

На правах рукописи



Клыжко Евгений Николаевич

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
КОММУТАЦИИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МАЛОЙ
МОЩНОСТИ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2011

Работа выполнена на кафедре Электропривода и электрооборудования
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Качин С.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Обрусник В.П.

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник Богданов А.А.

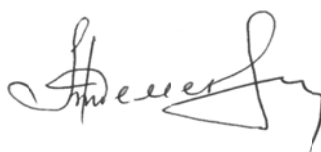
Ведущая организация: ОАО «СКБ СИБЭЛЕКТРОМОТОР»

Защита диссертации состоится « 29 » декабря 2011 года в 15.00 часа на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.11 при ФГБОУ ВПО НИ ТПУ «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в ауд. 217 8-го учебного корпуса по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО НИ ТПУ «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634034, ул. Белинского, 55 или на сайте: www.lib.tpu.ru

Автореферат разослан « 25 » ноября 2011 года.

Ученый секретарь
совета по защите докторских и
кандидатских диссертаций,
к.т.н., доцент



Ю. Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Коллекторные электродвигатели являются широко регулируемыми электрическими машинами и используются там, где необходимы большая перегрузочная способность, регулирование в широких пределах частоты вращения, малая масса и габариты. Поскольку в исследуемом классе универсальных коллекторных электрических машин (КЭМ) отказ коллекторно-щеточного узла (КЩУ) ввиду износа его элементов составляет до 48% от общего числа отказов данного типа машин, то основным техническим ограничением совершенствования этих двигателей остаётся проблема снижения коммутационной напряжённости.

Расчет и конструирование коммутационных элементов машин продолжают содержать эмпирическую основу, так как классическая теория не может дать строго обоснованный и практически приемлемый метод расчёта коммутации для случаев, когда щётки перекрывают несколько коллекторных пластин, в условиях возросших величин реактивных ЭДС, скорости вращения коллектора и температуры КЩУ.

По проблеме коммутационной напряжённости КЭМ выполнено множество экспериментальных и теоретических исследований. Большой вклад в изучение данной проблемы внесен рядом таких исследователей, как: В.С. Хвостов, В.Д. Авилов, А.С. Курбасов, Р.Ф. Бекишев, Л.Я. Зиннер, С.И. Качин, И.В. Плохов, А.И. Скороспешкин, И.И. Туктаев, В.В. Харламов, и многими другими.

В последнее время основное внимание уделяется исследованиям механической природы коммутационной напряжённости, оставляя в стороне электромагнитную составляющую, которая оказывает существенное влияние на процесс коммутации. Обычно при расчёте электромагнитных параметров коммутируемых секций принимаются следующие допущения: значения собственной и взаимной индуктивностей считаются постоянными, а при расчёте ЭДС используется фиксированная кривая распределения магнитного поля в воздушном зазоре КЭМ. Однако нелинейность магнитной системы, геометрия зубцовой зоны и неравномерное распределение плотности тока по пазам якоря оказывают существенное влияние на картину магнитного поля КЭМ и, как следствие, на мгновенные значения электромагнитных параметров. Таким образом, указанные допущения не применимы по отношению к высоконагруженным коллекторным электрическим машинам малой мощности в силу их устройства и условий работы.

Разработка новых конструкций КЭМ, применение индукторов с анизотропией магнитных свойств, разработка новых типов обмоток якоря ставят задачу более адекватной оценки электромагнитных факторов, влияющих на протекание процесса коммутации. В то же время в связи с ростом требований к уровню коммутационной напряжённости предприятия-изготовители нуждаются в программных продуктах, позволяющих на стадии проектирования осуществлять отработку кон-

струкций основных элементов машин с применением вычислительных экспериментов для улучшения основных технических показателей изделий.

Таким образом, необходимо создание и реализация в программном комплексе адекватной расчётной модели коммутационных процессов в коллекторных электрических машинах постоянного и переменного тока, в максимальной степени учитывающей влияние на процесс коммутации основных факторов электромагнитной и механической природы.

Объектом исследования являются коллекторные электрические машины постоянного и переменного тока малой мощности.

Предметом исследования является методическое и алгоритмическое обеспечение для исследования коммутационных процессов КЭМ.

Целью диссертационной работы является повышение ресурса работы щёток КЭМ малой мощности постоянного и переменного тока путём выбора их конструктивных параметров на основе моделирования коммутационных процессов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать архитектуру программного комплекса, решающего задачи расчёта коммутации секций якоря и оценки коммутационной напряжённости КЭМ малой мощности на основе наиболее полного учёта факторов механической и электромагнитной природы;
- создать программный модуль для расчёта магнитных полей КЭМ постоянного и переменного тока с разной степенью анизотропии магнитных свойств индуктора;
- создать программный модуль для расчёта механики КЩУ и контактных сопротивлений между щёткой и коллекторными пластинами;
- создать программный модуль для расчёта электромагнитных параметров, коммутируемых секций якоря, позволяющий учитывать различные типы обмотки якоря при работе машины на постоянном и переменном токе;
- разработать программный модуль для поиска оптимальных параметров конструкций элементов КЭМ, в том числе якорных обмоток, в целях уменьшения коммутационной напряжённости;
- разработать программный модуль для прогнозирования ресурса щёток КЭМ с учётом механического состояния скользящего контакта в процессе коммутации и уточнённых электромагнитных параметров коммутируемых секций.

Основные методы научных исследований. Теоретические исследования процесса коммутации электрических машин проводились с применением методов математического моделирования, дифференциального и интегрального исчислений. В процессе расчетов и анализа математических зависимостей применялись специализированные пакеты программы Matlab. Разработка оригинального программного продукта осуществлялась в среде Visual Studio 2010 на языке программирования C# с применением технологий модульного программирования, распределённого и параллельного вычислений. Для проверки корректности алгоритмов и программ использовались данные экспериментов, а также результаты расчетов на ос-

нове коммерческих программ ELCUT и Matlab. Экспериментальные исследования проводились на специально разработанных установках и реальных коллекторных электрических машинах малой мощности.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана оригинальная система взаимосвязанных алгоритмов для расчетной оценки и прогнозирования коммутационной напряженности КЭМ и расчёта ресурса щеток электрических машин малой мощности постоянного и переменного тока с нетрадиционными конструкциями индуктора и обмотки якоря с учетом электрофизических и механических свойств коллекторно-щеточного узла, мгновенных значений собственных и взаимных индуктивностей секций паза якоря.
2. Предложены алгоритмы расчета магнитного поля электрических машин постоянного и переменного тока методом конечных элементов (МКЭ) с введением процедуры уточнения конечного решения, а также вычислений величин индуктивностей и взаимных индуктивностей коммутируемых секций в процессе вращения якоря на основе величин энергии создаваемого ими магнитного поля, в том числе для нетрадиционных конструкций индуктора и обмотки якоря.
3. Выявлены основные закономерности влияния степени насыщения магнитопровода, анизотропии магнитных свойств индуктора и типа обмотки якоря на распределение магнитного поля электрической машины и мгновенные значения ЭДС, собственных и взаимных индуктивностей коммутируемых секций.
4. Исследованы для различных конструкций индуктора и обмотки якоря явления колебания положения физической нейтрали магнитного поля электрической машины вследствие зубчатости якоря, влияющие на величины коммутирующих ЭДС, индуктивностей и взаимных индуктивностей секций якоря.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработанный многофункциональный программный комплекс позволяет на осуществляют расчётную оценку работоспособности коллекторно-щеточного узла, коммутационной напряженности и величины изнашивания щеток в процессе виртуальной наработки на ресурс, что обеспечивает сокращение времени и затрат на проектирование КЭМ малой мощности постоянного и переменного тока.
2. Созданный программный комплекс является инструментом научных исследований, и используется для математического моделирования коммутационных процессов и явлений изнашивания щеток КЭМ постоянного и переменного тока с традиционными и нетрадиционными конструкциями индуктора и обмотки якоря, а также для синтеза КЭМ с оптимальными параметрами коллекторно-щеточного узла, геометрии магнитной системы и архитектуры демпфированных обмоток якоря.

