяется незначительно, а коммутирующая ЭДС в машинах с дополнительными полюсами практически постоянна в зоне коммутации, а также используя расчетные выражения для контактных сопротивлений (7), можно уравнение коммутируемого контура записать в виде выражения (8). Данное уравнение имеет аналитическое решение (9). При этом величина тока разрыва в сбегающем крае щетки в конце расчетного периода коммутации рассчитывается по формуле (10).

$$r_n(t) = r_{\max} e^{-\frac{t}{\tau_r}} ; \quad r_c(t) = r_{\max} e^{-\frac{T_k - t}{\tau_r}} ; \quad \tau_r = \frac{t_n}{\ln \frac{r_{\max}}{r_n}} , \quad (7)$$

где $r_{\max}$ – максимальная величина контактных сопротивлений, рассчитываемая по уравнениям (1)-(6) с учетом сокращения активной ширины щетки; r_n – промежуточное значение переходного сопротивления; t_n – текущее время, соответствующее значению r_n ($0 < t_n < T_k$).

$$L_s \frac{di}{dt} + Ai = i_a r_{\max} \left(e^{-\frac{t}{\tau_r}} - e^{-\frac{T_k - t}{\tau_r}} \right) - e_k N + e_k M \left(e^{-\frac{t}{\tau_e}} + e^{-\frac{T_k - t}{\tau_e}} \right), \quad (8)$$

$$\text{где } M = \frac{\frac{A}{r_H(T_k/2) + r_c(T_k/2) + R_s} - 1}{1 + e^{-T_k/\tau_e} - 2e^{-T_k/2\tau_e}}; \quad \tau_e = \frac{\frac{A^2}{r_H(T_k/2) + r_c(T_k/2) + R_s} - A}{(r_{\max}/\tau_r) \left(1 - e^{-T_k/\tau_r} \right)};$$

$N = 1 + M(1 + e^{-T_k/\tau_e})$; $A = R_s + R_k$; R_s – активное сопротивление секции; L_s – индуктивность секции; R_k – суммарное сопротивление скользящего контакта под набегающим и сбегающим краями щетки.

$$i(t) = i'(t) + i''(t) = i'(t) - e_k \gamma_e(t), \quad (9)$$

$$\text{где } i'(t) = \frac{i_a r_{\max}}{A - \frac{L_s}{\tau_r}} \left(e^{-\frac{t}{\tau_r}} - e^{-\frac{A}{L_s} t} \right) + \frac{i_a r_{\max} e^{-\frac{T_k}{\tau_r}}}{A + \frac{L_s}{\tau_r}} \left(e^{-\frac{A}{L_s} t} - e^{-\frac{t}{\tau_r}} \right) + i_a e^{-\frac{A}{L_s} t};$$

$$\gamma_e(t) = \frac{M}{\left(A - \frac{L_s}{\tau_e} \right)} \left(e^{-\frac{A}{L_s} t} - e^{-\frac{t}{\tau_e}} \right) + \frac{M e^{-\frac{T_k}{\tau_e}}}{\left(A + \frac{L_s}{\tau_e} \right)} \left(e^{-\frac{A}{L_s} t} - e^{-\frac{t}{\tau_e}} \right) + \frac{N}{A} \left(1 - e^{-\frac{A}{L_s} t} \right).$$

$$i_p = -i_a - i(T_k) = -i_a - i'(T_k) + e_k \gamma_e(T_k). \quad (10)$$

Исследования, проведенные на искусственном аппарате, также показали, что при возникновении искрения под щеткой наблюдается сокращение ее активной ширины за счет выгорания точек неустойчивого контакта, а опытные и расчетные кривые тока коммутируемой секции при этом удовлетворительно совпадают между собой (рис. 8, 9).

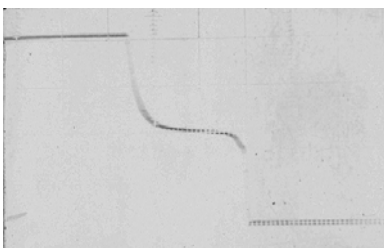


Рис. 8. $i_a = 2,5$ А;
 $L_s = 8,1 \cdot 10^{-5}$ Г.

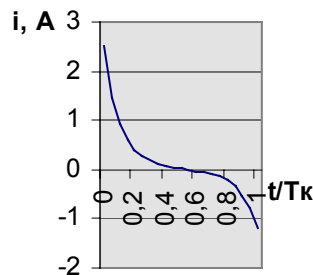


Рис. 9. Расчетная
зависимость

Полученные аналитические выражения тока коммутируемой секции достаточно точно описывают коммутационные процессы и в реальных электрических машинах, о чем свидетельствуют экспериментальные кривые токов коммутируемой секции (последняя секция паза) на

нижней и верхней границах области безыскровой работы и соответствующие расчетные кривые, представленные на рис. 10, 11, 12.

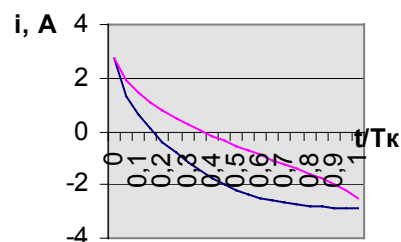
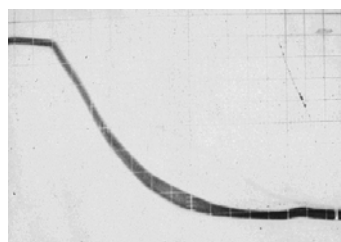
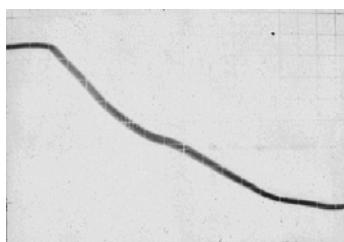


Рис. 10. $i = f(t)$ на нижней границе ОБР

Рис. 11. $i = f(t)$ на верхней границе ОБР

Рис. 12. Расчетные кривые

Выявленные аналитические зависимости составляющих тока коммутации позволяют оценивать влияние параметров коммутируемого контура на указанные компоненты и вырабатывать рекомендации по оптимизации данных параметров. Характерные зависимости проводимости коммутируемого контура в конце периода коммутации $\gamma_e(T_k)$ от основных параметров коммутируемого контура представлены на рис. 13, 14. В данных диаграммах прослеживаются ранее не выявленные коммутационные резонансные явления, проявляющиеся в наличии максимума $\gamma_e(T_k)$ при определенных величинах индуктивности секции.

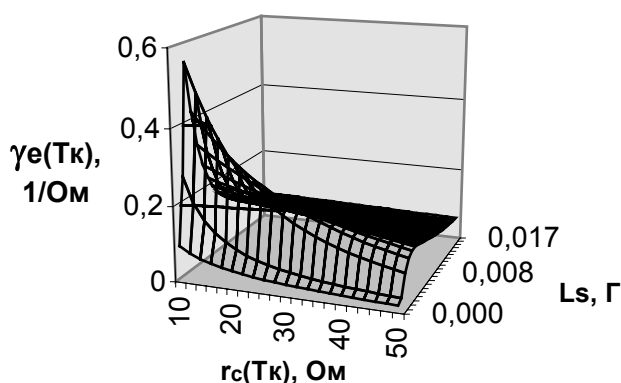


Рис. 13. $\gamma_e(T_k) = f(L_s, r_c(T_k))$

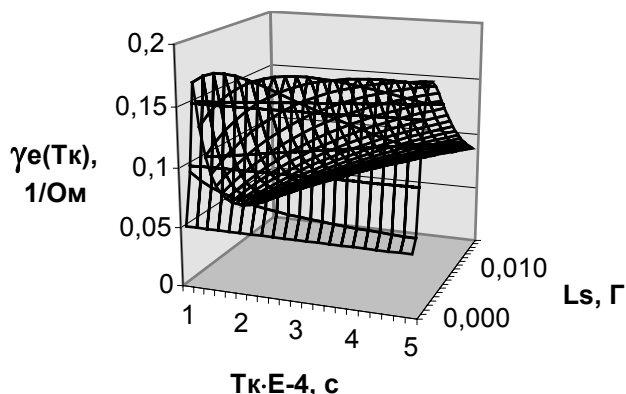


Рис. 14. $\gamma_e(T_k) = f(L_s, T_k)$

Представляют практический интерес и зависимости такого комплексного показателя коммутационной напряженности электрической машины, как ток разрыва, от параметров коммутируемого контура как при положительных, так и при отрицательных значениях коммутирующей ЭДС (рис. 15, 16). Из приведенных диаграмм прослеживается тенденция снижения тока разрыва при увеличении параметров $r_c(T_k)$ и T_k независимо от знака e_k .

Наряду с показателем коммутационной напряженности электрической машины в заданном режиме ее работы, большое значение имеет такой эксплуатационный параметр, как коммутационная устойчивость, оцениваемая по величине области безыскровой работы (ОБР). Полученные аналитические выражения для расчета контактных сопротивлений и тока разрыва коммутируемой секции якоря позволили выработать новый подход к

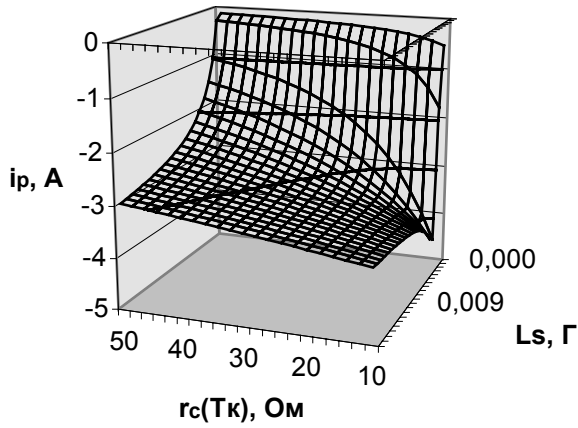


Рис. 15. $i_p = f(L_s, r_c(T_k))$
при $e_k = -5$ В

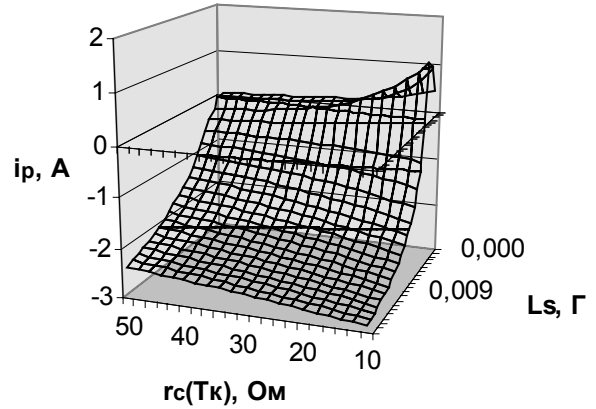


Рис. 16. $i_p = f(L_s, r_c(T_k))$
при $e_k = +5$ В

определению границ ОБР, сочетающий оперирование мгновенными значениями токов и напряжений и получение зависимостей в удобной аналитической форме. При этом коммутирующие ЭДС на верхней и нижней границах ОБР рассчитываются по выражению (11), а односторонняя ширина ОБР (ξ) и отклонение ее средней линии от оси абсцисс (ψ) определяются в соответствии с уравнениями (12).

$$e_k^{\pm} = \frac{(\pm i_{pk} + i_a)/K_m + i'(T_k)}{\gamma_e(T_k)}, \quad (11)$$

где i_{pk} – критическое значение тока разрыва; K_m – коэффициент, учитывающий влияние взаимных магнитных связей.

$$\xi = (I_{\pi}^{+} - I_{\pi}^{-})/2 = \frac{i_{pk}}{K_m \gamma_e(T_k)} \frac{(\theta - 1)}{K_k \theta};$$

$$\Psi = (I_{\pi}^{+} + I_{\pi}^{-})/2 = \left(\frac{i_a}{K_m \gamma_e(T_k)} + \frac{i'(T_k)}{\gamma_e(T_k)} - K_k I_a \right) \frac{(\theta - 1)}{K_k \theta}, \quad (12)$$

где I_a – ток нагрузки; $K_k = 2w_s \pi D_a \cdot n \cdot l_{\partial} w_{aq} (\theta - 1) \frac{\mu_0}{\delta_{\partial} K_{\delta\partial}}$; w_s – число

витков секции; $\theta = \frac{w_{\partial}}{w_{aq}}$; $w_{aq} = \frac{N}{8ap} (1 - \frac{2}{3} \frac{b_{3k}}{\tau})$ – число витков, определяющее

МДС поперечной реакции якоря; w_{∂} – число витков дополнительного полюса; l_{∂} – длина добавочного полюса; δ_{∂} – величина воздушного зазора под добавочным полюсом; $K_{\delta\partial}$ – коэффициент воздушного зазора под добавочным полюсом; n – частота вращения якоря; D_a – диаметр якоря; b_{3k} – ширина зоны коммутации; τ – полюсное деление; N – число проводников обмотки якоря; a – число пар параллельных ветвей; p – число пар полюсов.

Полученные зависимости обеспечивают хорошую точность вычислений, что следует из сравнения экспериментальных ОБР и расчетных кривых подпитки для машин с дополнительными полюсами (рис. 17, 18).

