

На правах рукописи

ГРИГОРЬЕВ РОМАН ВАЛЕРЬЕВИЧ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
СОВМЕСТИМОСТИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА
МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2000

Работа выполнена на кафедре электрических машин и аппаратов Томского политехнического университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Муравлев О.П.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Борзых В.Э.

кандидат технических наук, доцент
Карминская Т.Д.

Ведущее предприятие - НИИ Автоматики и электромеханики
при Томском университете систем
управления и радиоэлектроники (г. Томск)

Защита диссертации состоится 28 июня 2000 г. в 15 час. на заседании диссертационного совета К 063.80.01 в актовом зале главного корпуса Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского политехнического университета

Автореферат разослан 23 мая 2000 г.

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

Алехин А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность работы. Коллекторные электрические машины постоянного тока малой мощности получили широкое использование в общепромышленной и специальной технике, благодаря хорошим регулировочным характеристикам, как в качестве исполнительных электродвигателей, так и в качестве источников питания аппаратуры различного рода систем, а также в качестве тяговых электродвигателей. В то же время коллекторные электрические машины постоянного тока, имеющие в своих цепях скользящий электрический контакт, являются наиболее интенсивными источниками промышленных радиопомех и относятся к основной группе источников помех согласно ГОСТ 16842-82.

В последнее время, в связи с интенсивным развитием систем связи и созданием качественно новой радиоэлектронной техники, к коллекторным электрическим машинам постоянного тока предъявляются все более строгие требования к обеспечению электромагнитной совместимости по допустимым уровням радиопомех, со стороны радиоэлектронных систем, совместно с которыми используются электрические машины данного типа и подключенными к общему источнику питания.

В настоящее время, в условиях рыночной экономики залогом успешной деятельности предприятий является высокое качество выпускаемой продукции. Качество выпускаемых коллекторных электрических машин зависит от многих причин, но даже при высоком уровне прогрессивности технологического оборудования и свойств используемых материалов нельзя говорить о конкурентоспособном качестве производимых электрических машин не учитывая те требования, которые предъявляются к электрическим машинам по обеспечению электромагнитной совместимости согласно мировым стандартам. Поиск возможного компромисса, когда при производстве электрической машины удовлетворяются разнообразные технические требования, является важной проблемой, решение которой наилучшим образом соответствовало бы требованиям потребителя продукции.

Таким образом, возникает проблема обеспечения качественной электромагнитной совместимости коллекторных электрических машин постоянного тока малой мощности с радиоэлектронными средствами и системами различного назначения, количество которых в настоящее время непрерывно растет и увеличивается разнообразие выполняемых ими задач. Потребность в решении этой проблемы давно назрела также в связи необходимостью создания конкурентоспособной на мировом рынке отечественной техники.

Являясь основными источниками промышленных радиопомех коллекторные электрические машины, в первую очередь, становятся предметом пристального внимания. Такими авторами как, Абрамсон М.Д., Вольперт А.Р., Вольпян В.Г., Лютов С.А., Папалекси Н.Д., Синельников Е.М., Терентьев Б.П., Федоров Н.М., Рихтер В. неоднократно отмечалось, что наиболее эффективным и в большинстве случаев более экономичным способом борьбы с радиопомехами является их подавление непосредственно в источнике. Для машин постоянного тока таковым основным источником является скользящий электрический

контакт с его коммутационными явлениями, сопровождающимися искрой и дугообразованием. Однако из-за сложности и многообразия явлений, происходящих в скользящем электрическом контакте, вопросы обеспечения качественной электромагнитной совместимости коллекторных электрических машин постоянного тока малой мощности до сих пор не достаточно проработаны и имеют частный характер. С одной стороны, наличие такого количества наработанного материала по вопросам коммутационной устойчивости, изучения механики скользящего контакта и коллекторно-щеточного узла, анализа влияния отклонений геометрических размеров магнитной системы, проведения исследования динамических свойств элементов коллекторно-щеточного узла, разработка методов измерения колебаний и мероприятий по улучшению динамических свойств основных коммутационных элементов значительно расширяет возможности по анализу и разработке конкретных мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости, с другой - приводит к выводу о необходимости рассмотрения этой проблемы как обширного комплекса задач, направленных на изучение и анализ имеющегося "багажа" знаний о машинах постоянного тока с точки зрения обеспечения качества через обеспечение электромагнитной совместимости. В то же время широкое использование коллекторных электрических машин постоянного тока в различном качестве с повышенными требованиями к обеспечению электромагнитной совместимости создает необходимость искать наиболее эффективные пути подавления радиопомех непосредственно в источнике их возникновения.

Поэтому можно говорить о том, что на данный момент методология обеспечения качественной электромагнитной совместимости по допустимым уровням радиопомех коллекторных электрических машин постоянного тока малой мощности, как единой системы, учитывающей влияние конструктивных и эксплуатационных параметров электрической машины на уровни радиопомех, не сформирована.

В связи с этим представляется целесообразным создание структурной и математической моделей отражающих протекающие в электрической машине процессы генерации радиопомех и связывающие конструктивные и эксплуатационные параметры машины и показатели обеспечения электромагнитной совместимости, наряду с разработкой эффективных способов снижения уровней радиопомех непосредственно в источнике их генерации, а именно в скользящем электрическом контакте.

Цель работы. Целью данной работы является разработка математической модели обеспечения электромагнитной совместимости коллекторных электрических машин постоянного тока малой мощности и разработка новых конструктивных решений в электрических машинах с низким уровнем радиопомех.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

разработать структурную модель обеспечения электромагнитной совместимости электрических машин постоянного тока малой мощности с учетом взаимосвязей между показателями электромагнитной совместимости и

конструктивными и эксплуатационными параметрами электрической машины;
получить математические зависимости между показателями электромагнитной совместимости и конструктивными и эксплуатационными параметрами электрической машины;

разработать математическую модель для прогнозирования уровней показателей обеспечения электромагнитной совместимости по конструктивным и эксплуатационным параметрам электрической машины на стадии проектирования;

разработать устройства для коллекторных электрических машин постоянного тока малой мощности, обеспечивающие низкий уровень радиопомех, облегчающие условия протекания коммутационных процессов и позволяющие подавлять высокочастотные пульсации в местах их возникновения на коллекторе электрической машины.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались теория электрических машин, теория точности, методы математического моделирования, системного анализа, теория прогнозирования, экспериментальные исследования на специальных опытных установках и на серийно выпускаемых машинах, работающих в различных условиях эксплуатации, численные методы. При обработке экспериментальных данных и получении математических зависимостей использовались программные продукты и специализированные пакеты MathCAD® 2000, S - PLUS® 2000, Plot Maestro®, Curve Expert® 1.35, Numery® 3.1.

Научная новизна. При выполнении работы получены следующие новые научные результаты:

1. Предложена структурная иерархическая модель влияния конструктивных и эксплуатационных параметров электрической машины на показатели обеспечения электромагнитной совместимости электрических машин постоянного тока малой мощности, рассматривающая электрическую машину как сложную систему элементов - параметров машины и показателей обеспечения электромагнитной совместимости, а также взаимосвязей между ними,
2. Разработана математическая модель влияния конструктивных и эксплуатационных параметров электрической машины на показатели обеспечения электромагнитной совместимости электрических машин постоянного тока малой мощности, позволяющая прогнозировать уровни показателей обеспечения в зависимости от параметров машины на стадии проектирования;
3. Впервые разработаны принципиально новые устройства эффективного снижения уровней радиопомех и искрения, обеспечивающие равномерное распределение емкости по коллектору, позволяющие подавлять высокочастотные пульсации в местах их возникновения.