3. На основании виртуальных исследований коммутационных процессов электрических машин малой мощности выработаны рекомендации по выбору конструкций анизотропных индукторов и демпфированных обмоток якоря с улучшенными функциональными свойствами.
4. Предложенные технические решения индуктора с анизотропными магнитными свойствами и демпфированных обмоток якоря обеспечивают снижение энергии искрения под щеткой на порядок и более и увеличение ресурса щёток почти в 5 раз при работе КЭМ на постоянном токе, и в 4 раза при работе на переменном токе в сравнении с традиционными конструкциями.

Реализация результатов работы. Разработанная с участием автора модель изменения токов секций при коммутации и энергий коммутационного искрения, а также созданный на её основе вариант методики расчёта ресурса щёток КЭМ были переданы для использования компании «LG Electronics Inc.». Разработанный в диссертационной работе программный комплекс используется в учебном процессе Томского политехнического университета при подготовке студентов направления 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

Подтверждением реализации результатов диссертационной работы является наличие двух актов о внедрении.

На защиту выносятся:

1. Многофункциональный программный комплекс для расчёта коммутационных параметров параметров КЭМ постоянного и переменного тока малой мощности, позволяющий осуществлять оценку работоспособности коллекторно-щеточного узла, коммутационной напряженности и величины изнашивания щеток в процессе виртуальной наработки на ресурс.
2. Методика и программа расчёта магнитного поля КЭМ при работе на постоянном и переменном токе.
3. Методика и программа расчёта ЭДС коммутируемых секций якоря с учётом трансформаторной ЭДС.
4. Алгоритм и программа расчёта собственных и взаимных индуктивностей коммутируемых секций якоря на основе энергии магнитного поля.
5. Алгоритм и программа оптимизации обмоточных параметров КЭМ с целью снижения их коммутационной напряжённости.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях «Современные техника и технологии» (Томск, 2005, 2011 гг.), «Электромеханические преобразователи энергии» (Томск, 2005, 2007, 2011 гг.), «Электронные и электромеханические системы и устройства» (Томск, ФГУП «НПЦ «Полус» 2006 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе четыре статьи в журналах по списку ВАК, один патент РФ на изобретение и три свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех основных разделов, заключения, списка литературы и приложения.

Общий объем работы составляет 116 страниц, содержит 57 иллюстраций, 10 таблиц, список литературы из 103 наименований, 2 приложения на 21 странице.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и основные задачи работы, охарактеризована научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

В первой главе проведён критический анализ современного программного обеспечения, предназначенного для расчёта магнитного поля и электромагнитных параметров КЭМ.

Анализ существующих программных продуктов показал, что в настоящее время не существует коммерческого программного продукта, позволяющего прогнозировать коммутационную напряженность и ресурс щеток КЭМ малой мощности постоянного и переменного тока, как с традиционными, так и с нетрадиционными конструкциями индуктора и обмотки якоря с учетом электрофизических и механических свойств коллекторно-щеточного узла.

Обзор работ по теме диссертации показал, что наиболее перспективным направлением является разработка программного продукта для расчёта процесса коммутации универсальных коллекторных двигателей, который должен обеспечить:

1. Расчёт электромагнитных параметров коммутируемых секций якоря (собственные и взаимные индуктивности, ЭДС). В расчётах должны быть учтены различные конструкции индуктора и обмоток якоря и нелинейность магнитных свойств материалов.
2. Расчёт скользящего контакта с учётом электрофизических и механических свойств КЩУ.
3. Расчёт коммутационной напряжённости и жизненного цикла щёток КЭМ.
4. Возможность поиска оптимальных параметров основных элементов КЭМ в целях снижения коммутационной напряжённости.

Для достижения указанных целей предложена структура единого программного комплекса (рис. 1), реализация которого потребовала как доработки алгоритмов ранее разработанных, с участием автора, модулей (1, 2, 6, 7, 8), так и разработки в полном объёме новых модулей (3, 4, 5, 9). Кроме того, потребовалось обеспечить согласованное взаимодействие всех модулей комплекса путём создания соответствующей программной структуры верхнего уровня.

Таким образом, были определены задачи по разработке методик и алгоритмов расчёта электромагнитных параметров коммутируемых секций, а также по взаимной увязке всех новых и разработанных ранее алгоритмов в одном программном комплексе, предназначенном для проведения расчёта процесса коммутации, оценки коммутационной напряжённости КЭМ и ресурса работы щёток.

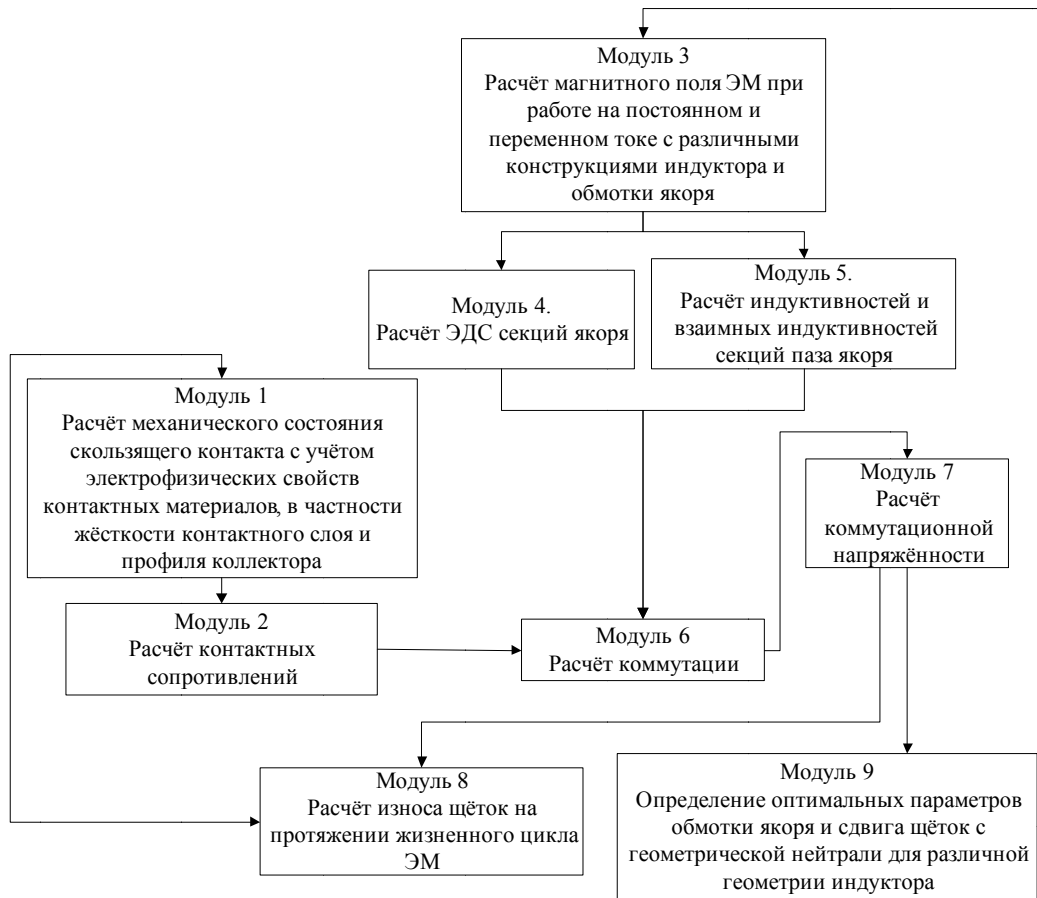


Рис. 1. Структура единого программного комплекса расчёта коммутационных параметров КЭМ
Во второй главе рассматривается методика и алгоритм расчёта магнитного поля КЭМ постоянного и переменного тока методом конечных элементов (МКЭ).