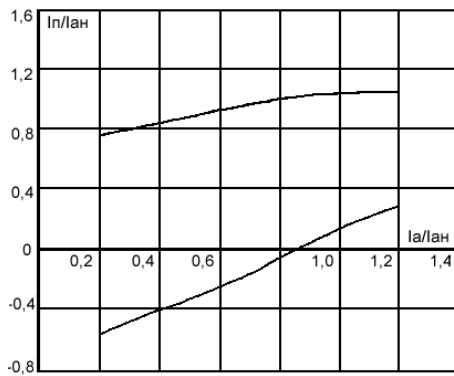


Рис. 17. Опытная ОБР Д-550Ф
для $n = 3000$ об/мин

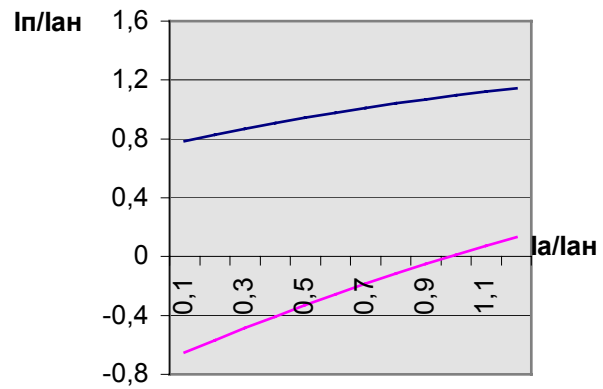


Рис. 18. Расчетная ОБР

Для машин без дополнительных полюсов коммутационная устойчивость может быть определена по предельным величинам угла сдвига щеток с геометрической нейтральной, которые рассчитываются по уравнению (13).

$$\beta_{\pm} = \frac{360a_0}{D_a \pi^2} \left(\arctg \frac{a_0(\pm i_{pk} + i_a)/K_m + a_0 i'(T_k)}{4\mu_0 \gamma_e(T_k) l_{\delta} v_a w_s (F_b - 0,5 A_a \tau)} \right) + \frac{2\delta}{a_0} \text{Arth} \frac{\delta(\pm i_{pk} + i_a)/K_m + \delta i'(T_k)}{2\mu_0 \gamma_e(T_k) l_{\delta} v_a w_s (F_b - 0,5 A_a \tau)}, \quad (13)$$

где a_0 – ширина межполюсного окна по поверхности якоря; δ – воздушный зазор под главным полюсом; l_{δ} , v_a – расчетная длина и окружная скорость якоря; A_a – линейная нагрузка; F_b – МДС обмотки возбуждения.

Полученные выражения для ширины (ξ) и отклонения (ψ) ОБР позволяют осуществлять анализ влияния ряда основных параметров на коммутационную устойчивость электрических машин и вырабатывать рекомендации по ее повышению. Основными факторами, способными существенно повлиять на увеличение ширины ОБР и на уменьшение отклонения ее средней линии, являются величины L_s , $r_c(T_k)$ и τ_r (некоторые

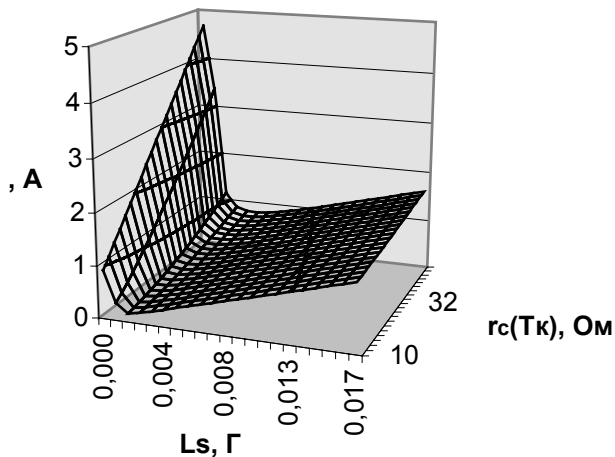


Рис. 19. $\xi = f(L_s, r_c(T_k))$

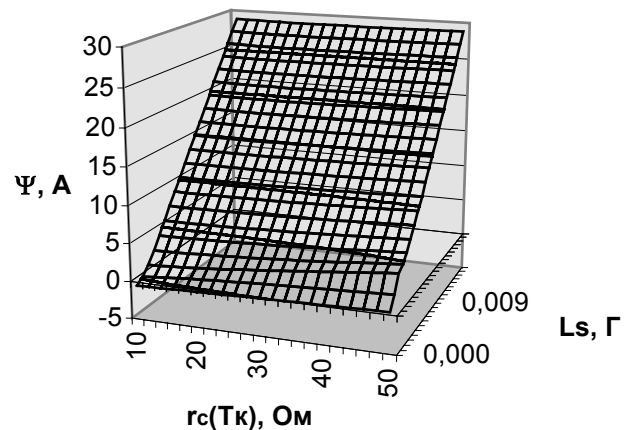


Рис. 20. $\psi = f(L_s, r_c(T_k))$

характерные зависимости приведены на рис. 19, 20). Причем предпочтительным является снижение L_s и увеличение $r_c(T_k)$ и τ_r .

Исходя из предположения, что сопротивление набегающего края щетки в конце периода коммутации является постоянной величиной, можно условие повышения $r_c(T_k)$ записать в виде выражения (14).

$$r_c(T_k) / r_n(T_k) = K_{r1} = \max. \quad (14)$$

Величина указанного отношения в области параметров ρ_x , h , которые в наибольшей степени влияют на $r_c(T_k)$, для пары ЭГ74-М1 представлена на рис.21. Из данной диаграммы следует, что для повышения разности падений напряжений под сбегаящим и набегающим краями щетки в конце периода коммутации необходимо, наряду с увеличением коэффициента анизотропии материала контактного элемента ($\lambda = \rho_x / \rho_y$), рекомендовать и снижение его высоты при одновременном повышении ρ_y .

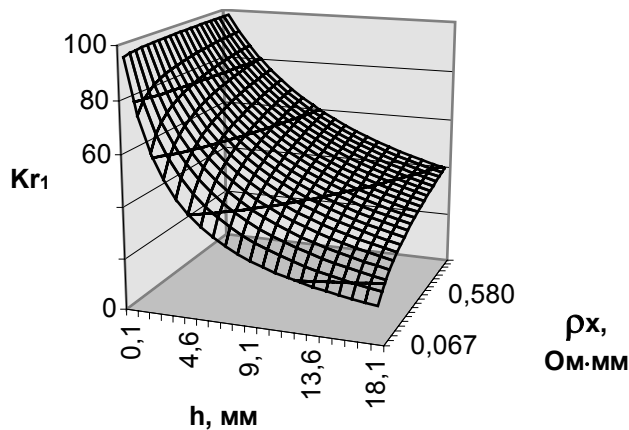


Рис. 21. $K_{r1} = f(\rho_x, h)$

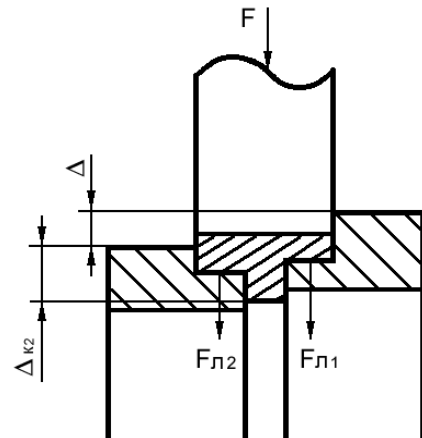


Рис. 22. Модель КЩУ

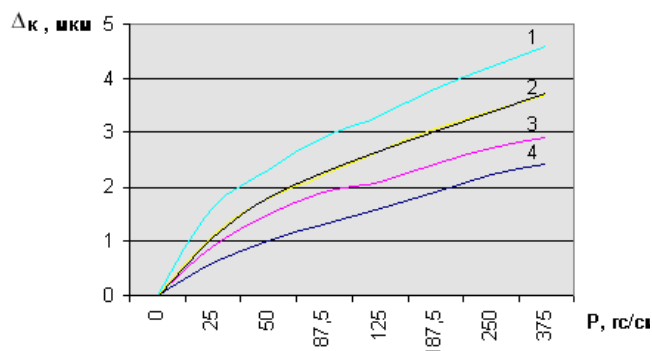
Большое влияние на коммутационную устойчивость электрических машин оказывают биения дорожки скольжения коллектора и перепады между коллекторными пластинами, которые необходимо учитывать при изучении коммутационных процессов. В простейшем случае коллекторно-щеточный узел (КЩУ) можно представить в виде расчетной модели, показанной на рис. 22. Значения сил, действующих при этом со стороны щетки на ламели, находятся из системы уравнений (15).

$$\begin{cases} F_{л1} = (\Delta + \Delta_{к2})^2 \cdot a b_1 t \\ F_{л2} = \Delta_{к2}^2 \cdot a (b_{щ} - b_1 - \delta_{из}) t \\ F_{л1} + F_{л2} = F \end{cases}, \quad (15)$$

где $F_{л1}$, $F_{л2}$ - силы, действующие на ламели 1 и 2; F - нажатие на щетку; Δ - перепад между коллекторными пластинами; $\Delta_{к2}$ - радиальная деформация переходного слоя на участке контактирования со второй ламелью; $b_{щ}$ - ширина щетки; b_1 - ширина участка щетки, перекрывающего первую ламель; t - аксиальная длина щетки; $\delta_{из}$ - толщина межламельной изоляции; $a = C/S_k$;

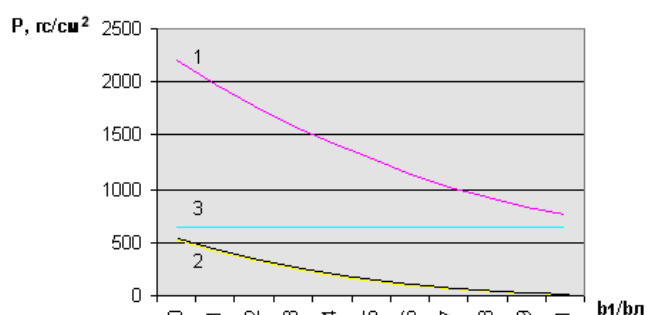
S_k – площадь контактной поверхности; C – постоянный коэффициент, определяемый из экспериментальной кривой нагружения СК.

С целью экспериментального определения зависимости коэффициента жесткости контактного слоя ($K_k = \Delta_k a$) от давления в контакте были разработаны специальная установка и методика измерений. Характерные усредненные зависимости деформаций контактного слоя для различных марок щеток, работающих в паре с медным коллектором, представлены на рис. 23.



1- Г20; 2- ЭГ2А; 3- ЭГ74; 4- МГС5

Рис. 23. Деформации СК щетка-М1



1- P_1 ; 2- P_2 ; 3- $P_{ср}$

Рис. 24. Давления в СК

При этом имеем общее решение системы (15) в виде выражения (16). Давления в переходных слоях между щеткой и выступающей и западающей ламелями находятся из уравнений (17).

$$\Delta_{k2} = \frac{-2b_1 t \Delta + \sqrt{4\Delta^2 b_1^2 t^2 - 4t(b_{щ} - \delta_{из})(\Delta^2 b_1 t - F/a)}}{2t(b_{щ} - \delta_{из})}. \quad (16)$$

$$P_1 = (\Delta + \Delta_{k2})^2 a; \quad P_2 = \Delta_{k2}^2 a. \quad (17)$$

Характер изменения давлений в контакте (для электродвигателя Д-550Ф с медным коллектором и щетками ЭГ74) при набегании щетки на выступающую ламель ($\Delta = 4,5$ мкм) приведен на рис. 24. Неравенство давлений в скользящем контакте влечет различие величин контактных сопротивлений, а также может приводить к сокращению периода коммутации,

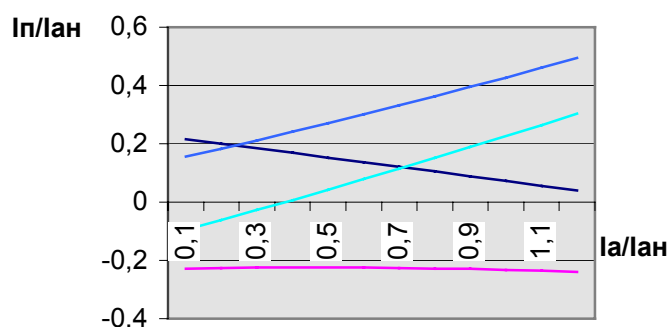


Рис. 25. ОБР секции при механической неустойчивости

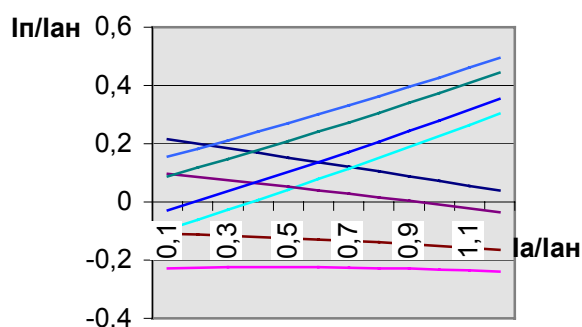


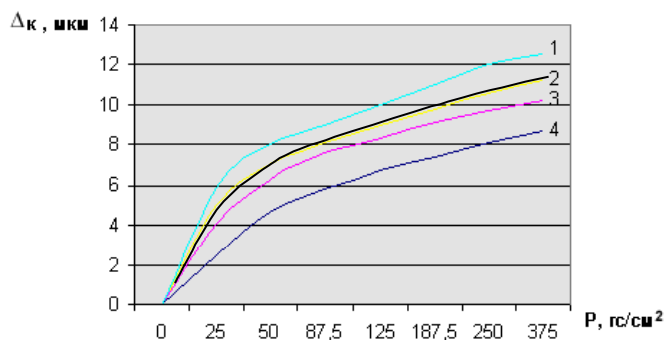
Рис. 26. ОБР секции при механической и электрической неустойчивости

что отражается на коммутационной устойчивости электрической машины. Так, например, ОБР секции электродвигателя Д550, коммутируемой в условиях набегания щетки на выступающую ламель ($\Delta = 4,5$ мкм) и сбегания с неё, имеют различный вид, а результирующая ОБР в этом случае существенно сужается (рис. 25). Нестабильность скользящего контакта электрической природы вызывает дополнительное сужение частных ОБР секций и снижение коммутационной устойчивости электрической машины (рис. 26).

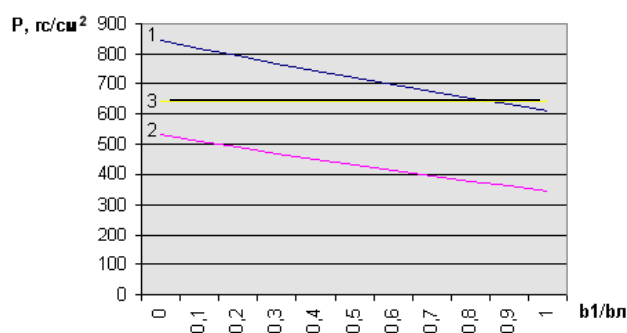
Анализ выражений (16), (17) показывает, что механическая стабильность СК может быть существенно повышена в результате уменьшения биений дорожки скольжения и перепадов между ламелями, а также путем снижения коэффициента жесткости контактного слоя используемой контактной пары

Третий раздел диссертационной работы посвящен созданию контактных материалов и коллекторно-щеточных узлов, отвечающих ранее выработанным требованиям, а также разработке систем бесконтактного контроля механического состояния скользящего контакта.