Практическая ценность. Практическая ценность данной работы заключается в следующем:

1. Применение результатов моделирования разработанной системы позволяет оценить уровень качества электромагнитной совместимости при проектировании коллекторных электрических машин постоянного тока малой мощности с повышенными требованиями по допустимым уровням радиопомех,

и предложить эффективные пути создания новых помехоподавляющих устройств.

2. Разработанные устройства снижения уровней радиопомех позволяют получить равномерное распределение емкости по коллектору с одновременным увеличением собственной емкости секции, что обеспечивает шунтирование дуговых разрядов сбегającego края щеточного контакта и уменьшает искрение и уровень радиопомех, повышает ресурс работы электрических машин.

3. Разработанные конструкции позволяют в широком диапазоне варьировать создаваемые дополнительно вводимые емкости, что позволяет обеспечить равномерное распределение емкости по коллектору для всего ряда машин малой мощности.

4. Предложена новая конструкция дополнительно вводимого спирального роллона, которая позволяет снизить уровень радиопомех в 2-6 раз и искрение при разрыве остаточного тока коммутируемой секции со щеткой в уже эксплуатируемых электрических машинах, тем самым увеличить срок службы машины на 30-50%.

Апробация работы. Основные положения работы и результаты исследований были представлены на следующих научно-технических конференциях:

1. Третья областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (г. Томск, 1997);

2. Четвертая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (г. Томск, 1998);

3. Всероссийская научно-практическая конференция «Решетневские чтения» (г. Красноярск, 1998);

4. Пятая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (г. Томск, 1999);

5. Международная молодежная научная конференция «XXV ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ» (г. Москва, 1999).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 8 печатных работах, в том числе 2 патентах на изобретения.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 172 страницах машинописного текста, содержит 44 иллюстраций и 9 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 154 наименований и 1 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана оценка актуальности работы, сформулированы ее цели, задачи и методы исследования, показаны новизна научных результатов и их практическая ценность.

Во втором разделе проведен анализ основных подходов к вопросу обеспечения электромагнитной совместимости коллекторных электрических машин постоянного тока малой мощности. При рассмотрении вопросов терминологии с позиций качества и совместимости, в качестве основных показателей качества электромагнитной совместимости выбраны допустимые уровни токов и напряжений радиопомех, а также уровни магнитной и электрической составляющей напряженности электромагнитного поля радиопомех

коллекторных электрических машин постоянного тока. Проанализированы нормативные требования по допустимым уровням показателей качества и методы их измерений. На основе проведенного анализа основных подходов к вопросу обеспечения электромагнитной совместимости поставлены конкретные задачи дальнейших исследований.

В третьем разделе рассмотрены экспериментальные исследования уровней показателей качества электромагнитной совместимости, а именно напряжения и тока радиопомех по цепям питания и нагрузки, электрической и магнитной напряженности электромагнитного поля радиопомех скользящего контакта щетка - контактное кольцо. Для измерения высокочастотных радиопомех использовался измерительный комплекс 1 класса FSM-11. Методика проведения измерения напряжений, токов и напряженностей поля соответствовала ГОСТ 16842-82. Установлено, что уровень напряжений радиопомех является наиболее информативным показателем обеспечения электромагнитной совместимости и может служить критерием оценки и выбора конструктивных и эксплуатационных параметров электрической машины при проектировании и эксплуатации. Проведены экспериментальные и теоретические исследования зависимости напряжения радиопомех в скользящем электрическом контакте щетка - контактное кольцо от основных конструктивных и эксплуатационных параметров коллекторной электрической машины, а именно скорость вращения скользящего контакта V , удельного давления на щетки $P_{щ}$, плотности тока в контакте J , температуры T и влажности H окружающей среды.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что уровень напряжений радиопомех в скользящем контакте щетка - контактное кольцо достигает максимального значения при скорости вращения контакта 1,3 м/с после чего остается практически постоянным. Так как под щеткой происходит постоянный пробой окисной пленки, возникают колебания контактного сопротивления то при малых скоростях вращения точки преимущественной проводимости при взаимодействии с кислородом окружающей среды успевают восстанавливать свои свойства. Этот процесс и вызывает более высокий уровень напряжений радиопомех, особенно при малых плотностях тока в контакте. При более детальном исследовании влияния плотности тока на уровни радиопомех скользящего контакта (рис. 1) было установлено, что для всех частот исследуемого диапазона (0,15 - 1000 МГц) наблюдается однотипный характер зависимостей, причем наибольшие амплитуды присутствуют на частоте 0,15 МГц. Это говорит о том, что максимальные значения уровней радиопомех лежат именно в начале защищаемого диапазона частот, поэтому при дальнейших исследованиях основное внимание уделялось частоте 0,15 МГц. На рис. 2 представлены зависимости влияния температуры окружающей среды на уровень напряжений радиопомех скользящего контакта. Из рис. 2 видно, что уровень радиопомех, особенно для небольшой плотности тока, например, $0,2 \cdot 10^4$ А/м² резко снижается. Данное явление объясняется свойствами окисной пленки, имеющейся на контактной поверхности. По своей природе окислы металлов относятся к полупроводниковым веществам, обладающим электронной и ионной проводимостью, которая растет с повышением температуры. Следовательно,

контактное сопротивление понижается, так как уменьшается сопротивление окисной пленки и снижается его пульсация. При плотности тока в 2-10 А/м уровни радиопомех значительно выше, но все равно выражена их сильная зависимость от изменения температуры окружающей среды, по сравнению с меньшей плотностью тока и поэтому с меньшей температурой контакта. При плотности тока в контакте равной $20 \cdot 10^4$ А/м² с увеличением температуры