Полагая распределение магнитного поля вдоль пакета якоря постоянным, расчёт ведётся в поперечном сечении КЭМ с учётом нелинейности магнитной системы, а также реальной геометрии и распределения источников тока.



Рис. 2. Варианты исследуемых КЭМ с индукторами с различной анизотропией магнитных свойств (размеры по осям координат указаны в метрах).

В качестве примера для расчёта и анализа распределения магнитного поля выбран двигатель ПК-58 с тремя вариантами индуктора с различной степенью

анизотропии магнитных свойств индуктора (мси): ПК-58-1, ПК-58-2, ПК-58-3 (рис. 2). В расчётах использовались два типа якорной обмотки: серийная и демпфированная. Рассматриваемая демпфированная обмотка в общем случае состоит из секций, каждая из которых представляет собой две или три катушки, смещённые по пазам якоря относительно друг друга.

Моделирование нелинейности материалов статора и якоря КЭМ обеспечивается заданием основной кривой магнитной проницаемости с учётом шихтовки пакета якоря и статора.

Для решения проблемы сходимости системы нелинейных алгебраических уравнений, получаемой в рамках МКЭ, разработан алгоритм, комбинирующий нелинейную и линейную модели расчёта PDE Matlab.

Адекватность работы разработанного алгоритма проверялась сравнением с расчётами, проводимыми в системе ELCUT. Отклонение в расчётах не превысило 5% при работе в условиях сильного насыщения магнитной системы, когда погрешность решения является максимальной.

Конечной целью расчётов магнитного поля является получение трёхмерного массива значений распределения магнитной индукции в поперечном сечении КЭМ, которое описывается как: $B = f(\alpha, i_a, r)$, где α – геометрический угол поворота якоря, i_a – изменение тока параллельной ветви, r – угол по расточке якоря от 0 до 2π . Из данной поверхности, например, можно вычислить распределение магнитной индукции в зазоре КЭМ $B_{\text{вз}} = f(\alpha, i_a, r)$ для дальнейшего расчёта ЭДС коммутируемых секций.

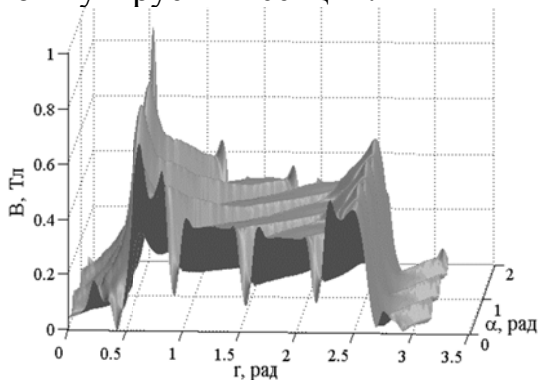


Рис. 3. Распределение индукции в воздушном зазоре на полюсном делении КЭМ при номинальном значении тока параллельной ветви $B_{\text{вз}} = f(\alpha, r)$

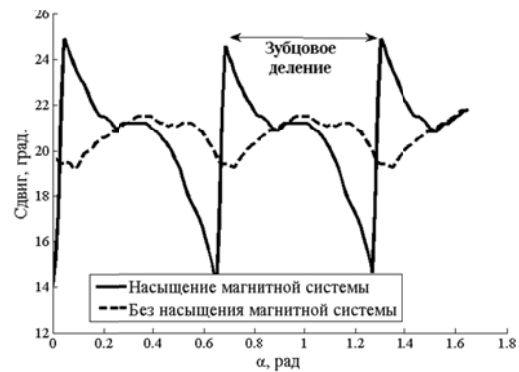


Рис. 4. Зависимость сдвига физической нейтрали от угла поворота якоря

Результаты расчётов $B_{\text{вз}} = f(\alpha, i_a, r)$, проведённых при номинальном токе параллельной ветви (рис. 3) показали, что средние значения магнитной индукции отличаются от значений, полученных аналитическим путём по традиционной методике для исследуемого типа КЭМ на 9-12% в зависимости от угла поворота якоря.

Следует заметить, что расчёт поверхности $B = f(\alpha, i_a, r)$ занимает продолжительное время. Для сокращения времени проводимых расчётов в программном

комплексе реализована технология распределённых вычислений, что позволило ускорить расчёт в несколько раз.

Результаты расчётов магнитного поля показали, что зубчатость якоря оказывает существенное влияние на положение физической нейтрали, вследствие чего наблюдаются её колебания, амплитуда которых достигает для исследуемого двигателя 16° при насыщении магнитной системы (рис. 4). Выявлено, что значения колебаний физической нейтрали зависят от анизотропии индуктора и типа обмотки якоря. Поскольку во время коммутации в области физической нейтрали находится как минимум один из пазов, в котором лежат витки катушки коммутируемой секции, то подобные колебания положения физической нейтрали оказывают существенное влияние на мгновенные значения ЭДС этой секции.

В результате исследований установлено, что влияние анизотропии магнитных свойств индуктора на распределение магнитного поля существенно зависит как от степени насыщения магнитопровода, зубчатости якоря, сдвига щёток с геометрической нейтрали, так и от типа якорной обмотки. Поскольку ЭДС и индуктивность коммутируемых секций, в свою очередь, зависят от распределения магнитного поля, то целесообразность применения той или иной конструкции индуктора следует рассматривать с точки зрения обеспечения оптимальных величин электромагнитных параметров коммутируемых контуров, позволяющих достигать минимального износа щёток.

Таким образом, разработанный подход к расчёту магнитного поля электрических машин постоянного и переменного тока является достаточно гибким и удобным инструментом, позволяющим с погрешностью в 9-12% получать распределение индукции магнитного поля по расточке якоря в зависимости от положения якоря и тока параллельной ветви для дальнейшего моделирования процесса коммутации КЭМ при различных конструкциях индуктора и обмоток якоря.

В третьей главе рассматриваются методики расчета ЭДС, а также собственной и взаимной индуктивностей коммутируемых секций обмоток якоря различной конструкции при работе КЭМ на постоянном и переменном токе.

Расчёт ЭДС, возникающей в коммутируемых секциях, производится на основе поверхности распределения индукции в воздушном зазоре электрической машины $B_{\delta} = f(\alpha, i_a, r)$. В этом случае ЭДС, наводимая в отдельной катушке секции паза якоря, представляет собой суммарную ЭДС:

$$e_k = \omega_k \frac{d\Phi_{\delta}}{dt} = e_{ep} + e_{mp}, \quad (1)$$

где Φ_{δ} - результирующий магнитный поток поля главных полюсов и поперечной реакции якоря, сцепленный с катушкой секции; e_{ep} - ЭДС вращения; e_{mp} - трансформаторная ЭДС; ω_k - число витков катушки секции.

