

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ
И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Б.Н. ЕЛЬЦИНА**

Диссертационный совет Д.05.14.488

На правах рукописи
УДК.: 62-592.117: 621.313.13(043.3)

ГАЛБАЕВ ЖАЛАЛИДИН ТОКТОБАЕВИЧ

**РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И РАЗРАБОТКА
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
УСТРОЙСТВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

БИШКЕК - 2014

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Бочкарев Игорь Викторович

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Бекбаев Амангелди Бекбаевич,

- доктор технических наук, профессор
Муслимов Аннас Паясович,

- доктор технических наук, с.н.с.
Брякин Иван Васильевич.

Ведущая организация: **Институт машиноведение НАН КР**

Защита состоится 19 декабря 2014 г. в ауд.118 в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д.05.14.488 при Институте автоматике и информационных технологий Национальной Академии наук Кыргызской Республики и Кыргызско-Российском Славянском университете им. Б.Н. Ельцина по адресу:

720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265, Институт автоматике и информационных технологий

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАИТ НАН КР.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.ф.-м.н



К. Керимкулова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный научно-технический прогресс требует широкого внедрения средств автоматизации и механизации. Особенно интенсивно ускоряются темпы обновления элементов и устройств систем управления, среди которых значительное место занимают силовые исполнительные электромагнитные устройства (ЭМУ). Их работа основана на электромеханическом преобразовании энергии и сигналов: входным сигналом является напряжение определенного вида и величины, а выходным – управляющее воздействие в виде силы или момента на рабочий орган объекта управления. Функциональное назначение таких ЭМУ очень разнообразно. Это дистанционное управление соединением валов и передача вращающего момента от одного вала к другому, быстрое торможение вращающихся валов и ограничение их выбегов после отключения питания, позиционирование рабочих органов, регулирование технологических процессов, протекающих с участием жидкостей и газов, и т.п. В связи с этим ЭМУ широко применяются в различных системах управления (в робототехнических и мехатронных системах, станкостроении, подъемно-транспортных машинах и механизмах, в установках различного назначения для поддержания и регулирования различных технологических параметров и т.д.). Очевидно, что технический уровень и эксплуатационные показатели перечисленного оборудования однозначно определяются параметрами и характеристиками ЭМУ, входящими в их электромеханические системы.

Вопросы теории и расчета ЭМУ изложены в работах М.П. Александрова, О.А. Ряховского, В.Н. Федосеева, Р.А. Агоронянца, М.А. Любчика, С.М. Борисова, Б.К. Буля, Р.В. Вирабова, Л.Б. Гинзбурга, П.Ф. Клубника, Ю.М. Келима, А.Г. Никитенко и др.

Широкое внедрение автоматизации приводит к ужесточению требований, которые предъявляются к системам автоматического управления. Это приводит к необходимости разработки новых, прогрессивных конструкций ЭМУ и схем их управления. Одним из путей улучшения выходных показателей ЭМУ является использование в их приводе постоянных магнитов (ПМ). Очевидно, что для создания научно обоснованных методик расчета таких ЭМУ необходимо разработать теоретическую базу, включающую математические модели, адекватно описывающие реальные физические процессы, протекающие в различных узлах исполнительных электромагнитных устройствах с постоянными магнитами (ЭМУ ПМ) с учетом различных способов управления. Это позволит создавать конкурентно способные ЭМУ ПМ с улучшенными эксплуатационными показателями. Значительный интерес представляют также вопросы диагностики ЭМУ ПМ в процессе эксплуатации, что позволяет повысить надежность работы систем автоматики в целом.

Таким образом, комплексное решение перечисленных вопросов, направленных, в конечном счете, на улучшение технико-экономических показателей ЭМУ ПМ, имеет важное научное и производственно-хозяйственное значение, что и определяет актуальность работы.

Цель работы - создание высокоэффективных исполнительных электромагнитных устройств на базе развития их теории, создании научно обоснованных методик расчета, а также разработки новых технических решений по конструкциям, схемам управления и устройствам диагностики работы, применение которых позволит улучшить эксплуатационные параметры систем управления.

Задачи исследования:

1. Анализ современного состояния вопросов теории и проблем разработки исполнительных силовых ЭМУ, анализ и классификация их конструкций и схем управления.

2. Развитие теоретических основ исполнительных ЭМУ ПМ:

- анализ и математическое описание основных закономерностей рабочего цикла электромагнитного привода ЭМУ ПМ;

- разработка математических моделей электромеханических процессов, протекающих при замыкании и размыкании фрикционного узла, и установившихся и динамических режимов работы электромагнитного привода при питании от источника постоянного напряжения;

- разработка обобщенных математических моделей и алгоритмов расчета переходных процессов, протекающих в исполнительных ЭМУ ПМ при использовании схем управления со встроенными выпрямителями с различными способами формирования требуемых параметров рабочего напряжения, прикладываемого к обмотке управляющего электромагнита;

- разработка методики численного расчета переходных режимов работы ЭМУ ПМ с учетом процесса проникновения электромагнитной волны в сплошной магнитопровод управляющего электромагнита;

- вывод аналитических зависимостей для вычисления вихревого тока, наводимого в магнитопроводе в переходных режимах работы.

3. Разработка новых конструкций, способов и устройств управления исполнительных силовых ЭМУ ПМ различных типов с улучшенными технико-экономическими показателями и расширенными функциональными возможностями, обеспечивающих повышение качества и надежности работы системы управления в целом.

4. Разработка эффективных топологий контактных и бесконтактных устройств диагностики состояния ЭМУ ПМ, обеспечивающих высокую достоверность контроля как за замыканием, так и за размыканием фрикционного узла.

5. Разработка методик расчета и конструирования исполнительных ЭМУ ПМ различных типов, научно-технических рекомендаций по выбору оптимальной топологии схемы управления силовых ЭМУ ПМ и рекомендаций по оптимизации их электромагнитного привода, а также методик расчета их выходных показателей.

6. Разработка компьютерных моделей ЭМУ ПМ и проведение виртуальных исследований, как самих ЭМУ ПМ, так и систем, содержащих ЭМУ ПМ.

7. Проведение экспериментальных исследований для подтверждения достоверности и точности разработанных математических моделей и методик расчета, а также эффективности новых технических решений.

Научная новизна работы:

1. Предложены формулы для описания электромеханических процессов, протекающих в ЭМУ ПМ при замыкании, размыкании и реверсе их фрикционного узла. Предложено математическое описание установившихся процессов работы электромагнитного привода, а также описание его динамических режимов работы при питании от источника постоянного тока.

2. Впервые разработаны обобщенные математические модели и алгоритмы расчета электромагнитных процессов, протекающих в ЭМУ ПМ в установившихся, переходных и квазиустановившихся режимах работы, при использовании различных схем управления со встроенными выпрямителями, разделенных на два класса: с независимой и взаимозависимой формами рабочего напряжения, прикладываемого к обмотке управляющего электромагнита.

3. Разработана методика численного расчета изменения магнитного потока во времени в переходных режимах работы исполнительных ЭМУ ПМ с учетом динамики проникновения электромагнитного поля в нешихтованный магнитопровод, которая обеспечивает повышенную точность вычисления параметров быстрогодействия.

4. Впервые получены аналитические выражения для практических инженерных расчетов вихревого тока, наводимого в магнитопроводе управляющего электромагнита в переходных режимах работы, без применения ЭВМ, что позволяет вычислять обмоточные данные ЭМУ ПМ с учетом размагничивающего действия этого тока.

5. Обоснована новая компоновка активных частей исполнительных ЭМУ ПМ с разветвленной магнитной системой за счет введения дополнительного полюса и предложен выбор рациональной величины воздушного зазора под этим полюсом.

6. Получены аналитические выражения, которые позволяют проводить синтез конструктивных параметров управляющего электромагнита и постоянного магнита при заданном комплексе выходных параметров ЭМУ.

7. Разработана методика расчета рациональных параметров возвратной пружины фрикционного узла, что позволяет обеспечивать требуемые выходные показатели ЭМУ ПМ с учетом колебаний напряжения сети, нестабильности теплового состояния обмотки и разброса технологических параметров.

8. Предложены методики проектирования ЭМУ ПМ различных типов, учитывающие особенности схемы управления и режима работы, а также рекомендации по оптимизации электромагнитного привода исполнительных силовых ЭМУ ПМ и выбору наиболее рационального варианта схемы их управления.

Практическая значимость полученных результатов.

1. Предложены пути улучшения технико-экономических показателей ЭМУ ПМ путем изменения конструкции. В частности, для повышения фрикционного момента предложена конструкция ЭМУ ПМ, имеющая воздушный зазор между внутренним полюсом и якорем. Получено аналитическое выражение для расчета рациональной величины этого зазора.

2. Разработан и запатентован новый способ ручного растормаживания исполнительных силовых ЭМУ ПМ без подачи напряжения на обмотку управляющего электромагнита и предложена конструкция для его реализации.

3. Разработаны и запатентованы следующие схемные решения:

- оригинальная схема управления, обеспечивающая сохранение режима работы ЭМУ ПМ при кратковременных аварийных отключениях питания, имеющая источник оперативного питания в виде конденсатора;

- новый способ управления электромагнитных муфт для реверсивного электропривода с повышенным моментом трения при пуске и реверсе, который исключает проскальзывание полумуфт;

- универсальная система управления электромеханической системой, которая осуществляет предварительное снижение частоты вращения ротора электродвигателя за счет электрического торможения и его последующее механическое торможение и фиксацию за счет фрикционных сил;

- новый способ управления электромагнитными двухсторонними переключающими муфтами с ПМ, который позволяет переводить муфту в нейтральное положение. Это улучшает эксплуатационные свойства и расширяет области применения электромагнитных переключающих муфт.

4. Разработана микропроцессорная схема управления электромеханической системой, содержащей электромагнитную фрикционную муфту, и создана программа работы микроконтроллера для формирования управляющих сигналов.

5. Разработано универсальное тиристорное устройство управления ЭМУ ПМ, которое обеспечивает возможность работы с различными типоразмерами двигателей путем соответствующей подстройки.

6. Разработано устройство диагностики, реализующее контактный способ контроля положения якоря, и получена его наиболее рациональная схема, обладающая защитой от ложных срабатываний.

8. Проведен анализ условий работы фрикционного узла исполнительных силовых ЭМУ ПМ и предложены рекомендации по выбору фрикционных материалов и конструктивного исполнения его элементов.

9. На базе предложенной методики расчета разработан ряд малогабаритных тормозных устройств для промышленных роботов и автоматизированных модулей. Разработанные тормоза соответствуют современному техническому уровню.

10. Разработаны компьютерные модели ЭМУ ПМ и проведены виртуальные исследования, как самих ЭМУ ПМ, так и систем, содержащих ЭМУ ПМ.

На защиту выносятся следующие положения:

1. **Теория исполнительных ЭМУ ПМ**, включающая математическое описание электромеханических процессов, протекающих при замыкании и размыкании их фрикционного узла, а также математическое описание установившихся и динамических режимов работы электромагнитного привода при питании от источника постоянного тока.

2. **Обобщенные математические модели и алгоритмы расчета** электромагнитных процессов, протекающих в ЭМУ ПМ в установившихся, переходных и квазиустановившихся режимах работы, при использовании различных схем управления, в том числе с форсировкой с независимой и взаимозависимой формами рабочего напряжения питания.

3. **Методика численного расчета переходных режимов работы ЭМУ ПМ** с учетом динамики проникновения электромагнитного поля в нешихтованный магнитопровод, которая позволяет вычислять параметры быстрогодействия ЭМУ ПМ с учетом реального изменения магнитного потока во времени.

4. **Методика вычисления величины вихревого тока**, наводимого в магнитопроводе в переходных режимах работы, что позволяет проводить расчеты ЭМУ ПМ с учетом размагничивающего действия вихревого тока.

5. **Методики расчета и конструирования** различных типов исполнительных ЭМУ ПМ, учитывающие особенности схемы управления и режима работы.

6. **Компьютерные модели механической и электрической частей ЭМУ ПМ** при различных схемах управления, учитывающие изменение индуктивности при изменении положения якоря управляющего электромагнита.

7. **Технические решения**, в том числе защищенные патентами на изобретения, касающиеся конструкций ЭМУ ПМ, способов и схем их управления и устройств диагностики работы, которые улучшают их технические показатели, расширяют эксплуатационные возможности, а также повышают качество и надежность работы автоматизированных систем управления в целом.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы получены автором лично под руководством научного консультанта. Результаты, приведенные в работах с соавторами, получены при непосредственном участии автора и заключаются в разработке новых конструкций ЭМУ ПМ и схем управления, их математических и компьютерных моделей, а также в проведении исследований и анализе полученных результатов.

Реализация результатов. 1. На Майлуу-Сууйском электроламповом заводе в 2010 г. в машинах для навивки моноспиралей внедрены тормозные ЭМУ ПМ, содержащие схему форсированного управления, защищенную патентом КР № 1037. За счет этого снизился расход вольфрамовой проволоки и молибденового керна, что обеспечило значительный экономический эффект.

2. На ОАО «Ак-Тилек» г. Бишкек в 2012 г. в приводе оборудования «Термопласт-автомат» внедрены однодисковые фрикционные муфты с магнитоэлектрическим приводом, а также способ управления, защищенный патентом КР № 1057.

3. На ТЭЦ г. Ош (на механическом участке) в 2012 году внедрен позиционный электропривод переменного тока, защищенный патентом КР № 1037.

4. Разработанные вопросы теории и расчета ЭМУ ПМ используются в учебном процессе кафедры «Электромеханика» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждены и доложены на следующих научно-технических конференциях:

- Международной НТК «Энергосбережение – проблемы, современные технологии и управление» (КТУ, Бишкек, 2004 г.);
- Международном научно-техническом симпозиуме «Образование через науку» (КТУ, Бишкек, 2004 г.);
- Международной НТК «Инновации в образовании, науке и технике» (КГТУ им И. Раззакова, Бишкек, 2006);
- 2-й Международной НТК «Проблемы управления и информатики» (Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР Бишкек 2007);
- Международной НТК «Энергетика – проблемы и перспективы» (КГТУ им И. Раззакова, Бишкек, 2007);
- Международной НТК «Проблемы автоматизации, управления, экономики и подготовки кадров для современных производств» (филиал БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Бишкек, 2008);
- Международной НТК «Современные состояние и актуальные проблемы развития энергетики» (КУУ, Ош, 2008 г.);
- Международной НТК «Наука, образование, инвестиции: приоритетные направления развития» (КГТУ им И. Раззакова, Бишкек, 2009);
- IV Международной НТК «Электромеханические преобразователи энергии» (ТПУ, Томск, 2009);
- Международной НТК «Проблемы управления и информационных технологий» (ИАНАН КР, Бишкек, 2010 г.);
- Всероссийской НТК «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования», (ТПУ, Томск, 2010 г.);
- Международной НТК «Рахматулинские чтения» (Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР, Бишкек, 2011 г.);
- 7-ой Всероссийской НТК с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов» (Амурский государственный университет, Благовещенск, 2013 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 44 печатные работы, в том числе 3 монографии (одна в личном авторстве), 36 статей, из них 25 в изданиях, рекомендованных ВАК КР, 12 в иностранных изданиях (9 в ближнем зарубежье и 3 в дальнем зарубежье) и 9 в личном авторстве, а также 5 патентов на изобретения (2 в личном авторстве).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и четырех приложений, содержит 285 страниц основного текста, 111 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 171 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность тематики и сформулированы конечная цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность работы, а также основные положения, выносимые на защиту. Кроме того, приведена информация о реализации и апробации полученных результатов.

В первой главе приведены сведения о функциональном назначении исполнительных силовых электромагнитических устройств с постоянными магнитами, рассмотрены и проанализированы базовые конструкции и рабочие режимы различных типов ЭМУ ПМ, описаны области и примеры их применения, предложена классификация по функциональному назначению (рис.1).