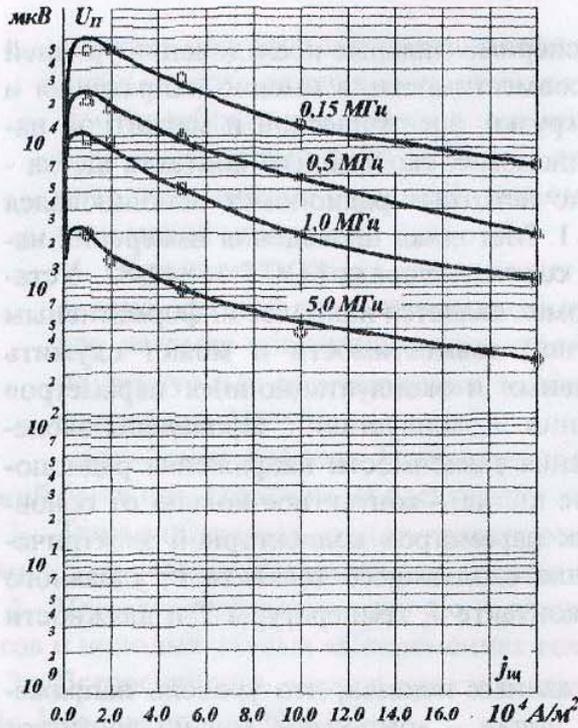


Рис. 1. Зависимость уровня напряжений радиопомех от плотности тока

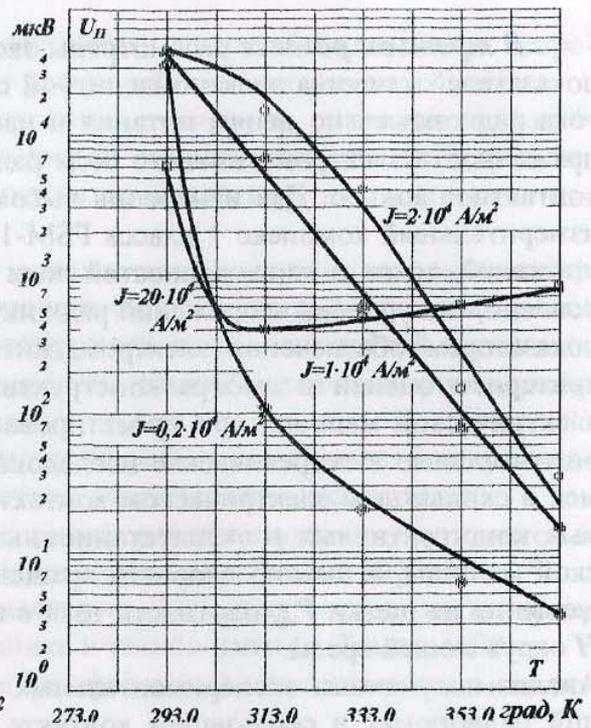


Рис. 2. Зависимость напряжений радиопомех от температуры окружающей среды

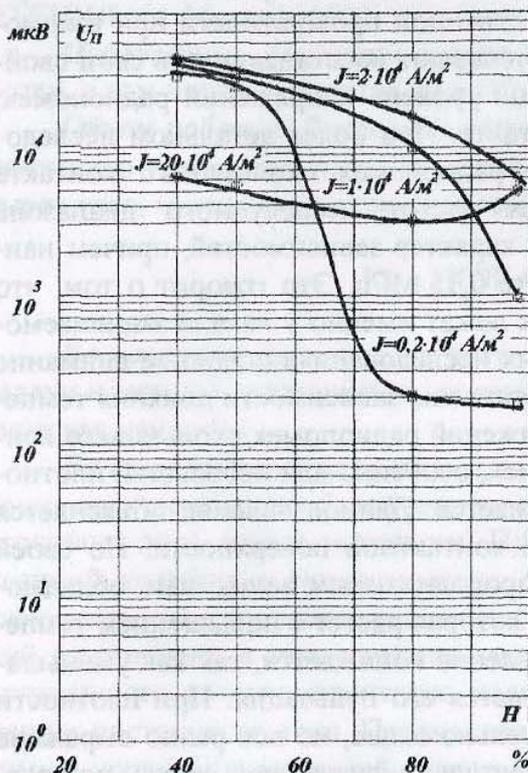


Рис. 3. Зависимость напряжений радиопомех от влажности окружающей среды

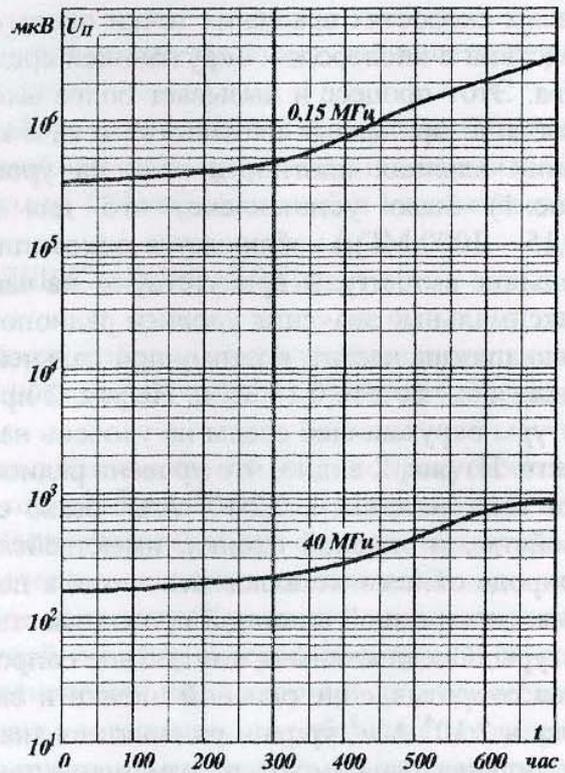


Рис. 4. Зависимость уровня напряжений радиопомех от срока службы

окружающей среды с 293 °К до 313 °К уровень радиопомех резко упал на порядок, так как понизилось контактное сопротивление сохранившегося полупроводникового слоя. Дальнейшее повышение температуры вызывает увеличение контактного сопротивления и приводит к возрастанию уровня радиопомех, что объясняется кинетикой образования окисной пленки при увеличении температуры.

На рис. 3 представлены экспериментально снятые значения напряжений радиопомех, показывающие влияние относительной влажности окружающей среды на уровень радиопомех скользящего контакта при различных плотностях тока в контакте.

С увеличением влажности окружающей среды с 50% до 98% особенно для малых плотностей тока, например $0,2 \cdot 10^4$ А/м², наблюдается значительное снижение уровня радиопомех (рис.3), вследствие того, что резко уменьшилось контактное сопротивление.

С увеличением влажности с 80% до 98% для плотности тока $0,2 \cdot 10^4$ А/м² уровень радиопомех изменился незначительно в сторону снижения, так как контактное сопротивление так же незначительно уменьшилось. Для плотностей $(1-2) \cdot 10^4$ А/м падение в уровнях радиопомех с повышением относительной влажности окружающей среды менее выражено. При высокой плотности тока в контакте ($20 \cdot 10^4$ А/м²) уровень напряжений радиопомех с повышением влажности до 80% снижается незначительно, а с 80% до 98% даже возрастает, что объясняется нарушением установившегося состояния окисной пленки в данном режиме, то есть более интенсивным окислением. Таким образом, уровень напряжения радиопомех от скользящего контакта является нестабильной величиной и изменяется вследствие колебаний контактного сопротивления, которое существенно зависит от влажности окружающей среды.

Так же проведены экспериментальные исследования на электромагнитную совместимость по цепи питания одноякорного преобразователя типа ОП-120Ф2 напряжением питания 220 В постоянного тока, токе потребления 1,5 А и частоте вращения 3000 об/мин с гарантийной наработкой в течение 700 часов.

Исследования проводились через каждые 100 часов работы согласно требованиям технических условий, измерялись амплитуды напряжений радиопомех по цепи питания. Фиксировалась также степень искрения приводного двигателя, которая не должна превышать 1 1/2 балла по шкале ГОСТ 183-74 в течение всего 700-часового ресурса работы. В связи с тем, что преобразователь предназначен для питания бортовой радиоаппаратуры, техническими условиями заданы повышенные требования по допустимому уровню радиопомех в защищаемых диапазонах частот от 0,15 до 0,5 МГц (250 мкВ); от 2,5 до 20 МГц (50 мкВ); от 20 до 150 МГц (250 мкВ); от 150 до 300 МГц (50 мкВ), которые не должны быть превышены в течение всего срока службы. При испытаниях преобразователя в номинальном режиме уровень напряжений радиопомех приводного двигателя существенно выше, чем уровень радиопомех на зажимах генератора, имеющего скользящий контакт по кольцу. Это различие в уровнях радиопомех обуславливается коммутационными явлениями, происходящими в скользящем контакте машины постоянного тока.

