

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

Диссертационный совет Д. 05.09.381

На правах рукописи  
УДК.: 004.31:62-883

**КАДЫРОВ ИШЕНБЕК ШАКИРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ  
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАШИННЫХ АГРЕГАТОВ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства  
вычислительной техники и систем управления.

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук.

**БИШКЕК 2009**

Работа выполнена на кафедре «Информационные и машиностроительные технологии» филиала Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова в г. Бишкеке

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
Бочкарев Игорь Викторович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Обозов Алайбек Джумабекович;

доктор технических наук, профессор  
Бримкулов Улан Нургазиевич;

доктор технических наук, профессор  
Бекбаев Амангелды Бекбаевич.

Ведущая организация: Алматинский Институт энергетики и связи  
Республика Казахстан, г. Алматы.

Защита состоится 12 июня 2009 г. в ауд.118 в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д. 05.09.381 при Институте автоматики и информационных технологий Национальной Академии наук Кыргызской Республики по адресу:

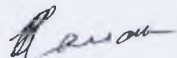
720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265, Институт автоматики и информационных технологий.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НАН КР.

Автореферат разослан 8 мая 2009 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета к.т.н., с.н.с.



В.И. Замай

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Одной из стратегических задач современного инженерного научно-технического прогресса, определяющего развитие экономики страны, является широкомасштабное применение микропроцессорных средств и устройств автоматики, направленное на повышение технико-экономических показателей энергоэлектрических машинных агрегатов (МА). Технический уровень и эксплуатационные показатели этих МА однозначно определяются параметрами и характеристиками их электромеханических систем (ЭМС), которые являются их энергетической основой. Реализация ЭМС на основе микропроцессорных устройств позволяет значительно расширить физические возможности ЭМС МА, снизить их стоимостные и массогабаритные показатели, улучшить динамические и регулировочные свойства, обеспечить возможность гибкой настройки их параметров в зависимости от конкретных эксплуатационных условий, а также повысить качество и надежность работы за счет диагностики текущих рабочих параметров в реальном масштабе времени. Однако на практике в большинстве функционирующих ЭМС для регулирования параметров используются аналоговые регуляторы и встроенные датчики регулируемых параметров, что не только усложняет конструкцию ЭМС, но и ухудшает их эксплуатационные показатели.

Проблемы комплексной автоматизации технологических процессов существенно усложняются огромным разнообразием МА, к которым относятся автоматизированные станки, робототехнические и мехатронные системы, подъемно-транспортные машины и механизмы, комплексные системы из автономных рассредоточенных объектов и т. д. Перспективность использования микроконтроллеров в их системах управления объясняется все возрастающими требованиями к технико-экономическим показателям этих МА, необходимостью организации обмена информации с устройствами управления различных уровней и обеспечения непрерывной диагностики состояния для надежной защиты от нарушений требуемого режима работы. При этом управляющие микроконтроллеры формируют программу алгоритма работы регуляторов основных параметров ЭМС, а вычислительные микроконтроллеры реализуют алгоритмы косвенного вычисления текущих координат с учетом особенностей электромагнитных процессов в электродвигателе. Это позволяет отказаться от применения в составе ЭМС встроенных датчиков регулируемых параметров. Переход к системам бездатчикового управления, в которых для оценки механических координат привода (положения, скорости, ускорения) используются специальные цифровые наблюдатели, существенно упрощает организацию обратных связей в системе управления и повышает тем самым качество работы ЭМС при одновременном ее удешевлении. Однако эффективные инженерные методы построения, расчета и синтеза микропроцессорных элементов и устройств для указанных электромашиных агрегатов в настоящее время отсутствуют.

**Целью работы** являются повышение технического уровня и расширение эксплуатационных возможностей микропроцессорных систем управления

ЭМС МА путем разработки быстродействующих, высокоточных и надежных управляющих устройств, содержащих:

- «Тиристорный преобразователь – двигатель» (ТП-Д) для главного движения металлорежущих станков и промышленных роботов;
- «Широтно-импульсный преобразователь – двигатель» (ШИП-Д) для напольного транспорта;
- «Непосредственный преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (НПЧ-АД) для землеройных машинных агрегатов;
- «Управляемый преобразователь – двигатель» (УП-Д) для систем из автономных рассредоточенных объектов.

Основная идея работы заключается в усовершенствовании систем управления машинных агрегатов, участвующих в технологическом процессе, путем оптимального регулирования координат приводного электродвигателя ЭМС МА с применением современных микроконтроллеров и в создании базовых универсальных структур и методик синтеза ЭМС, а также методов построения и алгоритмов расчета микропроцессорных систем их управления, которые могут быть легко адаптированы для каждого конкретного типа ЭМС МА.

#### Задачи исследований.

1. Анализ кинематических звеньев механизмов в составе различных машинных агрегатов и установление зависимости влияния механической части агрегата на его ЭМС.
2. Разработка базовых схем микропроцессорного управления ЭМС металлорежущих станков, промышленных роботов, землеройных машин, напольного электротранспорта и комплекса систем из автономных рассредоточенных объектов.
3. Разработка алгоритмов исследования режимов опрокидывания инвертора в электромеханических системах с активным характером нагрузки.
4. Разработка инженерных методов расчета и выбора силовых элементов вентиляльных преобразователей с учетом условий эксплуатации машинных агрегатов различных типов.
5. Разработка элементов систем управления для силовых преобразовательных устройств с целью реализации оптимального закона движения машинными агрегатами.
6. Исследование режимов работы основных узлов систем управления вентиляльными преобразователями, реализованных аппаратным методом с применением аналоговых и цифровых микросхем, и оптимизация их параметров.
7. Разработка микропроцессорных систем управления вентиляльными преобразователями, исследование режимов работы систем управления на основе создания их математических моделей.
8. Усовершенствование методов синтеза микропроцессорных систем управления для ЭМС машинных агрегатов переменного и постоянного тока.
9. Разработка микропроцессорных систем управления несколькими автономными рассредоточенными объектами, входящими в единую электромеханическую систему.

Выбранное направление диссертационной работы связано с научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами кафедр «Информационные и машиностроительные технологии» филиала БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова в г. Бишкеке и «Электромеханики» КГТУ им. И. Раззакова по теме «Разработка и исследование электромеханических преобразователей энергии и систем их управления» (№ государственной регистрации 0003457).

Методы исследований. При разработке и исследовании элементов и устройств ЭМС МА, исследовании электромагнитных и электромеханических процессов и решении задач подчиненного регулирования использованы методы математического и компьютерного моделирования. Синтез систем микропроцессорного управления производился методом математического моделирования, в котором операции вычисления реальных электрических переменных при создании алгоритма программы для выработки воздействий на объект в цифровой форме производились численным методом Эйлера. При исследовании устойчивости систем с НПЧ-АД использован метод z-преобразования Лапласа.

#### Научная новизна.

1. Впервые получена математическая модель аварийных режимов работы устройств ЭМС постоянного и переменного тока землеройных машин, позволяющих при внезапном отключении питающего напряжения преобразовать высвобождающуюся при спуске груза механическую энергию в электрическую.
2. Разработаны научные подходы и созданы методики расчетов силовых элементов на базе полупроводниковых тиристоров и устройств с широтно-импульсной модуляцией, а также методики выбора оптимальных схемных решений как силовой части, так и систем управления.
3. Разработана и обоснована методика расчета устойчивости работы устройства преобразования частоты в системе НПЧ-АД при работе в режимах источника напряжения и источника тока с использованием математического аппарата z-преобразования Лапласа.
4. Впервые разработаны принципы и алгоритмы реализации различных элементов устройств и систем управления: микропроцессорного генератора синусоидальных сигналов; микропроцессорных систем импульсно-фазового управления и блока логики тиристорным преобразователем; микропроцессорных управляющих устройств.
5. Осуществлено дальнейшее развитие методик синтеза системы управления ТП-Д для главного движения металлорежущих станков с применением микроконтроллера в канале обратной связи по ЭДС двигателя.
6. Разработаны методики синтеза системы управления ШИП-Д для напольного транспорта с использованием микроконтроллера в канале обратной связи по моменту и скорости.
7. Впервые решен комплекс вопросов, связанных с созданием универсальных микропроцессорных устройств и элементов для электромеханических систем промышленных роботов и манипуляторов, построенных по модульному принципу и состоящих из самостоятельных блоков, содержащих отдельные микроконтроллеры.