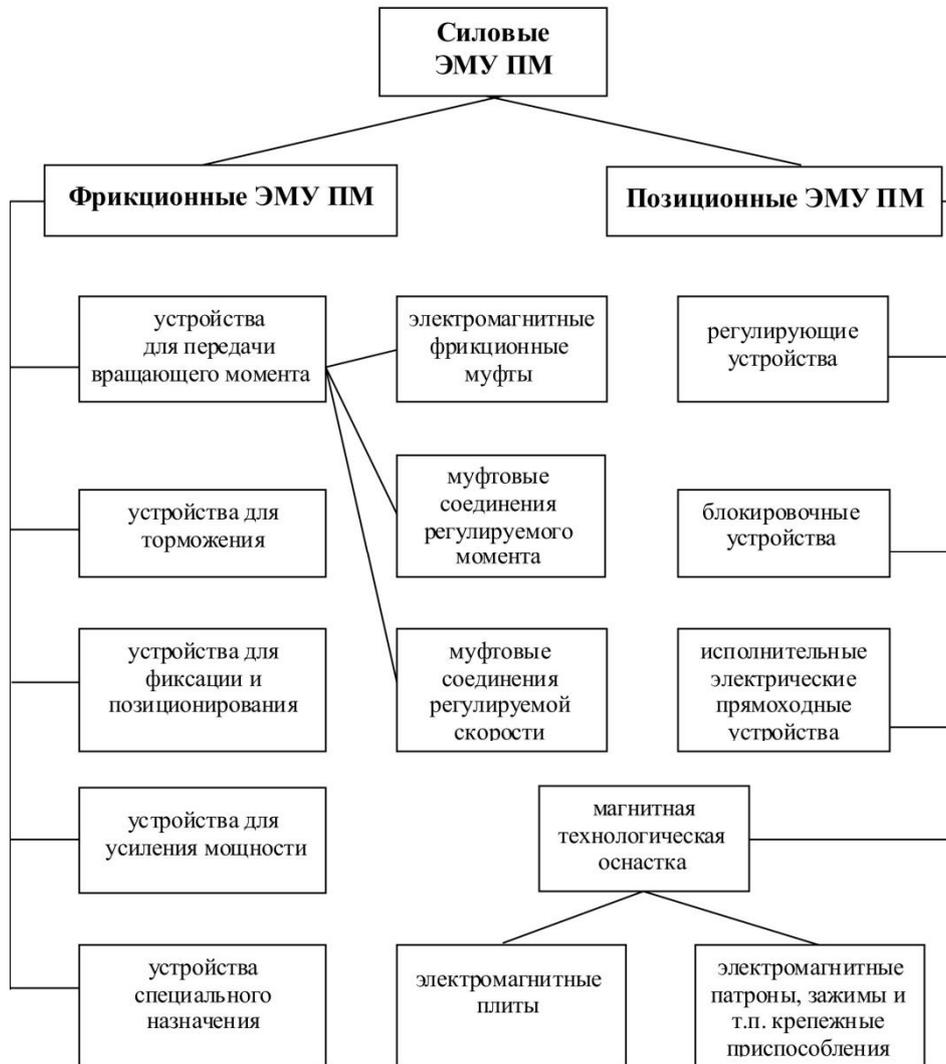


Рис.1. Классификация исполнительных силовых ЭМУ ПМ по функциональным признакам

Показано, что ЭМУ ПМ состоят из трех основных взаимосвязанных узлов: механического узла, электромагнитного привода для изменения положения элементов этого узла и электронной системы управления (СУ) электромагнитным приводом. В свою очередь, электромагнитный привод содержит управляющий электромагнит (УЭ) и постоянный магнит (ПМ), встроенный в его магнитную систему. Силовые ЭМУ ПМ предложено разделить на два класса:

- *фрикционные ЭМУ ПМ*, работа которых основана на использовании момента трения, создаваемого тяговым усилием магнитного поля ПМ и действующего на фрикционную пару, элементы которой имеют возможность относительного проскальзывания;

- *позиционные* ЭМУ ПМ, в которых тяговое усилие постоянного магнита используется для перевода рабочего элемента в определенное положение с его последующим удержанием в этом положении.

Показано, что существует большое количество конструктивных модификаций основных исполнений ЭМУ ПМ, которые обеспечивают им дополнительные функциональные свойства и возможности. В работе предложена классификация ЭМУ ПМ по конструктивным признакам. Проведен сравнительный анализ систем управления ЭМУ ПМ и предложена их классификация. Проанализировано также современное состояние вопросов исследования и проектирования электромеханических устройств данного класса. На базе проведенного анализа проблемы поставлены задачи разработки и исследования электромеханических устройств с постоянными магнитами и систем их управления.

Во второй главе приведены основы теории поляризованных электромагнитных устройств. Рассмотрены основные способы управления магнитным потоком ПМ, обеспечивающие перевод устройства из выключенного во включенное состояние (или наоборот). Показано, что из всех возможных способов наиболее рациональным является способ перераспределения магнитного потока.

В ЭМУ ПМ якорь под действием внешних сил совершает возвратно-поступательное движение между двумя крайними положениями. В первом положении он притянут магнитным полем ПМ к магнитопроводу управляющего электромагнита, а во втором – удерживается усилием возвратной пружины с зазором к указанной поверхности. Перевод из одного положения в другое обеспечивается управляющим электромагнитом. Очевидно, что параметры каждого режима рабочего цикла (их продолжительность, тяговые усилия и т.д.) зависят от параметров питающего напряжения, СУ и конструктивного исполнения ЭМУ ПМ, а также от параметров управляющего электромагнита, постоянного магнита и возвратной пружины. Рабочий цикл электромагнита ЭМУ ПМ показан на рис. 2. Его можно разбить на четыре режима. Для наглядности характеристику каждого режима покажем на примере электромагнитной муфты:

I - режим при отключенном источнике питания, при котором якорь притянут к магнитопроводу магнитным полем постоянного магнита и фрикционный узел муфты замкнут, причем между якорем и магнитопроводом будет присутствовать остаточный эквивалентный воздушный зазор $\delta = \delta_0 \approx 0$.

II - режим подачи напряжения на управляющую обмотку (режим перевода фрикционного узла в разомкнутое состояние). Этот режим включает в себя три периода: время нарастания тока до величины тока трогания $i_{тр.разм}$; время движения якоря от магнитопровода во второе устойчивое состояние $t_{дв. разм}$; время нарастания тока до установившегося значения $i_{уст}$.

III - режим установившегося напряжения питания (режим удержания якоря с зазором к магнитопроводу), при котором муфта разомкнута.

IV - режим отключения управляющей обмотки от питания (режим перевода фрикционного узла в замкнутое состояние). Этот режим включает в себя три периода: время спада тока до величины тока трогания $i_{тр.зам}$; время движения якоря до упора в магнитопровод $t_{дв. зам}$; время затухания тока до нуля $t_{зам} = t_6 \div t_7$.

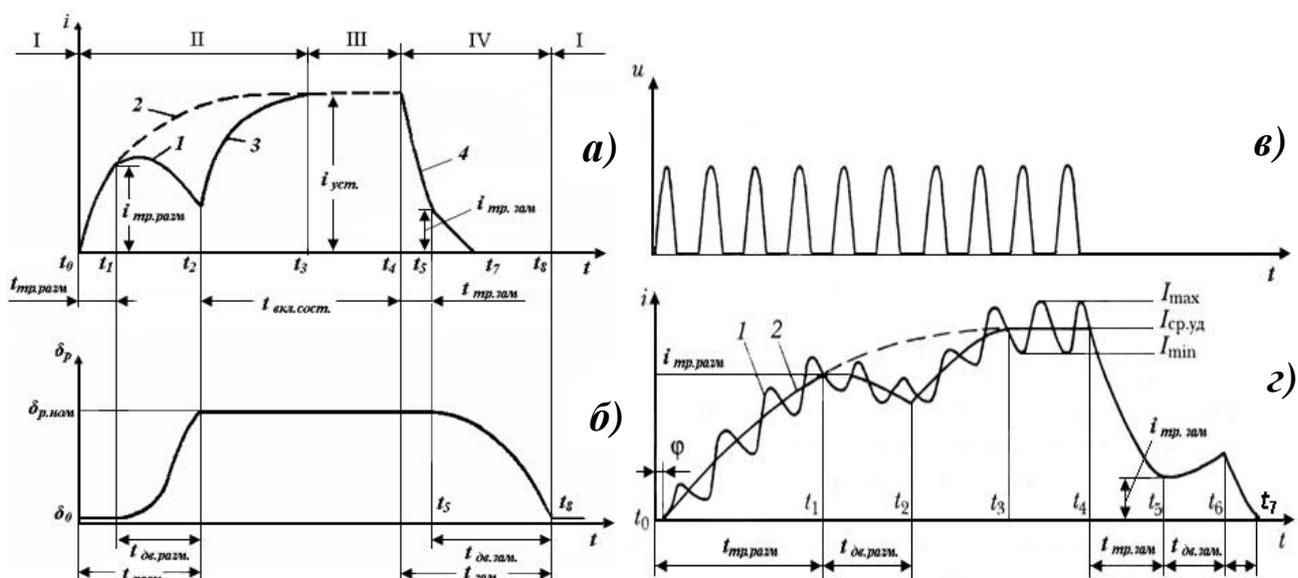


Рис. 2. Рабочий цикл электромагнитного привода ЭМУ ПМ:

а – зависимость тока в обмотке при питании от источника постоянного напряжения; *б* – кривая изменения зазора между якорем и магнитопроводом; *в, г* – зависимости напряжения и тока при питании от однофазного выпрямителя; 1, 2 – мгновенное и среднее значения тока

Величина суммарного тягового усилия $F_T(\delta, i)$, действующего на якорь, зависит от воздушного зазора δ между якорем и магнитопроводом и от величины тока i в обмотке и в общем случае имеет три составляющие

$$F_T(\delta, i) = |F_M(\delta) - F_{эм}(i) - F_{пр}(\delta)| \geq 0, \quad (1)$$

где $F_M(\delta)$ – тяговое усилие, действующее на якорь со стороны магнитного поля постоянного магнита; $F_{эм}(i)$ – тяговое усилие, создаваемое управляющим электромагнитом; $F_{пр}(\delta)$ – усилие возвратной пружины.

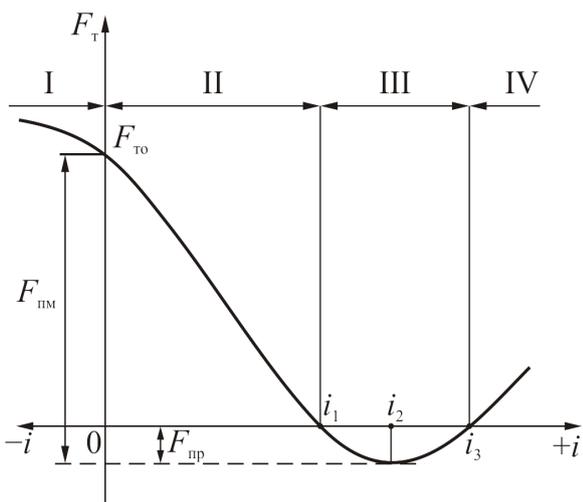
Зависимость усилия F_T от тока i обмотки показана на рис.3. На границе областей I и II ток i отсутствует и тяговое усилие F_T равно

$$F_{T0} = F_M(\delta_0) - F_{пр}(\delta_0). \quad (2)$$

Потоки $\Phi_{ПМ}$ и $\Phi_{эл}$ в области I действуют согласно, за счет чего $F_T > F_{T0}$. В остальных областях эти потоки направлены встречно. При этом в диапазоне токов $0 < i < i_2$ поток электромагнита меньше потока постоянного магнита $\Phi_{эл} < \Phi_{ПМ}$, при токе $i = i_2$ эти потоки равны $\Phi_{эл} = \Phi_{ПМ}$, а при токе $i > i_2$ имеем $\Phi_{эл} > \Phi_{ПМ}$.

В области II за счет недокомпенсации потока $\Phi_{ПМ}$ потоком $\Phi_{эл}$ якорь притянут к магнитопроводу усилием F_T ,

Рис. 3. Зависимость тягового усилия F_T от тока i в обмотке управляющего электромагнита



значение которого определяется избыточным потоком постоянного магнита (то есть его некомпенсированной частью). В области IV за счет перекомпенсации потока $\Phi_{ПМ}$ якорь притянут к магнитопроводу избыточным потоком электромагнита. Таким образом, в областях I, II, III и IV тяговые усилия F_T описываются следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} F_T^I(\delta_0, i) &= F_M(\delta_0) + F_{эм}(i, \delta_0) - F_{нр}(\delta_0) \geq 0; \\ F_T^{II}(\delta_0, i) &= F_M(\delta_0) - F_{эм}(i, \delta_0) - F_{нр}(\delta_0) \geq 0; \\ F_T^{III}(\delta_p, i) &= F_M(\delta_p) - F_{эм}(i, \delta_p) - F_{нр}(\delta_p) \leq 0, \\ F_T^{IV}(\delta_0, i) &= F_{эм}(i, \delta_0) - F_M(\delta_0) - F_{нр}(\delta_0) \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Из рис.5 видно, что фрикционный узел будет разомкнут только в области III в диапазоне токов $i_1 < i < i_3$, определяемом величиной силы $F_{нр}$.

Момент трения в фрикционном узле равен

$$M_m = k_{мп} \cdot R_{ср} \cdot F_T(\delta, i), \quad (4)$$

где $k_{мп}$ – коэффициент трения; $R_{ср}$ – средний радиус действия силы трения.

В работе рассмотрены электромеханические процессы, протекающие при замыкании и размыкании фрикционного узла, а также при реверсе муфты. Анализ и вывод аналитических соотношений выполнен на базе фрикционной электромагнитной муфты, поскольку электромеханический тормоз представляет собой, в сущности, фрикционную муфту, ведомая полумуфта которой замкнута на корпус. Получены формулы для вычисления момента трения в установившихся и переходных режимах работы, а также параметров быстродействия и работы трения, совершаемой за время проскальзывания контактных поверхностей фрикционного узла.

Приведена методика определения рабочих параметров постоянного магнита. Показано, что тяговое усилие $F_M(\delta_0)$ определяется производной энергии магнитного поля $W_M(\delta)$, создаваемой постоянным магнитом в рабочем зазоре между якорем и магнитопроводом, по координате перемещения якоря:

$$F_M(\delta) = dW_M(\delta)/d\delta, \quad (5)$$

где $W_M(\delta) = B_M H_M V_\delta / 2$; B_M и H_M – магнитная индукция и напряженность магнитного поля, создаваемые постоянным магнитом в рабочем зазоре; V_δ – объем пространства в рабочем зазоре, занятого полем.

Для расчета тягового усилия $F_M(\delta)$ предложена методика расчета действительных рабочих точек постоянного магнита при различных положениях якоря. При этом учтено, что магниты для ЭМУ ПМ намагничиваются отдельно от магнитной арматуры в намагничивающей установке.

Получены также математические модели, описывающие установившиеся и динамические режимы работы электромагнитного привода при питании от источника постоянного тока.

Третья глава посвящена разработке математических моделей переходных процессов, протекающих в ЭМУ ПМ при использовании различных схем управления со встроенными выпрямителями, включая схемы с форсировкой

перевода ЭМУ ПМ из одного рабочего состояния в другое. Проведенный анализ позволил разбить все известные СУ на *два класса* по условиям формирования закона изменения напряжения $U_{ex}(t)$ на обмотке управляющего электромагнита (УЭ): схемы с независимой формой рабочего напряжения, в которых закон $U_{ex}(t)$ определяется только собственными параметрами СУ; схемы с взаимозависимой формой рабочего напряжения, в которых закон $U_{ex}(t)$ зависит от соотношения параметров СУ и УЭ.

К схемам *первого класса* относятся СУ, содержащие различные типы неуправляемых и управляемых выпрямителей, а также СУ с двумя источниками питания, с емкостными накопителями, с балластным сопротивлением, с переводом на двухполупериодное выпрямление и т.д. К схемам *второго класса* относятся СУ с предвключенными элементами, работа которых определяется, в первую очередь, величиной и соотношением электрических параметров обмотки УЭ и этих предвключенных элементов.