С целью повышения коммутирующих свойств СК разработаны композиционные материалы на основе углеродных волокон, которые обладают высокой анизотропией электрических свойств, хорошей дугостойкостью и низкой жесткостью контактного слоя. Характерные диаграммы механического нагружения СК пары щетка-углепластик (УГП) приведены на рис. 27, из которых следует, что коэффициент жесткости контактного слоя пары щетка – УГП в 3 – 4 раза ниже, чем у традиционной контактной пары медь – щетка (рис. 23). В результате давления в СК при выступании ламели выравниваются (рис. 28) в сравнении с парой щетка – М1 (рис. 24).



1- Г20; 2- ЭГ2А; 3- ЭГ74; 4- МГС5
Рис. 27. Деформации СК щетка-УГП



1- P_1 ; 2- P_2 ; 3- P_{cp}
Рис. 28. Давления в СК

Углепластики превосходят другие контактные материалы по соотношению прочностных и удельных весовых показателей, что предопределяет высокую стабильность профиля коллекторов из УГП в различных условиях их эксплуатации и усиливает коммутирующие свойства контактной пары щетка-УГП.

С целью повышения коммутирующей способности СК разработан ряд конструкций коллекторов с повышенной прочностью и монолитностью на

базе различных контактных материалов, а также коллекторно-щеточные узлы с повышенной стабильностью СК, ряд которых приведен на рис. 29 - 34.

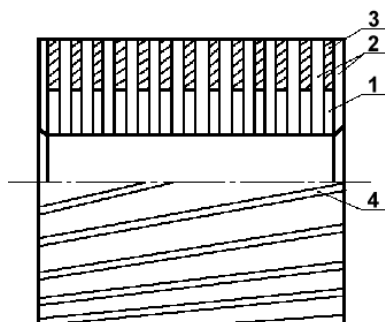


Рис. 29. Коллектор из УГП с высокими коммутационными свойствами

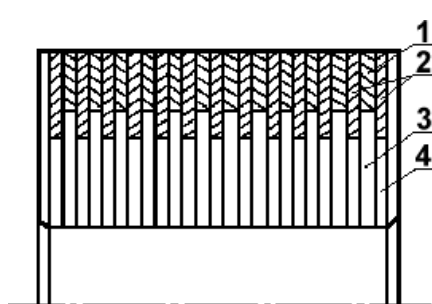


Рис. 30. Коллектор из УГП с высокой прочностью

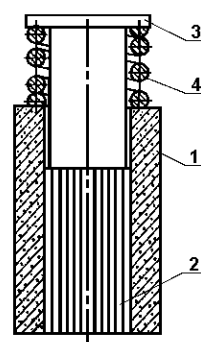


Рис. 31. Щетка с высокой стабильностью СК

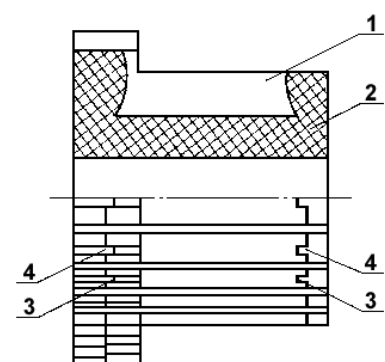


Рис. 32. Коллектор с высокой монолитностью

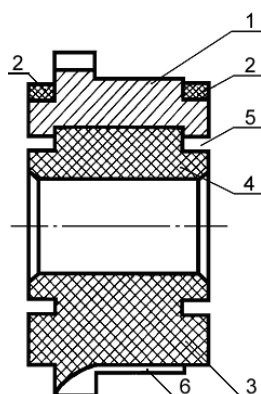


Рис. 33. Коллектор с бандажным креплением

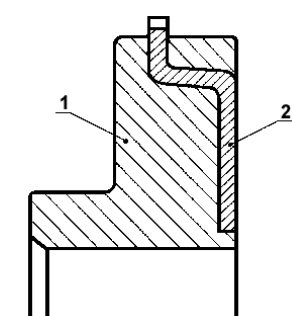
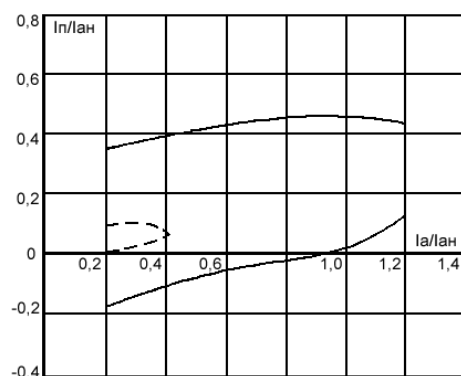


Рис. 34. Коллектор из листового материала

Высокие коммутационные свойства пары щетка-УГП обеспечивают многократное повышение коммутационной устойчивости электрических машин в сравнении с традиционными контактными парами, что подтверждается экспериментальными ОБР электрических машин на рис. 35.



— коллектор из УГП
 ----- медный коллектор

Рис. 35. Опытная ОБР Д-550Ф для $n = 6000$ об/мин

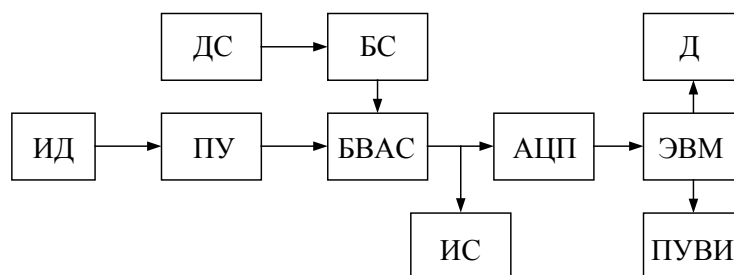


Рис. 36. Структурная схема системы контроля профиля коллекторов

Для решения задач экспериментальных профилометрических исследований коллекторно-щеточного узла при участии автора разработана диагностическая система, структурная схема которой представлена на рис. 36. (ИД – измерительный датчик; ПУ – промежуточный усилитель; БВАС – блок выделения аналогового сигнала; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЭВМ – электронно-вычислительная машина; Д – дисплей; ПУВИ – периферийное устройство выдачи информации; ИС – индикатор стрелочный; ДС – датчик синхронизации; БС – блок синхронизации).

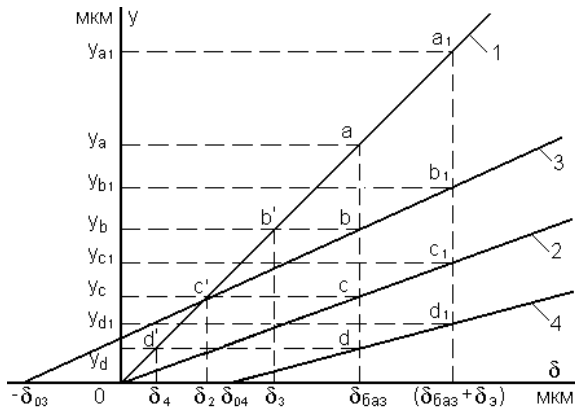


Рис. 37. Выходные характеристики для разных ламелей без коррекции

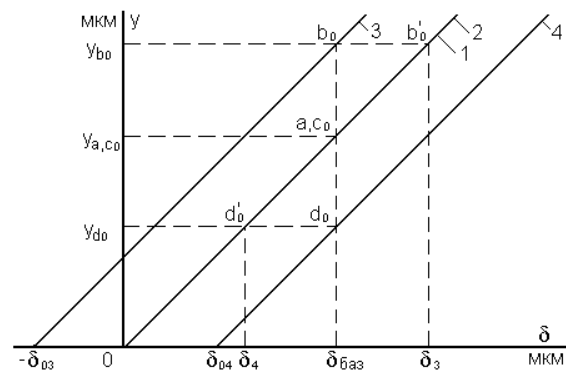


Рис. 38. Выходные характеристики для разных ламелей с коррекцией

Разработанный диагностический комплекс с линейной выходной характеристикой аналоговой части прибора, с обработкой данных в цифровом виде по специальным методикам с использованием предложенного метода поламельной базовой коррекции, сущность которого поясняется рис. 37, 38, обеспечивает получение информации о состоянии профиля коллектора с достаточно высокой степенью точности в статическом и динамическом режимах работы электрической машины или испытательной установки, что особенно важно при отработке конструкций коллекторов и технологий их изготовления.

Четвертый раздел посвящен вопросам оптимизации электромагнитных параметров коммутируемых контуров.

К числу основных факторов, определяющих характер коммутационного процесса, относится степень взаимного демпфирования секций на протяжении времени их коммутации сопротивлением СК, а также в течение времени горения дуги под сбегающим краем щетки. Для упрощения анализа указанных явлений целесообразно нахождение аналитического решения системы (18) дифференциальных уравнений токов одновременно коммутируемых секций, которое при принятых ранее допущениях и для случая, когда $L_1 = L_2 = L$; $R_{s1} = R_{s2} = R_s$, может быть получено на основе предварительного определения суммы токов (19) коммутируемых секций и их разницы (20). Величины токов коммутации секций при этом определяются по уравнениям (21).

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + i_1 [R_{s1} + r_{c1}(t) + r_{h1}(t)] = i_2 r_{h1}(t) - i_a r_{c1}(t) - e_{k1}; \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} + i_2 [R_{s2} + r_{c2}(t) + r_{h2}(t)] = i_a r_{h2}(t) + i_1 r_{c2}(t) - e_{k2}, \end{cases} \quad (18)$$

где R_{s1} , R_{s2} – активные сопротивления секций 1, 2; L_1 , L_2 – индуктивности коммутируемых секций 1, 2; M_{12} – взаимная индуктивность между секциями 1, 2; i_1 , i_2 – токи секций 1, 2; $r_{h1}(t)$, $r_{h2}(t)$ – контактные сопротивления под набегающими краями щетки для секций 1, 2; $r_{c1}(t)$, $r_{c2}(t)$ – контактные сопротивления под сбегающими краями щетки для секций 1, 2; e_{k1} , e_{k2} – коммутирующие ЭДС секций 1, 2.

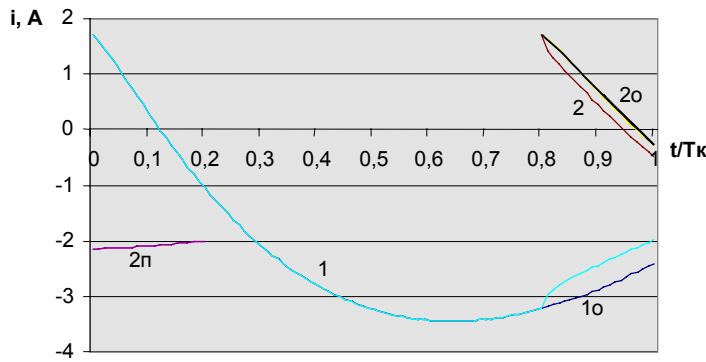
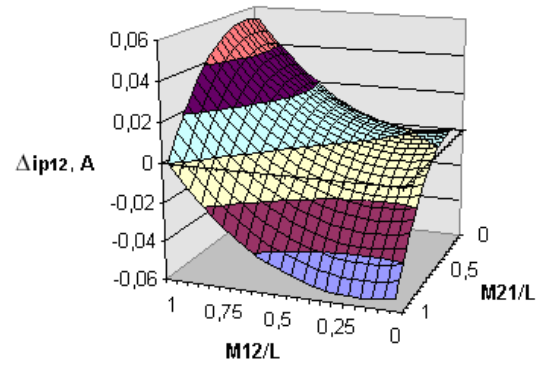
$$\begin{aligned} i_{12}^+ = & [i_a + i_1(t_0)] \cdot e^{\frac{A_{12}^+}{(L+M_{12})}(t_0-t)} + \frac{i_a r_{\max}}{A_{12}^+ - \frac{(L+M_{12})}{\tau_R}} \left[e^{\frac{t_0-t}{\tau_R}} - e^{\frac{A_{12}^+}{(L+M_{12})}(t_0-t)} \right] + \\ & + \frac{i_a r_{\max} e^{-\frac{T_k}{\tau_R}}}{A_{12}^+ + \frac{(L+M_{12})}{\tau_R}} \left[e^{\frac{t_0}{\tau_R}} \cdot e^{\frac{A_{12}^+}{(L+M_{12})}(t_0-t)} - e^{\frac{t}{\tau_R}} \right] + \\ & + \frac{e_{k1} M}{A_{12}^+ - \frac{(L+M_{12})}{\tau_e}} \left[e^{-\frac{t}{\tau_e}} - e^{\frac{t_0}{\tau_e}} \cdot e^{\frac{A_{12}^+}{(L+M_{12})}(t_0-t)} \right] + \\ & + \frac{e_{k1} M e^{-\frac{T_k}{\tau_e}}}{A_{12}^+ + \frac{(L+M_{12})}{\tau_e}} \left[e^{\frac{t}{\tau_e}} - e^{\frac{t_0}{\tau_e}} \cdot e^{\frac{A_{12}^+}{(L+M_{12})}(t_0-t)} \right] + \\ & + \frac{e_{k2} M}{A_{12}^+ - \frac{(L+M_{12})}{\tau_e}} \left[e^{\frac{t_0-t}{\tau_e}} - e^{\frac{A_{12}^+}{(L+M_{12})}(t_0-t)} \right] + \\ & + \frac{e_{k2} M e^{-\frac{T_k}{\tau_e}}}{A_{12}^+ + \frac{(L+M_{12})}{\tau_e}} \left[e^{\frac{t-t_0}{\tau_e}} - e^{\frac{A_{12}^+}{(L+M_{12})}(t_0-t)} \right] + \frac{(e_{k1} + e_{k2}) N}{A_{12}^+} \left[e^{\frac{A_{12}^+}{(L+M_{12})}(t_0-t)} - 1 \right]; \quad (19) \\ i_{12}^- = & [i_1(t_0) - i_a] e^{\frac{A_{12}^-}{L-M_{12}}(t_0-t)} + \frac{i_a r_{\max}}{A_{12}^- + \frac{L-M_{12}}{\tau_R}} \left[e^{\frac{A_{12}^-}{L-M_{12}}(t_0-t)} - e^{\frac{t_0-t}{\tau_R}} \right] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{i_a r_{\max} e^{-\frac{T_K}{\tau_R}}}{A_{12}^- + \frac{L - M_{12}}{\tau_R}} \left[-e^{\frac{t}{\tau_R}} + e^{\frac{t_0}{\tau_R}} \cdot e^{\frac{A_{12}^-}{L - M_{12}}(t_0 - t)} \right] + \\
& + \frac{e_{k1} M}{A_{12}^- - \frac{L - M_{12}}{\tau_e}} \left[e^{-\frac{t}{\tau_e}} + e^{-\frac{t_0}{\tau_e}} \cdot e^{\frac{A_{12}^-}{L - M_{12}}(t_0 - t)} \right] + \\
& + \frac{e_{k1} M e^{-\frac{T_K}{\tau_e}}}{A_{12}^- + \frac{L - M_{12}}{\tau_e}} \left[e^{\frac{t}{\tau_e}} - e^{\frac{t_0}{\tau_e}} \cdot e^{\frac{A_{12}^-}{L - M_{12}}(t_0 - t)} \right] + \\
& + \frac{e_{k2} M}{A_{12}^- - \frac{L - M_{12}}{\tau_e}} \left[e^{\frac{A_{12}^-}{L - M_{12}}(t_0 - t)} - e^{\frac{t_0 - t}{\tau_e}} \right] + \\
& + \frac{e_{k2} M e^{-\frac{T_K}{\tau_e}}}{A_{12}^- + \frac{L - M_{12}}{\tau_e}} \left[e^{\frac{A_{12}^-}{L - M_{12}}(t_0 - t)} - e^{\frac{t - t_0}{\tau_e}} \right] + \frac{(e_{k1} - e_{k2}) N}{A_{12}^-} \left[e^{\frac{A_{12}^-}{L - M_{12}}(t_0 - t)} - 1 \right],
\end{aligned} \tag{20}$$