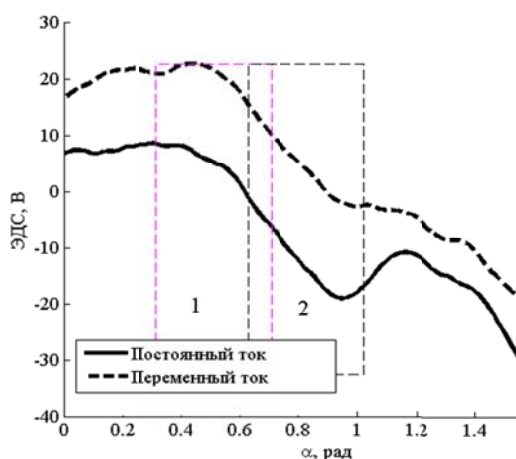


Рис. 5. ЭДС секций паза серийной обмотки якоря (цифрами 1 и 2 обозначены области коммутации 1 и 2 секции паза)

В то же время при работе машины в области насыщения суммарная ЭДС отличается от ЭДС вращения не более, чем на 10%.

Особый интерес представляет расчёт собственных и взаимных индуктивностей секций якоря КЭМ в процессе коммутации, который предлагается проводить через величину энергии магнитного поля, согласно выражению:

$$L_s = \frac{2W_s}{I_s^2}, \quad (2)$$

где W_s - собственная энергия магнитного поля секции I_s .

Собственная энергия магнитного поля секции рассчитывается на основании данных триангуляции расчётной области и распределения магнитного поля в поперечном сечении электрической машины:

$$W_s = L_s \sum_{i=1}^n \frac{B_{si}^2 S_i}{2\mu_{ai}}, \quad (3)$$

где B_{si} - магнитная индукция, обусловленная работой секции в i -м треугольном элементе; μ_{ai} - абсолютная магнитная проницаемость среды секции в i -м треугольном элементе; S_i - площадь i -го треугольного элемента.

Соответственно, взаимная индуктивность двух секций якоря рассчитывается, исходя из выражения для энергии двух контуров с током по формуле:

$$M_{12} = M_{21} = \frac{W_{12} - W_1 - W_2}{I_1 I_2}, \quad (4)$$

где W_1, W_2 - собственные энергии секций якоря; W_{12} - взаимная энергия обеих секций якоря; I_1, I_2 - токи, протекающие в секциях.

Таким образом, для расчёта собственной индуктивности секции якоря необходимо определить распределение магнитного поля, создаваемого этой секцией.

На рис. 5 приведены кривые значений ЭДС секций паза якоря, рассчитанные при работе машины на постоянном токе номинального значения и переменном токе в нулевой начальный момент времени (с фазы переменного тока, равной 0). Анализ результатов расчёта ЭДС показал, что вклад e_{mp} существенно зависит от угла сдвига щёток, типа обмотки якоря и степени насыщения магнитной системы машины. Так, из результатов расчётов следует, что в области слабого насыщения магнитной системы вклад величины суммарной ЭДС в зоне коммутации на переменном токе может в несколько раз превышать ЭДС вращения.

Аналогично для расчёта взаимной индуктивности двух секций якоря необходимо определить распределение магнитного поля, создаваемого как каждой, так и обеими секциями.

Было выявлено, что магнитный поток, создаваемый током одной или двух секций якоря мал относительно общего магнитного потока, и отключение даже двух секций, как правило, не приводит к существенному изменению нелинейности магнитной системы (среднее значение магнитной проницаемости остаётся неизменным). Учитывая вышесказанное, предлагается методика расчёта индуктивностей, позволяющая в наибольшей степени учесть нелинейность магнитной системы КЭМ:

1. Рассчитывается распределение магнитной индукции B_0 , обусловленное работой всех обмоток КЭМ.
2. Искусственно отключается одна или две секции, и ещё раз считается распределение индукции B_1 .
3. Разница между этими двумя индукциями магнитного поля $B = B_0 - B_1$ принимается за индукцию магнитного поля, обусловленную работой одной или двух секций.
4. По формуле (3) рассчитывается соответствующая энергия, и получаем собственную индуктивность по формуле (2). Аналогично, рассчитав необходимые энергии магнитного поля, получаем взаимную индуктивность по формуле (4).

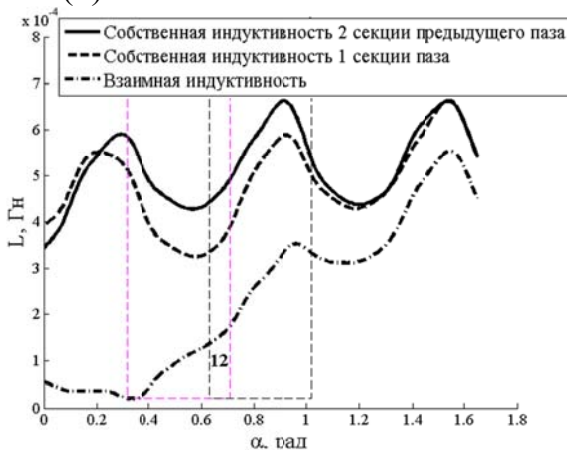


Рис. 6. Собственные ($L = f(\alpha)$) и взаимная ($M = f(\alpha)$) индуктивности секций разных пазов якоря (серийная обмотка якоря, цифрами 1,2 обозначена область их совместной коммутации)

В конечном итоге рассчитываются поверхности изменения собственных и взаимных индуктивностей секций паза как функции от угла поворота якоря и тока параллельной ветви: $L = f(\alpha, i_a)$ и $M = f(\alpha, i_a)$.

В качестве примера на рис. 6 представлены графики изменения индуктивностей секций разных пазов якоря при номинальном токе параллельной ветви. Поскольку время совместной коммутации секций мало по сравнению со временем коммутации отдельной секции, то в дальнейшем большее внимание уделяется анализу изменений собственных индуктивностей. В качестве факторов, характеризующих коммута-

ционные процессы, удобно использовать не мгновенные значения их электромагнитных параметров, а их средние значения за период коммутации: $E_{cp} = f(i_a)$,

$$L_{cp} = f(i_a) \text{ и } M_{cp} = f(i_a).$$

Выявлено, что величина влияния анизотропии магнитных свойств индуктора якоря на ЭДС секций паза существенно зависит от угла сдвига щёток с ГН и степени насыщения магнитной системы (рис. 7). В случае сдвига щёток против вращения якоря анизотропия магнитных свойств индуктора приводит к выравниванию средних значений ЭДС коммутируемых секций паза якоря, что должно положительно сказаться на коммутационных свойствах машины.

Кроме того проведённые исследования показали, что анизотропия магнитных свойств индуктора при прочих равных условиях приводит к уменьшению мгновенных значений индуктивностей в зоне коммутации секций паза до 10%.