8. Разработана методика синтеза регулируемого асинхронного двигателя в системе *НПЧ-АД*, базирующаяся на использовании формирующей положительной обратной связи по скорости при наличии микропроцессорного генератора синусоидальных сигналов.

#### **Научная и практическая ценность.**

1. На основании исследования режимов работы асинхронного двигателя при питании от *НПЧ* со свойствами источников напряжения и тока за счет введения дополнительных схемных решений в систему управления получены удовлетворительные статические и динамические свойства и устранены неустойчивые режимы работы *ЭМС*, обусловленные влиянием *ЭДС* вращения двигателя.

2. Предложены методики синтеза электромеханических систем с неявно выраженными структурами подчиненного регулирования.

3. Даны практические рекомендации по расчету и выбору оптимальных параметров системы управления, обеспечивающих работоспособность устройств инвертирования энергии в аварийном режиме опрокидывания инвертора, возникающем при внезапном отключении питающего напряжения в системах *ТП-Д* и *НПЧ-АД*, а также рекомендации по оценке степени влияния этого режима на механическое оборудование землеройных машинных агрегатов.

4. Предложен микропроцессорный генератор синусоидальных сигналов, являющийся основным элементом системы частотноуправляемого асинхронного двигателя, и рекомендации по выбору его оптимальных параметров.

5. Разработаны и внедрены методики расчета и синтеза систем управления для *ЭМС* постоянного и переменного тока *ТП-Д*, *ШИП-Д* и *НПЧ-АД*, содержащих в своем составе микроконтроллеры *Atmega 128*, а также программное обеспечение для этих микроконтроллеров.

6. Разработаны и внедрены новые структуры *ЭМС* и их системы управления для различных технологических и транспортных машин, позволяющие увеличить их быстродействие, производительность и надежность.

7. Предложена структура управления автономными рассредоточенными объектами, расположенными на удалении от центрального пункта управления, на базе которой разработано и внедрено микропроцессорное устройство управления подъемными установками, рассредоточенными на мишенном поле.

**Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций** обеспечивается и подтверждается применением методов исследований из теории динамики машин и механизмов, электрических машин, элементов автоматизированного электропривода, теории автоматического регулирования и управления, а также базовыми принципами построения микропроцессорных систем управления. Достоверность теоретических положений, выводов и рекомендаций подтверждена экспериментальными исследованиями на физических моделях, опытных и серийных образцах.

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту.**

1. Новая математическая модель устройств инвертирования энергии при работе в режиме опрокидывания инвертора, возникающая при внезапном отключении питающего напряжения, и методика расчета устойчивости работы

непосредственного преобразователя частоты в режиме источника напряжения и источника тока в электромеханических системах *НПЧ-АД*.

2. Методы и алгоритмы расчета силовых элементов тиристорных и широтно-импульсных усилительных устройств и научно обоснованные принципы выбора оптимальных схемных решений как их силовой части, так и систем управления.

3. Принципы и алгоритмы реализации различных микропроцессорных устройств и систем управления: микропроцессорного генератора синусоидальных сигналов; микропроцессорных систем импульсно-фазового управления и блока логики вентильного преобразователя; микропроцессорных управляющих устройств.

4. Методики синтеза различных типов систем управления электромеханических систем: *ТП-Д* для главного движения металлорежущего станка; *ШИП-Д* для напольного транспорта; *НПЧ-АД* для землеройной машины; универсальной микропроцессорной системы управления *ЭМС* промышленных роботов и манипуляторов, построенной по модульному принципу.

Использование микроконтроллеров в системе управления электроприводов в канале обратной связи (по *ЭДС* двигателя в системе *ТП-Д*; по моменту и скорости в системе *ШИП-Д*; в положительной обратной связи по скорости в системе *НПЧ-АД* при наличии микропроцессорного генератора синусоидальных сигналов) позволило получить типовые структуры, в которых синтез систем управления в процессе проектирования и эксплуатации производится методом последовательной коррекции.

5. Структура управления комплексными системами из автономных рассредоточенных объектов, расположенных на удалении от центрального пункта управления, которое производится через радиосвязь или по двухпроводной линии с использованием для этой цели силовых кабелей.

**Личный вклад соискателя.** Основной материал базируется на результатах бюджетных и хозяйственных научно-исследовательских работ по созданию *ЭМС* с улучшенными характеристиками для машинных агрегатов (1985 – 2008 гг.), в которых автор принимал участие как руководитель и ответственный исполнитель. Научные результаты, изложенные в работах [1-3, 14-16, 23-34], которые написаны в соавторстве, получены при непосредственном участии автора и заключаются в разработке новых схемных решений, проведении расчетов и экспериментальных исследований, а также в обобщении и анализе полученных результатов.

**Реализация работы.** Результаты научных исследований, созданные методики синтеза и алгоритмы расчета, практические рекомендации и схемные решения элементов и устройств микропроцессорного управления реализованы на следующих предприятиях и организациях:

1. На Бишкекском машиностроительном заводе в 1989 году внедрены методы расчета и синтеза электроприводов с числовым программным управлением для главного движения токарно-винторезного станка *ФТ-11*, выпускаемого заводом. Разработанные научные положения, а также предложенные прин-

ципы построения топологии систем управления легли в основу разработки и освоения производства указанных станков.

2. В 1991 г. на Пржевальском электротехническом заводе внедрены в серийное производство регуляторы напряжения модели *РНБ-М*, которые поставались в гг. Подольск и Серпухов Российской Федерации для комплектования швейных машин и электропрялок. Использование данных регуляторов напряжения повышает удобство эксплуатации швейных машин и электропрялок и расширяет их эксплуатационные возможности.

3. В 1994 году в *ОАО «Кыргызский камвольно-суконный комбинат»* была произведена модернизация электропривода тяги электрокары путем замены релеино-контакторной системы управления на регулируемый электропривод по системе *ШИП-Д*. Это позволило не только обеспечить оптимальное регулирование скорости электрокары, значительно увеличить надежность работы и улучшить ее массогабаритные показатели, но и снизить травматизм при эксплуатации.

4. Частотно управляемый электропривод внедрен в 1996 г. Инженерной академией Кыргызской Республики (*ИА КР*) для управления отбойным молотком *МOM-10B* с кривошипно-ползунным накопителем энергии. Данный привод обеспечил возможность регулировки скорости двигателя в широком диапазоне, что привело к повышению производительности установки при любой твердости грунта.

5. В 1996 г. были разработаны и изготовлены полуавтоматические дозирующие устройства для разлива лекарств и биопрепаратов для ветеринарии и медицины, которые были внедрены во Всероссийском НИИ защиты животных Министерства сельского хозяйства и продовольствия Российской Федерации. Разработанные дозирующие устройства обеспечили высокий уровень точности и производительности разлива лекарств.

6. В апреле 2001 года в Министерстве обороны Кыргызской Республики (*МО КР*) была произведена модернизация стрельбищного оборудования одного из полигонов войскового подразделения. Испытания, проведенные в полевых условиях, показали, что разработанные схемные решения могут быть положены в основу при проведении модернизации стрельбищного оборудования подразделений *МО КР*.

7. В ОсОО «ДесКом» г. Бишкек внедрены следующие результаты:

- методика построения микропроцессорных систем импульсно-фазового управления, блока логики и регуляторов для реверсивного тиристорного преобразователя на базе микроконтроллеров;

- микропроцессорный генератор синусоидальных сигналов для управления частотноуправляемых асинхронных двигателей и рекомендации по выбору его оптимальных параметров;

- разработаны и внедрены методики расчета и синтеза систем управления *ЭМС* постоянного и переменного тока *ТП-Д*, *ШИП-Д* и *НПЧ-АД* содержащих в своем составе микроконтроллеры *Atmega 128*;

- программное обеспечение для микроконтроллеров фирмы *Atmega*.