где $A_{12}^+ = R_s + r_c(T_K)$; $A_{12}^- = R_s + r_c(T_K) + 2r_n(T_K)$; $i_1(t_0)$ – ток i_1 в момент начала коммутации второй секции; t_0 – время начала коммутации второй секции.

$$i_1 = (i_{12}^+ + i_{12}^-)/2 ; i_2 = i_{12}^+ - i_1 . \tag{21}$$

Расчетные кривые на рис. 39 показывают, что наличие взаимной магнитной связи у секции на начальном этапе коммутации практически не сказывается на величине ее тока разрыва в конце периода собственно коммутации (здесь 1, 2, 2_п – кривые токов первой и второй секций рассматриваемого и предыдущего пазов якоря при наличии взаимной магнитной связи между секциями паза; 1_о, 2_о – соответствующие кривые в отсутствие указанной взаимной магнитной связи). В общем случае наличие взаимной магнитной связи ведет либо к замедлению коммутационного процесса первой секции паза, либо к его ускорению в зависимости от величин e_k и параметров коммутируемого контура. Варьируя величины коммутирующих ЭДС в секциях паза можно выравнивать токи разрыва секций или снижать их сумму (по модулю) в зависимости от поставленной задачи. При одинаковых величинах коммутирующих ЭДС равенство токов разрыва секций паза может быть достигнуто при одинаковых взаимных индуктивностях (рис. 40). Причем минимум самих токов разрыва при этом может достигаться при различных величинах взаимных индуктивностей в зависимости от значений коммутирующих ЭДС. В условиях усиления

Рис. 39. $i_{p10} = 0,707 \text{ A}$; $i_{p1} = 0,285 \text{ A}$ Рис. 40. $\Delta i_{p12} = i_{p1} - i_{p2} = f(M_{12}, M_{21})$

перекоммутации и недокоммутации минимум токов разрыва имеет место при максимальных величинах взаимных индуктивностей. При неодинаковых величинах коммутирующих ЭДС в секциях паза оптимальные соотношения между взаимными индуктивностями могут быть самыми различными.

Еще большее влияние на коммутационный процесс оказывают явления демпфирования на завершающей стадии коммутации, поскольку они связаны с дугообразованием под щетками и скоротечны, что многократно усиливает обмен энергией между секциями якоря. Система дифференциальных уравнений для данного этапа коммутации записывается в виде (22). Приняв допущения о постоянстве ряда составляющих уравнений в течение времени горения дуги, можно получить аналитическое выражение для тока дуги (23). При этом энергия искрового разряда и время горения дуги определяются по уравнениям (24), (25), а коэффициент демпфирования, определяющий долю электрической энергии коммутируемой секции, выделяемой в СК – по выражению (26).

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + i_1 [R_{s1} + r_{n1}(t)] = i_2 r_{n1}(t) \mu U_d - e_{k1}; \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} + i_2 [R_{s2} + r_{n1}(t) + r_{n2}(t)] = i_a r_{n2}(t) + i_1 r_{n1}(t) - e_{k2}, \end{cases} \quad (22)$$

где $M_{12} = k_1 \cdot L_1 = k_2 \cdot L_2$; U_d – напряжение горения дуги под сбегающим краем щетки на завершающей стадии коммутации секции 1 (знак зависит от направления тока в сбегающем крае щетки).

$$i_{d1} = D/C - (i_a + i_{p1} + D/C) \cdot e^{-\frac{CL_2}{(L_1 L_2 - M_{12}^2)} \cdot t}, \quad (23)$$

где i_{p1} – ток разрыва секции 1 по окончании расчетного периода коммутации; $D = i_{2(0)} [k_2 R_{s2} + k_2 r_{n2(0)} + r_{n1(0)} (1 + k_2)] - k_2 i_a r_{n2(0)} \mu U_d - e_{k1} + k_2 e_{k2}$;

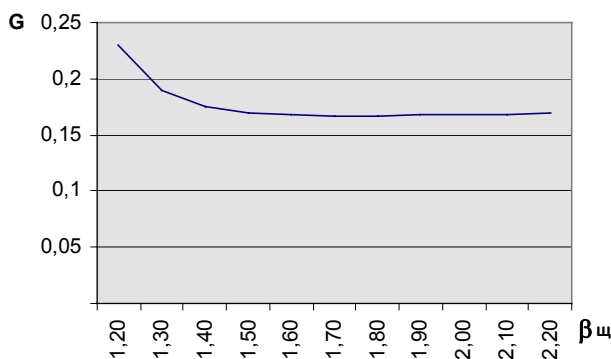
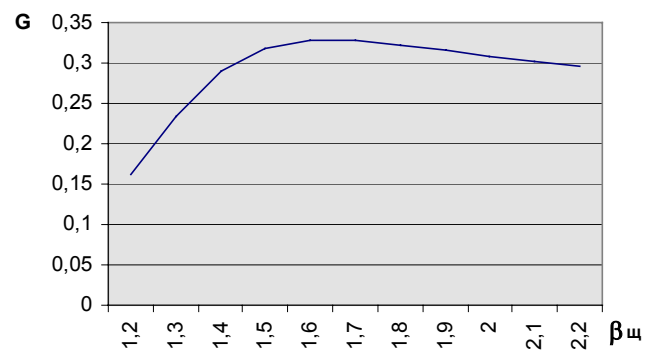
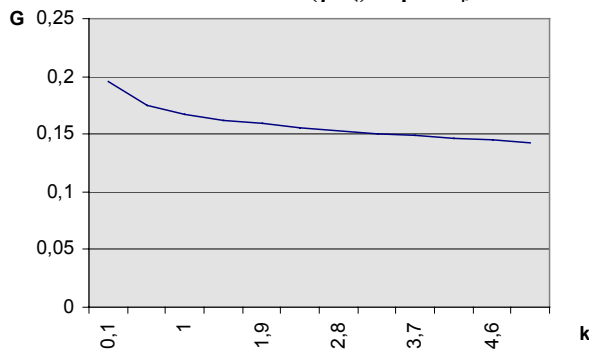
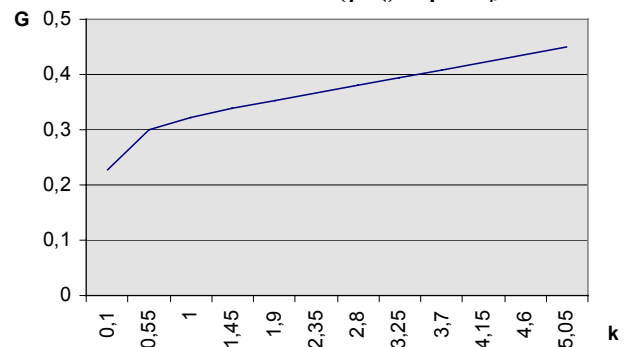
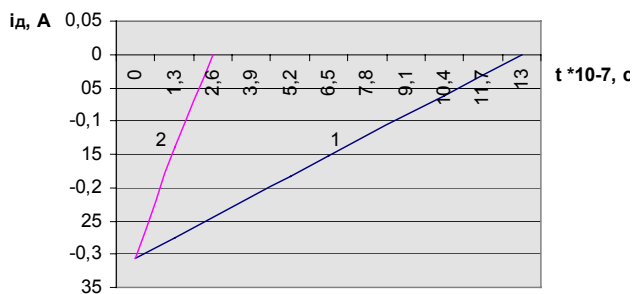
$C = R_{s1} + r_{n1(0)} (1 + k_2)$; $r_{n1(0)}$, $r_{n2(0)}$ – сопротивления под набегающим краем щетки для секций 1, 2 в начале искрового разряда; $i_{2(0)}$ – ток секции 2 в момент начала искрового разряда. (24)

$$W_{d2} = \mu U_d (i_a + i_{p1} + D/C) \cdot \frac{(L_1 L_2 - M_{12}^2)}{CL_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{CL_2}{(L_1 L_2 - M_{12}^2)} \cdot t} \right) \pm U_d (i_a + D/C) \cdot t.$$

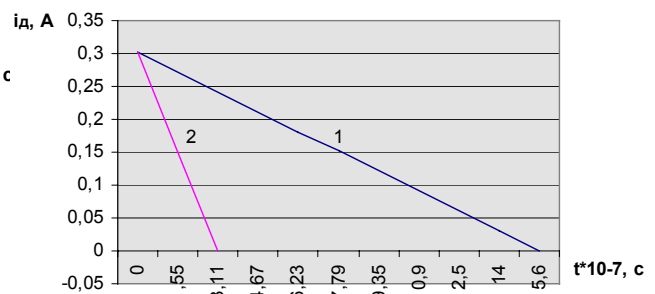
$$t_d = \frac{(M_{12}^2 - L_1 L_2)}{CL_2} \cdot \ln \left(\frac{i_a + D/C}{i_a + i_{p1} + D/C} \right). \quad (25)$$

$$G = \mu U_d (i_a + i_{p1} + D/C) \cdot \frac{2(L_1 L_2 - M_{12}^2)}{CL_1 L_2 i_{p1}^2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{CL_2}{(L_1 L_2 - M_{12}^2)} t_d} \right) \pm U_d (i_a + D/C) \cdot \frac{2t_d}{L_1 i_{p1}^2}. \quad (26)$$

Характер воздействия ряда параметров на протекание завершающей стадии процесса коммутации на нижней и верхней границах ОБР отражен на рис. 41 - 44. Общим явлением при работе электрической машины на верхней и нижней границах ОБР является снижение энергии искрового разряда при увеличении взаимной магнитной связи между коммутируемыми секциями (рис. 45, 46).

Рис. 41. $G = f(\beta_{ш})$ при $I_p < 0$ Рис. 42. $G = f(\beta_{ш})$ при $I_p > 0$ Рис. 43. $G = f(k = L_1/L_2)$ при $I_p < 0$ Рис. 44. $G = f(k = L_1/L_2)$ при $I_p > 0$ 

1 - $k_1 k_2 = 0$; 2 - $k_1 k_2 = 0,8$
Рис. 45. $I_d = f(t)$ при $I_p < 0$



1 - $k_1 k_2 = 0$; 2 - $k_1 k_2 = 0,8$
Рис. 46. $I_d = f(t)$ при $I_p > 0$

Таким образом, комплекс проведенных исследований показал, что необходимо создавать конструкции обмоток якорей, обладающих минимальными величинами индуктивностей секций, максимальными величинами взаимных магнитных связей, и в которых обеспечиваются оптимальные соотношения коммутирующих ЭДС в секциях и взаимных магнитных связей между секциями. Указанным требованиям удовлетворяют разработанные конструкции демпфированных обмоток, схемы которых представлены на рис. 47, 48. Сущность данных конструкций состоит в разбиении секций с одинаковым шагом по якорю на отдельные катушки и смещению их по пазам якоря относительно друг друга по определенному алгоритму.