Обобщенные математические модели, описывающие переходные процессы в СУ первого класса, получены для СУ, содержащей управляемый тиристорный двухполупериодный выпрямитель. Показано, что этот вариант является общим решением, а расчеты при использовании других типов СУ представляют собой частные случаи этого решения.

При описании режима подключения к источнику питания использован метод конечных последовательных интервалов. Согласно этого метода каждый период напряжения, прикладываемого к обмотке, разбит на два интервала – «импульс», когда любая пара тиристоров открыта, и «пауза», когда все тиристоры закрыты. Работа ЭМУ ПМ определяется формой кривой и величиной проходящего по обмотке управляющего электромагнита тока. Уравнения для расчета тока на интервалах «импульс» и «пауза» для случая синусоидального изменения входного напряжения $u_{ex}(t)$ получены в следующем виде:

$$i_{u.k}(t) = i_{св} + i_{св} \left[N \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t_u + \psi_H + \alpha_k - \varphi) + \left[i_{нк} - N \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha_k - \varphi) \right] \cdot e^{-\frac{t_u}{\tau}} \right]; \quad (6)$$

$$i_{нк}(t) = i_{u(k-1)} \cdot e^{-\frac{t_n}{\tau}}, \quad (7)$$

где $i_{св}$ и $i_{св}$ – вынужденная и свободная составляющие тока; R и Z – активное и полное сопротивление обмотки; $t_u = t - (t_{k-1} + \alpha_k / \omega)$ – текущее значение времени в пределах интервала «импульс»; ψ_H – начальная фаза напряжения; φ – угол сдвига между током и напряжением; α_k – угол управления тиристорами на k -том периоде; $\tau = L_n / R$ – постоянная времени цепи обмотки; L_n – текущее значение индуктивности обмотки; N – коэффициент, который при двухполупериодном выпрямлении равен $N = 1$, а при однополупериодном выпрямлении $N = -1$.

В работе описан алгоритм вычисления значения L_n , который учитывает реальные магнитные свойства магнитопровода и его геометрию. Сумма продолжительности интервалов «импульс» и «пауза» определяет текущее время расчета t . Переходы на интервал «импульс» с интервала «пауза» k -го периода и обратно производятся при выполнении, соответственно, условий

$$t_n \geq \frac{\alpha_k - \psi_n}{\omega}; t_u + \frac{\alpha_k}{\omega} \geq \frac{1}{2f}. \quad (8)$$

Угол управления тиристором α_k на k -том периоде вычисляется по величине среднего значения напряжения $U_{cp.k}$ на обмотке на этом периоде в зависимости от способа выпрямления. Соответственно, для двух- и однополупериодного управляемых выпрямителей α_k рассчитывается по выражениям

$$\alpha_k = \arccos(U_{cp.k} \cdot \pi / U_m - 1); \alpha_k = \arccos(2\pi \cdot U_{cp.k} / U_m - 1) + \pi, \quad (9)$$

где значение $U_{cp.k}$ определяется по заданной форме форсировочного импульса, формируемого СУ.

Получены также выражения, описывающие процессы, протекающие в квазиустановившемся режиме работы, а также рассмотрены переходные процессы при отключении питания и получены формулы для расчета параметров быстродействия размыкания и замыкания фрикционного узла ЭМУ ПМ.

Даны рекомендации по процедуре использования полученных обобщенных математических моделей для расчета других типов СУ первого класса.

Далее в работе рассмотрены математические модели расчета переходных режимов при использовании схем управления второго класса. Среди них наибольшее распространение, как показал анализ, получили СУ с предвключенными

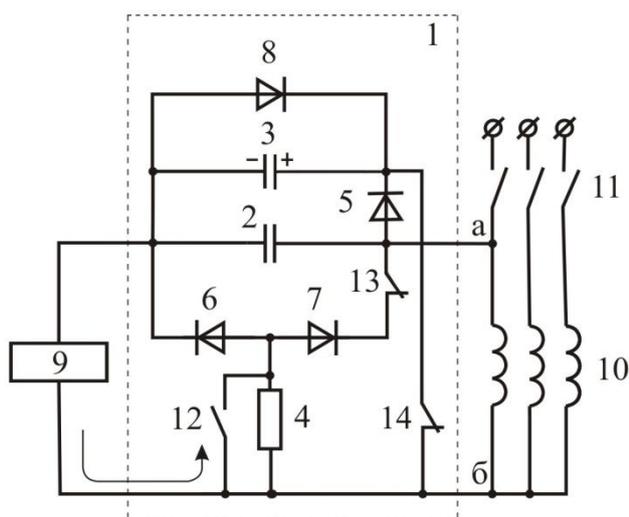


Рис. 4. Универсальная схема форсировки ЭМУ ПМ

элементами в виде конденсаторов. С целью получения аналитического описания переходных процессов, протекающих в электрической части ЭМУ ПМ при использовании любой СУ с предвключенными конденсаторами, получена обобщенная математическая модель. За базовый вариант взята разработанная СУ с рабочим и пусковым форсировочными конденсаторами (рис.4). Математическая модель расчета переходных процессов в этой СУ, как доказано в работе, является обобщенным вариантом, позволяющим выполнять расчеты и для других типов СУ данного класса. Блок 1 форсировки срабатывания ЭМУ ПМ содержит два параллельно включенных форсировочных конденсатора (рабочий 2 и пусковой 3) и разрядный резистор 4. Схема управления при использовании ЭМУ ПМ в качестве тормоза работает следующим образом. При пуске форсировка тока по обмотке 9 осуществляется обоими конденсаторами, что обеспечивает быстрое размыкание фрикционного узла ЭМУ ПМ и растормаживания тем самым вала электродвигателя. При отключении двигателя от сети на резисторе 4 за счет разряда обоих форсировочных конденсаторов 2 и 3 образуется падение напряжение, ток от которого направлен встречно току самоиндукции обмотки 9, что приведет к быстрому затуханию последнего и, соответственно, к быстрому замыканию фрикционного узла ЭМУ ПМ.

Для удобства составления математической модели в режиме подключения питания и в квазиустановившемся режиме расчет разбит на три временных интервала, на каждом из которых происходят различные процессы при разных начальных условиях: первый временной интервал – время зарядки обоих форсировочных конденсаторов; второй временной интервал – отрезок времени, на котором происходит разрядка рабочего конденсатора; третий временной интервал – переходной процесс протекает при параллельно включенных форсировочных конденсаторах, имеющих разные напряжения заряда.

Получено, что на первом интервале ток описывается уравнением

$$i_{i_B} \neq i_{CB} \frac{U_m}{Z_1} \sin(\omega t + \psi_H + \varphi_1) + \frac{i_{CB}(0+)}{\sin \nu} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \nu), \quad (10)$$

$$\text{где } \varphi_1 = \arctg \frac{1}{R} \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L \right); Z_1 = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}; \nu = \arctg \frac{i'_{CB}(0+) + \delta i_{CB}(0+)}{\omega_0 i_{CB}(0+)};$$

ω_0 и ν – угловая частота и начальная фаза i_{CB} ; $C = C_1 + C_2$ – суммарная емкость рабочего C_1 и пускового C_2 конденсаторов; $i_{CB}(0+)$ – значение свободной составляющей тока i в первый момент включения.

Напряжение на конденсаторах можно вычислить по выражению

$$u_C = u_C(0-) + \frac{1}{C} \sum_{k=0}^n i_k \Delta t, \quad (11)$$

где $n \Delta t$ – количество и величина шагов по времени; i_k – значение тока, вычисляемое по (10) на k -ом шаге.

На втором временном интервале схема распадается на две независимые цепи, одна из которых является цепью разрядки рабочего конденсатора C_1 , а другая представляет собой цепь замыкания тока обмотки от ЭДС самоиндукции. Ток в первой цепи, т.е. ток рабочего конденсатора i_{C1} , равен

$$i_{C1} = C \frac{du_{C1}}{dt} = C \frac{U_m}{Z_2 \omega C} \cdot \omega \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_2) + C \cdot \left(-\frac{1}{R_{\text{BH}} C} \right) \times$$

$$\left[u_{C2}(0-) + \frac{U_m}{Z_2 \omega C} \cos(\psi_1 - \varphi_2) \right] \cdot e^{-\frac{t}{R_{\text{BH}} C}} - \frac{U_m}{Z_2} \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_2) -$$

$$- \left[\frac{u_{C2}(0-)}{R_{\text{BH}}} + \frac{U_m}{Z_2} \cdot \frac{1}{\omega C R_{\text{BH}}} \cos(\psi_1 - \varphi_2) \right] \cdot e^{-\frac{t}{C \cdot R_{\text{BH}}}} \quad (12)$$

Ток во второй цепи, т.е. в обмотке электромагнита, равен

$$i = i(0-) \cdot e^{-\frac{R_{\text{об}}}{L} t} \quad (13)$$

На пусковом конденсаторе на протяжении всего второго интервала расчета напряжение не изменяется $u_{C2}(t) = \text{const}$. Соответственно, ток пускового конденсатора на этом интервале равен нулю $i_{C2}(t) = 0$.

Переходной процесс на третьем интервале начинается с момента, когда к рабочему конденсатору C_1 параллельно подключается пусковой конденсатор C_2 , причем конденсаторы имеют различные заряды и переходной процесс про-

текает при так называемых «некорректных начальных условиях». Ток i , протекающий по обмотке электромагнита, в первый момент времени скачком измениться не может и поэтому имеет значение, которое он имел в конце второго интервала. Очевидно, что описание переходного процесс на этом интервале можно выполнить по уравнениям первого интервала, но начальные условия изменяются и равны $u_C(0-) = u_C(0+)$, где $u_C(0+)$ вычисляется по выражению

$$u_C(0+) = \frac{u_{C1}(0-) \cdot C_1 + u_{C2}(0-) \cdot C_2}{C_1 + C_2}, \quad (14)$$

где $u_{C1}(0-)$ – напряжение конденсатора C_1 непосредственно вначале третьего интервала, т.е. в конце второго интервала.

Дальнейший расчет переходного процесса выполняется чередования расчетных схем второго и третьего временных интервалов. Условием перехода расчета на новый интервал является $u_C \geq u(t)$. После того, как пусковой конденсатор C_2 зарядится до амплитудного значения питающего напряжения и фрикционный узел ЭМУ ПМ замкнется, ток i в обмотке УЭ колеблется относительно среднего установившегося значения с постоянной амплитудой.

В работе получена математическая модель расчета переходных процессов после отключения питания, когда заряженные форсировочные конденсаторы начинают разряжаться на разрядный резистор. Для повышения быстродействия замыкания фрикционного узла ЭМУ ПМ необходимо, чтобы ток в обмотке УЭ быстро спадал до нуля. Показано, что это выполняется при определенном соотношении параметров схемы. Т.к. собственные параметры обмотки R и L и емкости предвключенных конденсаторов C определяются по заданным эксплуатационным показателям, то поставленная задача может быть решена только выбором величины активного сопротивления разрядного резистора R_I . В работе получено аналитическое выражение для расчета оптимальной величины R_{Iopt} .

Показано, что полученные математические модели расчета переходных процессов являются универсальными и расчет переходных процессов при использовании других типов СУ этого класса является частным случаем описанных алгоритмов. Например, при применении известной схемы с одним предвключенным конденсатором из расчета процесса включения питания просто надо исключить уравнения, относящиеся к пусковому конденсатору, а при расчете процесса отключения принять $C = C_1$, $u_{C2}(0-) = 0$ и $R_I = 0$.

Для оценки динамических показателей исполнительных силовых ЭМУ ПМ и корректности полученных математических моделей проведен расчет и анализ переходных процессов, протекающих в управляющем электромагните при использовании СУ первого и второго классов. Были разработаны алгоритмы и программы расчета режимов подключения и отключения напряжения питания, на базе которых проведены соответствующие расчеты. Результаты расчета переходных процессов при использовании СУ с предвключенными конденсаторами в режиме подключения питания при $\psi_H = 0$ показаны на рис. 5.

Характер изменения кривой $u_{об}(t)$ наглядно показывает (кривая 4 рис.5, б), что в процессе пуска ЭМУ ПМ имеет место эффект форсировки нарастания напряжения на обмотке его управляющего электромагнита.

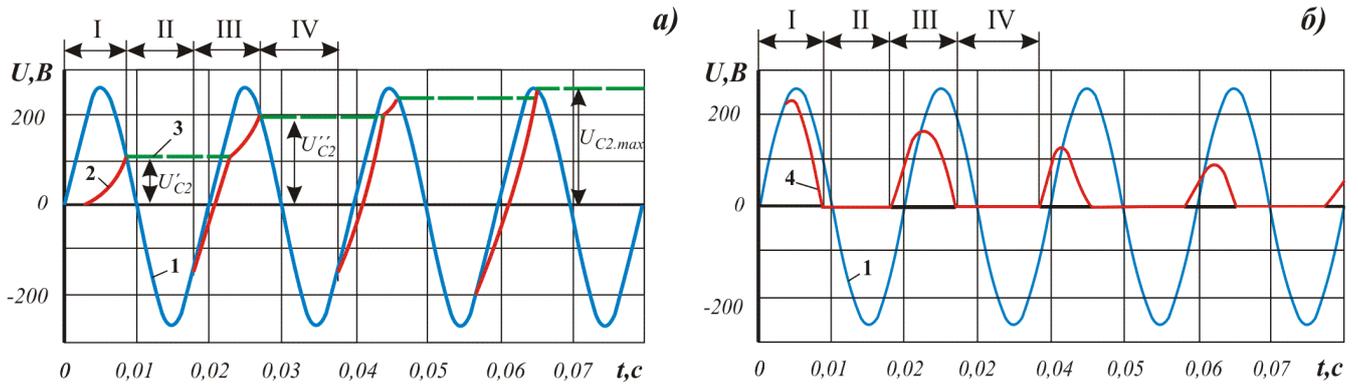


Рис. 5. Изменение напряжения на различных элементах СУ при $\psi_H = 0^\circ$:
 1 – напряжение питания u ; 2, 3 – напряжение рабочего u_{C1} и пускового u_{C2} конденсаторов; 4 – напряжение, прикладываемое к обмотке управляющего электромагнита $u_{об}$

Расчетные кривые изменения тока в обмотке электромагнита $i(t)$, а также токов через рабочий $i_{C1}(t)$ и пусковой $i_{C2}(t)$ конденсаторы приведены на рис.6.

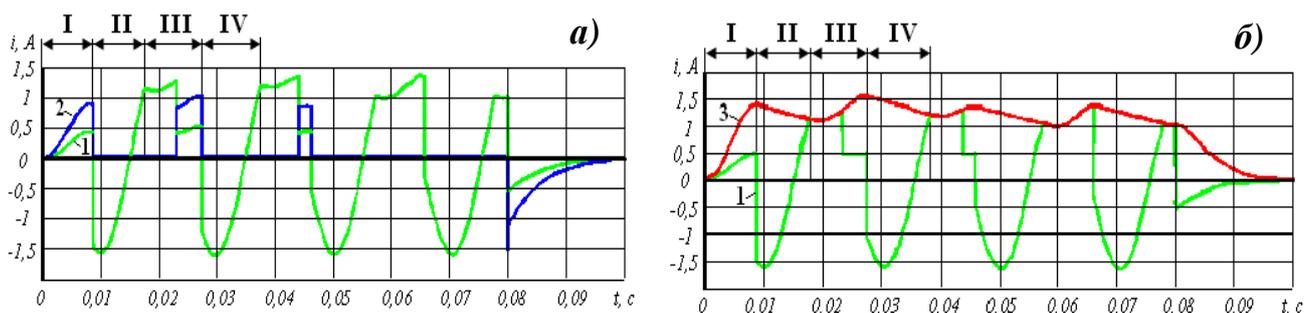


Рис.6. Кривые изменения тока при $\psi_H = 0^\circ$:
 1, 2 – кривые токов через рабочий $i_{C1}(t)$ и пусковой $i_{C2}(t)$ конденсаторы;
 3 – ток в обмотке электромагнита $i(t)$

Видно, что ток $i(t)$ по обмотке электромагнита равен сумме токов обоих конденсаторов на нечетных интервалах, причем за счет эффекта форсировки он быстро нарастает.