На рис. 4 представлены экспериментально снятые зависимости уровней высокочастотных напряжений радиопомех коллекторного двигателя от времени наработки для начальной частоты защищаемого диапазона 0,15 МГц, а также в области неэффективной работы фильтра на частоте 40 МГц. Из которых следует, что на выбранных частотах 0,15 и 40 МГц соответственно после 200 часов работы уровень радиопомех возрастает и увеличивается визуально наблюдаемое искрение под сбегаящим краем щетки с 1 1/4 до 1 1/2 балла. После 700 часов работы машины наблюдается порядковое увеличение уровня радиопомех и увеличение искрения под щетками до 2 баллов, с заметными подгарами рабочей поверхности многих ламелей коллектора. Таким образом, можно заключить, что уровень электромагнитной совместимости коллекторных электрических машин постоянного тока существенно зависит от ресурсной наработки машины и может служить критерием качественной оценки работоспособности коллекторных машин, а увеличение на порядок напряжений радиопомех, например, для начальной частоты защищаемого диапазона 0,15 МГц, наглядно демонстрирует, что дальнейшая эксплуатация электрической машины невозможна.

В четвертой главе на основе проведенного анализа возможных причин возникновения высокочастотных радиопомех 8 коллекторной электрической машины постоянного тока разработана структурная иерархическая модель системы обеспечения электромагнитной совместимости включающая показатели качества, основные факторы, влияющие на помехообразование, конструктивные и эксплуатационные параметры электрической машины, и взаимосвязи между ними.

На рис. 5 представлена обобщенная структурная иерархическая модель обеспечения качественной электромагнитной совместимости электрических машин постоянного тока малой мощности, на нижнем уровне которой расположены конструктивные и эксплуатационные параметры, определяющие уровни составляющих электромагнитной совместимости, представленные на следующем уровне. Обеспечение этих параметров в ходе проектирования и конструирования электрической машины или при разработке дополнительных помехоподавляющих устройств позволяет в свою очередь получить составляющие электромагнитной совместимости в требуемых пределах, которые определяются допустимыми уровнями показателей качества (напряжение и ток радиопомехи по цепи питания электрической машины, электрическая и магнитная составляющие напряженности поля генерируемого высокочастотными пульсациями).

Рассмотрена методика определения относительной важности каждого элемента, рассчитаны коэффициенты относительной важности элементов структурной модели.

На основании структурной иерархической модели, используя метод определения коэффициентов влияния наиболее важных конструктивных и эксплуатационных параметров на уровни показателей обеспечения, разработана математическая модель прогнозирования уровней обеспечения электромагнитной совместимости. При разработке математической модели обеспечения качественной электромагнитной совместимости в качестве выходных данных использованы единичные показатели качества

электромагнитной совместимости, которые устанавливаются государственными и отраслевыми стандартами, техническими условиями и характеризует работу электрической машины, а именно допустимые уровни

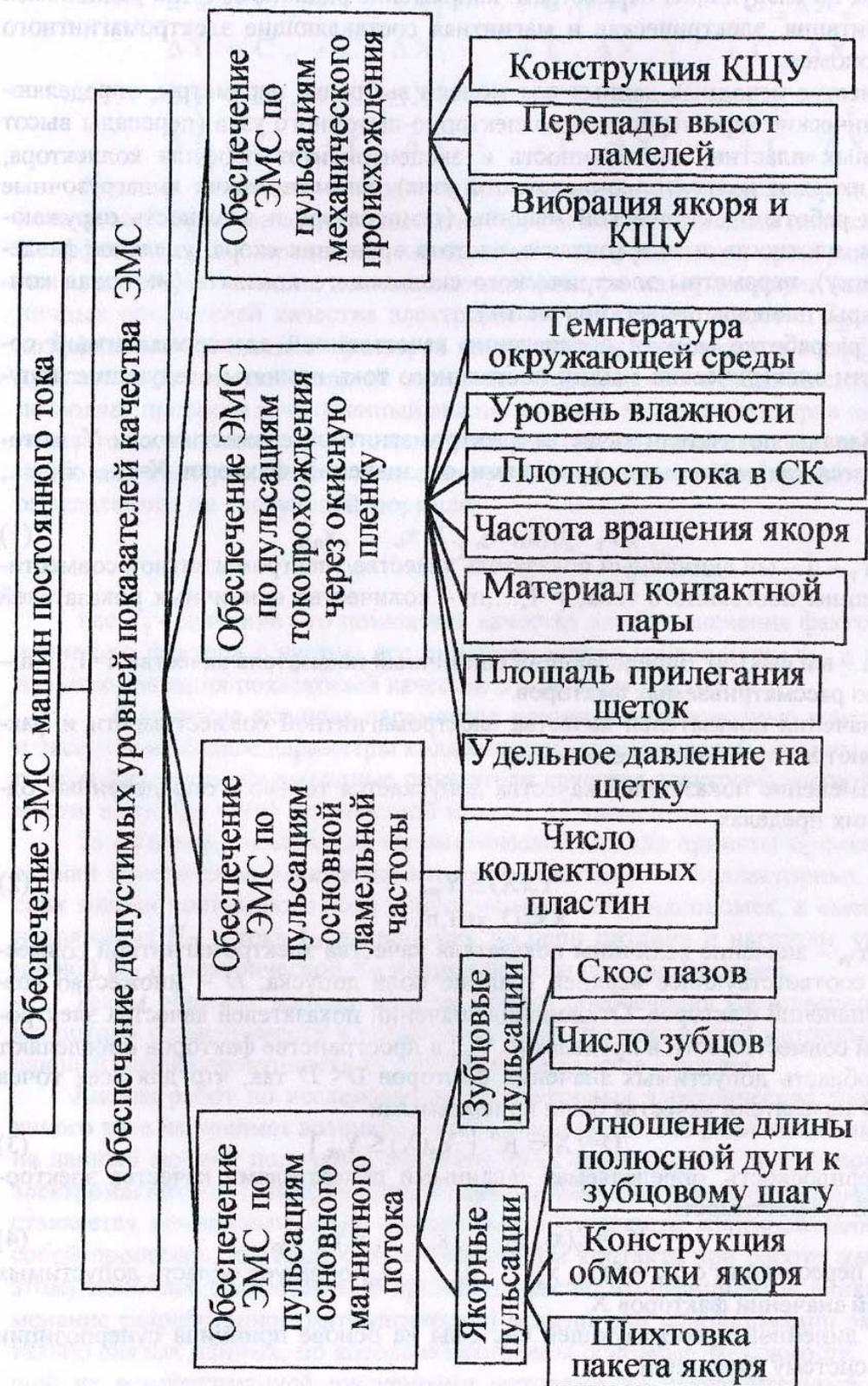


Рис. 6. Структурная схема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) в электрических машинах постоянного тока

радиопомех по следующим параметрам; напряжение радиопомех, ток радиопомех по цепи питания, электрическая и магнитная составляющие электромагнитного поля радиопомех.

В качестве исходных данных для модели выбраны: параметры, определяющие механические характеристики коллекторно-щеточного узла (перепады высот коллекторных пластин, эллиптичность и эксцентриситет профиля коллектора, вибрация якоря и коллекторно-щеточного узла), климатические и нагрузочные параметры работы электрической машины (температура и влажность окружающей среды, плотность тока в контакте, частота вращения якоря, удельное давление на щетку), параметры электрического скользящего контакта (материал контактной пары, площадь прилегания щеток).