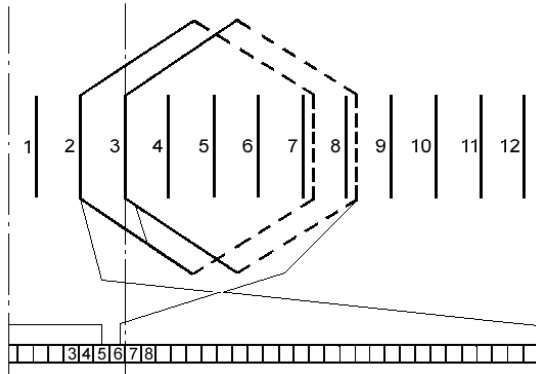


Рис. 47. Первая секция паза 3

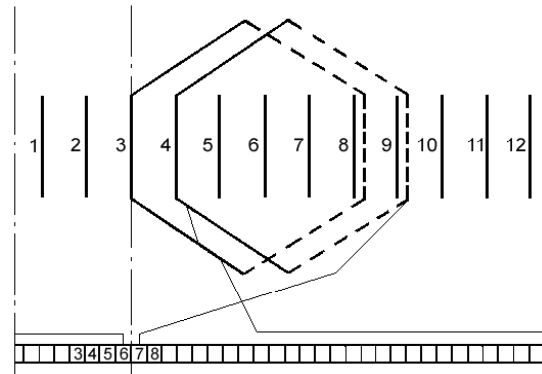


Рис. 48. Вторая секция паза 3

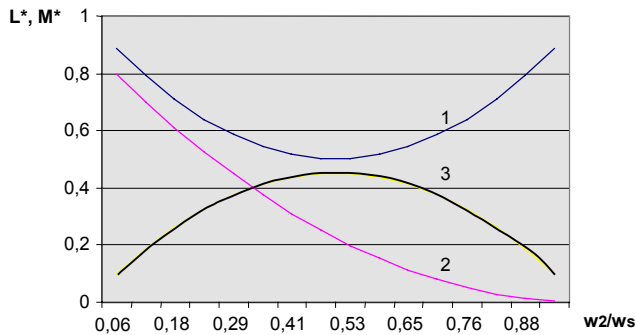
Демпфированные обмотки якоря коллекторных электрических машин малой мощности могут иметь несколько сотен вариантов их выполнения, что обусловлено различными возможными соотношениями таких параметров, как число катушек в секциях, их взаимное пространственное расположение в пазах якоря, а также распределение витков секций по составляющим их катушкам. Поэтому целесообразно на стадии проектирования осуществлять предварительную оценку коммутирующих свойств различных типов конструкций демпфированных обмоток якоря и определять область наиболее вероятных оптимальных значений параметров обмотки, что может быть выполнено с помощью ранее полученных выражений (18) - (26).

Величины индуктивностей и взаимных индуктивностей между соседними в порядке коммутации контурами для обмотки на рис. 47, 48 определяются выражениями (27). Диаграммы изменения указанных параметров от соотношения витков в катушках рассматриваемых конструкций обмоток представлены на рис. 49.

$$L_s = L_{s,\delta}(w_s^2 - 2w_s w_2 + 2w_2^2); \quad M_{12} = k_{M12} L_{s,\delta}(w_s - w_2)^2 / w_s^2; \\ M_{21} = 2k_{M21} L_{s,\delta}(w_s - w_2) \cdot w_2 / w_s^2, \quad (27)$$

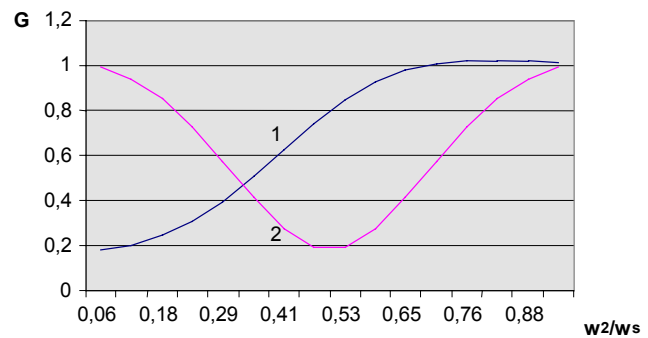
где w_2 - число витков в дополнительной катушке (катушки в пазах 2,7 и 4,9 на рис. 47, 48); $L_{s,\delta}$ - индуктивность однокатушечной секции; M_{21} - взаимная индуктивность между второй секцией рассматриваемого паза и первой секцией следующего (в порядке коммутации) паза; k_{M12} , k_{M21} -

коэффициенты магнитной связи между катушками различных секций, лежащими в одних пазах (в расчетах принято $k_{M12} = k_{M21} = 0,9$).



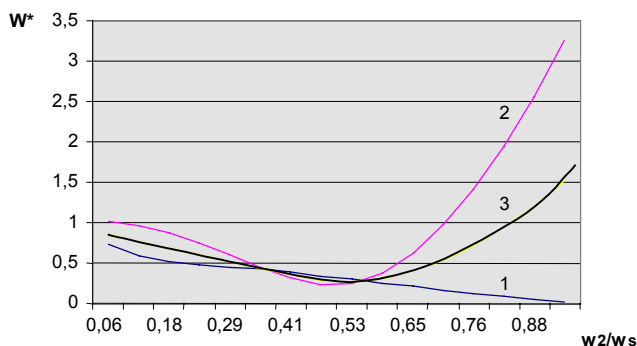
1 – L_s/L_b ; 2 – M_{12}/L_b ; 3 – M_{21}/L_b

Рис. 49. Параметры обмотки



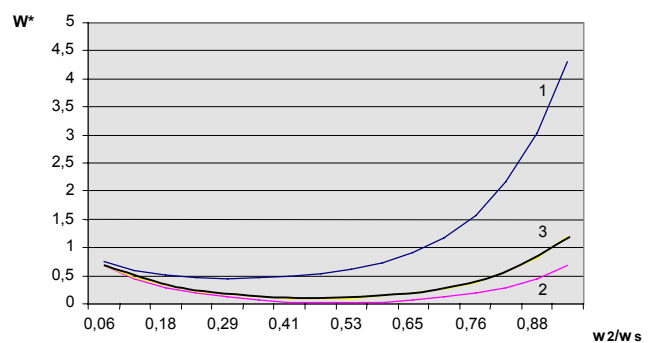
1 – G_1 ; 2 – G_2

Рис. 50. Демпфирующие свойства



1 – W_1/W_{1b} ; 2 – W_2/W_{2b} ; 3 – W/W_b

Рис. 51. Энергии искрения при перекоммутации



1 – W_1/W_{1b} ; 2 – W_2/W_{2b} ; 3 – W/W_b

Рис. 52. Энергии искрения при недокоммутации

Характерное поведение коэффициента демпфирования при варьировании чисел витков в катушках секции рассматриваемой демпфированной обмотки показано на рис. 50, а изменение энергий отдельных секций паза якоря и суммарной энергии паза якоря в режимах перекоммутации и недокоммутации представлены на рис. 51, 52. Из представленных зависимостей следует, что демпфированные обмотки обеспечивают как выравнивание энергий искрения между секциями, так и снижение суммарной энергии искрения до 10 и более раз благодаря уменьшению индуктивности секции, повышению ее демпфирующих свойств и достижению оптимального соотношения коммутирующих ЭДС в секциях паза.

Экспериментальные исследования на специальной установке подтвердили высокие коммутирующие свойства демпфированных обмоток. Суммарная энергия искрения в экспериментальной машине более чем в 3 раза ниже по сравнению с базовой. Коммутационная устойчивость электрических машин с демпфированными обмотками якоря возрастает в 2-3 раза в сравнении с базовыми изделиями.

В пятом разделе работы исследуются особенности процессов коммутации в электрических машинах без дополнительных полюсов.

Многообразие возможных вариантов выполнения демпфированных обмоток якоря и целесообразность их применения в машинах без дополнительных полюсов потребовали создания математической модели коллекторной электрической машины с произвольной конструкцией обмотки якоря, учитывающей влияние поля основных полюсов на коммутацию, возможную анизотропию магнитных свойств индуктора, а также механическую и электрическую нестабильность скользящего контакта. На базе разработанной универсальной расчетной модели коллекторной электрической машины малой мощности создан программный продукт в среде Visual C++ для исследования коммутационных процессов с использованием ЭВМ. Достоинством разработанной программы является удобство пользования данным программным продуктом, что достигается благодаря хорошо организованному интерфейсу программы, отдельные элементы которого приведены на рис. 53 - 55.

Редактирование данных

Время коммутации (с) 0.0002678
 Перекрытие 1.4266209
 Полож. 1 ламели отн. пол. напр. Г.Н. (град) 0.3026673
 Размер ламели (мм) 2.3273690
 Число ламелей 20
 Разм. изоляции по дуге (мм) 0.5000643
 Разм. изоляции (мм) 0.5
 Диаметр статора (мм) 32
 Число заполнения паза Uп 2
 ЭДС дополнит. полюсов Едп1 0
 ЭДС дополнит. полюсов Едп2 0

Н секции | Параметры секции
 1 | Параметры секции заданы
 2 | Параметры секции заданы
 3 | Параметры секции заданы
 4 | Параметры секции заданы
 5 | Параметры секции заданы
 6 | Параметры секции заданы
 7 | Параметры секции заданы

Номинальный ток якоря = $2 \cdot I_a$ 220
 Номинальное напряжение (В) 220
 Сопротивление якорной цепи (Ом) 6
 Шаг 0.2

Паза
 Положение 1 паза относит. 1 ламели (град) 36
 Число пазов 10
 Начальное положение 1 паза отн. пол. напр. Г.Н. (град) 5.9574240

Коллектор
 Диаметр коллектора (мм) 18
 Скорость вращения (об.мин) 14000

Щётки
 Угол сдвига от положит. напр. Г.Н. (град) 0
 Размер по прямой (мм) 4
 Размер по дуге (мм) 4.0336756

Якорь
 Диаметр якоря (мм) 31
 Ширина окна (град) 60
 Длина якоря (мм) 27
 Число акт. проводников 3000
 Ток параллельной ветви (А) 0.35

Эк = const ☐
 Значение постоянной Эк 0

Количество шагов расчёта
 За собственно коммутацию 3000
 За время искрового разряда 1000

Число периодов коммутации 3
 Номер секции 2

Козф. для расчёта взаим. индуктивностей
 K1 0.8
 K2 0.2
 K3 0.8

Напряжение искрового разряда 10
 Прибл. значение тока разрыва 0

Ввод коэффициентов магнитосвязности | Данные по расчёту коммутационной устойчивости
 Редактирование данных по расчёту поля машины | Button1

OK Cancel

Рис. 53. Меню редактирования исходных данных для расчета

Описание секции № 1

Добавить катушку | Убрать катушку

N катушки	Описание катушки
1	Витков 50, пазы 1, 5
2	Витков 25, пазы 10, 4

OK Cancel

Рис. 54. Меню ввода числа катушек секции

Описание катушки

Число витков 50
 Номер первого паза 1
 Номер второго паза 5

OK Cancel

Рис. 55. Меню ввода параметров катушки

Разработанная программа позволяет производить анализ особенностей коммутационных процессов в машинах без дополнительных полюсов, у которых величина коммутирующей ЭДС существенно изменяется в процессе коммутации. На рис. 56, 57 приведены расчетные кривые токов коммутации первой (1) и второй (2) секций паза и соответствующих коммутирующих ЭДС серийной машины без дополнительных полюсов в реверсивном режиме работы. Аналогичные характеристики для демпфированной обмотки якоря по рис. 47, 48 представлены на рис. 58, 59. Из приведенных зависимостей следует, что применение рассмотренного варианта демпфированной обмотки позволяет снизить суммарную энергию искрения секций паза якоря и максимальную энергию искрения отдельных секций паза на порядок и более.

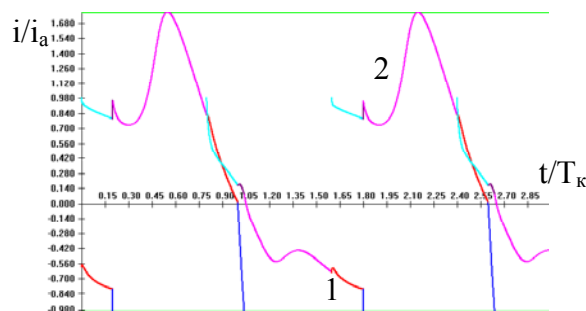


Рис. 56. $i/i_a = f(t/T_k)$ для серийной обмотки

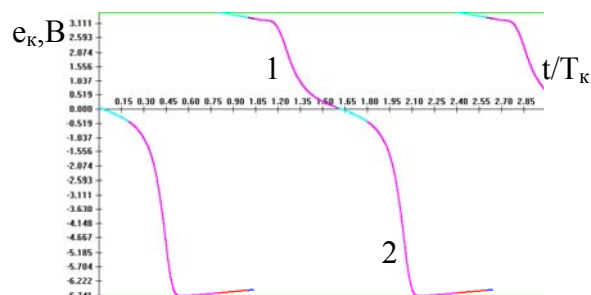


Рис. 57. $e_k = f(t/T_k)$ для серийной обмотки

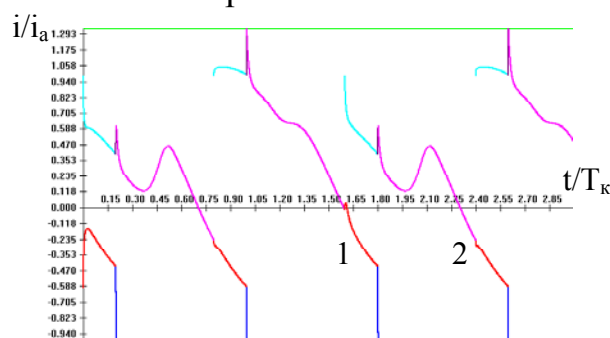


Рис. 58. $i/i_a = f(t/T_k)$ для демпфированной обмотки

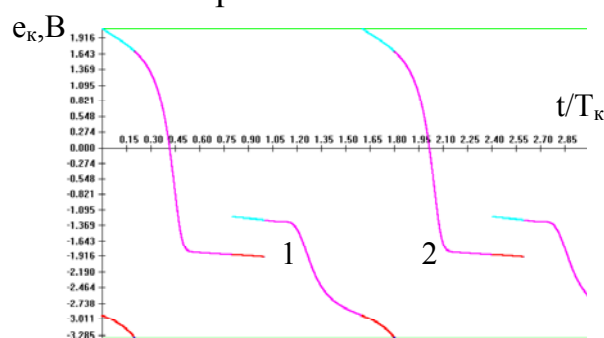


Рис. 59. $e_k = f(t/T_k)$ для демпфированной обмотки

Проведенные исследования показали, что распределение магнитного поля в воздушном зазоре электрических машин без дополнительных полюсов влияет как на величину тока разрыва в каждой отдельно взятой секции, так и на величину разброса между указанными токами секций паза якоря. Для уменьшения данных показателей целесообразно снижение поперечной реакции якоря. С этой целью разработан ряд конструкций индукторов, обладающих анизотропией магнитных свойств в области основных полюсов, варианты которых изображены на рис. 60, 61.