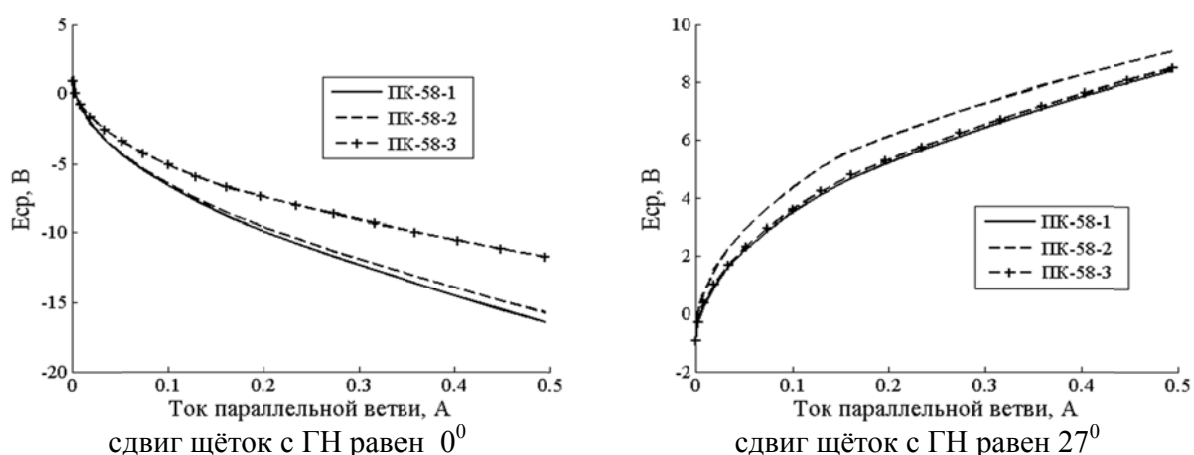


Рис. 7. $E_{cp} = f(i_a)$ второй секции паза при различном типе индуктора (серийная обмотка якоря)

Анализ результатов расчёта показал, что применение демпфированной обмотки оказывает существенное влияние на ЭДС секций паза (рис.8) и приводит к выравниванию средних значений ЭДС секций паза якоря, что положительно сказывается на процессе протекания коммутации. Степень оказываемого влияния существенно зависит от угла сдвига щёток с ГН и степени насыщения магнитной системы.

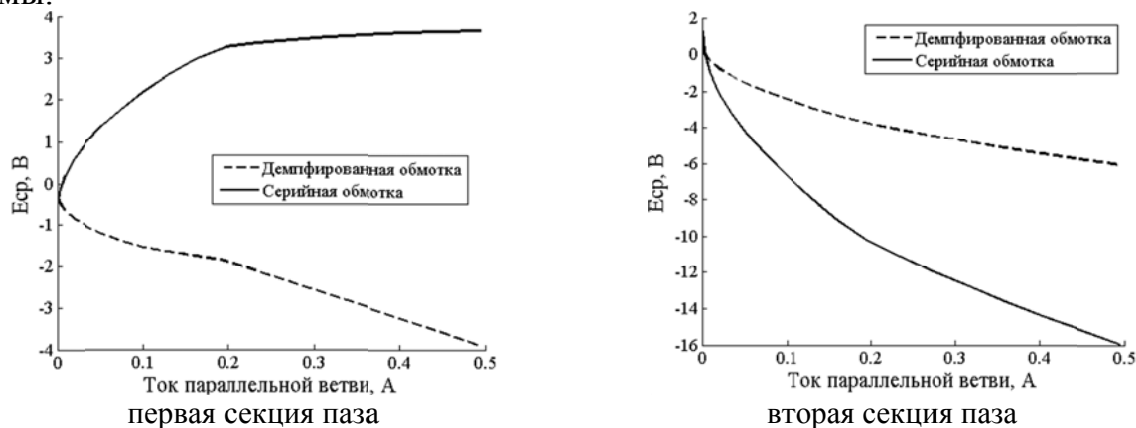


Рис. 8. $E_{cp} = f(i_a)$ (сдвиг щёток с ГН равен 0°)

Как показал проведённый анализ результатов расчётов, применение демпфированной обмотки якоря оказывает значительное влияние и на индуктивности

коммутируемых секций, приводя к их численному уменьшению. Анализ расчётных кривых (рис. 9а) показывает, что с увеличением тока параллельной ветви средние значения собственных и взаимных индуктивностей секций уменьшаются и нивелируется различие между значениями собственных и взаимных индуктивностей для различных типов обмотки якоря. Также следует заметить, что различия в значениях индуктивностей существенно зависят от угла поворота якоря КЭМ (рис. 9б).

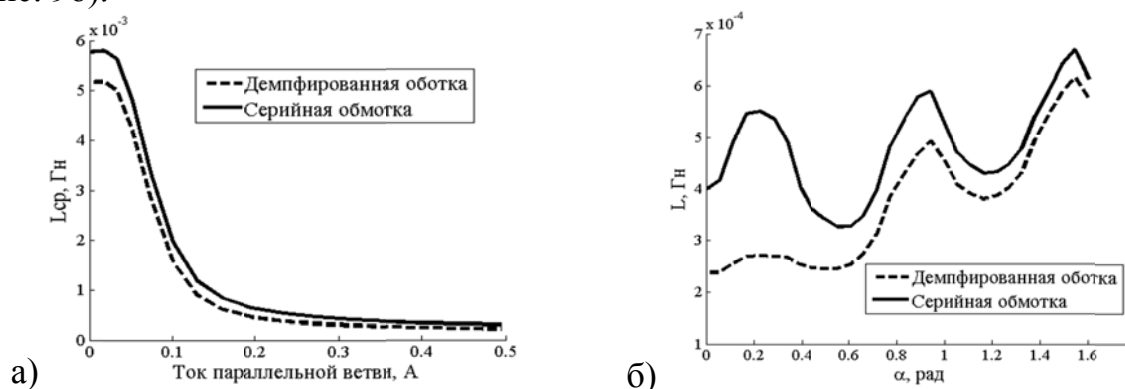


Рис. 9. Собственная индуктивность первой секции паза (сдвиг щёток с ГН равен 0^0):

а) $L_{cp} = f(i_a)$ при работе КЭМ на переменном токе, б) мгновенные значения собственных индуктивностей при работе КЭМ на постоянном токе в номинальном режиме

Таким образом, в результате проведённых виртуальных исследований установлено, что нелинейность магнитной системы, анизотропия индуктора, тип обмотки якоря и угол сдвига щёток с ГН оказывают существенное влияние на мгновенные значения ЭДС коммутируемых секций, собственных и взаимных индуктивностей. Расчёты показали, что собственная и взаимная индуктивность секций якоря может изменяться до 50% за время коммутации и более чем в 10 раз при изменении значений переменного тока от минимума до максимума.

Учитывая вышесказанное, можно утверждать, что предложенные методики позволяют уточнить расчёт электромагнитных параметров коммутируемых секций и, соответственно, процесса коммутации.

В четвёртой главе описывается методика поиска оптимальных параметров КЭМ, осуществляется численное моделирование коммутационных процессов на протяжении жизненного цикла машины при работе на постоянном и переменном токе и определение ресурса работы щёток.

Автором предложены методики поиска оптимальных параметров КЭМ (угла сдвига щёток с ГН и обмоточных данных якоря) для уменьшения коммутационной напряжённости. Коммутационная напряжённость оценивается на основании значений энергий искрения секций якоря на завершающем этапе коммутации, которые рассчитываются при помощи апробированной методики.

Анализ результатов расчётов мгновенных значений электромагнитных параметров коммутируемых секций паза при работе КЭМ на переменном токе показал, что изменения их мгновенных значений за положительный полупериод изменения тока параллельной ветви по модулю совпадают со значениями за отрица-

тельный полупериод (рис. 10). Следовательно, для анализа коммутации в установившемся режиме работы КЭМ достаточно использовать промежуток времени изменения тока за половину периода его изменения.