В частности, разработанные методики, предложенные рекомендации и технические решения были использованы при разработке регулируемого электропривода питателей сырого угля, которые были внедрены в Бишкекской *ТЭЦ* в количестве 14 штук. Разработка осуществлялась в рамках хозяйственных работ с ОсОО «ДесКом» в 2004 году.

8. Результаты научных исследований, полученные в диссертационной работе в 2006 г., использованы на *ОАО «Рудоавтоматика»* (Российская Федерация) при проектировании микропроцессорных систем управления электроприводов по системе *НПЧ-АД* основных механизмов экскаватора *ЭКГ-5*. Предполагается также использование предоставленных материалов при разработке *НКУ* на переменном токе экскаватора *ЭКГ-12К* в 2008-2009гг. Предложенные схемные решения и практические рекомендации позволили обеспечить высокую надежность и эффективность электроприводов малой и средней производительности при удовлетворительном качестве энергопотребления.

9. В *АО «Чакан ГЭС»* в мае 2007 года внедрена система автоматического тиристорного регулирования возбуждением синхронного генератора для малых электростанций каскада Аламединский *ГЭС*. Разработанная система обеспечивает требуемые режимы работы синхронного генератора и выполняет необходимые функции защит от аварийных ситуаций.

10. Разработанные вопросы теории, синтеза, расчета и методов построения микропроцессорных систем управления различных типов *ЭМС* используются в учебном процессе кафедр «Электромеханика» Кыргызского государственного технического университета и «Информационные и машиностроительные технологии» в филиале Балтийского государственного технического университета «Военмех» в г. Бишкеке по курсам «Электромеханические системы», «Основы электропривода», «Проектирование электромеханических систем для машин автоматического действия» и «Автоматизированный электропривод производственных механизмов», а также при курсовом и дипломном проектировании.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и получили одобрение на следующих международных и региональных научно-технических конференциях и совещаниях (1989÷2007 г.г.): Региональной технической конференции Республик Средней Азии и Казахстана «Методы и Средства повышения эффективности машиностроительного производства» (*РП* Союза *НИО* Кирг.ССР, Фрунзе, 1989), 6-й Всесоюзной научно-технической конференции «Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов» (*БПИ*, Бишкек, 1991), Конференции, посвященной 1 съезду Инженеров Кыргызстана и 10-летию образования (*ИА КР*, Бишкек 2001), 4-й Международной научно-технической конференции «Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях» (*АИЭС*, Алматы, 2004), 5-й Международной научно-технической конференции «Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях» (*АИЭС*, Алматы, 2006), 5-й Международной научно-технической конференции «Мехатроника—пути и перспективы развития на современном этапе» (филиал *БГТУ «ВОЕНМЕХ»* им. Д.Ф. Устинова, Бишкек, 2006), Международной научно-технической конференции

«Инновации в образовании, науке и технике» (КГТУ им И. Раззакова, Бишкек, 2006); 2-й Международной конференции «Проблемы управления и информатики» (ИА НАН КР Бишкек 2007), Международной научно-технической конференции «Энергетика—проблемы и перспективы» (КГТУ им И. Раззакова, Бишкек, 2007), расширенном научно-техническом Совете БГТУ «ВОЕНМЕХ» и ИА КР (Бишкек, 2007).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано: 1 монография, 1 учебное пособие и 36 научных статей. При этом 13 статей издано в иностранных журналах, а 17 трудов в личном авторстве, в том числе 10 в издательствах, рекомендованных НАК КР.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из перечня условных обозначений, символов, единиц и терминов, введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Диссертация содержит 310 страниц основного текста, в том числе 181 рисунка и 2 таблицы. В диссертацию включено 46 стр. списка использованных источников и приложения. Список использованных источников включает 104 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели, основная идея и задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость работы, а также ее общая характеристика.

В **первой главе** представлен обзор современного состояния вопросов разработки и синтеза микропроцессорных устройств и систем управления электромеханических систем машинных агрегатов и показаны пути и способы улучшения их показателей.

Анализ схем построения ЭМС различных машинных агрегатов, их конструктивных особенностей, способов регулирования скорости исполнительного двигателя, получения расчетных зависимостей статических и динамических нагрузок, возникающих на его валу, производились в соответствии со структурой машины автоматического действия, состоящей из рабочего органа, передаточных механизмов, двигателя, преобразовательных устройств, контрольно – измерительных, контрольно – управляющих и счетно-решающих устройств.

Для управления ЭМС МА можно применять микропроцессорные системы, основанные как на серийно выпускаемых универсальных микро-ЭВМ, так и на специально разработанных микропроцессорных управляющих и вычислительных средствах. При этом для унификации разрабатываемых МП систем и обеспечения возможности их применения для различных машинных агрегатов целесообразно применять универсальные принципы, методы и алгоритмы построения систем управления, разбив для этого машинные агрегаты на отдельные базовые группы, объединенные схожестью структур системы машины автоматического действия. Этот принцип построения основан на том, что каждый механизм машинного агрегата в рамках выделенной группы должен иметь одинаковую ЭМС, содержащую автоматизированный электропривод с управляемым преобразователем, у которого система управления состоит из однопипных

элементов, узлов и блоков. Тем самым обеспечиваются предпосылки синтеза систем управления с подчиненным регулированием координат для МА, имеющих различные электромеханические системы: с двигателями постоянного тока с независимым или смешанным возбуждением, с асинхронными двигателями. В структуре МА двигатель, как электромеханический преобразователь, является основным силовым элементом электромеханической системы. В средних универсальных и тяжелых токарно-винторезных станках в качестве электропривода главного движения используется система ТП-Д с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ).

Для организации микропроцессорного способа управления электроприводом (рис. 1) в цепь обратной связи по ЭДС двигателя следует включить мик-

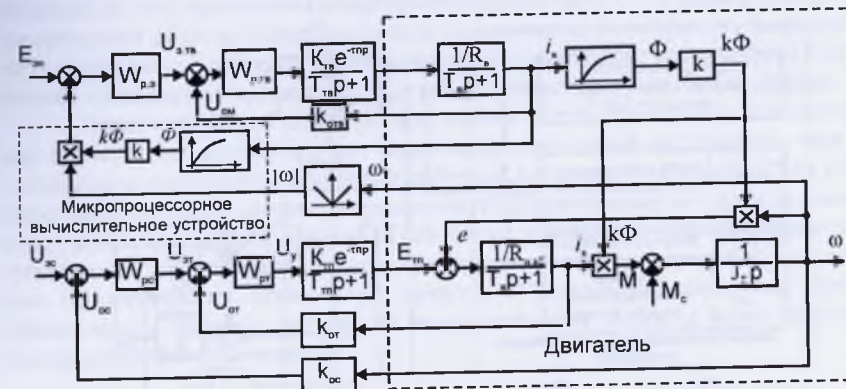


Рис. 1. Структурная схема электропривода с двухзонным регулированием скорости.

ропроцессорное вычислительное устройство (МВУ), вычисляющее сигнал, пропорциональный ЭДС вращения двигателя в реальном масштабе времени с учетом кривой намагничивания двигателя. При этом каждому значению тока возбуждения соответствует вполне определенное значение потока двигателя, поэтому можно констатировать, что функция  $\Phi = f(i_a)$  для рис. 1 является детерминированной. Такой подход существенно упрощает синтез системы управления электроприводом, где регулирование скорости ДПТ с НВ осуществляется ослаблением поля двигателя.

Особый интерес вызывает управление электромеханическими системами основных механизмов шагающих экскаваторов, которые относятся к классу землеройных машин. В настоящее время на экскаваторах в основном применяются электроприводы по системе ТВ-Г-Д с двигателями постоянного тока с независимой обмоткой. Неудовлетворительные массогабаритные показатели, значительная электромагнитная инерция генератора, требующая форсировок по цепи обмотки возбуждения с коэффициентом форсирования  $\alpha = 10 \div 15$  для по-



связей по скорости и моменту в этой схеме формируются микропроцессорным вычислительным блоком, который вычисляет эти сигналы в реальном масштабе времени по уравнениям, в которых переменными являются электрические сигналы, снимаемые с контрольных точек силовой схемы системы ШИП-Д [34]. Введение в двухконтурную структуру системы ШИП-Д микропроцессорного вычисления в реальном масштабе времени текущих значений сигналов обратной связи по моменту  $U_{ом}$  и по скорости  $U_{\omega}$  позволяют производить синтез регуляторов момента и скорости по аналогии с электроприводом по системе ТП-Д.