При отключении питания (для определенности примем, что оно произойдет в момент времени $t = 0,08$ с на рис.6) за счет коммутации цепей схемы управления (см. рис.4), оба конденсатора начинают разряжаться на разрядный резистор 4. Эти токи направлены в таком направлении, что на резисторе 4 образуется падение напряжение, ток от которого направлен встречно току самоиндукции обмотки управляющего электромагнита. За счет этого видно, что ток, протекающий по обмотке, быстро снижается до нуля (рис.6,б).

Для оценки точности разработанных математических моделей и программ расчета были проведены экспериментальные исследования. Для примера на рис.7 приведены расчетная и экспериментальная кривые тока обмотки электромагнита при использовании схемы управления по рис.4.

Видно, что расхождение расчетных и экспериментальных значений составляет не более 10-12 %, что вполне приемлемо для практических расчетов.

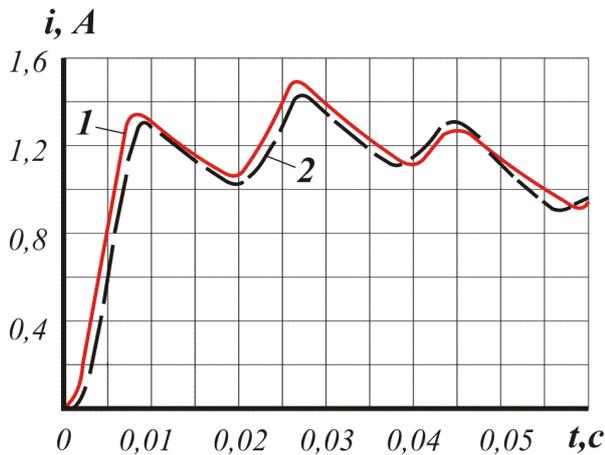


Рис. 7. Изменение тока обмотки электромагнита во времени:
1 – расчетная; 2 – экспериментальная

Обычно при анализе исполнительных силовых ЭМУ ПМ расчет времени размыкания фрикционного узла ведется по кривой нарастания тока без учета динамики проникновения электромагнитной волны в полюс. Это вносит существенную ошибку в расчет параметров быстродействия, т.к. нарастание потока $\Phi_{эл}$ происходит с запаздыванием во времени по отношению к току i .

Процесс проникновения электромагнитной волны, создаваемой УЭ, в полюс можно описать следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \cdot \mu_0} \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial r^2}, \quad (15)$$

где H – напряженность магнитного поля; μ_0 и γ – дифференциальная магнитная проницаемость и удельная электрическая проводимость сердечника.

Уравнение (15) решено численным методом, в соответствии с которым напряженность H определяется при дискретном изменении пространственной координаты r . При этом шаг Δr изменения выбран такой, чтобы значение H в пределах Δr было постоянным. Для этого разбиваем внутренний полюс сердечника на n элементарных колец с шириной $\Delta r = a/n$, и определяем функцию $H(r)$ для каждого момента времени. Расчет проводим в следующем порядке. Вычисляем ток обмотки в момент времени $t_1 = \Delta t$ по методике, изложенной выше. Затем находим напряженность $H(0, t_1)$ на границе сердечника, прилегающей к обмотке. На другой границе сердечника принимаем $H(a, t_1) = 0$ и из решения уравнения (15) вычисляем функцию $H(r)$ в момент времени t_1 , используя численный метод «прогонки», причем дифференцирование уравнения (15) заменяем системой конечно-разностных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{H_{i,j+1} - H_{i,j}}{\Delta t} = \frac{1}{\gamma \mu_0} \cdot \frac{H_{i+1,j+1} - 2H_{i,j+1} + H_{i-1,j+1}}{\Delta r^2} \\ & \frac{\Delta r^2}{\Delta t} \gamma \mu_0 \cdot (H_{i+1,j} - H_{i,j}) = H_{i+1,j+1} - 2H_{i,j+1} + H_{i-1,j+1} \end{aligned} \right. \quad (16)$$

где i и j – номера шагов по пространственной координате и по времени.

Таким образом, вычисление функции $H(r, t)$ в любой очередной момент времени $t = t_{j+1}$ производится по ее значению на предыдущем шаге расчета в момент $t = t_j$.

Известно, что магнитный поток УЭ описывается следующим выражением

$$\Phi(t) = \int_0^a B(r) dS = 2\pi \int_0^a H(r) \mu_\delta \cdot r dr, \quad (17)$$

где $dS = 2\pi \cdot \Delta r \cdot R_i$ – площадь i -го кольца, выделенного в полюсе.

Заменяем интегрирование функции $H(r)$ суммированием элементарных магнитных потоков всех элементарных колец. Тогда магнитный поток равен

$$\Phi(t) = 2\pi \int_0^a H(r) \mu_\delta \cdot r dr = 2\pi \Delta r \sum_{i=1}^n H_i \mu_{\delta i} \cdot R_i, \quad (18)$$

где H_i и $\mu_{\delta i}$ – напряженность и магнитная проницаемость i -го кольца.

Таким образом, можно определить закон изменения суммарного магнитного потока $\Phi_{\text{сум}}(t)$ в ЭМУ МП, создаваемого совместным действием ПМ и УЭ, учитывая при этом процесс проникновения электромагнитной волны в сплошной сердечник управляющего электромагнита, имеющий нелинейные магнитные свойства. Результаты расчета процесса нарастания тока в обмотке УЭ $i(t)$ и кривые изменения суммарного потока $\Phi(t)$ при питании от источника постоянного напряжения показаны соответственно на рис. 8,а и рис. 9,а, а для СУ с форсировкой – на рис. 8,б и рис. 9,б. Расчеты проведены для тормозного ЭМУ МП, имеющего номинальный фрикционный момент 40 Н·м.

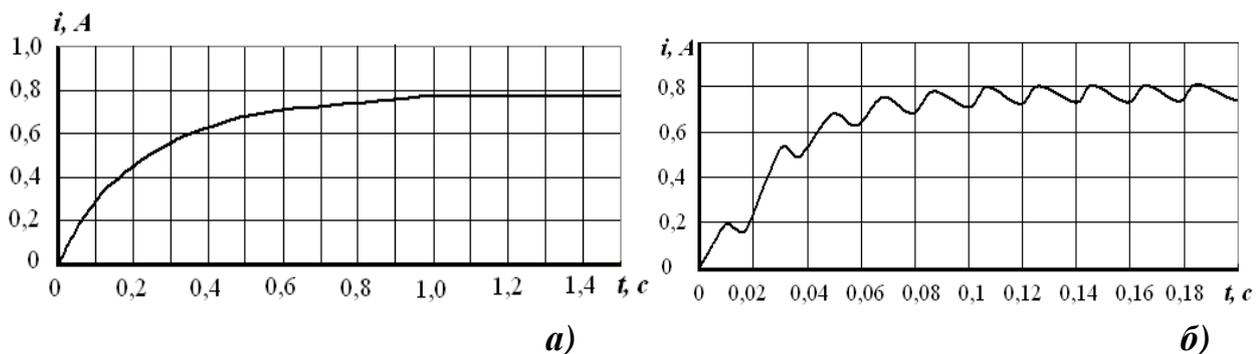


Рис.8. Кривые нарастания тока в обмотке электромагнита

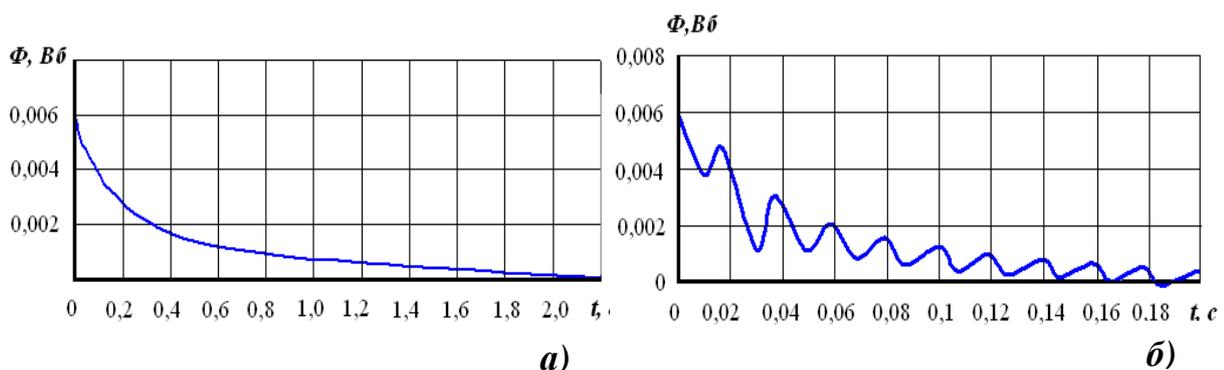


Рис.9. Кривые изменения магнитного потока $\Phi_{\text{сум}}(t)$

Для определения времени размыкания t_p фрикционного узла ЭМУ, необходимо по оси ординат отложить значение магнитного потока, при котором сумма тяговых усилий, действующих на якорь 1 со стороны управляющего электромагнита $F_{эм}$ и со стороны постоянного магнита F_m , становится равным по величине усилию упругой мембраны F_{np} . Таким образом, именно в момент времени t_p фрикционный момент между якорем и полюсами магнитопровода исчезает. Для исследуемого ЭМУ $F_{np} = 225$ Н, соответственно получаем, что при использовании схемы с форсировкой $t_p \approx 0,03$ с, что соответствует экспериментальным данным. При $t > t_p$ выполнится условие $F_{np} > F_m - F_{эм}$ и якорь полностью отходит от полюсов под действием избыточного усилия мембраны F_{np} .

Четвертая глава посвящена разработке конструкций исполнительных ЭМУ ПМ с улучшенными технико-экономическими показателями. Известные поляризованные электромагнитные механизмы имеют ряд недостатков, основными из которых являются низкий удельный фрикционный момент, обусловленный размагничиванием ПМ, т.к. при размыкании ЭМУ ПМ его магнитный поток замыкается по воздуху, а также завышенные габариты и масса, которые

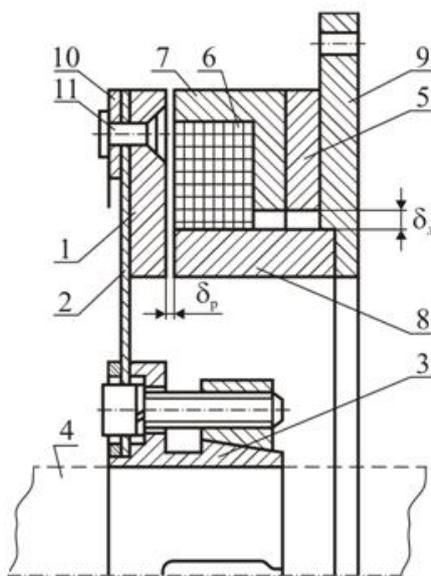


Рис. 10. Конструкция фрикционного ЭМУ ПМ

обусловлены большой мощностью, потребляемой обмоткой управляющего электромагнита. Для ликвидации этих недостатков, был проведен комплекс научно-исследовательских работ, в результате которых была разработана конструкция основных активных частей однодисковой муфты или тормоза, изображенная на рис. 10. Здесь 1 – дисковый якорь, 2 – упругая мембрана, 3 – узел крепления, 4 – приводной вал, 5 – постоянный магнит, 6 – обмотка управляющего электромагнита, 7 и 8 – наружный и внутренний полюса, 9 – фланец. Дисковая часть полюса 7 образует дополнительный полюс.

При обесточенной обмотке 6 фрикционный узел замкнут, т.к. магнитный поток ПМ $\Phi_{ПМ}$ замыкается по якорю и притягивает его к полюсам, преодолевая незначительное усилие мембраны. При подаче напряжения на обмотку она создает магнитный поток, равный по величине и направленный встречно потоку $\Phi_{ПМ}$. Поток $\Phi_{ПМ}$ вытесняется его из якоря и замыкается по добавочному полюсу. Сила, притягивающая якорь к полюсам, исчезает и под действием упругой мембраны якорь отходит от полюсов. Таким образом, фрикционный узел размыкается (это положение и показано на рис.10). При снятии напряжения с обмотки 6 магнитный поток $\Phi_{ПМ}$ опять начинает замыкаться по якорю 1 и притягивает его к полюсам магнитопровода. Тем самым фрикционный узел замыкается.

Разработанная конструкция имеет за счет дополнительного полюса разветвленную магнитную систему. Поэтому при подключении питания к обмотке ее МДС не размагничивает постоянный магнит, а просто вытесняет его поток в дополнительный полюс. Это позволяет уменьшить размеры постоянного магнита и повысить быстродействие, а также снизить МДС обмотки, необходимую

для гарантированного размыкания фрикционного узла, что приводит к уменьшению размеров обмотки и, соответственно, всего ЭМУ ПМ в целом.

Очевидно, что величина воздушного зазора δ_D под добавочным полюсом определяет степень шунтирования этим полюсом постоянного магнита и оказывает тем самым значительное влияние на показатели ЭМУ ПМ, в том числе на величину фрикционного момента. Для оценки влияния величины воздушного зазора δ_D на момент трения M_m и определения наиболее целесообразного значения δ_D , были проведены экспериментальные исследования различных муфт и тормозов. В качестве примера на рис.11 приведены результаты исследования магнитоэлектрических тормозов типа ТПМ2 (в качестве базовых значений приняты номинальные значения тормозного момента $M_{m.ном}$ и рабочего зазора $\delta_{p.ном}$ серийных тормозов).

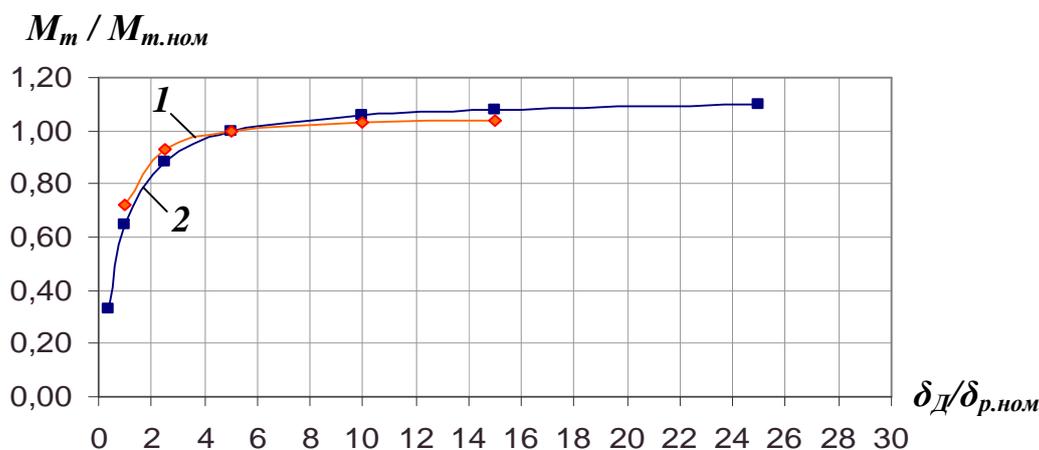


Рис. 11. Влияние величины воздушного зазора δ_D под добавочным полюсом на момент трения:

1 – экспериментальная зависимость; 2 – расчетная зависимость.

При испытаниях величина зазора δ_D варьировалась путем изменения внутреннего диаметра дополнительного полюса. Результаты экспериментальных исследований подтвердили выводы, полученные расчетным путем, что воздушный зазор δ_D под добавочным полюсом необходимо выбирать с учетом величины рабочего воздушного зазора δ_p . Получено, что наиболее рациональная величина δ_D находится в пределах $\delta_D = (4 \div 5)\delta_p$.