При разработке модели обеспечения качественной электромагнитной совместимости электрических машин постоянного тока приняты следующие допущения.

1. Заданы показатели качества электромагнитной совместимости Y_γ которые являются непрерывными функциями от значений факторов $X=(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$,

$$Y_\gamma = f_\gamma(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (1)$$

где Y_γ - j - ый единичный показатель качества электромагнитной совместимости машины постоянного тока; $\gamma=1, \dots, m$ - количество единичных показателей качества;

x_i - i - ый фактор, определяющий единичный показатель качества; $i=1, \dots, n$ - количество рассматриваемых факторов.

2. Значения показателей качества электромагнитной совместимости и факторов являются случайными величинами.

3. Изменение показателей качества допускается только в определенных односторонних пределах

$$\begin{aligned} Y_\gamma(X) < Y_{\gamma s}, \\ X \in D, \gamma=1, m, \end{aligned} \quad (2)$$

где $Y_{\gamma s}$ - значение величины показателя качества электромагнитной совместимости, соответствующее верхней границе поля допуска; D - множество возможных значений факторов. Отклонения значений показателей качества электромагнитной совместимости в пределах $[0, Y_{\gamma s}]$ в пространстве факторов определяют связную область допустимых значений факторов $D \subset D$ так, что для всех точек области D показатели качества были приемлемыми

$$D = \{X \in R^n \mid Y_\gamma(X) < Y_{\gamma s}\} \quad (3)$$

Гиперплоскость, определяемая заданными показателями качества электромагнитной совместимости

$$Y_\gamma = f_\gamma(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) = Y_{\gamma s} \quad (4)$$

при пересечении с $Y_\gamma = f_\gamma(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ образует область допустимых изменений значений факторов X .

Для линейной преобразующей системы на основе принципа суперпозиции запишем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \Delta Y &= C_{10} + C_{11} \Delta X_1 + \dots + C_{1j} \Delta X_j + \dots + C_{1n} \Delta X_n \\ \Delta Y &= C_{20} + C_{21} \Delta X_1 + \dots + C_{2j} \Delta X_j + \dots + C_{2n} \Delta X_n \\ \Delta Y &= C_{\gamma 0} + C_{\gamma 1} \Delta X_1 + \dots + C_{\gamma j} \Delta X_j + \dots + C_{\gamma n} \Delta X_n \\ \Delta Y &= C_{m0} + C_{m1} \Delta X_1 + \dots + C_{mj} \Delta X_j + \dots + C_{mn} \Delta X_n \end{aligned} \right\} (5)$$

Система уравнений описывает формирование чувствительности единичных показателей качества электромагнитной совместимости машин постоянного тока. Коэффициенты $C_{\gamma i}$ определяют передаточные коэффициенты преобразующей системы, отражают влияние того или иного фактора на суммарную величину единичных показателей качества электромагнитной совместимости. $C_{\gamma i}$ называются коэффициентами влияния факторов на показатели качества или коэффициентами чувствительности показателей качества. Определение коэффициентов влияния позволяет провести качественный анализ влияния входных факторов на выходные показатели, выделить те из них, к которым те или иные выходные показатели наиболее чувствительны, и дать оценку их взаимосвязи. Коэффициенты влияния определяются по следующей формуле:

$$C_{\gamma j} = \frac{Y_{\gamma} - Y_{j'n}}{x_i - x_{in}} \cdot \frac{x_{in}}{Y_{\gamma n}} \quad (6)$$

где Y_{γ} - значение j -го показателя качества для i -го значения фактора; x_i - значение i -го фактора с учетом его действительного отклонения; $Y_{\gamma n}$ и x_{in} - номинальные значения показателей качества и основных факторов.

В качестве входных параметров принимаются основные конструктивные и эксплуатационные параметры коллекторной электрической машины постоянного тока влияющие на выходные показатели качества электромагнитной совместимости, всего, согласно структурной модели, 17 элементов.

За выходные показатели математической модели приняты применяемые для оценки обеспечения электромагнитной совместимости коллекторных электрических машин постоянного тока допустимые уровни радиопомех, а именно уровни напряжения $U_{\text{п}}$ и тока $I_{\text{п}}$ радиопомех по цепи питания и нагрузки, уровни магнитной $H_{\text{п}}$ и электрической $E_{\text{п}}$ напряженности поля радиопомех.

Таким образом, математическая модель обеспечения качественной электромагнитной совместимости в общем виде представлена в виде матрицы, представляющей собой совокупность $17 \cdot 5 = 85$ коэффициентов влияния.

Анализ работ по исследованию коллекторных электрических машин постоянного тока на предмет возникновения высокочастотных радиопомех показал, что на данный момент получение аналитических зависимостей между показателями электромагнитной совместимости и параметрами электрической машины не представляется возможным из-за значительной сложности взаимосвязанных между собой процессов, протекающих в скользящем контакте при работе машины. Поэтому наиболее целесообразно проводить расчет коэффициентов влияния и применение разработанной математической модели

при использовании экспериментально снятых данных, по которым построены основные зависимости, с дальнейшей их аппроксимацией численными методами на вычислительной технике с применением существующих на данный момент программных продуктов, например пакетов математической обработки экспериментальных данных Numery[®] 3.1, Curve Expert[®] 1.35, математической среды MathCad[®]. Другим путем является использование методов планирования эксперимента с дальнейшей обработкой полученных результатов с применением аппарата математической статистики.

Предложенная методика позволяет при наличии наработанного экспериментального материала по производимым сериям коллекторных электрических машин постоянного тока прогнозировать, уже на стадии проектирования, влияние тех или иных конструктивных или эксплуатационных параметров электрической машины на обеспечение качественной электромагнитной совместимости, что особенно важно при повышении предъявляемых к электрической машине требований по совместимости с различного рода радиоэлектронными системами. В качестве примера расчета, предлагаемой в данной работе, математической модели, были использованы экспериментальные данные полученные при исследовании электромагнитной совместимости на исполнительном электродвигателе постоянного тока Д-550. На базе полученных экспериментальных данных были построены аппроксимирующие зависимости и уравнения кривых, определены коэффициенты влияния некоторых информативных параметров на показатели обеспечения электромагнитной совместимости. Так в качестве входных параметров были использованы пять наиболее информативных параметров, а именно; плотность тока в скользящем контакте J , скорость вращения скользящего контакта V , температура окружающей среды T , влажность окружающей среды H , высота перепадов коллекторных пластин Δh , в качестве выходного показателя были рассмотрены допустимые уровни напряжения радиопомех U_n по цепи питания электрической машины.

Тогда уравнение отклонения выходного показателя на основании (5) запишется следующим образом:

$$\Delta U_n = C_J \cdot \Delta J + C_H \cdot \Delta H + C_T \cdot \Delta T + C_{\Delta h} \cdot \Delta h_{от} + C_V \cdot \Delta V \quad (7)$$

где ΔJ , ΔH , ΔT , $\Delta h_{от}$, ΔV - отклонение входных параметров от их номинальных значений.