На рис. 4 показан разработанный вариант микропроцессорного управле-

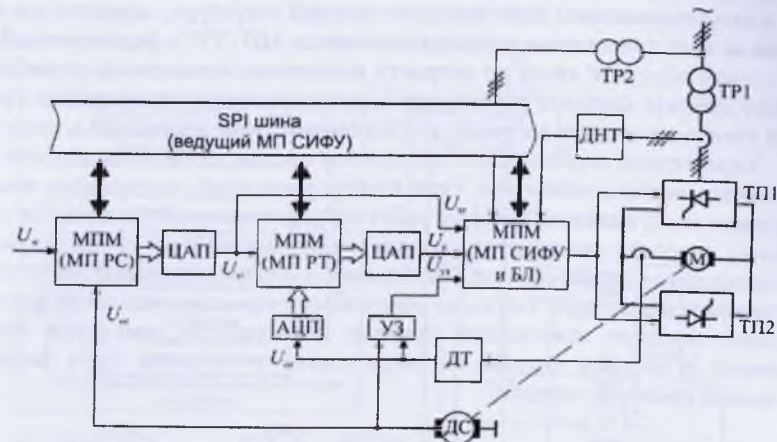


Рис. 4. Микропроцессорная система управления ЭМС постоянного тока.

ния ЭМС постоянного тока по системе ТП-Д для механизмов промышленного робота. В этой схеме применен модульный принцип построения системы управления за счет использования микроконтроллеров фирмы *Atmel*, реализующих функции микропроцессорных регуляторов скорости МП РС и тока МП РТ, а также микропроцессорной системы импульсно фазового управления МП СИФУ и блока логики БЛ. В отличие от МП-системы с фиксированной структурой, в этой системе связь между микропроцессорными модулями (МПМ) как аналоговая за счет использования цифро-аналоговых преобразователей, так и цифровая за счет использования SPI – шины. Это выполнено для того, чтобы каждый МПМ работал автономно без согласования разрядности математического аппарата их микропроцессоров, обеспечивая тем самым требования к точности управления объектом и задачам унификации. Сигналы задания и обратных связей поступают на входы МПМ в аналоговом виде и преобразуются в цифровой код при помощи встроенных в микроконтроллер аналого-цифровых преобразователей АЦП. При этом требуемые для вычисления алгоритмы МПМ производятся синхронизировано в цифровом виде с помощью обмена данными по шине SPI ведомые МПМ СИФУ и БЛ.

Использование разработанного в теории электропривода метода синтеза, получившего название метода последовательной коррекции с подчиненным регулированием, для выделенного класса ЭМС МА возможно только в том случае, если применить обобщенную методику синтеза системы УП-Д (рис. 5) с использованием микроконтроллеров как в прямом канале систем управления, так и в каналах обратной связи по моменту и скорости [36]. В качестве преобразовательного устройства на рис. 5 может быть использован управляемый тиристорный преобразователь или непосредственный преобразователь частоты, подключенные к трехфазной сети переменного напряжения промышленной частоты или широтно-импульсный преобразователь, подключенный к сети постоянного напряжения. Двигатели в этой схеме также отличаются друг от друга по конструктивному исполнению, по роду тока, наличием встроенных в двигатель датчиков скорости и пути. Принципиальная схема на рис. 5 приемлема для синтеза системы управления системы ТП-Д с двигателем постоянного тока с независимой обмоткой и в частотно-управляемой системе НПЧ-АД с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.

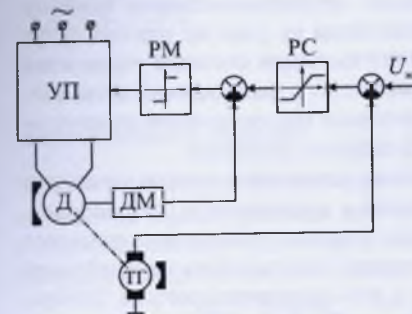


Рис.5. Функциональная схема системы УП-Д.

При синтезе регулятора момента  $PM$  постоянство магнитного потока в двигателе является неотъемлемым условием для оптимизации контура момента. В двигателе постоянного тока магнитный поток  $\Phi_{ном}$  поддерживается за счет отдельного канала по цепи обмотки возбуждения. Стабилизацию магнитного потока в частотно-управляемых электроприводах можно осуществить двумя способами: регулированием по отклонению или регулированием по управлению и возмущению. Регулирование магнитного потока по отклонению путем введения на вход системы управления НПЧ-АД обратной связи на базе информации о потоке вызывает определенные трудности, связанные со сложностью установки и отладки датчиков Холла и большими погрешностями при вычислении. Поэтому в работе использован второй способ, обеспечивающий косвенную обратную связь, в основу которого заложено решение уравнений баланса ЭДС в статорной или роторной цепи с последующей компенсацией падения напряжения на тех сопротивлениях асинхронного двигателя, увеличение падения напряжения на которых вызывает изменения потокосцепления.

В принципиальной схеме на рис. 5 датчик момента ДМ предназначен для косвенного контроля текущего значения момента. Регулирование момента двигателя в системе УП-Д с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением обеспечено введением в систему управления отрицательной обратной связи по току, пропорциональному моменту при постоянном потоке двигателя.

В принципиальной схеме на рис. 5 датчик момента ДМ предназначен для косвенного контроля текущего значения момента. Регулирование момента двигателя в системе УП-Д с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением обеспечено введением в систему управления отрицательной обратной связи по току, пропорциональному моменту при постоянном потоке двигателя.



В системе *НПЧ-АД* однозначно получить информацию о текущем моменте практически невозможно, поскольку момент двигателя находится в сложной зависимости от токов как в статорной, так и в роторной цепи. Поэтому для системы *НПЧ-АД* применен другой способ настройки контура момента, заключающийся в том, что асинхронный двигатель запитан от *НПЧ*, работающего в режиме источника тока (источника момента). В этом случае в прямой канал управления системы *НПЧ-АД* вводится *П* – регулятор момента, а взамен интегральной составляющей регулятора использована формирующая положительная обратная связь по скорости с критической настройкой. При таком подходе отпадает необходимость определения сигнала, пропорционального моменту двигателя, а динамические свойства электропривода на участке разгона будут идентичными системе *ТП-Д*. При синтезе и оптимизации системы управления *ШИП-Д* с двигателями постоянного тока смешанного возбуждения использовать схему, представленную на рис. 5, можно только при включении микропроцессора в канал обратной связи по моменту и скорости двигателя.

Эффективным методом синтеза системы управления электроприводом является метод математического моделирования с применением микропроцессорных систем. При цифровом моделировании операции вычисления реальных электрических переменных и алгоритм программы для выработки воздействий на объект выполняются в цифровой форме с использованием метода Эйлера, согласно которому искомая кривая заменяется ломаной, а операции интегрирования и дифференцирования сводятся к арифметическим операциям.

**Вторая глава** посвящена анализу кинематических схем и законов движения рабочих органов различных *МА*, а также установлению зависимости влияния механической части *МА* на их *ЭМС* с целью обоснования требований к системам управления *МА* различных классов и типов.

Показано, что ступенчатое регулирование скорости шпинделя на токарных станках не обеспечивает изменение скоростей резания в широком диапазоне и не отвечает условиям получения наивыгоднейших режимов резания при выполнении разнообразных операций. Поэтому для привода главного движения тяжелых универсальных станков предложено электрическое бесступенчатое регулирование в сочетании с шестеренной коробкой скоростей, за счет которого существенно повышается производительность станка, упрощается его конструкция, особенно при высоких требованиях к качеству обработки изделия. Исходя из конструктивных соображений и простоты управления, предложенный вариант двухступенчатой компоновки коробки скоростей является наиболее целесообразным, так как в систему управления станком можно ввести два режима обработки – «черновая» и «чистовая», и в зависимости от этого с помощью электромагнитной муфты задавать требуемые скорости резания детали.