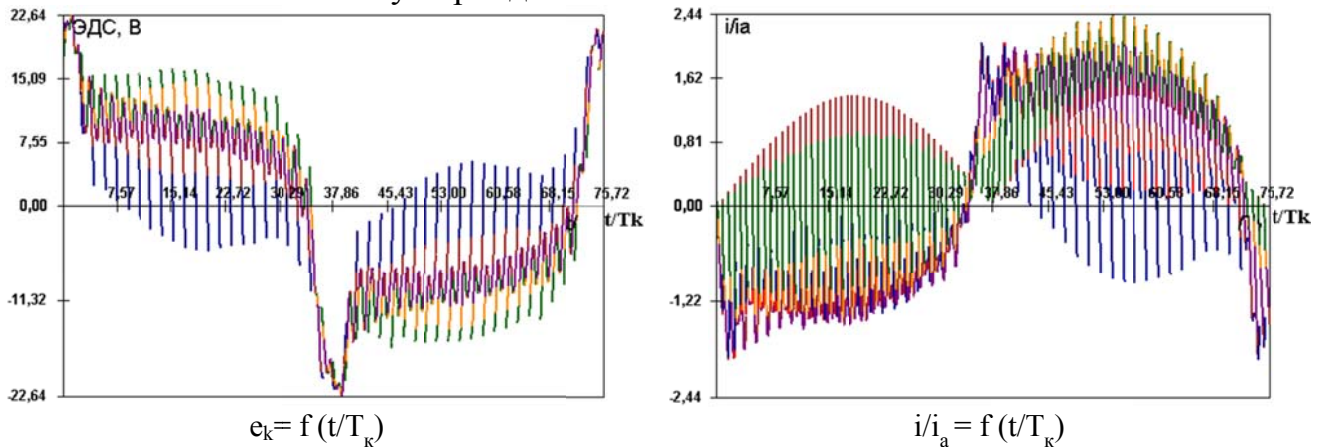


Рис. 10. Мгновенные значения ЭДС и тока секций паза якоря на периоде изменения тока параллельной ветви; серийная обмотка якоря

Таким образом, в качестве конечной оценки коммутационной напряжённости КЭМ используются суммарные значения энергий искрения секций якоря:

- при работе машины на постоянном токе: $W_{\text{сум}} = |W_{p1}| + |W_{p2}|$, здесь $|W_{p1}|$ и $|W_{p2}|$ – абсолютные значения энергий первой и второй секций паза;
- при работе машины на переменном токе: $W_{\text{сум}} = W_{1\text{сум}} + W_{2\text{сум}}$, здесь $W_{1\text{сум}}$ и $W_{2\text{сум}}$ – суммы абсолютных значений энергий секций паза за половину периода изменения тока параллельной ветви КЭМ.

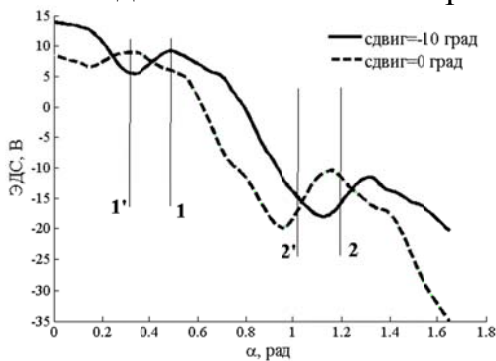


Рис. 11. $E = f(\alpha)$. Серийная обмотка якоря. Цифрами обозначено: 1-2 – обл. коммутации 1 и 2 секций паза при $\varphi=0$; 1'-2' – обл. коммутации 1 и 2 секций с $\varphi=-10^\circ$

В конечном итоге необходимо осуществить поиск такого сочетания параметров КЭМ, при которых достигается минимум суммарной энергии искрения $-\min(W_{\text{сум}})$. В диссертационной работе основной акцент делается на подборе параметров КЭМ, связанных с расчётом магнитной системы: значений угла сдвига щёток с ГН и обмоточных данных якоря.

В общем случае суммарная энергия выражается функцией:

$$W_{\text{сум}} = f(\varphi, \|\omega\|), \quad (5)$$

где φ – угол сдвига щёток с ГН; $\|\omega_{ij}\|$

$(i=\overline{1,m}; j=\overline{1,n})$ – матрица, описывающая обмоточные данные секций паза; здесь m – количество секций паза якоря, n – количество катушек в секции (каждое значение в строке представляет количество витков в катушке секции, каждый столбец представляет секцию паза).

Поскольку секция серийной обмотки состоит из одной катушки, то в данном случае суммарная энергия искрения является функцией только угла сдвига щёток с ГН: $W_{\text{сум}} = f(\varphi)$.

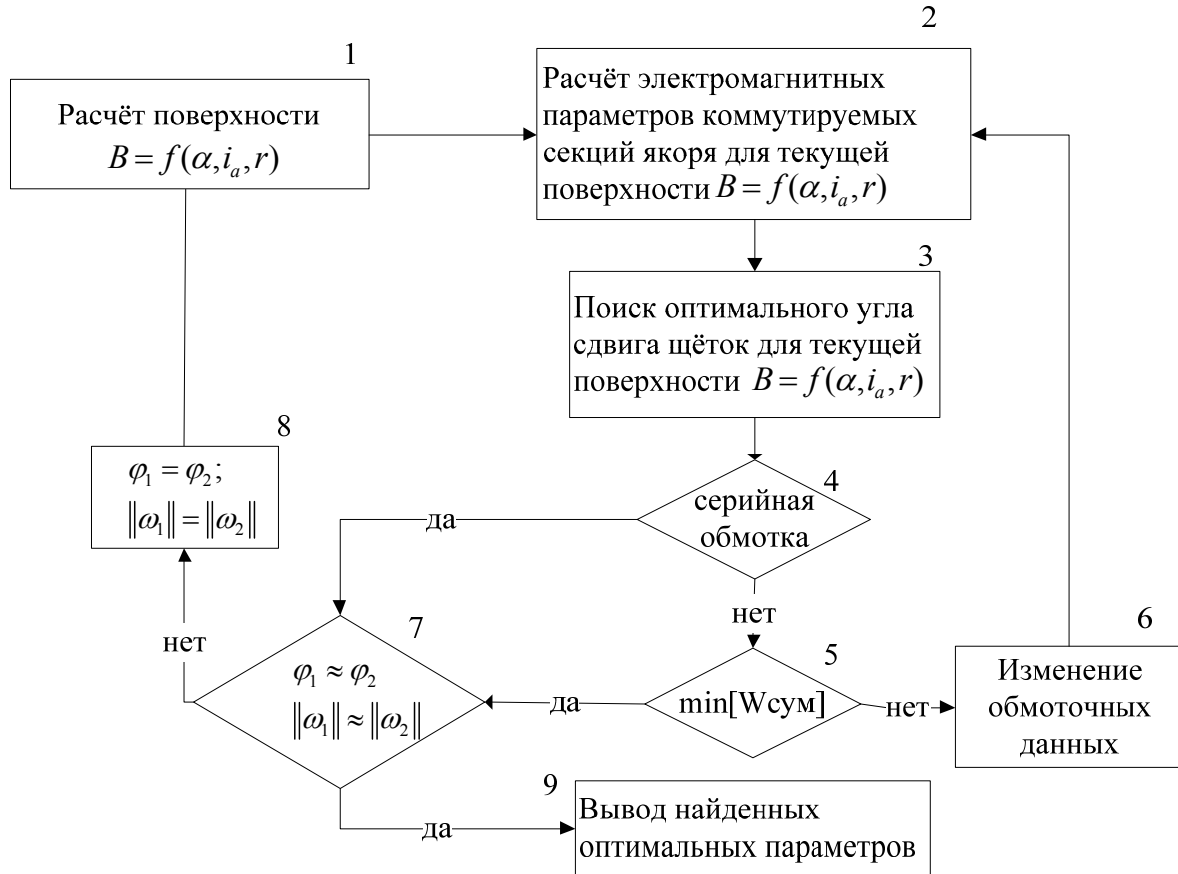


Рис. 12 Алгоритм поиска оптимальных параметров при работе КЭМ на постоянном и переменном токе; в блоках 2-6 происходит поиск оптимальных параметров для случая демпфированной обмотки (в блоке 5 принимается решение о прекращении поиска)

Как показали исследования, электромагнитные параметры секций паза якоря в основном зависят от магнитного потока, создаваемого током других обмоток КЭМ и угла поворота якоря. На рис. 11 приведены графики ЭДС коммутирующих секций паза при различном угле сдвига щёток с ГН, из которых следует, что в области коммутации форма ЭДС одного графика почти эквивалентна форме другого графика, но со сдвигом в 10^0 . Поэтому, если пренебречь изменением магнитного потока, создаваемого током секций паза якоря, то сдвиг щёток с ГН будет соответствовать сдвигу области коммутации на одном графике рис. 11. Таким образом, используя зависимость $E = f(\alpha)$, можно исследовать процесс коммутации при изменении угла сдвига щёток в пределах расчётной кривой.