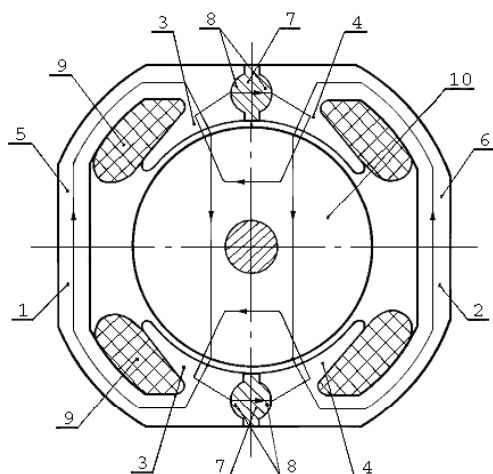


Рис. 60. Индуктор с немагнитным зазором

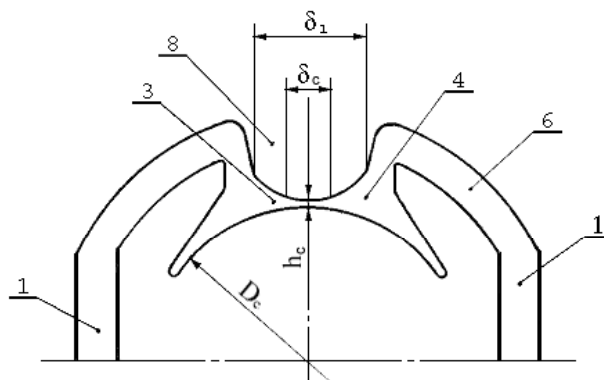


Рис. 61. Индуктор с сужением магнитопровода

Конструкция индуктора на рис. 60 представляет собой магнитопровод, выполненный из двух отдельных частей 1,2, зафиксированных друг относи-

тельно друга промежуточным немагнитным элементом 8. Наиболее простым с технологической точки зрения решением по снижению поперечного магнитного потока является конструкция индуктора, представленная на рис. 61. Данная конструкция не требует существенного изменения технологии изготовления индуктора и каких-либо дополнительных конструктивных элементов. Минимальная высота сечения полюса может быть выполнена на уровне 0,4-0,5 мм при скругленном пазе (магнитопроводе) в средней части полюса, либо на уровне 0,4-0,75 мм при прямоугольном пазе (магнитопроводе) в средней части полюса при толщине листа электротехнической стали 0,5 мм, что обеспечивает достаточное снижение поперечного магнитного потока. Величина нормального продольного сечения в средней части основного полюса конструкции индуктора по рис. 61 может быть определена по выражению (28) с использованием специально разработанной расчетной программы.

$$S_c = \frac{A \cdot b^2 \cdot l_{\text{и}} \cdot h \cdot c_i \cdot \delta_c \cdot \mu_o \cdot (\delta_1 - \delta_2)}{\delta_2 \cdot b^2 \cdot A \cdot (\delta_1 - c_i \cdot \delta_c \cdot \mu_o) - N_i \cdot \delta_c \cdot \delta_1 \cdot (8 \cdot \delta \cdot h + 2 \cdot \delta_2 \cdot b)}, \quad (28)$$

где A – линейная токовая нагрузка якоря; b – ширина полюсной дуги вдоль расточки индуктора; $l_{\text{и}}$ – длина пакета индуктора; h – геометрическая высота полюса в средней его части; δ_c – длина сужения; δ_1 – средняя длина воздушного зазора в средней части полюса; $\delta_2 = \delta_{\text{экв.}} - 2\delta$; $\delta_{\text{экв.}}$ – величина эквивалентного зазора для поперечного магнитного потока; δ – зазор между полюсом и якорем; c_i – постоянный коэффициент для кривой намагничивания стали индуктора при индукции B_i ; N_i – постоянная для кривой намагничивания стали индуктора при индукции B_i .

В результате увеличения магнитной индукции под сбегаящими краями полюсов у анизотропной конструкции индуктора суммарная энергия искрения секций паза якоря снижается в 1,5 – 2 раза как в базовом электродвигателе, так и у машин с демпфированной обмоткой якоря, как это следует из расчетных кривых на рис. 62, 63.

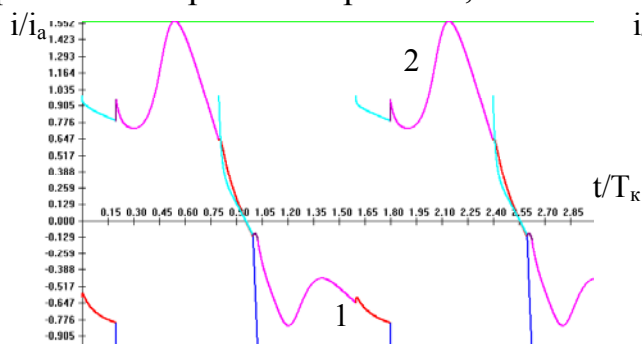


Рис. 62. $i/i_a = f(t/T_k)$ для серийной обмотки и анизотропного индуктора

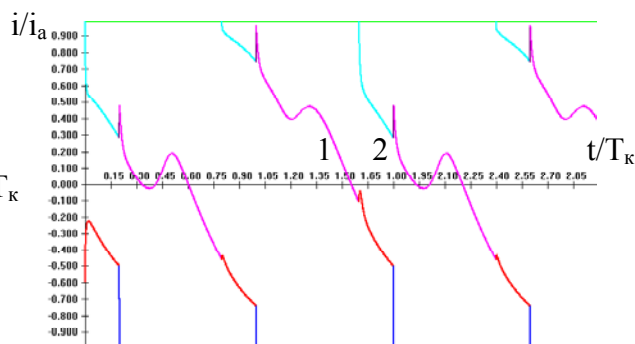


Рис. 63. $i/i_a = f(t/T_k)$ для демпфированной обмотки и анизотр. индукт.

Оптимизация обмоточных данных демпфированных обмоток позволяет дополнительно выровнять энергии искрения секций паза якоря и снизить величины максимальных энергий и суммарной энергии секций паза якоря как при использовании серийного, так и анизотропного индукторов, что следует

из кривых токов коммутации в реверсивном режиме работы электрической машины на рис. 64, 65.

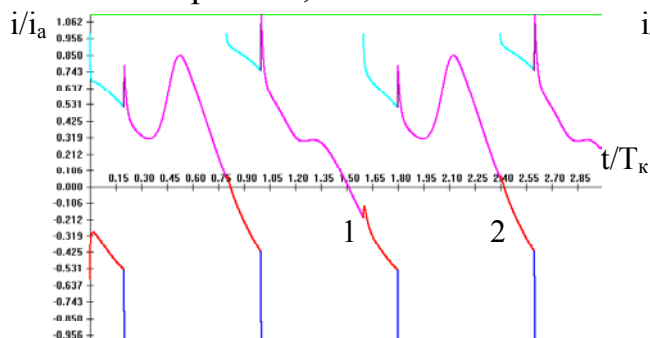


Рис. 64. $i/i_a = f(t/T_K)$ для серийного индуктора

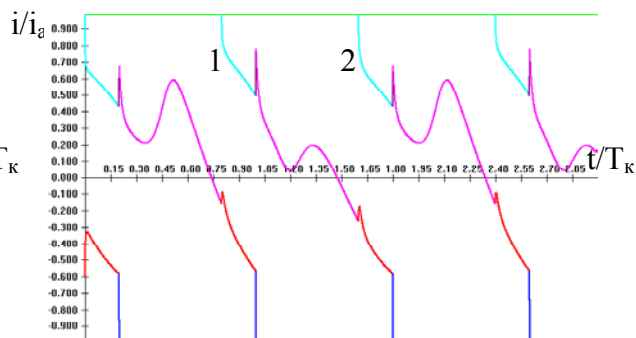


Рис. 65. $i/i_a = f(t/T_K)$ для анизотропного индуктора

Благодаря применению демпфированных обмоток якоря в реверсивном режиме обеспечивается снижение суммарной энергии искрения секций паза якоря в 14 – 17 раз и максимальной энергии искрения секций - в 20 – 30 раз. В нереверсивном режиме работы электрической машины указанные выше параметры уменьшаются в 6 – 11 раз относительно базового уровня. При этом возможно уменьшение сдвига щеток с нейтрали с одновременным снижением энергий искрения и увеличением результирующего магнитного потока на 20 %, что может быть использовано для повышения ряда основных эксплуатационных показателей данного класса электрических машин. Совместное использование демпфированных обмоток и анизотропных индукторов позволяет уменьшать суммарную энергию искрения секций паза якоря более чем в 30 раз, а максимальную энергию искрения секций снижать в 50 раз в сравнении с базовым уровнем.

С целью повышения объективности оценки качества протекания коммутационных процессов на стадии проектирования электрических машин предложена методика определения видимого искрения в скользящем контакте, основанная на комплексе проведенных теоретических и экспериментальных исследований. В качестве критерия выгорания проводящих мостиков могут служить как удельная мощность потерь в контакте, так и величина падения напряжения, зависящие от протекающего

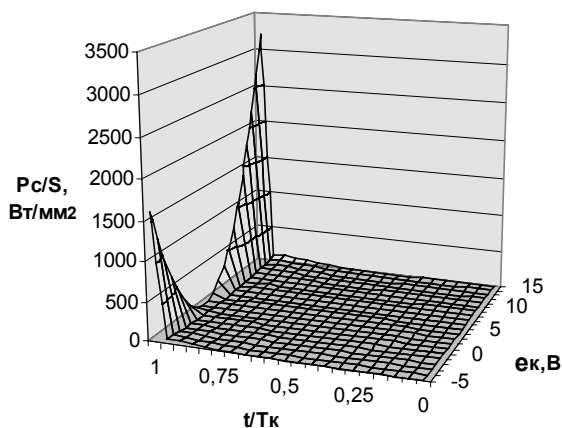


Рис. 66. $P_c/S = f(e_K, t/T_K)$

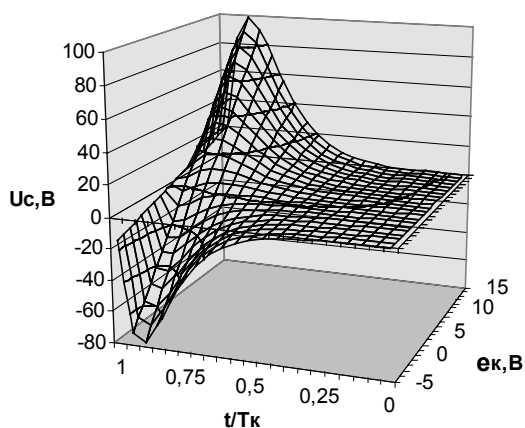


Рис. 67. $U_c = f(e_K, t/T_K)$

тока. Характер изменения указанных параметров в процессе коммутации при различных величинах коммутирующих ЭДС приведен на рис.66, 67.

Наиболее доступным параметром для экспериментальных исследований является падение напряжения в сбегающем крае щетки, предельное значение которого для пары медь-графит составляет около 2,0 – 3,0 В, тогда как у пары графит-графит оно равно 3,0 – 4,0 В.

Кроме того, моменту потери электрического контакта щетки с ламелью должно соответствовать критическое значение тока в сбегающем крае щетки, приводящее к видимому искрению. Исследования показали, что основным факторам, влияющим на величину критического тока разрыва, является индуктивность секции. Соответствующие зависимости критических токов разрыва описаны уравнениями регрессии (29) - (31).

$$i_{p.k.} = 0,206 - 5,103 \cdot L_s \quad \text{для пары графит-графит.} \quad (29)$$

$$i_{p.k.} = 0,311 - 61,674 \cdot L_s \quad \text{для пары М1-графит, катодная щетка.} \quad (30)$$

$$i_{p.k.} = 0,374 - 34,146 \cdot L_s \quad \text{для пары М1-графит, анодная щетка.} \quad (31)$$

Характерные расчетные кривые тока и падения напряжения в сбегающем крае щетки (на нижней границе ОБР) представлены на рис. 68, 69.

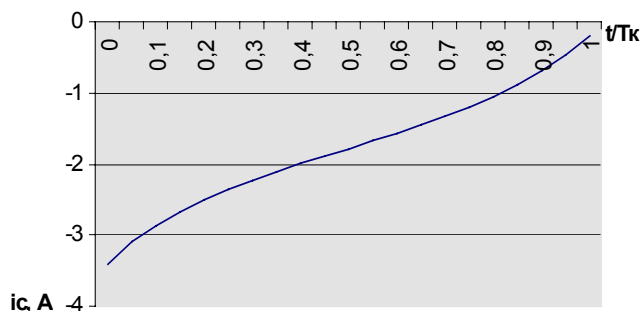


Рис. 68. $i_c = f(t/T_k)$ на нижней границе ОБР

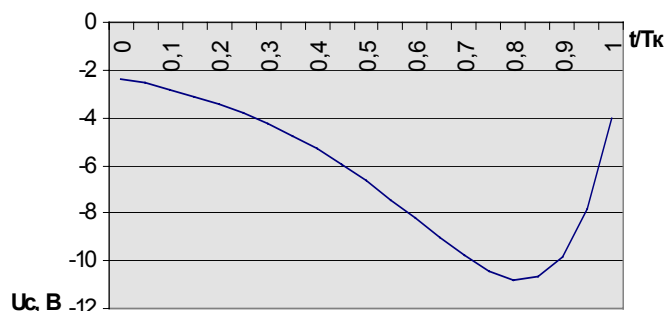


Рис. 69. $U_c = f(t/T_k)$ на нижней границе ОБР

Следовательно, условие возникновения видимого искрения под щеткой определяется уравнением (32).

$$\pm U_{c.d.} = \pm i_{p.k.} \cdot r_{c.kp.}, \quad (32)$$

где $U_{c.d.}$ - минимальное значение допустимого напряжения в сбегающем крае щетки в течение периода коммутации; $i_{p.k.}$ - критический ток разрыва; $r_{c.kp.}$ - критическое сопротивление сбегающего края щетки, при превышении которого происходит выгорание точек контакта и возникает видимое искрение при токе сбегающего края щетки, равном предельной величине.

Шестой раздел работы посвящен изучению основных направлений совершенствования коллекторных электрических машин малой мощности на базе предложенных конструкций их активных элементов.

Одним из направлений совершенствования данного класса электрических машин при использовании разработанных технических решений является

повышение их выходной мощности на 10 – 40 % при сохранении тепловой загрузки на заданном уровне.