Для эффективного управления промышленными роботами (*ПР*) с большим числом степени свободы (рис. 6) необходимо знать законы движения механизмов на основе кинематического и силового анализ в зависимости обобщенных координат от времени, которые находятся из решения обратной задачи динамики [29].



Рис. 6. Структурная кинематическая схема *ПР*.

При управлении от *ЭВМ* траекторию движения манипуляционной системы *ПР* можно программировать с минимальным машинным временем, если известны выражения скорости и ускорения для каждой координаты. Для *ПР*, работающего в цилиндрической системе координат (рис. 6), кинематический анализ механизмов роботов целесообразно производить матричным методом для механизмов поворота 1, подъема 2 и выдвигания руки 3, так как именно эти механизмы управляются с помощью индивидуальных электроприводов. В понятие определения рабочего пространства объекта манипулирования *ПР* входит установление зависимости положения рабочего органа как функции угла поворота  $\varphi_{1n}$  для звена 1, а также в функции поступательных перемещений  $\varphi_{2n}$ ,  $\varphi_{3n}$  для звеньев 2 и 3. Решение этой задачи возможно за счет приведения координат подвижных звеньев к неподвижной системе, которое целесообразно выполнять с помощью матриц. Матрица координат точки *B* (рис. 6):

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_{1n} & \sin \varphi_{1n} & 0 & l \cos \varphi_{1n} \\ -\sin \varphi_{1n} & \cos \varphi_{1n} & 0 & -l \sin \varphi_{1n} \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_{3n} \\ \varphi_{1n} \\ \varphi_{2n} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Используя матрицу (1), можно записать уравнения координат точки *B*:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \varphi_{3n} \cos \varphi_{1n} + \varphi_{1n} \sin \varphi_{1n} + l \cos \varphi_{1n}; \\ y_0 &= -\varphi_{3n} \sin \varphi_{1n} + \varphi_{1n} \cos \varphi_{1n} - l \sin \varphi_{1n}; \\ z_0 &= \varphi_{2n} + h. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Если задать законы движения подвижных звеньев  $\varphi_{1n}(t)$ ,  $\varphi_{2n}(t)$ ,  $\varphi_{3n}(t)$ , то дифференцирование по времени *t* уравнений (2), описывающих траектории движения схвата робота, позволяет получить аналитические выражения проекций скорости точки *B* на неподвижные координатные оси механизмов поворота, подъема и выдвигания руки:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_0 &= \dot{\varphi}_{3n} \cos \varphi_{1n} + \dot{\varphi}_{1n} \sin \varphi_{1n} + \omega_{1n} (\varphi_{1n} \cos \varphi_{1n} - \varphi_{3n} \sin \varphi_{1n} - l \sin \varphi_{1n}); \\ \dot{y}_0 &= \dot{\varphi}_{1n} \cos \varphi_{1n} - \dot{\varphi}_{3n} \sin \varphi_{1n} - \omega_{1n} (\varphi_{1n} \sin \varphi_{1n} + \varphi_{3n} \cos \varphi_{1n} + l \cos \varphi_{1n}); \\ \dot{z}_0 &= \dot{\varphi}_{2n}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Аналитические выражения проекций ускорения для точки *B* получим, продифференцировав уравнения (3) по времени *t*:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_0 &= \ddot{\varphi}_{3n} \cos \varphi_{1n} + \ddot{\varphi}_{1n} \sin \varphi_{1n} + 2\omega_{1n} (\dot{\varphi}_{1n} \cos \varphi_{1n} - \dot{\varphi}_{3n} \sin \varphi_{1n}) + \\ &+ \dot{\omega}_{1n} (\varphi_{1n} \cos \varphi_{1n} - \varphi_{3n} \sin \varphi_{1n} - l \sin \varphi_{1n}) - \omega_{1n}^2 (\varphi_{1n} \sin \varphi_{1n} + \varphi_{3n} \cos \varphi_{1n} + l \cos \varphi_{1n}); \\ \ddot{y}_0 &= \ddot{\varphi}_{1n} \cos \varphi_{1n} - \ddot{\varphi}_{3n} \sin \varphi_{1n} - 2\omega_{1n} (\dot{\varphi}_{1n} \sin \varphi_{1n} + \dot{\varphi}_{3n} \cos \varphi_{1n}) - \\ &- \dot{\omega}_{1n} (\varphi_{1n} \sin \varphi_{1n} + \varphi_{3n} \cos \varphi_{1n} + l \cos \varphi_{1n}) + \omega_{1n}^2 (\varphi_{3n} \sin \varphi_{1n} - \varphi_{1n} \cos \varphi_{1n} + l \sin \varphi_{1n}); \\ \ddot{z}_0 &= \ddot{\varphi}_{2n}. \end{aligned} \right\} (4)$$

Из уравнений (4) видно, что проекции ускорения на неподвижные оси состоят из тангенциального ускорения, ускорения выдвигания руки, нормального ускорения и кориолисова ускорения. Скорости и ускорения для любой точки, принадлежащей звеньям 2 и 3, определяются теми же выражениями (3) и (4). Цифровая информация, полученная в результате расчета уравнений (2)-(4), представляет собой командную информацию, которая вводится в систему числового программного управления для обеспечения оптимальной траектории движения рабочего органа промышленного робота, обусловленную технологическим процессом.

Для описания перемещения центра масс схвата и задания углового ускорения, с целью получения требуемых динамических процессов в рассматриваемых манипуляционных системах, необходимо использовать следующие уравнения движения, определяющие моменты двигателя для каждого звена (рис.6):

$$\left. \begin{aligned} M_1 - M_{св1} &= (J_{\Sigma 1} + m_{3n} r_{1n}^2) \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_2 - M_{св2} &= [J_{\Sigma 2} + (m_{2n} + m_{3n}) r_{2n}^2] \frac{d\omega_2}{dt}; \\ M_3 &= (J_{\Sigma 3} + m_{1n} r_{1n}^2 + m_{23} r_{3n}^2) \frac{d\omega_3}{dt}, \end{aligned} \right\} (5)$$

где  $J$  — моменты инерции, приведенные к валу двигателя механизма:  $J_{\Sigma 1} = J_{дв1} + J_1 + J_2 + J_3$  — поворота;  $J_{\Sigma 2} = J_{дв2} + J_2$  — подъема;  $J_{\Sigma 3} = J_{дв3} + J_3$  — выдвигания руки.

В работе показано, что структурная схема механической части приводов промышленных роботов, соответствующая уравнениям (5), представляет собой кинематическую схему с несколькими степенями свободы, взаимное влияние которых учитывается наличием перекрестных связей между каналами регулирования координат системы [30].

На основании анализа кинематической схемы электромеханической системы механизма машин напольного транспорта показано, что при разработке системы управления механизма тяги механическую часть можно рассматривать как одномассовую систему с абсолютно жесткими связями. Показано, что для электромеханической системы тяги механизма напольного транспорта наиболее оптимальным является система ШИП-Д, в которой регулируемые параметрами являются скорость и момент двигателя с возможностью формирования оптимальных переходных процессов  $\omega = f(t)$  и  $M = f(t)$  при одновременном

уменьшении потерь энергии, а также увеличении КПД, быстродействия и надежности системы в целом [12].

Как показано в работе, электромеханические системы основных механизмов землеройных машин наиболее целесообразно строить по системе НПЧ-АД. При этом наиболее сложной проблемой является защита электроприводов и механического оборудования от аварийных режимов опрокидывания инвертора, вызываемых сбоями системы управления и внезапным отключением питающего напряжения. Экспериментальное исследование влияния возникающих в процессе опрокидывания инвертора ударных моментов на механизм поворота экскаватора ограничено вследствие возможности выхода дорогостоящего оборудования из строя [21]. Поэтому такой режим был рассмотрен методом математического моделирования с использованием аналоговой вычислительной машины. Математическое моделирование позволило получить более полное представление о степени опасности ударных нагрузок на механизм поворота экскаватора и дало возможность произвести сравнительный анализ аварийного режима в системах ТП-Д и НПЧ-АД при внезапном отключении напряжения.