Исследование магнитного поля КЭМ показало, что в случае применения демпфированной обмотки взаимное изменение числа витков в катушках секции паза в небольших пределах также не приводит к существенному изменению магнитного поля КЭМ. На основании этого разработана методика и алгоритм поиска

оптимальных параметров обмоточных данных якоря, позволяющие подбором соотношения витков в катушках коммутирующих секций паза добиться минимума W_{sum} .

Поскольку для поиска оптимальных параметров коммутируемых секций используется текущий расчёт магнитного поля КЭМ, то это существенно ускоряет процесс поиска, учитывая длительность расчёта самой поверхности магнитного поля. Тем не менее после оценки оптимальных параметров КЭМ в соответствии предложенному алгоритму (рис.12) производится перерасчёт поверхности $B = f(\alpha, i_a, r)$ и соответствующий уточнённый расчёт электромагнитных параметров секций якоря.

В таблице 1 приведены результаты расчётов для серийной обмотки якоря при работе машины на постоянном токе в номинальном режиме, из которых следует, что применение индукторов с анизотропией магнитных свойств оказывает существенное уменьшение коммутационной напряжённости, что выражается в уменьшении суммарной энергии разрыва примерно в 25 раз для индуктора с немагнитной вставкой, и в 3 раза для индуктора с мостиком магнитного насыщения.

Таблица 1

тип индуктора	угол сдвига щёток с ГН, град.	$ W_{p1} + W_{p2} $, Дж
ПК-58-1	$\varphi = -27^0$	8,29e-8
ПК-58-2	$\varphi = -23^0$	3,29e-9
ПК-58-3	$\varphi = -26^0$	2,89e-8

В таблице 2 приведены результаты расчётов для демпфированной обмотки при работе машины на постоянном токе в номинальном режиме, из которых следует, что при их использовании коммутационная напряжённость по сравнению с серийной обмоткой уменьшается примерно в 16 раз при использовании индуктора без анизотропии магнитных свойств и в 6-7 раз с индуктором с анизотропией магнитных свойств.

Таблица 2

тип индуктора	$\ \omega\ $	угол сдвига щёток с ГН, град.	$ W_{p1} + W_{p2} $, Дж
ПК-58-1	$\begin{pmatrix} 63 & 6 \\ 12 & 69 \end{pmatrix}$	$\varphi = -18^0$	5,15e-9
ПК-58-2	$\begin{pmatrix} 61 & 11 \\ 14 & 64 \end{pmatrix}$	$\varphi = -18^0$	5,59e-10
ПК-58-3	$\begin{pmatrix} 63 & 6 \\ 12 & 69 \end{pmatrix}$	$\varphi = -18^0$	3,99e-9

При демпфированной обмотке якоря применение индукторов с анизотропией магнитных свойств позволяет уменьшить суммарную энергию разрыва примерно

в 9 раз для индуктора с немагнитной вставкой, и в 1,3 раза для индуктора с мостиком магнитного насыщения. Кроме того, применение индуктора с анизотропией магнитных свойств приводит к различному оптимальному соотношению витков в катушках секций паза.

В таблице 3 приведены результаты расчётов для серийной обмотки при работе машины на переменном токе, из которых следует, что применение индукторов с анизотропией магнитных свойств уменьшает суммарную энергию разрыва примерно на 14 - 40%.

Таблица 3

тип индуктора	угол сдвига щёток с ГН, град.	$W_{1\text{сум}} + W_{2\text{сум}}$, Дж
ПК-58-1	$\varphi = -27^0$	1,06e-5
ПК-58-2	$\varphi = -27^0$	6,21e-6
ПК-58-3	$\varphi = -27^0$	9,11e-5

Результаты расчётов для демпфированной обмотки показали, что при работе машины на переменном токе оптимальные параметры отличаются от соответствующих значений при работе ЭМ на постоянном токе. Из результатов расчётов для демпфированной обмотки при работе машины на переменном токе (таблица 4) следует, что, в сравнении с серийной обмоткой, демпфированная позволяет уменьшить коммутационную напряжённость почти в 3 раза в случае применения индуктора без анизотропии магнитных свойств. Наибольшее уменьшение суммарной энергии получилось при применении индуктора с мостиком магнитного насыщения и демпфированной обмотки – примерно в 4,5 раза в сравнении с традиционной конструкцией индуктора и обмотки якоря.

Таблица 4

Тип индуктора	$\ \omega\ $	угол сдвига щёток с ГН, град.	$W_{1\text{сум}} + W_{2\text{сум}}$, Дж
ПК-58-1	$\begin{pmatrix} 69 & 0 \\ 6 & 75 \end{pmatrix}$	$\varphi = -18^0$	2,83e-5
ПК-58-2	$\begin{pmatrix} 66 & 6 \\ 9 & 69 \end{pmatrix}$	$\varphi = -18^0$	2,92e-6
ПК-58-3	$\begin{pmatrix} 59 & 0 \\ 16 & 75 \end{pmatrix}$	$\varphi = -18^0$	2,31e-6

Таким образом, приведённые методики поиска оптимальных параметров КЭМ позволяют на стадии проектирования КЭМ подобрать соотношение типа индуктора, обмоточных данных и угла сдвига щёток с ГН при котором достигается наименьшая коммутационная напряжённость и, соответственно, следует ожидать увеличение ресурса КЭМ.

При оценке ресурса КЭМ используется разработанный с участием автора программный модуль расчёта изнашивания щеток, учитывающий характеристики материала щеток и нажимного устройства, жесткости контактного слоя щетка-коллектор, механического состояния КЩУ и подшипниковых узлов. Поскольку полученные предыдущими исследователями экспериментальные данные показали, что коллектор КЭМ малой мощности имеет двукратный запас ресурса в сравнении с ресурсом комплекта щеток, то ресурс КЩУ целесообразно оценивать на основе ресурса комплекта щеток.

Таблица 5

тип индуктора	Серийная обмотка		Демпфированная обмотка	
	Постоянный ток	Переменный ток	Постоянный ток	Переменный ток
ПК-58-1	146 часов	120	676 часов	580
ПК-58-2	276 часов	230	739 часов	640
ПК-58-3	198 часов	215	690 часов	570

В таблице 5 приведены результаты расчёта времени износа щёток КЭМ, из которых следует:

1. Применение индукторов с анизотропией магнитных свойств увеличивает время работы щёток на 26-47% для серийной обмотки при работе машины на постоянном и переменном токе. В то же время изменение обмоточных данных демпфированных обмоток нивелирует влияние анизотропии индуктора на ресурс щёток, которое составляет в данном случае 2-8%.
2. Применение демпфированной обмотки увеличивает время работы комплекта щёток в 2-3 раза в сравнении с серийной обмоткой при работе КЭМ на постоянном токе, и на 30-50% при работе КЭМ на переменном токе.
3. При работе КЭМ на переменном токе наилучший результат дало использование демпфированной обмотки и индуктора с мостиком магнитного насыщения, что привело к увеличению времени работы комплекта щёток примерно в 3,9 раза в сравнении традиционной конструкцией индуктора и обмотки якоря.
4. При работе КЭМ на постоянном токе наилучший результат дало использование демпфированной обмотки и индуктора с немагнитной вставкой, что привело к увеличению времени работы комплекта щёток примерно в 5 раз в сравнении традиционной конструкцией индуктора и обмотки якоря.