1. Для зависимости уровней напряжений радиопомех в коллекторной электрической машине постоянного тока от плотности тока в скользящем контакте J уравнение кривой

$$U_n(J) = a + b \cdot J + c \cdot J^2 \quad (8)$$

где $a=105,97$; $b=-3,287$; $c=0,251$ - коэффициенты формы кривой, выраженные в относительных единицах, децибелах.

Вид полученной экспериментальной и аппроксимирующей кривых говорят о значительном влиянии высокочастотной коммутационной составляющей, имеющей место на завершающем этапе коммутации, когда происходит разрыв остаточного тока в коммутируемой секции и увеличивающейся с ростом плотности тока в контакте.

2. Для зависимости уровней напряжений радиопомех от влажности H

окружающей среды общий вид аппроксимирующей кривой имеет следующий вид:

$$U_n(H) = a + b \cdot H + c \cdot H^2 + d \cdot H^3, \quad (9)$$

где $a=84,38$; $b=-0,95$; $c= - 0,02$; $d=1,2 \cdot 10^{-4}$ - коэффициенты формы кривой, выраженные в относительных единицах, децибелах.

Кривая зависимости уровней напряжений радиопомех от имеет выраженный минимум при уровне влажности окружающей среды 80%, объяснимый характером изменения влажности на токопрохождение в окисной пленке и контактное сопротивление. При значительных уровнях влажности (свыше 80%) уровень напряжения начинает увеличиваться из-за нарушения установившегося состояния окисной пленки, а именно более интенсивного окисления.

3. Для зависимости уровней напряжений радиопомех от температуры T окружающей среды общий вид аппроксимирующей кривой имеет следующий вид:

$$U_n(T) = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3, \quad (10)$$

где $a=115,66$; $b= -1,38$; $c=- 0,021$; $d= - 8,64 \cdot 10^{-5}$ - коэффициенты формы кривой, выраженные в относительных единицах, децибелах.

Кривая зависимости уровней напряжений радиопомех, имеет выраженный минимум при температуре 313 град. К, обусловленный изменением свойств окисной пленки, ее электронной и ионной проводимостью, растущей с повышением температуры при плотности тока выше $2 \cdot 10^4$ А/м². Общий уровень напряжения радиопомех характеризуется величиной коммутационной составляющей присутствующей при разрыве остаточного тока в коммутируемой секции на завершающем этапе коммутации. Дальнейшее повышение температуры вызывает увеличение контактного сопротивления и приводит к росту уровня радиопомех, что объясняется кинетикой образования окисной пленки при увеличении температуры.

4. Для зависимости уровней напряжений радиопомех от высоты перепада коллекторных пластин Δh общий вид аппроксимирующей кривой запишется следующим образом:

$$U_n(\Delta h) = a + b \cdot \Delta h + c \cdot \Delta h^2 + d \cdot \Delta h^3, \quad (11)$$

где $a= 87,185$; $b= 0,377$; $c= - 0,009$; $d= 6,7 \cdot 10^{-5}$ - коэффициенты формы кривой выраженные в относительных единицах, децибелах.

5. Зависимость уровня напряжений радиопомех в скользящем контакте электрической машины от скорости вращения представлена в следующем виде:

$$U_n(V) = \frac{a + b \cdot V}{1 + c \cdot V + d \cdot V^2}, \quad (12)$$

где $a= 90,327$; $b= - 3,527$; $c= - 0,046$; $d= 9,4 \cdot 10^{-5}$ - коэффициенты формы кривой, выраженные в относительных единицах, децибелах.

Равномерное увеличение уровня напряжения радиопомех с повышением скорости вращения объясняется ростом ламельной составляющей высокочастотных пульсаций напрямую зависящей от частоты оборотов, количества ламелей и диаметра коллектора, совместно с незначительным увеличением пульсаций в токопереходе через окисную пленку.

Тогда выражение (7) можно записать в следующем виде:

$$\Delta U_n = 0,022 \cdot \Delta J - 0,09 \cdot \Delta H - 0,05 \cdot \Delta T + 0,093 \cdot \Delta h_{от} + 0,064 \cdot \Delta V \quad (13)$$

На основании полученных коэффициентов влияния можно сказать, что

наиболее сильное влияние на уровень напряжения радиопомех оказывают такие параметры работы электрической машины, как плотность тока в скользящем контакте, температура и влажность окружающей среды, перепады высот коллекторных пластин, причем наибольшее значение оказывает выбор номинальных величин таких параметров, как плотность тока и перепад высот ламелей.

Пятая глава посвящена разработке конструктивных решений по снижению уровней радиопомех и искрения коллекторных электрических машин постоянного тока на основе обеспечения равномерного распределения емкости по коллектору с одновременным увеличением собственной емкости шунтирующей секции, что позволяет отводить высокочастотные пульсации по наикратчайшему пути через емкости соседних коммутируемых коллекторных пластин на заземленный вал машины. Коммутируемую секцию шунтируют несколько собственных емкостей электрической машины. Образуя суммарную емкость, которая складывается из собственной емкости секции (C_c), емкости между ламелями коллектора (C_k) и половинной емкости секции относительно корпуса машины ($C_{кр}/2$):

$$\sum C = C_c + C_k + C_{кр}/2 \quad (14)$$

Распределение суммарных емкостей шунтирующих секций относительно коллекторных пластин в машинах, выпускаемых серийно, имеет характер кривой 1 представленной на рис. 6, где $C_{макс}$ - суммарная емкость между соседними коллекторными пластинами, $C_{мин}$ - суммарная емкость между диаметрально противоположными пластинами. Таким образом, имеет место неравномерное распределение емкости, относительно коллекторных пластин, что не позволяет замыкать противоположные по знаку высокочастотные пульсации от разнополярных щеток. Вследствие этого, для эффективного подавления генерируемых в коллекторном узле высокочастотных пульсаций и обеспечения качественной электромагнитной совместимости машин постоянного тока необходимо создать равномерное распределение емкостей относительно коллекторных пластин. Подобное распределение, представленное кривой 2 на рис. 6, возможно обеспечить путем введения дополнительных емкостей (C_d). Значения дополнительных емкостей должно удовлетворять требованию:

$$C_c + C_k + C_{кр}/2 \leq (5-10)\% \cdot C_d \quad (15)$$

При соблюдении указанного требования собственной емкостью секции, емкостью относительно корпуса машины и емкостью между пластинами коллектора по сравнению с дополнительно вводимыми емкостями можно пренебречь. Таким образом, обеспечивая равномерное распределение емкости по коллектору, можно добиться эффективного подавления радиопомех непосредственно в источнике их генерации и обеспечить в свою очередь качественную электромагнитную совместимость коллекторных электрических машин с радиоэлектронными системами различного назначения. На рис. 7 представлены экспериментально снятые уровни напряжений радиопомех исполнительного двигателя Д-550 без фильтра (кривая 1), с промышленным фильтром (кривая 2) и с дополнительно вводимыми емкостями (кривая 3). Из

рис. 7 видно, что при обеспечении равномерного распределения емкости по коллектору (кривая 3), уровни напряжений радиопомех у электродвигателя в 12 - 15 раз ниже, чем у электрической машины только с промышленным фильтром (кривая 2).

На рис. 8-10 представлены разработанные конструкции, которые позволяют в широком диапазоне варьировать создаваемые дополнительно вводимые емкости, что позволяет обеспечить равномерное распределение емкости по коллектору.