В качестве примера рассмотрен механизм поворота экскаватора ЭШ-20/55, для которого моделирование режима опрокидывания инвертора в системе НПЧ-АД производилось с асинхронным двигателем типа АЗ-12-52-4. Подачей на вход модели в качестве управляющего воздействия сигнал полуволны синусоиды с амплитудой и длительностью, равными ударному значению момента, определена реакция механической системы на режим опрокидывания инвертора в системе. Полученные осциллограммы показывают, что в результате подачи на вход модели ударных значений моментов, соответствующих  $5M_n$ ,  $2,8M_n$  и  $4M_n$ , получен перепад скорости, не превышающий 10% от  $\omega_0$ . При этом опасных для механизма динамических нагрузок не возникает.

Третья глава посвящена разработке и исследованиям преобразовательных устройств для электромеханических систем постоянного и переменного тока различных типов машинных агрегатов.

В тех случаях, когда требуется высокая точность непрерывного и плавного регулирования скорости в широком диапазоне, в ЭМС МА применяются тиристорные электроприводы постоянного тока. Для механизмов с маломощными электромеханическими преобразователями предложены однофазные ТП и ШИП, выполненные на силовых тиристорах [25, 34]. Например, ТП, собранный по схеме однополупериодного выпрямления, использован в установках для подъема и опускания мишеней в составе стрельбищного оборудования [25]. Рассмотрены особенности работы предложенных вентильных преобразователей и всей электромеханической системы из-за наличия ЭДС вращения двигателя в цепи постоянного тока.

Разработаны трехфазная нулевая и мостовая схема преобразователя, а также ШИП с параллельной коммутацией, которые были внедрены в МА в виде тиристорных агрегатов постоянного тока. Для этих схем получены инженерные методы расчета и выбора силовых элементов с учетом условий эксплуатации конкретных МА. Выведены формулы для вычисления средневывярмленного

напряжения  $E_d = f(\alpha)$  и  $E_d = f(\gamma)$  и уравнения внешней характеристики для тиристорных агрегатов с учетом всех режимов работы силового тиристора: непрерывного, гранично-непрерывного и прерывистого. Показано влияние режима прерывистых токов на характеристики управления тиристорных агрегатов, который вносит неоднозначность в определение математической зависимости  $E_d = f(\alpha)$  и  $E_d = f(\gamma)$ . Поэтому в процессе проектирования тиристорных электроприводов для их устранения требуется принятие дополнительных мер. Рассмотрен режим «инвертирования энергии в сеть», при котором токи в обмотках трансформатора в течение большей части периода проводимостей вентилях направлены навстречу ЭДС вторичной обмотки трансформатора и протекают под действием ЭДС вращения двигателя.

На базе модульного принципа для комплектования главного привода металлорежущего станка и промышленного робота разработан реверсивный тиристорный агрегат, собранный включением параллельно двух унифицированных мостовых схем преобразователя. Управление комплектами вентильных групп раздельное, поэтому отсутствие в силовой схеме уравнивающих реакторов существенно снизило габариты установки, что особенно важно, когда требования к массогабаритным показателям высоки. Разработанные схемные решения в принципиальной схеме блока логики (БЛ) позволили улучшить работу тиристорного преобразователя в зоне прерывистых токов. Выбор оптимальной системы регулирования скорости электропривода позволил обеспечить высокие требования к простоте, надежности и унификации тиристорных агрегатов для различных установок.

На основании проведенных лабораторных исследований, как наиболее надежная и рациональная была выбрана силовая схема с параллельной коммутацией, для которой была разработана система управления ШИП с широтно-импульсным модулятором для задания скважности  $\gamma$ . Выполненный анализ различных силовых схем тиристорных ШИП с искусственной коммутацией показал, что не только функциональные возможности и регулировочные характеристики, но и надежность работы, а также массогабаритные показатели всей электромеханической системы во многом определяются разработанной структурой построения системы управления ШИП [12]. Напряжение на нагрузке регулируется за счет изменения скважности включения  $\gamma$  основного и коммутирующего тиристоров, величина которых зависит от напряжения управления, подаваемого на вход системы управления ШИП.

Разработанные тиристорные преобразователи по нулевой и мостовой схеме позволяют использовать их в качестве базового модуля при разработке непосредственного преобразователя частоты [8]. Обоснованы преимущества системы НПЧ-АД применительно к требованиям, предъявляемым к электроприводам основных механизмов экскаватора. Показано, что с учетом значительной мощности, именно данный тип ЭМС обладает благоприятными возможностями для экономичного регулирования скорости в широком диапазоне. При этом в состав системы управления добавляется в качестве дополнительного элемента лишь задающий генератор, который воздействует на входы

отдельных тиристорных преобразователей каждой фазы. Разработанный базовый модуль «тиристорный преобразователь с раздельным управлением в экскаваторном исполнении» обладает высоким быстродействием, полоса пропускания которого позволяет регулировать частоту тока нагрузки от 0 до 25 Гц при трехпульсной схеме и до 35 Гц при шестипульсной. При трехпульсной схеме три таких преобразователя достаточно для управления двигателем мощностью 150±200 кВт, а шесть преобразователей в шестипульсной схеме обеспечат управление двигателем 300±400 кВт, что достаточно для широкого круга одноковшовых экскаваторов. Исследование особенностей системы НПЧ-АД применительно к основным механизмам экскаватора было проведено на экспериментальном лабораторном стенде, состоящем из НПЧ, выполненного на трех трехфазных реверсивных преобразователях постоянного тока с раздельным управлением. Как показали экспериментальные исследования выбранной схемы НПЧ, проведенные на ряде асинхронных двигателей различных серий, для обеспечения непрерывного плавного управления моментом и скоростью асинхронного двигателя необходимо сигналы, задающие ток и напряжение, формировать в синусоидальной форме.

Непосредственные преобразователи частоты могут обладать свойствами источника напряжения или свойствами источника тока. Наибольший интерес представляет вопрос использования частотно-токового управления асинхронного электропривода, так как имеются благоприятные условия для формирования экскаваторных характеристик с любым требуемым заполнением.

Свойства источника тока достигается в НПЧ за счет формирования синусоидальных токов переменной частоты с использованием структуры одноконтурного регулирования тока с ИП – регулятором, настроенным на модульный оптимум. Исследование условий работы унифицированного контура регулирования тока при наличии быстроизменяющейся противофазы ЭДС двигателя выполнено с использованием расчетных структурных схем (рис. 7) с учетом дискретно-нелинейных свойств ТП по управляющему (а) и по возмущающему воздействиям (б).

Для маломощных электроприводов формирование токов стабильной неискаженной формы затрудняется влияниями режима прерывистых токов, нелинейностью и неоднозначностью характеристик тиристорных преобразователей. Амплитуда ЭДС вращения растет с увеличением

частоты, соответственно растет и скорость изменения  $de/dt$ . Контур тока, оптимизированный методом последовательной коррекции, не может обеспечить удовлетворительные условия формирования переменных токов при наличии столь быстрых изменений ЭДС нагрузки. Расчетные схемы (рис. 7) позволяют получить передаточные функции модифицированного  $z$  – преобразования Лап-

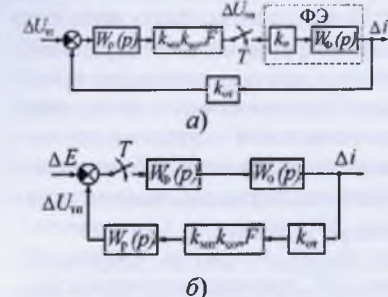


Рис. 7. Структурные схемы формирования тока фазы АД: а) по управляющему воздействию; б) по возмущающему воздействию.