В работе описан также целый ряд разработанных конструкций исполнительных силовых ЭМУ ПМ, обеспечивающих улучшение выходных показателей. В частности, описана конструкция ЭМУ ПМ с автоматической компенсацией износа фрикционных элементов. Она отличается наличием фрикционной накладкой, расположенной между полюсами и подпружиненной упругим элементом. Фрикционная накладка при разомкнутом фрикционном узле выступает над торцевой поверхностью магнитопровода. При замыкании фрикционного узла якорь смещает накладку и притягивается до упора в полюса. При этом силы трения и, соответственно, износ будут возникать в основном между якорем и накладкой, а между якорем и полюсами магнитопровода они будут практиче-

ски отсутствовать. Это обеспечит постоянство величины δ_p в течение всего срока службы. По мере износа фрикционной накладке специальные ограничители периодически смещают фрикционную накладку. Важно отметить, что в наличие подпружиненной фрикционной накладке снижает удары, шум и вибрацию при замыкании фрикционного узла.

При монтаже, ремонте и эксплуатации появляется необходимость разомкнуть муфту или растормозить вал приводного электродвигателя без подачи напряжения. Для этого был *разработан и запатентован новый способ растормаживания ЭМУ с постоянными магнитами в обесточенном состоянии* и конструкция, реализующая этот способ. Основная идея этого способа заключается в том, что изменяют путь замыкания магнитного потока постоянного магнита за счет магнитного шунтирования постоянного магнита относительно якоря. Устройство для ручного растормаживания состоит из магнитного шунта, выполненного в виде ленты из ферромагнитного материала, охватывающей наружный полюс, причем ширина магнитного шунта равна, по меньшей мере, аксиальной толщине постоянного магнита. Магнитный шунт установлен с возможностью принудительного аксиального смещения при помощи управляющего узла, выполненного, например, в виде зубчатой пары, состоящей из зубчатого колеса, установленного с возможностью вращения, и зубчатой рейки, закрепленной на магнитном шунте. На зубчатом колесе установлена рукоятка, при вращении которой зубчатая рейка под действием зубчатого колеса перемещает магнитный шунт. Тем самым магнитный поток постоянного магнита, минуя якорь, начинает замыкаться по шунту. Сила притяжения якоря к полюсам исчезает и под действием упругого элемента якорь отходит от полюсов. Таким образом, фрикционный узел размыкается без подключения напряжения.

Кроме того, разработаны ЭМУ ПМ с системой импульсного управления с источником оперативного питания в виде конденсатора, обеспечивающие отсутствие потребления энергии из сети при разомкнутом фрикционном узле.

Пятая глава посвящена разработке систем управления электромеханическими системами, содержащими исполнительные силовые ЭМУ ПМ. При этом основное внимание было уделено разработке перспективных систем управления и контроля непосредственно исполнительными силовыми ЭМУ ПМ.

Для улучшения эксплуатационных свойств электромеханических систем, содержащих ЭМУ ПМ, был разработан и запатентован новый способ управления. Его сущность заключается в том, что в момент пуска на обмотку электромагнитной муфты дополнительно подается напряжение, причем длительность подачи напряжения равно времени разгона электродвигателя, а полярность этого напряжения такова, что создаваемый обмоткой магнитный поток направлен согласно магнитному потоку постоянного магнита. Сущность предлагаемого способа поясним на примере реверсивного электропривода, схема которого приведена на рис.12. Электродвигатель М через нормально замкнутую поляризованную электромагнитную муфту ЭМУ ПМ связан с рабочим органом РО. Режим работы электродвигателя М задается блоком управления 1, а обмотка У муфты управляется блоком 2. Блок 1 содержит реле времени, которое имеет размыкающий контакт К3.1 с задержкой времени размыкания, равной времени

разгона электропривода. Блок 2 содержит коммутатор 3 с блоком его управления 4. Коммутатор может быть электромеханическим или электронным. На рис.14 он показан в виде электромагнитного реле K4.

Блок контроля 5 размыкания фрикционного узла содержит магнитоуправляемый элемент SF, например, геркон, установленный вблизи постоянного магнита с возможностью взаимодействия с его полями рассеяния. Реле K5 управляет сигнальной лампой HL.

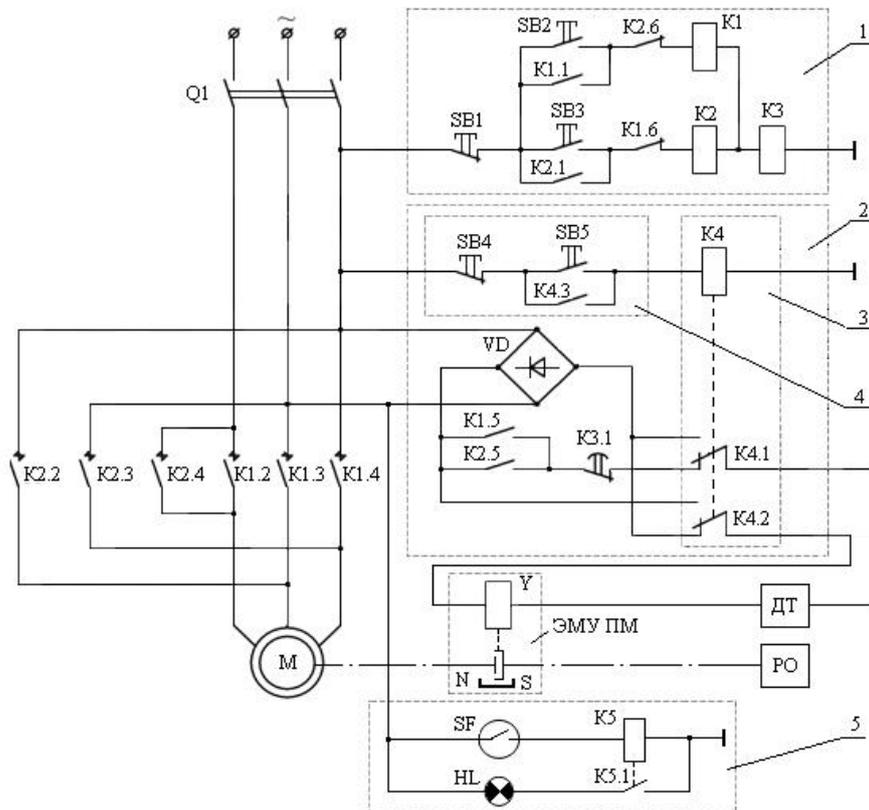


Рис.12. Схема управления реверсивным электроприводом

При пуске двигателя посредством пускателя K1 питание одновременно подается и на обмотку K3 реле времени. Т.к. контакт K1.5 замыкается, а размыкающий контакт K3.1 реле K3 имеет задержку времени размыкания, то обмотка Y муфты по цепи «выпрямитель VD, контакт K1.5, контакт K3.1, контакт K4.1, контакт K4.2» подключается к источнику питания. Направление тока в обмотке Y обеспечивается такого направления, что она создает магнитный поток, направленный согласно магнитному потоку ПМ. За счет этого усилие замыкания муфты увеличивается, что исключает проскальзывание полумуфт и обеспечивает надежный разгон приводного механизма. После истечения заданной задержки времени контакт K3.1 размыкается, муфта отключается от питания и остается замкнутой только усилием магнитного поля ПМ. Процесс реверса также будет сопровождаться увеличением усилия сцепления полумуфт. Если по условия эксплуатации требуется разомкнуть муфту, то подается напряжение на обмотку реле K4, переключающие контакты K4.1 и K4.2 которого изменяют полярность напряжения на обмотке Y муфты и она питается по цепи «выпрями-

тель VD, контакт K4.2, контакт K4.1». Поскольку магнитный поток, создаваемый обмоткой Y, будет направлен встречно магнитному потоку ПМ, то полу-муфты под действием возвратной пружины разомкнутся.

При замкнутом фрикционном узле, когда якорь притянут к магнитопроводу, потоки рассеяния ПМ незначительны. Следовательно, магнитоуправляемый элемент SF разомкнут и разрывает цепь обмотки реле K5, т.е. лампа HL не светится. При размыкании муфты между якорем и магнитопроводом появляется воздушный зазор, за счет чего поток рассеяния ПМ резко увеличивается и замыкает магнитоуправляемый элемент SF. При этом реле K5 включает сигнальную лампу HL, сигнализируя о разомкнутом состоянии фрикционного узла.

Разработана микропроцессорная система управления предложенной системой, которая показана на рис.13 (здесь ДТ – датчик тока). В соответствии с этой схемой, для формирования управляющих сигналов была разработана программа работы контроллера.

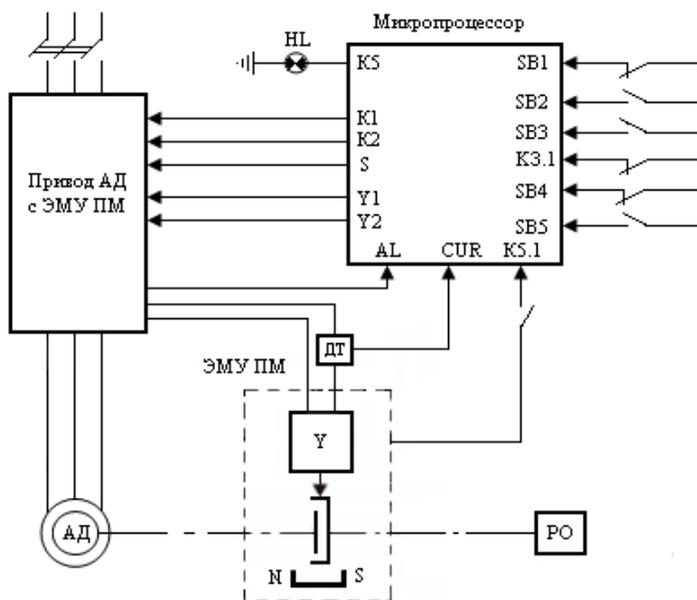


Рис.13. Структурная схема системы управления

Цикл работы начинается с подготовки входных портов к работе. Затем вводятся начальные значения переменных, причем ток $I_{зад}$ задается в виде постоянной величины, которая определяется по параметрам муфты. Далее работа осуществляется в соответствии с приведенным выше описанием. Например, если требуется разомкнуть муфту, то производится подключение обмотки муфты Y по команде оператора, которая поступает на вход микроконтроллера SB4. Перевод муфты в замкнутое состояние осуществляется также

по команде оператора, поступающей на вход микроконтроллера SB5. Кроме того, осуществляется контроль состояния привода АД и ЭМУ ПМ по величинам аналоговых сигналов, поступающих на входы микроконтроллера AL и CUR. Программа скомпилирована в среде разработки AVR Studio. Эффективность разработанного микропроцессорного устройства управления была подтверждена его экспериментальным тестированием.

С целью комплексного улучшения эксплуатационных показателей позиционных электроприводов была разработана и запатентована система управления, принципиальная электрическая схема которой изображена на рис. 14.

При пуске электродвигателя к его обмоткам 1, 2, 3 и к обмотке 8 ЭМТУ прикладывается напряжение. По мере заряда пускового конденсатора 11 по обмотке 8 протекает большой ток, под действием которого растормаживающий электромагнит быстро сработает и ротор двигателя растормаживается. После заряда пускового конденсатора 11 до амплитудного значения напряжения фаз-

ной обмотки 3, диод 13 запирается и ток в обмотке 8 ограничивается сопротивлением рабочего конденсатора 10.

После отключения двигателя контакты 14, 15 и 16 пускателя замыкаются. Тем самым обмотки статора замыкаются накоротко, а к обмотке 3 прикладывается напряжение заряженного конденсатора 11. Поскольку ротор продолжает по инерции вращаться, то начинается комбинированное электрическое магнитно-динамическое торможение. Магнитное торможение обеспечивается остаточным магнитным потоком машины, а динамическое торможение обеспечивается за счет энергии, запасенной в пусковом конденсаторе 11. При этом ЭМТУ переходит в режим торможения с задержкой времени, обусловленной наличием замкнутого контура «обмотка 8 – диод 12», по которому продолжает протекать ток, обусловленный ЭДС самоиндукции обмотки 8.

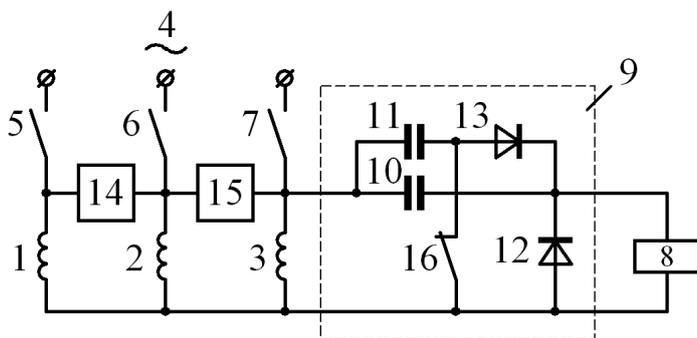


Рис. 14. Принципиальная электрическая схема позиционного электропривода переменного тока

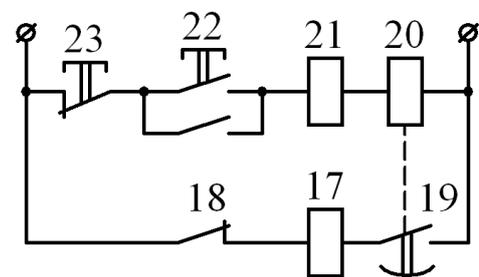


Рис.15.Схема управления при использовании дополнительного контактора

Комбинированное электрическое торможение заканчивается обычно за 2÷3 периода переменного тока (40÷60 мс), что соответствует времени срабатывания ЭМТУ. Таким образом, через промежуток времени, определяемый временем срабатывания ЭМТУ, дополнительно к электрическому торможению обеспечивается механическое торможение, что приводит к быстрой остановке и фиксации ротора.

Для повышения надежности работы коммутационные элементы 14 и 15 могут быть выполнены в виде замыкающих контактов дополнительного контактора, в цепь обмотки 17 которого последовательно подключены дополнительный размыкающий контакт 18 пускателя 21 и замыкающий контакт 19 с задержкой времени размыкания реле 20 (см. рис.15).

В предложенном электроприводе осуществляется предварительное снижение частоты вращения ротора за счет электрического торможения, а затем начинается механическое торможение при помощи тормоза. Оба способа торможения действуют последовательно и независимо друг от друга.

В пятой главе также описаны разработанные и запатентованные устройства управления ЭМУ ПМ, обеспечивающие улучшение различных выходных параметров и расширение эксплуатационных возможностей, а именно:

- сохранение режима работы исполнительных силовых ЭМУ ПМ при кратковременных аварийных отключениях питания;

- форсированное изменение тока в обмотке управляющего электромагнита в различных режимах работы, что улучшает параметры быстродействия электромеханических систем в переходных режимах работы.

Разработан и запатентованный способ управления электромагнитных двухсторонних переключающих муфт. Разработано также универсальное устройство управления ЭМУ ПМ с тиристорным регулятором напряжения, которое обеспечивает возможность работы с различными типоразмерами ЭМУ ПМ.

Для подтверждения работоспособности и эффективности разработанных схем управления и методик расчета проведены аналитические и экспериментальные исследования, как самих ЭМУ ПМ, так и различных автоматизированных цифровых систем управления электромеханическими системами. Результаты показали высокую эффективность разработанных схем. Для примера в таблице приведены расчетные и экспериментальные данные параметров быстродействия тормозного устройства асинхронного двигателя типа 4AM80EB4 при использовании различных схем управления второго класса.

Тип схемы управления	Время размыкания фрикционного узла, с		Время замыкания фрикционного узла, с	
	расчетное	опытное	расчетное	опытное
СУ без форсировки	0,059	0,065	0,040	0,045
СУ с одним предвключенным конденсатором	0,031	0,035	0,040	0,045
Разработанная СУ по рис.4	0,028	0,031	0,029	0,032

Расчеты проведены с использованием методик, приведенных в шестой главе. Время размыкания ЭМУ определялось по кривой нарастания тока в обмотке управляющего электромагнита, причем при расчете – по величине тока срабатывания, а при проведении эксперимента – по провалу в кривой тока. При этом расхождение экспериментальных и расчетных значений вполне удовлетворительное, не более 10÷11 %, что подтверждает корректность и достоверность разработанных методик.