Из проведённых исследований следует, что разработанный с участием автора индуктор с мостиком магнитного насыщения может быть более предпочтительным выбором в виду большей технологичности его изготовления, чем индуктор с немагнитной вставкой.

Таким образом, алгоритмы и методики, реализованные в программном комплексе, позволяют подобрать параметры КЭМ, обеспечивающие существенное снижение скорости износа щёток КЭМ, и, соответственно, увеличение их жизненного цикла.

Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

1. На основе разработанных и существующих алгоритмов расчёта коммутации создан программный комплекс, позволяющий на стадии проектирования коллекторных электрических машин постоянного и переменного тока малой мощности осуществлять оценку работоспособности коллекторно-щеточного узла, коммутационной напряжённости и величины изнашивания щеток в процессе виртуальной наработки на ресурс.
2. Предложена методика и алгоритм расчета магнитного поля КЭМ постоянного и переменного тока для нетрадиционных конструкций индуктора и обмотки якоря.
3. Предложены методики расчета величин электромагнитных параметров коммутируемых секций в процессе вращения якоря, в том числе для нетрадиционных конструкций обмоток якоря с учётом реальной картины магнитного поля электрических машин постоянного и переменного тока.
4. Исследованы основные закономерности влияния степени насыщения магнитопровода, анизотропии магнитных свойств индуктора, колебания физической нейтральной оси и типа обмотки якоря на распределение магнитного поля электрической машины, мгновенных значений ЭДС, собственных и взаимных индуктивностей коммутируемых секций якоря.
5. Предложены методики и алгоритмы поиска оптимального угла сдвига щёток с ГН и параметров обмоточных данных в целях минимизации коммутационной напряжённости.
6. На основе численного моделирования коммутационных процессов КЭМ на протяжении их жизненного цикла при работе на постоянном и переменном токе выработаны рекомендации по изменениям в конструкциях индуктора, якорных обмоток и угла сдвига щёток с ГН, обеспечивающие снижение энергии искрения под щеткой приблизительно до 10 раз и увеличение ресурса щёток почти в 5 раз при работе машины на постоянном токе, и почти в 4 раза при работе на переменном токе в сравнении с традиционными конструкциями.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Коммутирующие свойства обмоток якорей коллекторных машин электроприводов на начальном этапе коммутации./ Качин С.И., Боровиков Ю.С.,

- Качин О.С., **Клыжко Е.Н.** // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 5. – С. 136–140.
2. Анализ коммутрующих свойств обмоток якорей электроприводов на завершающей стадии процесса коммутации./ Качин С.И., Боровиков Ю.С., Качин О.С., Саблуков В.Ю., **Клыжко Е.Н.**// Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 103–106.
 3. Моделирование коммутационных процессов коллекторных машин малой мощности с нетрадиционными конструкциями активных элементов./ Клыжко Е.Н.// Электричество, 2009. -№ 12 -с. 71-73
 4. Расчёт электромагнитных параметров коммутируемых секций якоря коллекторных машин переменного тока малой мощности./**Клыжко Е.Н.**, Качин С.И.//Электромеханика, 2011. -№ 6 -с. 80-84

Патенты и свидетельства о регистрации:

5. Пат. 2313879 РФ, МПК H02K 1/14. Сердечник статора коллекторной электрической машины / С.И. Качин, О.С. Качин, **Е.Н. Клыжко**. Заявлено 29.08.2006; Опубл. 27.12.2007, Бюл. № 36. – 15 с.: ил.
6. Программа расчета коммутрующих электродвижущих сил электрической машины малой мощности / С.И. Качин, Ю.С. Боровиков, О.С. Качин, **Е.Н. Клыжко** // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007610892 от 22.02.2007.
7. Программа расчета магнитного поля электрической машины / С.И. Качин, Ю.С. Боровиков, О.С. Качин, **Е.Н. Клыжко** // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007610891 от 22.02.2007.
8. Программа расчета мгновенных давлений в скользящем контакте щетка-коллектор / С.И. Качин, Ю.С. Боровиков, О.С. Качин, **Е.Н. Клыжко** // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2006610773 от 26.02.2006.

Публикации в других изданиях:

9. Математическое моделирование магнитных полей коллекторных машин с анизотропными магнитными свойствами индуктора./ **Клыжко Е.Н.**, Боровиков Ю.С.// «Современные техника и технологии»: Труды XI международной науч.-практ. конф.. – Томск: ТПУ, 2005. – Т. 1. – С. 351–352.
10. Применение расчетных и измерительных комплексов для обеспечения качества электродвигателей для электроинструмента./ Качин С.И., Боровиков Ю.С., **Клыжко Е.Н.**, Саблуков В.Ю., Качин О.С.// «Электромеханические преобразователи энергии»: Труды международной науч.-техн. конф.. – Томск: 20 – 22 октября 2005. – С. 78–81.
11. Моделирование магнитного поля коллекторных электрических машин малой мощности для расчетов процесса коммутации численными методами./ **Клыжко Е.Н.**, Качин С.И., Боровиков Ю.С.// «Электромеханические преобразователи энергии»: Труды международной науч.-техн. конф.. – Томск: 20 – 22 октября 2005. – С. 81–85.

- 12.Расчёт магнитного поля электрической машины с нетрадиционными конструкциями статора./ Качин С.И., Боровиков Ю.С., **Клыжко Е.Н.**// «Электромагнитные процессы в электромеханических преобразователях энергии»: Межвузовский тематический сборник научных трудов. – Омск: ОмГУПС, 2006. – С. 39–44.
- 13.Формирование пространственно – временных зависимостей магнитного потока секций для расчёта коммутационных процессов коллекторных электрических машин./Клыжко Е.Н. // Электронные и электромеханические системы и устройства: Тез. докл. XVII науч.-техн. конф. (20-21 апр. 2006г., г.Томск), Томск:ФГУП «НПЦ «Полус», 2006.-348с.
- 14.Моделирование и расчет индукции магнитного поля в воздушном зазоре электрических машин./ Клыжко Е.Н.// Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной научно-технической конференции - Томск, 17-19 октября 2007. - Томск:, 2007. - с. 98-100
- 15.Расчет собственных и взаимных индуктивностей обмоток коллекторных переменного тока малой мощности с применением программы Matlab./ Клыжко Е.Н.// Совершенствование электромеханических преобразователей преобразователей энергии: Сборник научных трудов, 2010. -с. 50-54
- 16.Исследование влияния реакции якоря на распределение магнитного поля в зазоре коллекторной электрической машины переменного тока малой мощности и на положение физической нейтрали./Клыжко Е.Н.// СТТ-2011
- 17.Клыжко Е.Н. Методика снижения коммутационной напряжённости коллекторных машин переменного тока малой мощности изменением параметров обмотки якоря и сдвига щёток с геометрической нейтрали.// «Электромеханические преобразователи энергии»: Труды международной науч.-техн. конф. – Томск: 12 – 14 октября 2011. – С. 120–123.

Личный вклад автора. Пять работ написаны автором единолично. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: обработка полученных данных [1, 2, 8]; разработка алгоритмов расчёта [4]; реализация части расчётных алгоритмов [5-7, 9-12].