ласа разомкнутой системы по управляющему  $W_{раз}^*$  и возмущающему  $W_{раз.в}^*$  воздействию:

$$W_{раз}^*(z) = k k_{\alpha} \frac{z^2(1+\beta) - z - d^{\mu}(1+\beta)z^{(2-\mu)} + d^{\mu}z^{(1-\mu)}}{z^2 - z(1+d) + d}, \quad (6)$$

$$W_{раз.в}^*(z) = k_0 Z \left\{ \frac{1}{p(p+\alpha)} + \frac{\gamma}{p^2(p+\alpha)} \right\} (1-z^{-\mu}) =$$

$$= \frac{k_0}{\alpha} \left[ \frac{(1-d)z}{(z-1)(z-d)} + \frac{\gamma T z}{(z-1)^2} - \frac{\gamma(1-d)z}{d(z-1)(z-d)} \right] (1-z^{-\mu}) =$$

$$= \frac{k_0}{\alpha^2} \frac{az^2 + bz - az^{2-\mu} - bz^{1-\mu}}{z^3 + Bz^2 + Dz + F}, \quad (7)$$

где  $k = k_p k_{mn} k_{от} F k_{\alpha}$ ;  $\beta = T/T_n$ ;  $F$  - фактор пульсаций, влияющий на динамический коэффициент передачи замкнутой системы в режиме прерывистого тока;  $k_{mn}$  - масштабный коэффициент, равный отношению базовых величин;

$a = (\alpha - \gamma)(1-d) + \alpha\gamma T$ ;  $b = (\alpha - \gamma)(1-d) + \alpha\gamma T d$ ;  $B = -2 - d$ ;  $D = 1 + 2d$ ;  $F = d = e^{-T/T_n}$ ;  $k_{mn} = E_{дс}/U_{\gamma 6}$ ;  $k_{\alpha}$  - динамический коэффициент усиления СИФУ;  $T$  - период квантования импульсного звена.

С помощью передаточных функций (6) и (7) для рассматриваемых структур построены амплитудно - фазочастотные характеристики (АФЧХ) по возмущающему воздействию и управляющему воздействию при замене  $z = e^{j\varphi}$ , где  $\varphi = \omega t$ . Из анализа кривых видно, что АФЧХ по управляющему воздействию имеют запас по фазе на всех частотах, равных  $90^\circ$ , а АФЧХ по возмущению имеют низкий запас по фазе и амплитуде на частоте среза  $\omega_{ср}$ , причем эти показатели сильно уменьшаются с ростом нагрузки. Теоретический анализ, подтвержденный экспериментальными осциллограммами токов и напряжений позволил сделать вывод, что ошибка по возмущению значительна и увеличивается с ростом частоты, поэтому необходимо принимать меры для компенсации влияния противо - ЭДС двигателя. Компенсация ЭДС вращения АД осуществлена с помощью положительной обратной связи по ЭДС двигателя, подаваемой на вход усилителя СИФУ ТП. В качестве датчика ЭДС применен косвенный метод выделения ЭДС двигателя (рис. 2).

Немаловажным является вопрос предотвращения режимов опрокидывания инвертора, характерных для используемых в электромеханических системах экскаваторов управляемых преобразователей, которые возникают в связи с внезапным отключением питающего напряжения, связанным со сбоями в энергосистеме из-за слабости электрических сетей [4, 22].

Исследования показали, что вследствие периодического характера изменения токов и напряжений в асинхронном двигателе, режим опрокидывания инвертора в этой системе будет иметь более мягкий характер. Для полу-

чения количественной оценки динамических процессов опрокидывания инвертора в системе НПЧ-АД при внезапном отключении питающей сети исследование проводилось методом математического моделирования дифференциальных уравнений двухфазной обобщенной машины на АВМ для механизма поворота, где возможны наиболее тяжелые переходные процессы в режиме опрокидывания инвертора из-за значительной инерционности масс механизма. Полученные данные свидетельствуют, что кратности токов в аварийном режиме меньше кратности пускового тока, а выбросы моментов хотя и большие, однако из-за ограниченной длительности, не превышающей 20 мс, их действие оказывается недостаточным для существенного изменения скорости АД. При этом выбросы токов для реальных параметров АД не представляют опасности как для двигателя, так и для силовых тиристоров, из-за ограниченности времени переходного процесса.

Разработана схема управления системой НПЧ-АД с трехфазным задающим генератором синусоидальных напряжений с плавным регулированием частоты в диапазоне от нуля до сотен Гц и с возможностью изменения порядка чередования фаз выходного напряжения [2], эффективность которой подтверждена на математической и физической моделях.

В четвертой главе рассмотрены методы построения систем управления полупроводниковыми преобразователями для ЭМС МА, а также приведены сведения по разработке и испытанию опытных образцов систем их управления, реализованных аппаратным и программным способами.

Для широтно-импульсного преобразования разработан широтно-импульсный модулятор (ШИМ), с помощью которого производится формирование импульсов с переменной скважностью, а для фазового управления ТП - система импульсно-фазового управления (СИФУ), с помощью которой осуществляется подача управляющих импульсов на силовые вентили. При разработке ШИМ были обеспечены условия, необходимые для достижения максимального быстродействия коммутирующего элемента ШИП, за счет оптимального выбора основных элементов колебательного контура, связанного с зарядом и разрядом конденсатора. Обеспечены пределы изменения скважности при широтно-импульсной модуляции, определяемые неравенством  $0,1 < \gamma < 0,9$ , для ограничения напряжения на выходе ШИП в пределах  $0,1U_n < E_d < 0,9U_n$ .

В схеме управления тиристорным преобразователем СИФУ играет ключевую роль, так как к формированию управляющих импульсов силовыми вентилями предъявляются жесткие требования по обеспечению требуемой мощности, точности и симметричности. Поэтому для выбора оптимальной структуры СИФУ использована компьютерная математика *Matlab*. В разработанной СИФУ применен вертикальный принцип формирования управляющих импульсов, а в качестве опорного напряжения использовано линейно изменяющееся напряжение. Получены математические зависимости, позволяющие формировать синхроимпульсы прямоугольной формы, для подачи на вход генераторов линейно изменяющихся напряжений (ГЛИН).

Математическое моделирование позволило углубленно изучить процессы, происходящие во всех звеньях СИФУ, использовать отдельные блоки в виде конкретных схем при составлении принципиальной электрической схемы СИФУ, облегчало синтез основных блоков и процесс разработки полноценного функционирующего электронного устройства. Приведенные осциллограммы контрольных точек математической модели СИФУ и осциллограммы, снятые в контрольных точках каналов управления СИФУ для вентилей анодной и катодной группы тиристорного преобразователя, принципиальная схема которого разработана на основе рекомендаций математического моделирования, подтверждают адекватность математической модели аналоговому варианту схемы СИФУ, реализованной аппаратным методом с применением аналоговых и цифровых микросхем.

В системе управления реверсивного тиристорного преобразователя с раздельным управлением содержится блок логики БЛ, с помощью которого производится управление группами вентилей, обеспечивающих различные режимы работы двигателя: двигательный, тормозной и реверс. В функцию блока логики входит также анализ параметров регулируемых координат для блокирования подачи управляющих импульсов в силовые вентили в случае, когда их значения превышают допустимые. Для синтеза ЛПУ использована Булева алгебра, представляющая теоретическую основу проектирования цифровых систем управления. Выделены логические переменные, логические функции, составлена карта Карно на основе таблицы истинности, описывающей основные режимы работы ТП. Получены минимизированные функции для реализации оптимальной структуры ЛПУ с трехпозиционной схемой блока задания направления движения.

Разработанная микропроцессорная система импульсно-фазового управления и блоком логики реверсивного тиристорного преобразователя обеспечивает высокую точность и симметричность формирования управляющих импульсов вентилями группами реверсивного тиристорного преобразователя. При разработке микропроцессорной системы управления ТП ставилась задача достижения максимального быстродействия при заданной точности вычисления основных уравнений управляющих устройств. Для этой цели применен модульный принцип построения блоков, в том числе и цифрового СИФУ, работающего с независимой системой синхронизации.