Далее рассмотрены вопросы контроля эксплуатационного состояния исполнительных силовых ЭМУ ПМ непосредственно во время работы. Показано, что контроль состояния ЭМУ ПМ является неотъемлемой составляющей нормального функционирования оборудования.

Диагностика может осуществляться как контактными, так и бесконтактными способами. В работе описаны результаты разработок схем устройств диагностики, реализующие оба указанных способа контроля. Так, в результате комплекса исследований разработана схема устройства диагностики, реализующая первый способ и обеспечивающая контроль, как за размыканием, так и за замыканием фрикционного узла ЭМУ ПМ. Предложенное устройство содер-

жит блок контроля, состоящий из последовательно соединенных маломощного источника питания и датчика тока. Блок контроля подключен к полюсам магнитопровода параллельно постоянному магниту. В обесточенном состоянии якорь притянут к полюсам и между ними есть электрический контакт. Следовательно, суммарное электрическое сопротивление на входе устройства контроля незначительно и равно $R_{\text{сум}}=R_{\text{Я}}+R_{\text{Н}}+R_{\text{ВН}}$, где $R_{\text{Я}}$, $R_{\text{Н}}$, $R_{\text{ВН}}$ – электрические сопротивления якоря, наружного и внутреннего полюсов магнитопровода. Поэтому по датчику тока будет протекать ток. При подаче напряжения фрикционный узел размыкается и между якорем и полюсами магнитопровода появляется зазор δ . Следовательно, цепь устройства контроля будет содержать только сопротивление постоянного магнита $R_{\text{ПМ}}$. Поскольку $R_{\text{ПМ}} \gg R_{\text{сум}}$, то сопротивление на входе устройства контроля резко увеличивается и ток в датчике тока практически исчезает. Таким образом, по величине тока в датчике тока можно определить состояние фрикционного узла.

Для улучшения эксплуатационных характеристик устройства диагностики ЭМУ ПМ была получена его наиболее целесообразная схема. В качестве объекта испытания был взят электромеханический тормоз типа ФМТ1 с постоянными магнитами. В результате наблюдений, объем которых составил 10^4 включений тормоза, было выявлено, что происходят кратковременные ложные срабатывания реле при разомкнутом тормозе. Это можно объяснить наличием в зазоре металлической пыли в следствие износа фрикционных поверхностей. Эта пыль образует электропроводящие мостики. Наблюдение и анализ осциллограмм ложных срабатываний (отказов) позволили определить, что их основными параметрами являются следующие величины: T – длительность (время отказа); t_1 – длительность отдельного ложного сигнала; t_2 – длительность отдельного достоверного сигнала. В течение времени T , равном $5 \cdot 10^{-1} \div 5 \cdot 10^{-2}$ с, происходит многократное изменение напряжения на контакте, причем t_1 меньше, чем t_2 , а именно, $t_1 = 1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-3}$ с, а $t_2 = 2 \cdot 10^{-3} \div 10 \cdot 10^{-3}$ с.

С целью определения зависимости числа отказов от напряжения, приложенного к контакту, была проведена серия экспериментов при напряжениях 24, 18, 12, 6 В. При этом рабочий зазор δ_p выдерживался равным $0,5 \div 0,6$ мм, а режим работы тормоза не изменялся. Результаты эксперимента показали, что величина напряжения не влияет на надежность работы контакта.

Вторая серия экспериментов была направлена на определение зависимости числа отказов от величины зазора между якорем и полюсами магнитопровода тормоза. Выявлено, что при уменьшении зазора δ_p ниже 0,4 мм число отказов резко увеличивается и при зазоре $\delta_p = 0,2$ мм устанавливается устойчивое состояние отказа (см. рис.16). При зазорах $\delta_p > 0,6$ мм число отказов от величины зазора практически не зависит (наблюдения проводились при зазорах не более 1,5 мм, реально применяемых в ЭМУ ПМ). При этом проведенный анализ показал, что обычно в ЭМУ ПМ минимальный воздушный рабочий зазор δ_p составляет не менее $0,3 \div 0,4$ мм.

Проведенные исследования позволили получить схему устройства с защитой от ложных срабатываний (рис.17). Она содержит сигнальное реле P , последовательно с которым включен контакт K «якорь – полюса сердечника». Для сглаживания выпрямленного напряжения в схему введен конденсатор C .

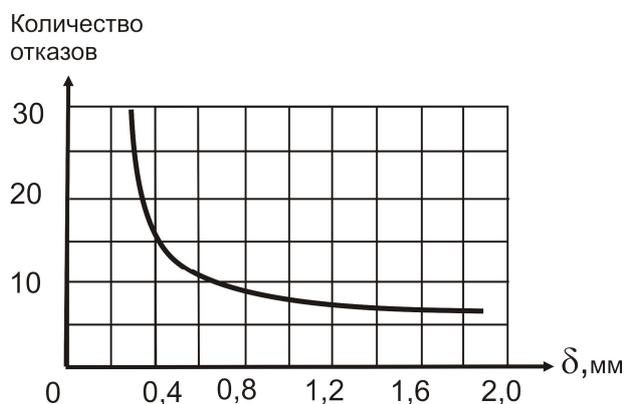


Рис.16. Зависимость интенсивности отказов от величины воздушного зазора ЭМУ ПМ

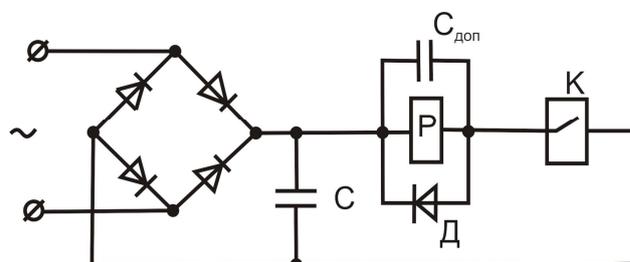


Рис.17. Электрическая схема устройства контроля с защитой от ложных срабатываний

Установлено, что для отстройки от отказов в измерительную схему нужно ввести дополнительный конденсатор $C_{доп}$, подключенный параллельно обмотке P реле, а для снятия скачков напряжения при размыкании контакта параллельно обмотке P реле дополнительно включить диод D .

Разработанное устройство обеспечивает высокую надежность работы системы контроля как за замыканием, так и за размыканием ЭМУ ПМ. При выполнении датчика тока в виде, например, оптрона можно обеспечить автоматическое управление оборудования с учетом состояния ЭМУ ПМ. Например, в приводах автоматизированных станков сигнал с фотоприемника оптрона будет обрабатываться электроавтоматикой станка, и система числового программного управления будет или разрешать работу станка, или отключать его.

В работе описаны также разработанные устройства бесконтактного контроля, реализующие статические методы, которые контролируют установившееся положение якоря по отношению к полюсам магнитопровода, и динамические методы, которые выполняют контроль за наличием перемещения якоря. Устройство первого типа контролирует положение якоря по изменению потока рассеяния постоянного магнита при изменении воздушного зазора δ . Устройство второго типа реализует известный эффект -провал в кривой тока управляющего электромагнита при движении якоря, обусловленный противодействующей ЭДС (см. рис.2).

Шестая глава посвящена разработке методик расчета и компьютерному моделированию поляризованных исполнительных ЭМУ.

Расчет электромагнитного привода ЭМУ ПМ разделен на два этапа: предварительный расчет и уточненный расчет. Предварительный расчет заключается в вычислении геометрии и обмоточных данных управляющего электромагнита и постоянных магнитов, а также определении параметров возвратной пружины. При этом расчет геометрии магнитной системы электромагнитного

привода выполняется с учетом возможностей и удобства встраивания ЭМУ ПМ в приводной электродвигатель (для муфт и тормозов) или из конструктивных размеров трубопровода (для клапанов). В работе получены аналитические выражения, которые связывают размеры постоянного магнита с требуемыми выходными параметрами ЭМУ ПМ и конструктивными параметрами электромагнитного привода, что позволяет минимизировать размеры магнита.

Уточненный расчет заключается в определении действительных рабочих точек ПМ при разных положениях якоря с учетом полученной геометрии разветвленной магнитной системы и расчетной МДС обмотки, что позволит рассчитывать фактические выходные параметры ЭМУ ПМ и при необходимости откорректировать геометрические размеры и обмоточные данные привода.

В основу традиционных методов проектирования ЭМУ ПМ положены требования выполнения заданных статических характеристик и параметров быстродействия при размыкании и замыкании их фрикционного узла. При этом учет переходных электромагнитных процессов, протекающих в нешихтованных сердечниках УЭ, в инженерных методиках обычно не делают. Но для быстродействующих систем автоматики учет этих явлений должен проводиться обязательно, т.к. вихревые токи, которые наводятся в массивных сердечниках в переходных режимах работы, замедляют нарастание магнитного потока и снижают тем самым быстродействие ЭМУ ПМ. В работе получены аналитические выражения, позволяющие *вычислять величину вихревого тока*, наводимого в сердечнике в переходных режимах работы. В основу положены результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований процесса проникновения электромагнитной волны в сплошной сердечник ЭМУ ПМ. Несмотря на относительно несложное конструктивное исполнение магнитных систем ЭМУ ПМ, их расчет, а тем более оптимальное проектирование, встречают ряд затруднений, обусловленных сложностью составления и совместного решения системы нелинейных уравнений, которыми описываются процессы в электрических и магнитных цепях. Поэтому для расчета вихревых токов и учета их влияния на быстродействие ЭМУ ПМ без применения ЭВМ, необходимо упростить реальную физическую картину. Рассмотрим основные особенности электромагнитного процесса в ферромагнитном сердечнике при возбуждении обмотки электромагнита постоянным током (рис. 18).

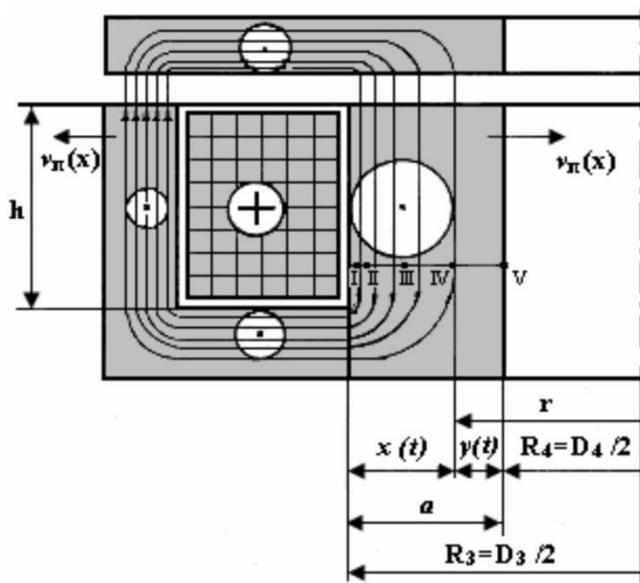


Рис. 18. Процесс проникновения магнитного потока в сердечник

В момент включения электромагнитное поле с большой скоростью проникает только в тонкий поверхностный слой сердечника, возбуждая в круговом контуре радиусом $D_3/2$ и толщиной Δ вихревой ток, который препятствует

дальнейшему движению электромагнитной волны внутрь сердечника. С течением времени плотность тока и индукция в поверхностном слое уменьшаются, что приводит к проникновению магнитного потока вглубь сердечника. Анализ экспериментальных данных показывает, что движение поля в сердечнике характеризуется существенной неравномерностью магнитной индукции по координате r . При этом увеличивающаяся глубина проникновения $x(t)$ приводит к изменению геометрических параметров и электрического сопротивления контура, по которому замыкается вихревой ток. С одной стороны величина $x(t)$ ограничена поверхностью полюса, а с другой – фронтом движущейся вовнутрь сердечника волны.

Для анализа особенностей проникновения электромагнитной волны в сердечник управляющего электромагнита были проведены экспериментальные исследования тормозного ЭМУ ПМ для электродвигателя типа 4А80В4. В начальный период переходного процесса индукция вблизи внутренней границы полюса растет очень быстро, оставаясь по величине больше установившегося значения $B_y=0,54$ Тл вплоть до момента времени $t=0,114$ с, когда ток в обмотке достигает установившегося значения.

Анализ экспериментальных данных позволил получить упрощенные формулы, устанавливающие зависимость вихревого тока от времени при подключении напряжения питания. Допустим, что граница движущегося потока определяется глубиной проникновения волны $x(t)$ (рис.18). Тогда круговой контур, в котором в любой момент времени действует ЭДС, являющаяся причиной вихревого тока, имеет среднюю длину $l_k(t)=\pi[2R_3-x(t)]$ и сечение $S_k=hx(t)$, а сама ЭДС $e(t)$ возбуждается магнитным потоком $\Phi(t)$, движущимся к оси сердечника со скоростью $V_n(t)$:

$$e(t) = B_{cp}(t) \cdot l_k(t) \cdot V_n(t), \quad (19)$$

где $B_{cp}(t)$ – среднее мгновенное значение магнитной индукции.

Исследования показали, что средняя по всей площади полюса индукция хорошо аппроксимируется функцией

$$B_{cp} = B_y (\sigma - \sigma \cdot e^{-t/T}), \quad (20)$$

где $\sigma \leq 1$ – коэффициент, зависящий от материала сердечника.

В работе показана процедура определения величины σ . Зависимость вихревого тока от времени может быть записана в виде

$$i_g(t) = e(t) / R_k(t), \quad (21)$$

где $R_k(t) = \rho_c \cdot l_k(t) / S_k(t)$ – сопротивление контура вихревого тока; ρ_c – удельное сопротивление материала сердечника.

Примем следующие допущения:

1. Индуктивность обмотки УЭ постоянна $L=\text{const}$, а магнитный поток есть экспоненциальная функция времени

$$\Phi = \Phi_y (\sigma - e^{-t/T}) \quad (22)$$

Где Φ_y – установившееся значение магнитного потока; $T=L/R$ – постоянная времени; L и R – индуктивность и активное сопротивление обмотки.

2. В любой момент времени переходного процесса скорость движения магнитного потока в пределах глубины проникновения $x(t)$ одна и та же.

3. Пренебрегая явлением магнитного последействия, будем считать, что переходной процесс в ферромагнитном сердечнике заканчивается в момент времени, когда ток обмотки достигает установившегося значения.

Кроме того, примем вначале, что, проникая вглубь сердечника, магнитный поток равномерно распределяется по торцевой поверхности и в каждый момент времени пронизывает площадь (рис. 17), равную

$$S_k(t) = \pi(R_3^2 - r^2) - S_n - \pi(y^2 + 2r_4 y), \quad (23)$$

где r – текущая координата; $S_n = \pi(R_3^2 - R_4^2)$ – торцевая поверхность полюса.

С учетом принятых допущений уравнение, описывающее изменение магнитной индукции в полюсе электромагнита, примет вид

$$B_y(1 - \sigma \cdot e^{-\frac{t}{T}}) = \Phi_y(1 - e^{-\frac{t}{T}}) / [S_n - \pi(y^2 + 2R_4 \cdot y)]. \quad (24)$$

После ряда преобразований получим

$$i_g(t) = \frac{\Phi_y h}{2\pi T \rho_c} \cdot \frac{R_3(1 - \sigma \cdot e^{-\frac{t}{T}}) - \sqrt{(1 - \sigma \cdot e^{-\frac{t}{T}})[R_4^2(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + R_3^2(1 - \sigma)e^{-\frac{t}{T}}]}}{(1 - \sigma \cdot e^{-\frac{t}{T}}) \sqrt{(1 - \sigma \cdot e^{-\frac{t}{T}})[R_4^2(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + R_3^2(1 - \sigma)e^{-\frac{t}{T}}]}} (1 - \sigma)e^{-\frac{t}{T}}. \quad (25)$$

Размагничивающее действие вихревого тока учитывается путем суммирования его величины с магнитодвижущей силой обмотки, определяемой при расчете магнитной цепи. Таким образом, полученные аналитические выражения позволяют уже на стадии проектирования ЭМУ ПМ вычислять обмоточные данные его УЭ с учетом величины вихревого тока.