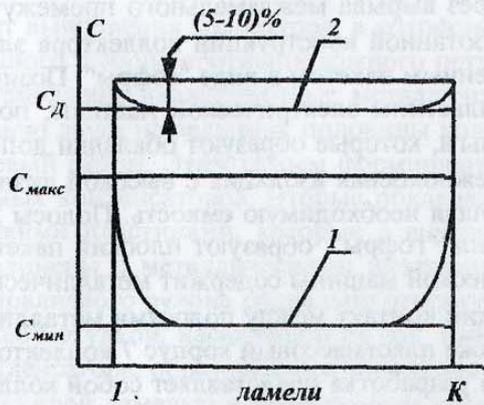


Рис. 6. Распределение суммарной емкости

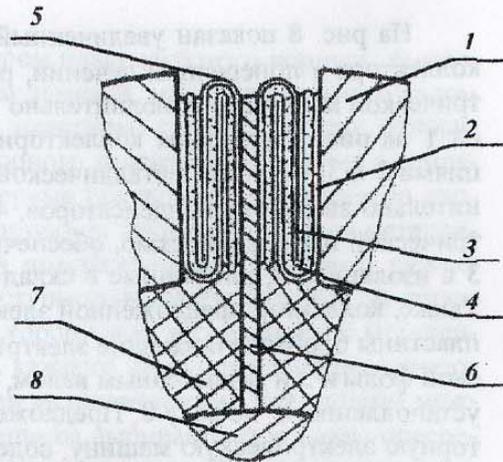


Рис. 8. Поперечный разрез коллектора с дополнительно введенным пакетом в виде "гофры"

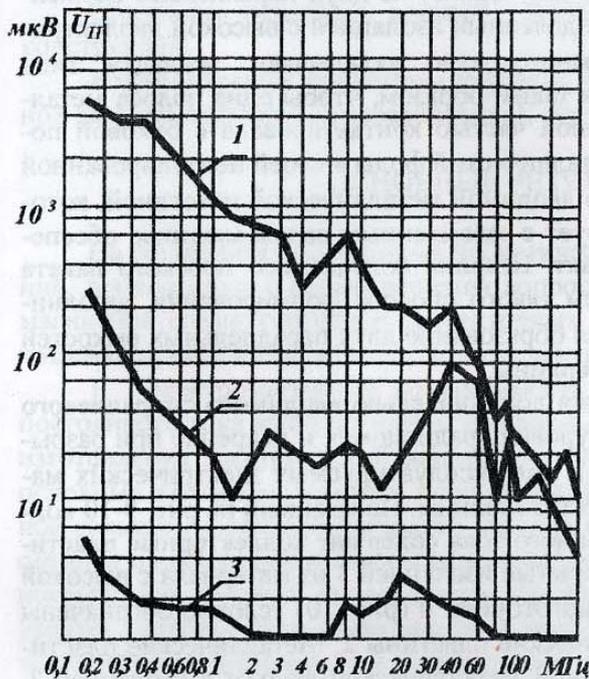


Рис. 7. Уровни напряжений радиопомех двигателя Д-550: (1) - без фильтра, (2) - с промышленным фильтром, (3) - с дополнительно вводимыми емкостями

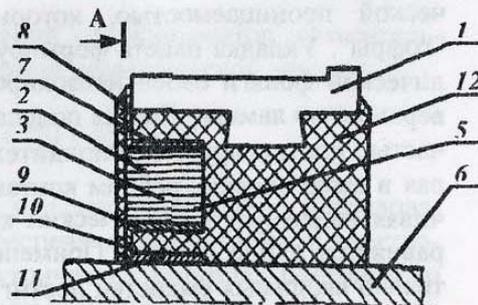


Рис. 9. Коллектор с дополнительно введенным спиральным рулоном

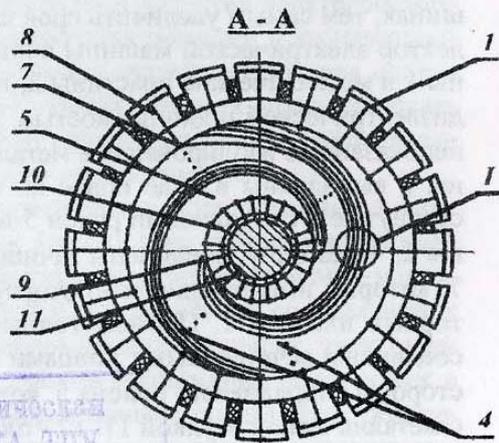


Рис. 10. Поперечный разрез коллектора

Научно-техническая
БИБЛИОТЕКА ТИУ
00 - 3130

На рис. 8 показан увеличенный разрез вырыва межламельного промежутка коллектора в поперечном сечении, разработанной конструкции коллектора электрической машины с дополнительно введенным пакетом в виде "гофры". Позицией 1 на рис. 8 показаны коллекторные пластины электрической машины, позициями 2 и 3 - полосы металлической фольги, которые образуют обкладки дополнительно вводимых конденсаторов, 4 - межполосная изоляция с высокой диэлектрической проницаемостью, обеспечивающая необходимую емкость. Полосы 2 и 3 с изоляцией 4, уложенные в складку типа "гофры", образуют плоский пакет 5. Также, коллектор предложенной электрической машины содержит металлические пластины 6, обеспечивающие электрический контакт между полосами металлической фольги 3 и заземленным валом, а также пластмассовый корпус 7 коллектора, установленного на валу 8. Предложенная разработка представляет собой коллекторную электрическую машину, содержащую вал с размещенным на нем коллектором. В пластмассовом корпусе коллектора укреплены ламели и дополнительные металлические пластины. Между ламелями и дополнительной металлической пластиной установлен плоский пакет, полученный из двух параллельно сложенных полос металлической фольги и разделенных изоляцией с высокой диэлектрической проницаемостью, которые многократно укладывают в складку типа "гофры". Укладка пакета формируется таким образом, чтобы одна полоса металлической фольги своей незащищенной частью контактировала с боковой поверхностью ламели. Другая полоса металлической фольги своей незащищенной частью контактирует с дополнительно вводимой металлической пластиной, которая в свою очередь ребром контактирует с заземленным валом машины, обеспечивая надежный электрический контакт. Ширина получаемого плоского пакета равняется длине ламели. Применением такого способа формирования дополнительно вводимых емкостей достигается образование двух параллельных емкостей с каждой ламели на заземленный вал машины.

Другая разработанная конструкция дополнительно вводимого спирального рулона (рис. 9-10), позволяет снизить уровень радиопомех и искрение при разрыве коммутируемой секции со щеткой в уже эксплуатируемых электрических машинах, тем самым увеличить срок службы машины. Показанный на рис. 9-10 коллектор электрической машины постоянного тока содержит коллекторные пластины 1 и металлические пластины 2, покрытые изоляцией 3 из материала с высокой диэлектрической проницаемостью. Многоточием 4 (рис. 10) условно обозначены непоказанные изолированные металлические пластины 2. Металлические пластины 2 выполнены в виде полос из тонкой металлической фольги с изоляцией 3, свернутые в спиральный рулон 5 вокруг вала 6 машины. Металлические пластины 2, через одну, соединены зачищенными концами с металлическими штырями 7, которые имеют радиально отогнутые части 8, соединенные с торцами коллекторных пластин 1. Промежуточные изолированные металлические пластины 2 соединены зачищенными концами с металлическими штырями 9, с внутренней стороны спирального рулона 5, которые имеют отогнутые части 10, соединенные с металлической втулкой 11. 12 - пластмассовый корпус коллектора.