Другим направлением является минимизация расхода обмоточного провода на якоре или индукторе в коллекторных электрических машинах на 20 – 30 % при сохранении рабочих характеристик на требуемом уровне.

Следующим направлением является повышение ресурсных характеристик коллекторно-щеточных узлов электрических машин благодаря снижению электроэрозионной составляющей изнашивания контактных элементов. При этом интенсивность изнашивания щеток может быть уменьшена в 2 - 30 раз. Для машин, работающих в двух основных режимах, предложена процедура оптимизации нажатия на щетку, которая позволяет достичь максимума ресурса работы щеток при заданном временном соотношении основных режимов работы. Оптимальное давление в СК при сочетании двух режимов работы машины может быть определено по уравнению (33). При этом ресурс комплекта щеток и максимальное время работы в одном из режимов вычисляются по уравнениям (34).

$$P_0 = \frac{-b_2 - b_1 \cdot K}{2(a_1 \cdot K + a_2)}, \quad (33)$$

$$\text{где } a_1 = \frac{\Delta'_{S1} - \Delta''_{S1} - b_1 \cdot (P_1 - P_2)}{P_1^2 - P_2^2}; \quad b_1 = \frac{(\Delta''_{S1} - \Delta'''_{S1})(P_1^2 - P_2^2) - (\Delta'_{S1} - \Delta''_{S1})(P_2^2 - P_3^2)}{(P_2 - P_3)(P_1^2 - P_2^2) - (P_1 - P_2)(P_2^2 - P_3^2)};$$

$$a_2 = \frac{\Delta'_y - \Delta''_y - b_2 \cdot (P_1 - P_2)}{P_1^2 - P_2^2}; \quad b_2 = \frac{(\Delta''_y - \Delta'''_y)(P_1^2 - P_2^2) - (\Delta'_y - \Delta''_y)(P_2^2 - P_3^2)}{(P_2 - P_3)(P_1^2 - P_2^2) - (P_1 - P_2)(P_2^2 - P_3^2)};$$

$K = t_{S1}/t_y$; t_{S1} , t_y - времена работы в режимах S1 и ударном; P_1 , P_2 , P_3 - значения давлений в СК в экспериментальных точках; Δ'_{S1} , Δ'_y - скорости изнашивания щеток при давлении P_1 в режимах S1 и ударном; Δ''_{S1} , Δ''_y - скорости изнашивания щеток при давлении P_2 в исследуемых режимах работы; Δ'''_{S1} , Δ'''_y - скорости изнашивания щеток при давлении P_3 в исследуемых режимах работы.

$$t_p = (K + 1) \cdot h_m / [K \cdot \Delta_{S1}(P) + \Delta_y(P)]; \quad t_y = h_m / [K \cdot \Delta_{S1}(P) + \Delta_y(P)], \quad (34)$$

где $\Delta_{S1}(P) = a_1 P^2 + b_1 P + c_1$; $\Delta_y(P) = a_2 P^2 + b_2 P + c_2$; $c_1 = \Delta'_{S1} - a_1 P_1^2 - b_1 P_1$; $c_2 = \Delta'_y - a_2 P_1^2 - b_2 P_1$; h_m - предельная высота изнашивания щетки.

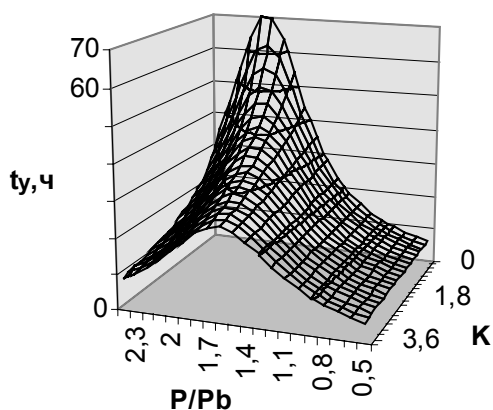


Рис. 70. $t_y = f(K, P/P_b)$

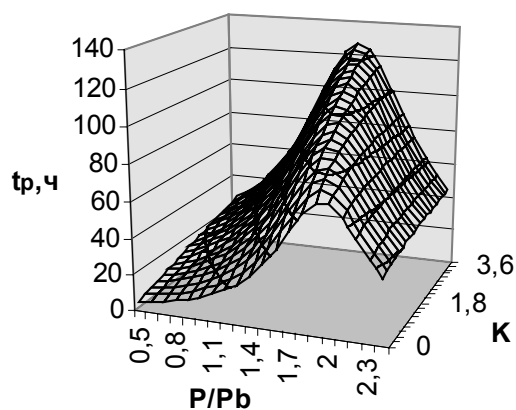
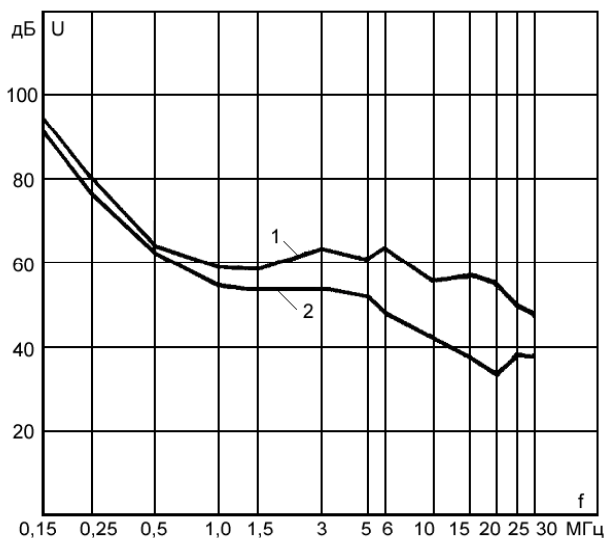


Рис. 71. $t_p = f(K, P/P_b)$

Ресурсные характеристики щеток в области определения K , P/P_b имеют вид, представленный на рис. 70, 71.

Важным следствием улучшения коммутации благодаря более оптимальному построению активной зоны электрической машины является снижение уровня радиопомех, генерируемых в процессе ее работы, о чем свидетельствуют экспериментально снятые характеристики на рис. 72, 73.



1 – базовый электродвигатель;
2 – с демпфированной обмоткой якоря
Рис. 72. Напряжения радиопомех электродвигателя ДК 100-250-12



1 – базовый электродвигатель;
2 – с демпфированной обмоткой якоря
Рис. 73. Напряжения радиопомех электродвигателя ПК 58-03-01

Оценка экономической эффективности разработанных технических решений по оптимизации активной зоны коллекторных электрических машин осуществлялась для сфер производства и потребления изделий на примере электродвигателей МЭС-450ЭР.

Экономический эффект в сфере производства от снижения массы обмоточного провода индуктора определялся по выражению (35), а при сокращении длины машины – по уравнению (36).

$$\Delta C = (M_1 \cdot C_{M1} - M_2 \cdot C_{M2}) \cdot Q, \quad (35)$$

где M_1 , M_2 – массы обмоточного провода, требуемые на одно изделие в серийном и опытном вариантах электродвигателей; C_{M1} , C_{M2} – стоимость единицы массы обмоточного провода в серийном и опытном вариантах электродвигателей; Q – объем выпуска изделий в год.

$$\Delta C = \Delta C_M + \Delta C_{ж}, \quad (36)$$

$$\text{где } \Delta C_M = \left(\frac{M_{и}}{L_{и}} \cdot 2 \cdot \Delta l \cdot C_{м.и.} + \frac{M_{я}}{L_{я}} \cdot 2 \cdot \Delta l \cdot C_{м.я.} \right) \cdot Q - \text{экономия на}$$

обмоточной меди; $M_{и}$ – расход массы меди на обмотку возбуждения на изделие; $M_{я}$ – расход массы меди на обмотку якоря на изделие; $L_{и}$, $L_{я}$ – средние длины витков обмоток возбуждения и якоря; Δl – сокращение длин пакетов индуктора и якоря; $C_{м.и.}$, $C_{м.я.}$ – стоимости единиц масс проводов индуктора и якоря для электродвигателей;

$$\Delta C_{\text{ж}} = \left(\frac{M_{\text{ж.и.}}}{l_{\text{ж.и.}}} \cdot \Delta l \cdot C_{\text{ж.и.}} + \frac{M_{\text{ж.я.}}}{l_{\text{ж.я.}}} \cdot \Delta l \cdot C_{\text{ж.я.}} \right) \cdot Q \quad - \quad \text{экономия на}$$

электротехническом железе; $M_{\text{ж.и.}}$, $M_{\text{ж.я.}}$ – расход массы железа на индуктор и якорь; $l_{\text{ж.и.}}$, $l_{\text{ж.я.}}$ – длины пакетов индуктора и якоря; $C_{\text{ж.и.}}$, $C_{\text{ж.я.}}$ – стоимости единиц масс листов пакетов индуктора и якоря для изготовителя электродвигателей.

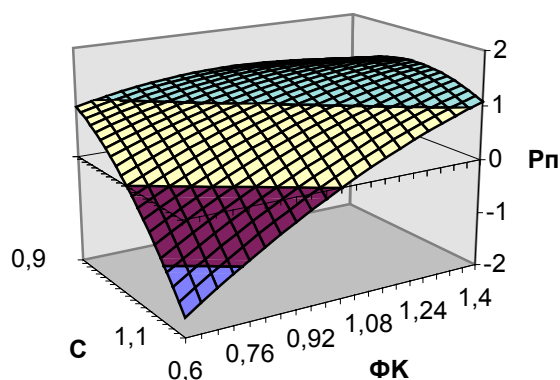


Рис. 74. Прибыль независимого продавца

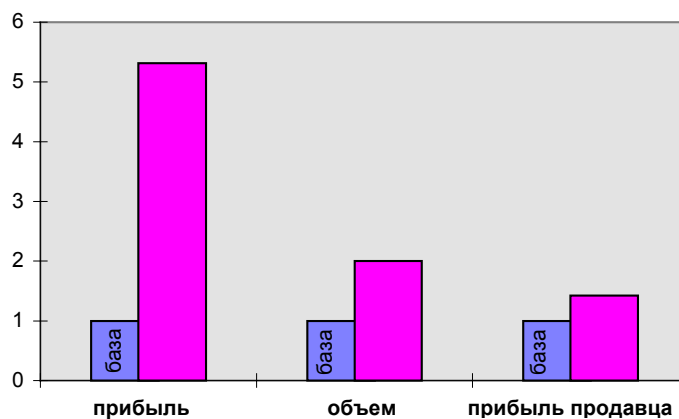


Рис. 75. Экономические показатели при $C_m = 1,01$; $\Phi K_m = 1,4$

Для оценки экономического эффекта в сфере потребления была разработана с участием заводских специалистов упрощенная модель продаж, учитывающая влияние функционального качества (ФК) на объем продаж при заданной отпускной цене изделия (С), а также особенности различных форм доведения товара до потребителя и методов ценообразования.

Расчеты показали, что наибольший эффект достигается в сфере потребления изделия благодаря повышению его функционального качества, что для случая продаж независимым продавцом иллюстрируется диаграммами на рис. 74, 75.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного комплекса теоретических, конструкторских и экспериментальных работ разработаны основные принципы создания высокоиспользованных коллекторных электрических машин малой мощности с повышенными эксплуатационными показателями, предложены принципиально новые технические решения, открывающие перспективные разносторонние направления для их кардинального совершенствования, а также выработаны основополагающие принципы дальнейшего развития данного класса электрических машин.

Реализация предложенных технических решений и рекомендаций по их применению в ряде типов электрических машин обеспечила их многократное превосходство по ряду важнейших показателей над базовыми конструкциями, что определяет практическую ценность данных разработок.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Получены аналитические зависимости переходных сопротивлений скользящего контакта, являющиеся основой для расчета коммутационных процессов высоконагруженных электрических машин, которые позволили определить основные направления повышения коммутирующих свойств коллекторно-щеточного узла.

2. Разработан математический аппарат и соответствующие методики для определения коммутационной напряженности и коммутационной устойчивости электрических машин малой мощности, позволяющие оптимизировать параметры коммутируемых контуров.

3. Получены аналитические выражения, описывающие явления взаимного демпфирования одновременно коммутируемых магнитосвязанных контуров на всех стадиях коммутационного процесса, которые позволили на основе системного анализа выработать основные принципы конструирования обмоток якорей с повышенными коммутирующими свойствами.

4. Разработано универсальное программное обеспечение, позволяющее рассчитывать основные коммутационные показатели коллекторных машин с различными конструкциями обмоток якоря при использовании индукторов с разной степенью анизотропии магнитных свойств в машинах с дополнительными полюсами и без них, что обуславливает ее практическое применение для решения широкого круга задач при проектировании электрических машин малой мощности с традиционными и нетрадиционными конструктивными решениями элементов их активной зоны.

5. В соответствии с выработанными рекомендациями созданы углепластики для узлов токосъема и конструкции коллекторов из УГП, обладающие максимальной коммутирующей способностью, что обеспечивает увеличение ширины ОБР электрических машин в номинальном режиме в шесть и более раз.

6. Разработаны конструкции коллекторов, щеточных узлов и щеток, которые отличаются стабильностью скользящего контакта в широком диапазоне частот вращения и в условиях вибраций, что улучшает условия коммутации секций якоря.

7. Выработанные принципы построения диагностических комплексов для дистанционного контроля профилей коллекторов в статических и динамических режимах их работы позволяют создавать системы, отличающиеся высокой точностью измерений благодаря применению оригинальных конструкций токовых датчиков, цифровой обработке измеряемого сигнала на компьютере и использованию предложенного метода поэлементной базовой коррекции в процессе измерений.

8. Предложены конструкции демпфированных обмоток якоря, обладающие повышенными коммутирующими свойствами вследствие снижения индуктивностей секций и оптимального сочетания коммутирующих

ЭДС в секциях и взаимных магнитных связей между ними, что позволяет повысить коммутационную устойчивость машин с дополнительными полюсами в 2-3 раза, а в реверсивных режимах работы машин без дополнительных полюсов обеспечивает снижение максимальной энергии искрения секций в 20 – 30 раз, а также увеличение результирующего магнитного потока в нереверсивном режиме работы указанных машин более чем на 20 % .