Рассмотрены особенности условий работы и вопросы *расчета и конструирования узла трения* фрикционных исполнительных силовых ЭМУ ПМ.

Рассмотрены особенности расчета фрикционных муфт сцепления с электромагнитным управлением при различных конструкциях, например, при наличии фрикционной накладки между полюсами. Получены аналитические выражения для расчета угловой скорости, угла поворота и времени пробуксовки в процессе захвата ведомой полумуфты, что позволяет оценивать быстродействие и погрешности фрикционных муфт.

Далее в работе приведены *методики расчета и проведены экспериментальные исследования нагрева* наиболее уязвимых в тепловом отношении узлов исполнительных силовых ЭМУ ПМ, которыми являются фрикционный узел и обмотка управляющего электромагнита. Сравнение результатов расчета и эксперимента, приведенные в работе, показывает их хорошую сходимость.

В работе приведены результаты расчета тормозных ЭМУ ПМ с использованием разработанных методик расчета, предназначенные для тормозного режима работы. Их общий вид показан на рис. 19. Указанные тормоза разработаны для комплектации вентильных и высокомоментных электродвигателей, используемых в электроприводах различных автоматизированных модулей, линий и систем, промышленных роботов, а также в другом технологическом оборудовании. Полученные выходные параметры разработанных тормозов нахо-

дятся на уровне лучших известных аналогов, что подтверждает эффективность предложенных в работе конструкций и методик проектирования ЭМУ ПМ.



Рис. 19. Общий вид тормозных ЭМУ ПМ типа ФМТ

пускают ток другой полярности и вся система размагничивается. В работе приведена разработанная *методика расчета переходных процессов таких ЭМУ ПМ с электроимпульсным управлением*. Поскольку при выполнении практических инженерных расчетов использование численных методов затруднительно, поэтому был применен метод графического интегрирования. Разработана процедура вычисления законов изменения тока и магнитного потока, по которым можно определить закон нарастания усилия сжатия $F(t)$ фрикционных элементов и, соответственно, рассчитать параметры быстродействия таких ЭМУ ПМ.

Рассмотрены вопросы *оптимизации электромагнитного привода* исполнительных ЭМУ ПМ, которые включают в себя оптимизацию управляющего электромагнита и схемы его управления. Показана последовательность решения задачи оптимизации магнитопровода и обмотки УЭ. Приведены результаты исследований и даны рекомендации, используя которые уже на первом этапе проектирования ЭМУ ПМ можно выбрать наиболее целесообразную схему управления ЭМУ ПМ.

Далее в работе рассмотрены вопросы компьютерного моделирования и исследований ЭМУ ПМ. Было проведено преобразование уравнений, описывающих работу ЭМУ ПМ, к виду, удобному для компьютерного моделирования. На базе этих уравнений разработана компьютерная модель ЭМУ ПМ, содержащая модели его электрической и механической частей. Модель электрической части позволяет получить изменение электрических параметров в цепи управляющего электромагнита, например, токов $i(t)$ и напряжений $u(t)$, в зависимости от параметров питающей сети, схемы управления и собственных параметров R и $L(\delta)$ этого электромагнита. Модель механической части позволяет получить изменение момента трения $M_T(t)$, создаваемого фрикционным узлом,

Наряду с традиционными конструкциями, известны исполнительные силовые ЭМУ ПМ, в которых питание на обмотку управляющего электромагнита подается кратковременно (десятые доли секунды). При пропуске тока обеспечивается намагничивание постоянного магнита, после чего питание отключается и фрикционный узел удерживается в замкнутом состоянии магнитным полем ПМ. Для размыкания фрикционного узла по обмотке кратковременно про-

в зависимости от соотношения усилий, создаваемых магнитным полем постоянного магнита F_m и возвратной пружины F_{np} , и тягового усилия $F_{эм}(t)$ управляющего электромагнита, определяемого током $i(t)$ в его обмотке.

Разработанная модель ЭМУ ПМ позволяет проводить исследования эксплуатационных режимов работы различного технологического оборудования. Для примера на рис. 20 показана компьютерная модель привода главного движения токарно-винторезного станка 16К20, содержащего АД со встроенным ЭМУ.

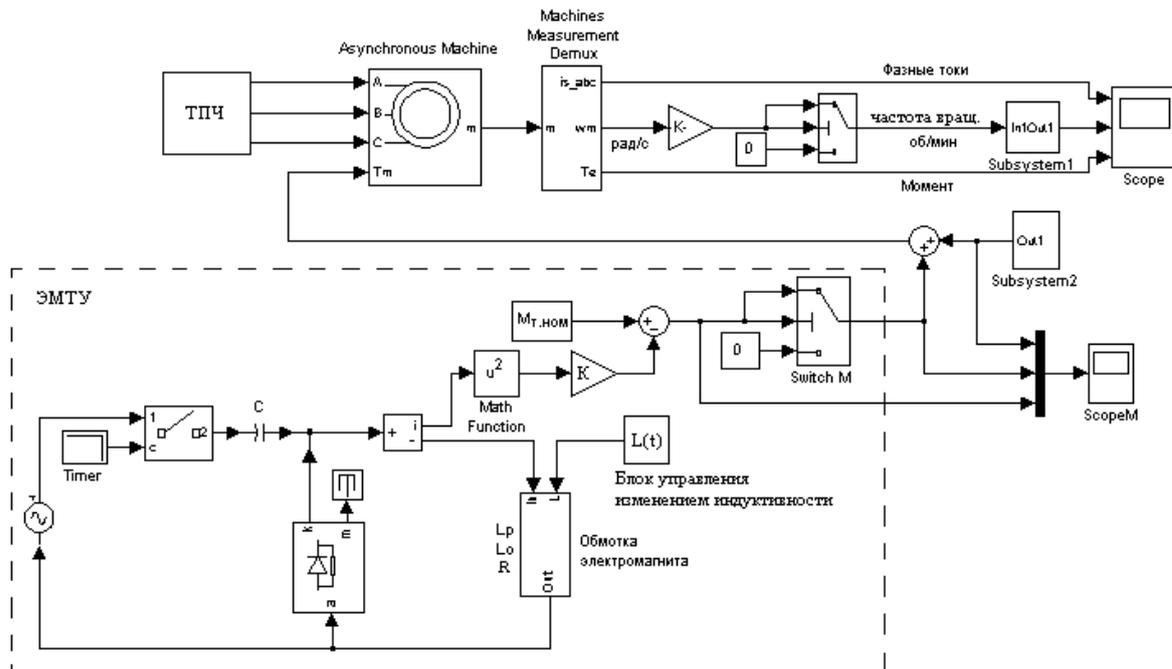


Рис.20.Компьютерная модель привода главного движения токарно-винторезного станка

На порт Tm подается сигнал, равный суммарному механическому моменту на валу двигателя, который складывается из момента нагрузки, который имитируется блоком Subsystem 2, и тормозного момента $M_m(t)$, создаваемого ЭМУ.

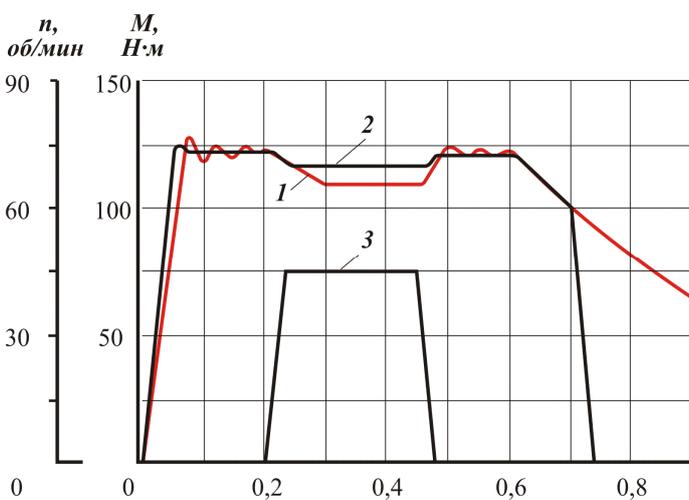


Рис. 21. Кривые частоты вращения шпинделя станка 16К20

ЭМУ. Блок Subsystem 1 может содержать модель системы передачи движения от вала двигателя к рабочему органу приводного механизма. АД питается от транзисторного преобразователя IGBT, содержащего модуль IRG40KD1200.

С помощью разработанной компьютерной модели проведены виртуальные исследования. На рис. 21 приведены зависимости частоты вращения шпинделя станка от времени под нагруз-

кой без использования ЭМТУ и регулятора частоты (кривая 1) и с использованием ЭМТУ и ТПЧ по схеме, разработанной в главе 5. Моделирование выполнено при нагрузочной диаграмме, имеющей вид кривой 3, которая формируется блоком Subsystem 2. Из рис. 21 видно, что применение системы управления электропривода «ТПЧ – АД с ЭМТУ» обеспечивает стабилизацию частоты вращения электродвигателя, значительно снижает перерегулирование скорости и при пуске, и при изменении нагрузки, а также обеспечивает быстрое торможение шпинделя.

В приложении представлены листинг программы работы микропроцессорного устройства управления, пример расчета фрикционного тормозного ЭМУ ПМ, результаты разработки опытных образцов малогабаритных тормозных устройств для станкостроения и робототехники, а также акты о внедрении полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ современного состояния вопросов теории, расчета и конструирования различных типов фрикционных и позиционных исполнительных силовых ЭМУ ПМ. Составлены классификации силовых ЭМУ ПМ и схем управления ими по функциональным и конструктивным признакам.

2. Разработаны теоретические основы исполнительных силовых ЭМУ ПМ: рассмотрены особенности процессов включения и отключения электромагнитного привода ЭМУ ПМ; предложены аналитические зависимости, описывающие электромеханические процессы, протекающие при замыкании и размыкании их фрикционного узла; разработаны универсальные математические модели и алгоритмы расчета установившихся и динамических режимов работы электромагнитного привода при использовании различных СУ; разработаны нелинейные модели и алгоритмы расчета переходных процессов с учетом процесса проникновения электромагнитной волны в сплошной магнитопровод управляющего электромагнита; выведены формулы для расчета величины вихревого тока, наводимого в магнитопроводе в переходных режимах работы.

3. На основании разработанной теоретической базы созданы инженерные методики расчета силовых ЭМУ ПМ различных типов с заданным комплексом выходных параметров. При этом получены аналитические выражения, которые позволяют проводить синтез геометрических параметров управляющего электромагнита и постоянного магнита, предложена методика расчета и проведены экспериментальные исследования нагрева основных узлов ЭМУ ПМ в различных режимах работы, даны рекомендации по выбору рациональной топологии схемы управления и выполнению оптимизационного расчета ЭМУ ПМ. Приведен пример практического использования разработанной методики расчета.

4. Разработаны новые конструкции ЭМУ ПМ:

- базовая конструкция, которая имеет разветвленную магнитную систему за счет дополнительного полюса;

- конструкция, в которой с целью повышения фрикционного момента введен воздушный зазор между внутренним полюсом и якорем;

- запатентован новый способ растормаживания ЭМУ с постоянными магнитами в обесточенном состоянии и устройство для его реализации;
- конструкции фрикционного узла с автоматической компенсацией износа фрикционных элементов, которые обеспечивают постоянство рабочего воздушного зазора в течение всего срока службы.
- система импульсного управления ЭМУ ПМ с двумя электромагнитами.

Проведена оценка предложенных решений и даны рекомендации по выбору оптимальной геометрии.

5. Разработан и запатентован целый ряд новых способов и схем управления, которые позволяют:

- исключить проскальзывание муфты и уменьшить износ фрикционных поверхностей за счет повышения момента трения при пуске и реверсе;
- сохранить режим работы исполнительных силовых ЭМУ ПМ при кратковременных аварийных отключениях питания;
- улучшить работу тормозных ЭМУ за счет предварительного снижения частоты вращения ротора электродвигателя путем электрического торможения, с последующим торможением при помощи фрикционного тормоза;
- улучшить параметры быстродействия электропривода в переходных режимах работы за счет обеспечения форсированного изменения тока в обмотке управляющего электромагнита в различных режимах работы.

Кроме того, разработаны:

- новый способ управления электромагнитными двухсторонними переключающими муфтами с ПМ;
- микропроцессорная система управления электроприводом, содержащим электромагнитную фрикционную муфту.

6. Разработаны устройства диагностики состояния ЭМУ ПМ, реализующие контактный и бесконтактный способы контроля и обеспечивающие регистрацию установившегося положения якоря или осуществляющие контроль за фактом движения якоря. Проведены экспериментальные исследования разработанных устройств.

7. Выполнено приведение уравнений ЭМУ МП к виду, удобному для моделирования, и составлена компьютерная модель ЭМУ ПМ. Проведены виртуальные исследования переходных процессов, протекающих как в самих ЭМУ ПМ при различных СУ, так и в системах, содержащих ЭМУ ПМ.

Эффективность разработанных конструкций и схемных решений, а также корректность и точность полученных математических моделей и методик расчета подтверждены экспериментальными исследованиями. Результаты разработки серии малогабаритных тормозных устройств показали, что их технические показатели соответствуют современному техническому уровню, что также подтверждает эффективность разработанных конструкций и методик расчета.

Разработанные исполнительные силовые ЭМУ ПМ могут найти широкое применение в качестве элементной базы при создании высокоэффективных автоматизированных систем управления, применяемых в мехатронике, робототехнике, станкостроении, в различных технологических установках и т.п.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Монографии:

1. Галбаев, Ж.Т. Проектирование и моделирование электромагнитных устройств для систем автоматики [Текст]/ Ж.Т. Галбаев. – Б.: Изд-во «Илим», 2011. – 218 с.

2. Галбаев, Ж.Т. Быстродействующие электромагнитные механизмы с постоянными магнитами и схемы их управления для систем автоматики [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев. – Б.: Изд-во «Илим», 2008. – 274 с.

3. Галбаев, Ж.Т. Электродвигатели с встроенным электромеханическим тормозом для станков и роботов [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев. – Бишкек: Илим, 2005. – 314 с.

Статьи:

4. Галбаев, Ж.Т. Влияние электромеханического тормозного устройства на режимы пуска и остановки электродвигателей тормозных модификаций [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев // Москва, «Электротехника». – 2000. – № 6. – С. 51-56.

5. Galbaev, J.T. Influence of the electromechanical braking system on the starting and stopping of braking electric motors/ I.V. Bockkarev, J.T. Galbaev // Russian Electric Engineering. – NewYork, AllertonPress, Inc. 2000. – Vol. 72. – № 6, –pp. 77-83.

6. Галбаев, Ж.Т. Расчет нагрева электромеханических тормозных устройств с учетом регулирования энергопотребления в различных режимах работы [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев // Мат-лы междунаро. конференции «Энергосбережение – проблемы, современные технологии и управление», КТУ. – Б.: «Техник». – 2004. – С. 226-229.

7. Галбаев, Ж.Т. Оценка теплового состояния фрикционного узла электромеханических тормозных устройств для станочных электроприводов [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев // Мат-лы международного научно-техн. симпозиума «Образование через науку». – Б.: Техник. – 2004. – С. 289-292.

8. Галбаев, Ж.Т. Математическая модель переходных процессов в асинхронных электродвигателях со встроенным электромеханическим тормозным устройством [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев // Вестник КНТУ. – 2005. – №7, – С. 213-220.

9. Галбаев, Ж.Т. Коммутационные перенапряжения, возникающие в тормозных устройствах для мехатронных систем в переходных режимах работы [Текст]/И.В. Бочкарев, А.А.Соколов, М.Г. Гунина, Ж.Т. Галбаев // Известия КГТУ №9. Т.1. КГТУ. – Б.: Техник. – 2006. – С.232-237.