Равномерное распределение емкостей достигается образованием дополнительной емкости с каждой коллекторной пластины на заземленный вал машины за счет выполнения коллектора, в котором в проем пластмассового корпуса, выполненного с торца противоположного петушкам ламелей, между ламелями и валом установлены изолированные металлические пластины, сдвинутые друг относительно друга на величину половины коллекторного деления и свернутые в спиральный рулон. Этим самым формируются первые обкладки дополнительно вводимых конденсаторов. Вторые обкладки образуются промежуточными металлическими пластинами, которые с внутренней поверхности спирального рулона соединены с металлическими штырями, выступающие части которых за торец спирального рулона радиально отогнуты в сторону вала и соединены с металлической втулкой, насаженной на вал. Емкость каждого дополнительно введенного конденсатора, образованного изолированными металлическими пластинами между каждой ламелью и заземленным валом машины выбирают из условия обеспечения равномерного распределения емкости по коллектору. Причем создание необходимых емкостей варьируется количеством витков спирального рулона, обеспечивая необходимую площадь обкладок создаваемых конденсаторов.

Освещены основные вопросы технологии изготовления рекомендуемых конструкций.

В приложении приведены таблицы значений коэффициентов относительной важности элементов разработанной структурной иерархической модели.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований, проведенных с целью решения вопроса обеспечения качественной электромагнитной совместимости в коллекторных электрических машинах постоянного тока малой мощности, можно сделать следующие основные выводы.

1. Электромагнитная совместимость коллекторных электрических машин постоянного тока является одним из критериев обеспечивающих оценку качества изготовления электрической машины, а также ее работоспособности. Выявлены основные взаимосвязи между основными показателями качества электромагнитной совместимости электрической машины с ее конструктивными и эксплуатационными параметрами и на основе анализа этих взаимосвязей разработана единая комплексная система, позволяющая на стадии проектирования прогнозировать уровни радиопомех в электрической машине и сравнивать с предъявленными техническими требованиями по электромагнитной совместимости.

2. Проведены экспериментальные и теоретические исследования влияния основных конструктивных и эксплуатационных факторов на уровни показателей электромагнитной совместимости, а именно, исследованы уровни токов и напряжений радиопомех по цепям питания, магнитной и электрической составляющих напряженности электромагнитного поля радиопомех коллекторных электрических машин постоянного тока. Выявлено, что уровни напряжений радиопомех в электрической машине являются наиболее

информативным показателем обеспечения качества электромагнитной совместимости коллекторных электрических машин и может служить количественной оценкой, позволяющей обоснованно проектировать электрическую машину согласно требованиям по электромагнитной совместимости, предъявляемым радиоэлектронными системами совместно с которыми используется электрическая машина.

3. На основании проведенного анализа основных причин возникновения высокочастотных радиопомех в коллекторных электрических машинах постоянного тока разработана структурная модель обеспечения качественной электромагнитной совместимости. Элементы и взаимосвязи полученной структурной иерархической модели описывают сложную систему которой является электрическая машина постоянного тока имеющая в своих цепях скользящий электрический контакт с протекающими в нем коммутационными процессами, сопровождающиеся искро- и дугообразованием.

4. Построена математическая модель обеспечения качественной электромагнитной совместимости коллекторных электрических машин постоянного тока на основании разработанной структурной иерархической модели, и предложена методика оценки и прогнозирования показателей качества электромагнитной совместимости на основе экспериментальных данных и определении численных коэффициентов, наглядно показывающих количественную связь между показателями качества и конструктивными и эксплуатационными параметрами электрической машины.

5. Впервые были предложены способы формирования дополнительно вводимых конденсаторов, позволивших варьировать в широких пределах суммарные емкости, шунтирующие секции относительно коллекторных пластин, что позволяет обеспечить требуемую качественную электромагнитную совместимость электрических машин постоянного тока, путем достижения оптимального и равномерного распределения емкости по коллектору.

6. Впервые разработаны устройства, осуществляющие подавление радиопомех непосредственно в местах их возникновения и снижение искрения коллекторных электрических машин постоянного тока малой мощности, а также технология их изготовления, которые обеспечивают равномерное распределение емкости по коллектору. Данные устройства позволяют замыкать по наикратчайшему пути высокочастотные пульсации, возникающие под разнополярными щетками, а также увеличить емкость, шунтирующую секцию в процессе коммутации. Ток, разрываемый между коллекторной пластиной и сбегающей щеткой на завершающем этапе коммутации, замыкается по наикратчайшему пути через емкости соседних пластин, облегчая работу сбегающего края щеточного контакта, стремясь поддержать напряжение секции постоянным, что приводит к уменьшению амплитуд перенапряжений.

Разработанная конструкция с дополнительно вводимым пакетом емкостей в виде спирального рулона может устанавливаться на уже эксплуатируемых электрических машинах при повышении предъявляемых требований. Разработанные устройства, защищенные патентами, обеспечивают снижение искрения и уровня радиопомех коллекторных электрических машин постоянного тока в 4-6 раз во всем защищаемом диапазоне радиочастот от 0,15

МГц до 1000 МГц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ
ПУБЛИКАЦИЯХ.

1. Григорьев Р.В., Селяев А.Н. Повышение электромагнитной совместимости коллекторных электрических машин постоянного тока по цепям питания// Третья областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии": Тез. докл. - Томск; ТПУ, 1997.-С. 133-134.
2. Селяев А.Н., Григорьев Р.В. Влияние ресурсной наработки на уровень электромагнитной совместимости машин постоянного тока// Четвертая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии": Тез. докл. - Томск: ТПУ, 1998. - С. 185-186.
3. Селяев А.Н. Григорьев Р.В. Иерархическая модель обеспечения качества электромагнитной совместимости в машинах постоянного тока малой мощности// "Решетневские чтения": Материалы Междунар. науч.-практ. конф. - Красноярск: САА, 1998. Вып. 2. - С. 124.
4. Патент № 2118023 РФ, МПК 6 Н 01 R 39/04, Коллекторная электрическая машина с низким уровнем радиопомех/А.Н. Селяев, О.П. Муравлев, Р.В. Григорьев // Открытия. Изобретения. 1998. № 23.
5. Патент № 2125758 РФ, МПК 6 Н 01 R 39/04, Н 02 К 13/10, Коллекторная электрическая машина /А.Н. Селяев, О.П. Муравлев, Р.В. Григорьев// Открытия. Изобретения. 1999, № 3.
6. Структурная модель обеспечения качественной электромагнитной совместимости машин постоянного тока/ Р.В. Григорьев, А.Н. Селяев// Томский политехнич. ун-т. - Томск, 1998. - 16 с.: ил.-2. деп. в ВИНТИ 03.03.99. №641-В99.
7. Обеспечение качественной электромагнитной совместимости бортовых исполнительных двигателей постоянного тока/ Р.В. Григорьев, А.Н. Селяев// "XXV Гагаринские чтения": Материалы Междунар. молодеж. науч. конф. - М.: МАТИ, 1999.-С. 102-103.
8. Коллекторная электрическая машина с улучшенной электромагнитной совместимостью/ А.Н. Селяев, Р.В. Григорьев// Пятая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии": Тез. докл. -Томск: ГПУ, 1999. -С. 89-91.