9. Разработаны конструкции индукторов с анизотропными магнитными свойствами, обеспечивающие снижение магнитного потока поперечной реакции якоря в 2-3 раза. Использование предложенных конструкций индукторов в электрических машинах без дополнительных полюсов позволяет в 1,5 - 2 раза снизить суммарную энергию искрения секций паза якоря.

10. Оптимальное сочетание индукторов с анизотропными магнитными свойствами и демпфированных обмоток якоря позволяет в реверсивном режиме работы электрических машин без дополнительных полюсов уменьшить суммарную энергию искрения секций паза якоря до 30 раз, а максимальную энергию искрения - до 50 раз относительно базового уровня серийных изделий.

11. Высокие коммутационные свойства предложенных конструкций демпфированных обмоток якорей и анизотропных индукторов электрических машин малой мощности открывают такие направления их совершенствования, как повышение КПД на 25 %, сокращение расхода обмоточного провода якоря или индуктора на 30 %, увеличение ресурса работы контактных элементов в 2-30 раз, снижение уровня радиопомех на 2-6 дБ в диапазоне частот от 0,15 до 2 МГц и на 6-20 дБ в диапазоне частот от 2 до 30 МГц.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Качин С.И. Улучшение эксплуатационных характеристик коллекторных машин малой мощности. - Электричество, №6, 1997, с. 28-32.
2. Качин С.И. Ресурсные характеристики коллекторно-щеточных узлов электрических машин с демпфированными обмотками на якоре. - В сб. Электронные и электромеханические системы и устройства. Томск, НПЦ "Полюс", 1997, с. 171-174.
3. Качин С.И. Совершенствование коллекторных машин малой мощности на основе оптимизации их электромагнитных параметров. – Электромеханика и управляемые электромеханические системы: Вестник УГТУ-УПИ. Екатеринбург: ГГТУ-УПИ, №10, 2000, с. 357-361.
4. Качин С.И. Оптимизация параметров однофазных коллекторных электродвигателей для бытовой техники и электроинструмента. – В сб. трудов XVI научно-технической конференции "Электронные и электромеханические системы и устройства". Томск: НПЦ «Полюс», 2001, с. 307-311.

5. Бекишев Р.Ф., Качин С.И., Сайфутдинов Р.Х. Определение коммутационной устойчивости коллекторных машин постоянного тока без дополнительных полюсов. - Электротехника, 1989, № 9, с. 31-32.
6. Бекишев Р.Ф., Качин С.И., Кошкин В.Г. Демпфированные обмотки коллекторных электрических машин с повышенными коммутационными свойствами. - Тезисы докладов научно-технической (подотраслевой) конференции "Проблемы электромашиностроения". Л.: ВНИИЭлектромаш, 1991, с. 172.
7. А.С. 997153 (СССР). Композиционный материал для коллекторов электрических машин./ Бекишев Р.Ф., Качин С.И. и др. Оpub. в Б.И. № 6, 1983.
8. А.С. 1001257 (СССР). Коллектор электрической машины./ Бекишев Р.Ф., Качин С.И. Оpub. в Б.И. № 8, 1983.
9. А.С. 1179463 (СССР). Коллектор электрической машины./ Бекишев Р.Ф., Данекер В.А., Качин С.И. и др. Оpub. в Б.И. № 34, 1983.
10. А.С. 1069038 (СССР). Коллектор для электрической машины./ Бекишев Р.Ф., Данекер В.А., Качин С.И. и др. Оpub. в Б.И. № 3, 1984.
11. А.С. 1198620. (СССР). Щетка для электрической машины./ Бекишев Р.Ф., Качин С.И. Оpub. в Б.И. № 46, 1985.
12. А.С. 1252851 (СССР). Способ изготовления коллектора./ Бекишев Р.Ф., Данекер В.А., Качин С.И. и др. Оpub. в Б.И. № 31, 1986.
13. А.С. 1228174 (СССР). Способ измерения износа коллекторов и контактных колец электрических машин./ Бекишев Р.Ф., Данекер В.А., Качин С.И. Оpub. в Б.И. № 16, 1986.
14. А.С. 1474771 (СССР). Коллектор электрической машины./ Качин С.И. Оpub. в Б.И. № 15, 1989.
15. А.С. 1534577 (СССР). Щеткодержатель электрической машины./ Качин С.И. Оpub. в Б.И. № 1, 1990.
16. А.С. 1541695 (СССР). Коллектор электрической машины./ Качин С.И. Оpub. в Б.И. № 5, 1990.
17. А.С. 1601677 (СССР). Щеточно-коллекторный узел электрической машины./ Качин С.И. Оpub. в Б.И. № 39, 1990.
18. А.С. 1624570 (СССР). Коллектор электрической машины./ Качин С.И. Оpub. в Б.И. № 4, 1991.
19. А.С. 1624571 (СССР). Щеточно-коллекторный узел электрической машины./ Качин С.И. Оpub. в Б.И. № 4, 1991.
20. А.С. 1624572 (СССР). Коллектор электрической машины./ Качин С.И. Оpub. в Б.И. № 4, 1991.
21. А.С. 1661885 (СССР). Щеточно-коллекторный узел электрической машины./ Арсентьев О.В., Бекишев Р.Ф., Качин С.И. Оpub. в Б.И. № 25, 1991.
22. А.С. 1665445 (СССР). Коллектор электрической машины./ Арсентьев О.В., Бекишев Р.Ф., Качин С.И. Оpub. в Б.И. № 27, 1991.

23. А.С. 1667182 (СССР). Щеточно-коллекторный узел электрической машины./ Бекишев Р.Ф., Качин С.И., Сайфутдинов Р.Х. Оpub. в Б.И. № 28, 1991.
24. Арсентьев О.В., Качин С.И. Расчет сопротивлений коллекторно-щеточного узла с учетом упругих свойств скользящего контакта. – Рукопись представлена Томск. политехн. ин-том. Деп. в Информэлектро 9 июля 1986, № 405-эт. -13 с.
25. Арсентьев О.В., Качин С.И. Оптимизация работы скользящего контакта коллекторной электрической машины. - Тезисы докладов краев. научно-технической конференции “Автоматизация электроприводов и оптимизация режимов электропотребления”. Красноярск, 1988, с. 94-95.
26. Арсентьев О.В., Качин С.И. Влияние механики контакта на коммутационную устойчивость широкорегулируемых машин постоянного тока. - Тезисы докладов V Всесоюзной научно-технической конференции “Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов”. Каунас, 1988, ч.2, с. 117.
27. Арсентьев О.В., Бекишев Р.Ф., Качин С.И. Коллекторно-щеточные узлы с повышенной механической стабильностью контактирования. - Тезисы докладов региональной научно-технической конференции “Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири”. Иркутск, ИрГТУ, 1995, с. 25.
28. Бекишев Р.Ф., Качин С.И. Электрические свойства скользящего контакта из углеродных материалов и их влияние на коммутацию. - В сб. Исследование специальных электрических машин и машинно-вентильных систем. Томск, 1984, с. 109-114.
29. Бекишев Р.Ф., Качин С.И., Кошкин В.Г. Прогнозирование динамики коммутационной надежности коллекторных электрических машин постоянного тока. - Тезисы докл. VI Всесоюзной научно-технической конференции по коммутации электрических машин, ч.2. Бишкек, 1991, с. 79-80.
30. Бекишев Р.Ф., Данекер В.А., Качин С.И. Высокотехнологичные токопроводящие композиционные материалы в электромашиностроении. - Тезисы докладов первой Международной конференции по электромеханике и электротехнологии. Суздаль, 1994, с. 15.
31. Бекишев Р.Ф., Качин С.И., Рузайкина Т.М. Методика расчета магнитного поля машин с демпфированными обмотками на якоре. - Тезисы докладов XV научно-технической конференции “Электронные и электромеханические системы и устройства”. Томск, ГНПП “Полюс”, 1996, с. 118-119.
32. Бекишев Р.Ф., Качин С.И., Рузайкина Т.М. Оптимизация конструкций демпфированных обмоток якорей коллекторных электрических машин. - Тезисы докладов региональной научно-технической конференции “Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири”. Иркутск, ИрГТУ, 1996, с. 53.

33. Бекишев Р.Ф., Боровиков Ю.С., Качин С.И. Универсальная компьютерная программа для расчета коммутации коллекторных электрических машин малой мощности. - Рукопись представлена Томск. политехн. ин-том. Деп. в ВИНТИ 10 января 2002, № 38-B2002.- 27 с.
34. Bekishev R.F., Kachin S.I. Collector electric machines of low power with optimized active zone. - Abstracts of the third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology. KORUS'99, Novosibirsk, 1999, p. 796.
35. Bekishev R.F., Kachin S.I. Collector electric machines of low power with optimized active zone. - Proceedings of the third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology. KORUS'99, Novosibirsk, 1999, p. 793-795.
36. Качин С.И., Бекишев Р.Ф., Константинов Г.Г. Способы соединения углеродных коллекторов с проводниками обмотки якоря электрических машин. - Тезисы докладов VI Всесоюзной научно-технической конференции "Новые технологические процессы и оборудование для производства электрических машин малой мощности". М., Информэлектро, 1983, с. 72-73.
37. Качин С.И. Неидентичность коммутационных циклов в одноякорных преобразователях постоянного тока в однофазный переменный. - Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции "Коммутация электрических машин". Харьков, 1984, Ч.1. Коммутация коллекторных машин постоянного тока, с. 30-31.
38. Качин С.И. Влияние параметров обмотки якоря машины постоянного тока на коммутационную устойчивость. - В сб. Исследование специальных электрических машин и машинно-вентильных систем. Томск, 1984, с. 106-108.
39. Качин С.И., Сайфутдинов Р.Х. Применение демпфированных якорных обмоток в коллекторных электрических машинах малой мощности. - Электротехническое производство: Передовой опыт и научно-технические достижения для внедрения. 1986, вып.7, с. 12-13.
40. Качин С.И., Сидоренко С.С. Критерий искрообразования в скользящем контакте машин постоянного тока. - Рукопись представлена Томск. политехн. ин-том. Деп. в Информэлектро 20 апреля 1987, № 752-эт.- 20 с.
41. Качин С.И., Климова Л.Г. Расчет зон безыскровой работы машин постоянного тока с учетом неидентичности коммутационных циклов секций. - Рукопись представлена Томск. политехн. ин-том. Деп. в Информэлектро 20 апреля 1987, № 753-эт.- 22 с.
42. Качин С.И. Определение коммутационной устойчивости коллекторных электрических машин с учетом неидентичности коммутационных циклов. - Тезисы докладов научно-технической конференции "Электромашинные и машинно-вентильные источники импульсной мощности". Томск, 1987, с. 66.

43. Качин С.И., Кошкин В.Г. Методика оценки электроэрозионной стойкости материалов скользящего контакта в электрических машинах постоянного тока. - Тез. докл. второй Дальневосточной региональной научно-практической конференции "Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышл. предприятий". Комсомольск-на-Амуре, 1989, с. 23.
44. Качин С.И., Кошкин В.Г. Расчет ресурса работы и коммутационной надежности коллекторных электрических машин постоянного тока. - Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции "Электромеханические преобразователи и машинно-вентильные системы". Томск, 1991, с. 45-46.
45. Качин. С.И. Улучшение массогабаритных показателей коллекторных машин применением якорных обмоток с повышенными коммутающими свойствами. - Тезисы докладов IV научно-технической конференции "Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных машин постоянного тока". Омск, 1993, с. 58-59.
46. Качин С.И. Высокостабильный скользящий контакт для бытового электропривода. - Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции "Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири". Иркутск, ИрГТУ, 1994, с. 18-19.
47. Качин С.И. Универсальные конструкции коллекторов для бытового электропривода. - Тезисы докладов региональной научно-технической конференции "Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири". Иркутск, ИрГТУ, 1995, с. 60.
48. Качин С.И. Ресурсные характеристики коллекторно-щеточных узлов электрических машин с демпфированными обмотками на якоре. - Тезисы докладов XV научно-технической конференции "Электронные и электромеханические системы и устройства". Томск, ГНПП "Полус", 1996, с. 120-121.
49. Качин С.И. Повышение удельных энергетических характеристик и надежности универсальных коллекторных двигателей. - Тезисы докладов II Международной конференции по электромеханике и электротехнологии. Ч.1. Крым, 1996, с. 195.
50. Качин С.И. Улучшение коммутации коллекторных электрических машин путем оптимизации их активной зоны. - Тезисы докладов III Международной конференции по электромеханике и электротехнологии. Клязьма, 1998, с. 303-304.
51. Качин С.И. Повышение электромагнитной совместимости коллекторных электрических машин с радиоэлектронными системами. - Тезисы докладов Всероссийского электротехнического конгресса с международным участием "На рубеже веков, итоги и перспективы", т. II. Москва, 1999, с. 408.

52. Качин С.И. Оптимизация параметров однофазных коллекторных электродвигателей для бытовой техники и электроинструмента. - Тезисы докладов XVI научно-технической конференции “Электронные и электромеханические системы и устройства”. Томск: НПЦ «Полус», 2000, с. 119-120.
53. Качин. С.И. Снижение уровня радиопомех коллекторных электрических машин применением демпфированных обмоток на якоре. - Труды IV международной конференции “Электротехника, электромеханика и электротехнологии”. Клязьма, 2000, с. 317.
54. Kachin S.I., Kolosov D.A., Borovikov Y.S., Bekishev R.F. Decrease of Radio Interference Level of Collector Electrical Machines with the Help of Armature Damper Winding. - Proceedings of the 5th Korean- Russian International Symposium on Science and Technology. KORUS 2001, Tomsk, 2001, p. 158-161.
55. Патент РФ №1489536. Якорь коллекторной электрической машины./Качин С.И. 1991.
56. Патент РФ №2104605. Статор коллекторной электрической машины./Качин С.И. Опуб. в Б.И. №4, 1998.
57. Патент РФ №2107375. Статор коллекторной электрической машины./Качин С.И. Опуб. в Б.И. №8, 1998.
58. Патент РФ №2120175. Якорь коллекторной электрической машины./Качин С.И. Опуб. в Б.И. №28, 1998.