10. Галбаев, Ж.Т. Разработка электропривода постоянного тока с цифровым управляющим устройством для робототехнических и мехатронных систем [Текст]/И.В. Бочкарев, И.Ш. Кадыров, Ж.Т. Галбаев // Мат-лы второй Международной научно-техн. конф. «Проблемы управления и информатики», Институт автоматики НАН КР. – Бишкек, 2007. – С. 269 – 275.

11. Галбаев, Ж.Т. Расчет поляризованных электромагнитных клапанов с дистанционным управлением [Текст] / Ж.Т. Галбаев // Мат-лы второй Международной научно-техн. конф. «Проблемы управления и информатики», Институт автоматики НАН КР. - Бишкек, 2007. – С.264-268
12. Галбаев, Ж.Т. Выбор типа постоянных магнитов для поляризованных электромагнитных механизмов и разработка устройства для их намагничивания [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев // Известия КГТУ. – 2007. – №11.– С.65-70.
13. Галбаев, Ж.Т. Выбор оптимальных параметров силовых элементов широко – импульсного преобразователя системы управления электроприводом постоянного тока [Текст]/И.В. Бочкарев, И.Ш. Кадыров, Ж.Т. Галбаев // Проблемы автоматики и управления: Научно-техн. журнал. НАН КР. – Б.: Илим, 2007. –С.185-189.
14. Галбаев, Ж.Т. Разработка схем управления позиционным электроприводом переменного тока с улучшенными эксплуатационными показателями [Текст] / Ж.Т. Галбаев // Проблемы автоматики и управления: Научно-техн. журнал. НАН КР. – Б.: Илим, 2007. –С.198-204.
15. Галбаев, Ж.Т. Разработка и компьютерное моделирование позиционных электроприводов для автоматизированных станков и роботов [Текст]/И.В. Бочкарев, И.Ш. Кадыров, М.Г. Гунина, Ж.Т. Галбаев// Известия КРСУ. – 2007. – Том 7. – №12. – С. 88-94.
16. Галбаев, Ж.Т. Компьютерное моделирование мехатронных систем для промышленных роботов и манипуляторов [Текст]/И.В. Бочкарев, М.Г. Гунина, Ж.Т. Галбаев // Известия КГТУ. – 2007. – №12. – С.123 -127.
17. Галбаев, Ж.Т. Разработка способа и устройства для растормаживания электромеханических тормозов с ПМ в обесточенном состоянии [Текст]/ Ж.Т. Галбаев // Известия КГТУ. – 2008. – №13. – С. 51-53.
18. Галбаев, Ж.Т. Разработка схемы управления электроприводом, содержащим электромагнитную муфту с постоянными магнитами [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев// Мат-лы Международной НТК «Проблемы автоматизации, управления, экономики и подготовки кадров для современных производств», Филиал БГТУ «Военмех». - Санкт-Петербург, 2008. –С.7-13
19. Галбаев, Ж.Т. Особенности процессов включения и отключения поляризованных фрикционных муфт [Текст]/ Ж.Т. Галбаев// Мат-лы Международной научно-техн. конф. «Проблемы автоматизации, управления, экономики и подготовки кадров для современных производств», Филиал БГТУ «Военмех». – Санкт-Петербург, 2008. –С.19-25.
20. Галбаев, Ж.Т. Системы энергосберегающего микропроцессорного управления асинхронных двигателей [Текст]/ Ж.Т. Галбаев, Л.А. Усачева, Е.В. Хворостьяная// Известия КГТУ. – 2008. – №13. – С. 44-50.
21. Галбаев, Ж.Т. Разработка и компьютерное моделирование электромеханических тормозных устройств для станкостроения и робототехники [Текст]/И.В. Бочкарев, М.Г. Гунина, Ж.Т. Галбаев// Москва, «Электротехника». – 2008. – №5. – С. 48-55.

22. Галбаев, Ж.Т. Исследование надежности фрикционных электромагнитных устройств для систем автоматики [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев// Проблемы автоматики и управления: Научно-техн. журнал НАН КР. – Б.: Илим, 2008. –С.180-186.
23. Галбаев, Ж.Т. Расчет магнитоэлектрического привода поляризованных фрикционных устройств [Текст] / Ж.Т. Галбаев //Проблемы автоматики и управления: Научно-техн. журнал НАН КР. – Б.: Илим, 2008. –С.187-192.
24. Галбаев Ж.Т. Влияние изменения температуры на выходные параметры электромагнитных механизмов с постоянными магнитами [Текст]/ Ж.Т. Галбаев // Известия КГТУ №14. 2008. – С. 17-21.
25. Galbaev, J.T. Development and computer simulation of electromechanical brake units for machine tool building and robotics / I.V. Bochkarev, M.G. Gunina, J.T. Galbaev // Russian Electric Engineering. - New York, Allerton Press, Inc. 2008. – Vol. 79. – № 5. –pp. 268-274.
26. Галбаев, Ж.Т. Разработка фрикционных муфт и тормозов с магнитоэлектрическим приводом [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев//Москва, Научно-техн. журнал «Электротехника». – 2009. – №7. – С. 14-20.
27. Галбаев, Ж.Т. Расчет переходных процессов поляризованных электромагнитных механизмов с электроимпульсным управлением[Текст]/ Ж.Т. Галбаев // Проблемы автоматики и управления: Научно-техн. журнал /НАН КР. – Б.: Илим, 2009. - С.94-99.
28. Галбаев, Ж.Т. Переходные процессы в массивном магнитопроводе электромагнитного привода фрикционных механизмов [Текст]/ Ж.Т. Галбаев // Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009.– Том 314. – №4. –С.79-84.
29. Галбаев, Ж.Т. Устойчивость к воздействиям внешних полей электромагнитных механизмов с постоянными магнитами [Текст]/Ж.Т. Галбаев // Известия КГТУ. – 2009. – №16. – С. 255-259.
30. Галбаев, Ж.Т. Разработка устройства диагностики состояния электро-механических устройств с постоянными магнитами [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев // Мат-лы IV Международ. НТК «Электромеханические преобразователи энергии». - Томск: Изд-во ТПУ. 2009.
31. Галбаев, Ж.Т. Разработка базовых схем микропроцессорного управления электромеханическими системами машинных агрегатов [Текст]/И.В. Бочкарев, И.Ш. Кадыров, Ж.Т. Галбаев // Известия КГТУ. – 2009. – №16. –С. 260-265.
32. Galbaev, J.T. Development of frictional couplings and brake with a magnetoelectric drive / I.V. Bochkarev, J.T. Galbaev // Russian Electric Engineering. - New York, Allerton Press, Inc. 2009. – Vol. 80. – № 7. – pp. 371-375.
33. Галбаев, Ж.Т. Разработка системы управления позиционными асинхронными электроприводами автоматизированных станков и роботов [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: Мат-лы Всероссийской НТК. – Изд-во Томского политех. университета, 2010. –С. 240- 242.

34. Галбаев, Ж.Т. Выбор топологии схемы управления электромагнитными механизмами со встроенным выпрямителем / Проблемы автоматики и управления [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев //НАН КР. – Б.: Илим, 2010. –С.143-148.

35. Галбаев, Ж.Т. Вопросы проектирования магнитной системы электромагнитных устройств с постоянными магнитами со стабильным магнитным полем [Текст]/И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев //Рахматулинские чтения: Труды международной НТК. НАН КР. – Б.: 2011. – С.212-215.

36. Галбаев, Ж.Т. Расчет переходных режимов работы электромагнитных устройств с постоянными магнитами [Текст]/И.В. Бочкарев, М.Г. Гунина, Ж.Т. Галбаев // Известия КГТУ. – 2012. – №26. – С.26-29.

37. Галбаев, Ж.Т. Схемы управления электроприводов с встроенными электромеханическими тормозными устройствами для систем автоматики [Текст]/И.В. Бочкарев, М.Г. Гунина, Ж.Т. Галбаев// Сборник трудов седьмой Всероссийской НТК с международным участием. – Благовещенск: Изд-во Амурского государственного университета. – 2013. – Т1. – С. 339-343.

38. Галбаев, Ж.Т. Разработка микропроцессорной системы управления электроприводом, содержащим электромагнитную фрикционную муфту [Текст] /И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев, А.А. Постнов // Известия КРСУ. – 2013. – Том 13. – № 7. – С. 118-122.

40. Галбаев, Ж.Т. Вопросы оптимизации исполнительных силовых электромагнитных устройств для систем управления [Текст] /И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев // Известия КГТУ, 2014. – №30. – С. 28-33.

Патенты на изобретения:

40. Пат. Кыргызстана № 1036. Способ растормаживания электромеханического тормоза в обесточенном состоянии и устройство для его осуществления / И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев. – 2008.– Бюл. №4

41. Пат. Кыргызстана № 1037. Позиционный электропривод переменного тока (варианты) / И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев. – 2008.– Бюл. № 4

42. Пат. Кыргызстана № 1057. Способ управления электроприводом, содержащего нормально замкнутую поляризованную электромагнитную муфту / И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев. – 2008.– Бюл. № 7.

43. Пат. Кыргызстана № 1206. Устройство для управления электромеханической передачей с электромагнитной муфтой Ж.Т. Галбаев. – 2009. – Бюл. № 12.

44. Пат. Кыргызстана № 1207. Способ управления электромагнитной переключающей муфтой / Ж.Т. Галбаев. – 2009. – Бюл. № 12.

РЕЗЮМЕ

Галбаев Жалалидин Токтобаевичтин диссертациясынын аталышы:
«Башкаруу системдери учун аткаруучу электромагниттик тузулушторду иштеп чыгуу жана илимий негиздерин оркундотуу» 05.13.05-эсептоо техникасынын тузулуштору жана элементери кесипчилиги боюнча техника илиминин доктору илимий даражасына талапкер»

Негизги создор: автоматаштырылган башкаруу системасы, сурулгучтук-кошкуч, электрмеханикалык токтотмо, электромагниттик сарп башкаргыч, турактуу магнит, электромагнит, сурулгучтук туйун, электромеханикалык отможараян, котормолоо жана дал тактоо тузулушу.

Изилдоонун объектиси: башкаруу системи учун тез аракет этуучу фрикциондук жана позициондук турактуу магниттер менен электромагниттик тузулуш.

Диссертациялык иштин максаты: эксплуатациялык корсоткучтору жакшыртылган автоматиканын системин тузууго мумкунчулук берген, турактуу магниттуу электромагниттик тузулуштордун назариятын оркундотуу менен алардын техника-экономикалык корсоткучторун жакшыртуу жана эксплуатациялык мумкунчулукторун кенейтуу, жалпылашкан математикалык улгусун жана алгоритмикалык эсептоолорду тузуу, башкаруунун ыкмаларын, солокотторун жана иштоонун дал тактоо тузулушторун, конструкциялары боюнча келечектуу жаны техникалык чечимдерди иштеп чыгуу.

Алынган жыйынтыктар жана алардын жанылыгы: ТМ ЭМТ ар кандай иштоо шартарында, ар кандай башкаруу солокотторун пайдаланууда журуучу жараяндардын эсептоо алгоритми жана жалпыланган математикалык улгусу алынды жана ТМ ЭМТ назарияты иштелип чыкты. ТМ ЭМТ отмо иштоо режимдерин электромагниттик талаанын майдаланбаган магнит откоргучко сунгуп кируу динамикасын эсеби менен сандык эсептоо ыкмасын иштелип чыкты.

Ар турдуу типтеги ТМ ЭМТ структурлоо жана эсептоо ыкмалары сунушталынды. ТМ ЭМТ жаны конструкциялары, аларды башкаруу ыкмалары жана солокоттору, мындан тышкары техника-экономикалык корсоткучторун жана эксплуатациялык мумкунчулукторун жогоруулатуучу, жумушту дал тактоо тузулуштору иштелип чыкты жана патентелди. Алардын негизинде ТМ ЭМТ шайма-шай башкаруу жана дал тактоотузулуштору иштелип чыкты жана сыноо улгулору даярдалынды. ЭМТ турактуу магнитин магнитештируу учурунда аз энергия сарптаган магнитештируучу тузулуш сунушталды.

ТМ ЭМТ сунушталган эсептоо ыкмасынын негизинде аз коломдуу токтотуучу тузулуштордун шайма-шай катары иштелип чыкты.

Колдонуу областы: мехатроникада, роботтехникасында, станок курууда жана башка ар турдуу технологиялык коюлмаларда ж.б. автоматаштырылган башкаруу системдеринде.

РЕЗЮМЕ

диссертации Галбаева Жалалидина Токтобаевича на тему:
«Развитие теоретических основ и разработка исполнительных
электромагнитных устройств систем управления» на соискание
ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.05 –
«Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

Ключевые слова: исполнительные силовые электромагнитные устройства, автоматизированная система управления, фрикционная муфта, электромеханический тормоз, электромагнитный клапан, постоянный магнит, электромагнит, фрикционный узел, электромеханические переходные процессы, устройства форсировки и диагностики.

Объект исследования: фрикционные и позиционные исполнительные силовые электромагнитные устройства для систем управления.

Цель диссертационной работы: создание высокоэффективных исполнительных электромагнитных устройств на базе развития их теории, создании научно обоснованных методик расчета, а также разработки новых технических решений по конструкциям, схемам управления и устройствам диагностики работы, применение которых позволит улучшить эксплуатационные параметры систем управления.

Полученные результаты и их новизна: разработана теория исполнительных силовых ЭМУ ПМ и получены обобщенные математические модели и алгоритмы расчета процессов, протекающих в различных режимах работы при использовании различных схем управления. Разработана методика численного расчета переходных режимов работы ЭМУ ПМ с учетом динамики проникновения электромагнитного поля в нешихтованный магнитопровод. Предложены методики расчета и конструирования различных типов исполнительных силовых ЭМУ ПМ. Разработаны и запатентованы новые конструкции исполнительных силовых ЭМУ ПМ, способы и схемы их управления, а также устройства диагностики работы, которые улучшают их технические показатели и расширяют эксплуатационные возможности. На их базе разработаны и изготовлены опытные образцы универсальных устройств управления и диагностики ЭМУ ПМ.

На базе предложенной методики расчета ЭМУ ПМ разработана серия фрикционных тормозных устройств.

Область применения: автоматизированные системы управления, применяемые в мехатронике, робототехнике, станкостроении, в различных технологических установках и т.п.

SUMMARY

**Galbaev Zhalalidin Toktobaevich's dissertation on the theme:
" Development of theoretical foundations and development executive
electromagnetic devices control systems"
on competition the degree of doctor of technical sciences, specialty
05.13.05 - Elements and devices of computer facilities and control systems**

Keywords: executive power electromagnetic devices, automatic control system, torque limiters, electronic brake, a solenoid valve, a permanent magnet, an electro-magnet, the friction assembly, electromechanical transients, forcing the device and diagnostics.

Object of study: friction and positional executive power electromagnetic devices for control systems.

The aim of the thesis: creation of high executive electromagnetic devices based on the development of their theory, the creation of scientifically based methods of calculation, as well as the development of new technical solutions for structures, control circuits and devices diagnostic work, the application of which will improve the performance parameters of control systems.

Results and novelty: developed theory of executive power EMDPM and the generalized mathematical models and algorithms for processes in the various modes of operation using different control schemes. The technique of numerical calculation of transients of EMDPM considers the dynamics of penetration of the electromagnetic field in a magneticolid. The methods of calculation and construction of various types of executive power EMD PM. Developed and patented new design of executive power EMD PM, methods and schemes of their management, and diagnostics of devices that improve their technical performance and enhance operational capabilities. Based on them are designed and built prototypes of universal control devices and diagnostics EMD PM.

On the basis of the proposed methodology for calculating EMD PM has developed a series of friction brakes.

Application: automatic control systems used in mechatronics, robotics, machine tool, in various technological applications etc.



Подписано к печати 12.11.2014 г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆.

Бумага офс. Печать офс. Объем 2,75 п.л.

Бишкек, ул. Сухомлинова, 20. ИЦ “Текник” КГТУ им. И.Раззакова, т.: 54-29-43

e-mail: beknur@mail.ru