Микропроцессорные регуляторы электромеханических систем постоянного тока с реверсивным тиристорным преобразователем содержат цифровой регулятор скорости и цифровой регулятор тока, а также систему управления реверсивным тиристорным преобразователем, состоящую из цифровой системы импульсно-фазового управления и цифрового логического переключающего устройства (рис. 4). Параметры регуляторов скорости и тока могут быть получены в результате синтеза системы управления электроприводом методом последовательной коррекции и оптимизированы настройкой контуров тока и скорости на технический или симметричный оптимум [16, 26]. Функциональные узлы цифрового управляющего устройства, цифровой регулятор скорости и цифровой регулятор тока реализованы в микроконтроллере программным пу-

тем. При разработке программного обеспечения указанных выше регуляторов использован метод математического моделирования на языке СИ, который относится к специальной системной программе применительно к выбранному микроконтроллеру. В основу цифрового моделирования типовых регулирующих устройств положен численный метод Эйлера, согласно которому искомая интегральная кривая заменяется ломаной, причем отклонение реальной кривой от аппроксимированной зависит от времени квантования  $T$ .

При разработке микропроцессорного устройства управления электроприводом по системе НПЧ-АД задающий генератор синусоидальных сигналов построен по принципу представления непрерывной функции времени ее ступенчатой аппроксимацией. Для создания микропроцессорного генератора синусоидальных сигналов МП ГСС на основе программного метода был получен математический аппарат, реализация которого позволила обеспечить плавное регулирование частоты, амплитуды и фазы питающего напряжения НПЧ, обладающего свойствами источника тока. Используя десятиразрядные счетчики-таймеры, производится квантование сигналов, то есть гладко изменяющиеся синусоидальные сигналы аппроксимируются микроконтроллером в ступенчатые функции по всем трем каналам. Высота каждой ступени и моменты перехода со ступени на ступень обеспечиваются генератором кода таким образом, чтобы полученная ступенчатая аппроксимация наилучшим образом соответствовала синусоиде.

В пятой главе рассмотрены вопросы синтеза микропроцессорных систем управления электромеханическими машинными агрегатами.

При синтезе системы управления ТП-Д с двигателем постоянного тока независимого возбуждения, построенной по структуре двухзонного регулирования, применена методика синтеза с подчиненным регулированием координат: контуры тока якоря и тока возбуждения настраиваются на технический оптимум, а контур скорости – на симметричный оптимум. В контур регулирования ЭДС вращения двигателя введен микропроцессор, с помощью которого производится вычисление в реальном масштабе времени величины ЭДС вращения с учетом кривой намагничивания двигателя. С целью дальнейшего использования метода последовательной коррекции при синтезе контура регулирования ЭДС результаты расчета, выполняемые микропроцессором в реальной схеме управления, необходимо заменить линейной зависимостью между ЭДС вращения двигателя и током возбуждения.

На рис. 8 представлены экспериментальные осциллограммы реакции на скачок задания  $U_{\infty}$  для разгона двигателя до основной скорости в первой зоне системы ТП-Д с двигателем независимого возбуждения типа 2ПН 112 ЛГ. Анализ этих осциллограмм показывает, что коэффициент усиления пропорциональной части регулятора скорости  $k_{p,c}$  немного превышает значения, соответствующие настройке на технический оптимум, поэтому перерегулирование скорости составляет 7 % от установившегося значения.

Время переходного процесса пуска двигателя с нагрузкой  $M_c = 0,2 \cdot M_n$  при стопорном токе  $I_{\text{стоп}} = 3 \cdot I_{\text{н}}$  составляет  $t_n = 0,1c$ , поэтому этот показатель

удовлетворяет требованиям, предъявляемым к электромеханическим системам главного движения металлорежущих станков.

Модульный принцип построения микропроцессорных систем для регулирования скорости с постоянством момента применим в системе *ТП-Д* для

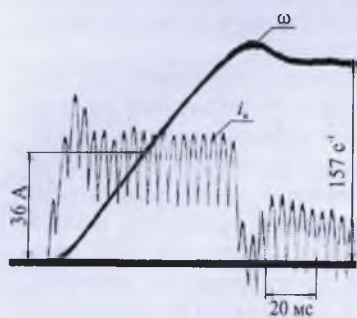


Рис. 8. Осциллограммы переходных процессов в системе *ТП-Д*.

промышленных роботов, где основные механизмы приводятся в движение с помощью высокомоментных двигателей постоянного тока. Характерной особенностью таких двигателей является наличие постоянных магнитов, используемых для возбуждения. Высокая степень вероятности размагничивания постоянного магнита ограничивает возможности двигателя, поэтому при построении системы управления электроприводом необходимо учитывать зависимость между скоростью и допустимым вращающим моментом, которые приводятся в справочниках и каталогах двигателей. Отличие синтеза контура скорости от рассмотренного выше за-

ключается только в нахождении алгоритма и принципа организации *ИП* — регулятора скорости со схемой адаптации скорости и зависимого от скорости токоограничения.

Алгоритм работы цифрового *ИП* — регулятора скорости получен в результате решения следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{i, \text{ст}1} &= (1/T_{\text{ис}1}) U_{i, \text{вх}} \Delta t; \\ U_{i, \text{ст}1} &= U_{(i-1), \text{ст}1} + \Delta U_{i, \text{ст}1}; \\ U_{i, \text{ст}2} &= U_{i, \text{вх}} 8T_{\mu} (1/T_{\text{ис}1}); \\ U_{i, \text{ст}} &= U_{i, \text{ст}1} + U_{i, \text{ст}2}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $\Delta t$  — промежуток времени;  $\Delta U_{i, \text{ст}1}$  — приращение напряжения;  $U_{(i-1), \text{ст}1}$  — предыдущее значение напряжения пропорциональной части регулятора;  $U_{i, \text{ст}1}$  — пропорциональная составляющая напряжения регулятора;  $U_{i, \text{ст}2}$  — интегральная составляющая напряжения регулятора;  $U_{i, \text{ст}}$  — сумма пропорциональной и интегральной составляющих напряжений *ИП* — регулятора.

Для вычисления системы уравнений (8) в составе микроконтроллера выделен вычислительный блок, выполняющий роль регулятора скорости со схемой адаптации от переходных ошибок, и вычислительный блок, обеспечивающий зависимое от скорости токоограничение и защиту от динамических перегрузок. Синтез двухконтурной системы управления электроприводом производился по методике, изложенной выше для  $\Phi = \Phi_{\mu}$ , при этом рекомендуемые значения стопорного момента  $M_{\text{стоп}} = (3 \div 5)M_{\mu}$ , а скорости  $\omega = \omega_{\text{max}}$ .

На рис.9 показана осциллограмма пуска двигателя типа *ИПИ 12.11*, на которой наглядно видно зависимое от скорости токоограничение.

Особенностью синтеза микропроцессорного управления *ШИП-Д* является отсутствие встроенного в двигатель датчика скорости. Общий подход синтеза применим и для этой системы, исходя из следующих соображений: во-первых, одинаковостью условий электромеханического преобразования энергии для электродвигателей; во-вторых, наличием микропроцессора, позволяющего определять сигналы, пропорциональные моменту  $U_{\text{ом}}$  и скорости  $U_{\text{ос}}$  двигателя на осно-

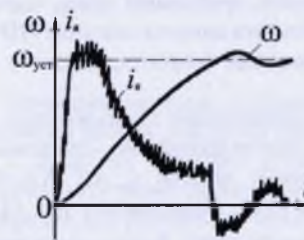


Рис. 9. Осциллограмма тока и скорости при пуске двигателя с зависимым от скорости токоограничением.

вании решения уравнений с переменными, снимаемыми как по цепи якоря и обмотки последовательного возбуждения, так и обмотки параллельного возбуждения; в-третьих, одинаковостью требований, предъявляемых к статическим и динамическим свойствам для электроприводов машинных агрегатов. При этом типовая структура будет состоять из контура момента и контура скорости, а порядок построения и синтеза двухконтурной системы не изменится (рис. 3).

На рис. 10 показаны осциллограммы реакции на скачок задания на скорость в системе *ШИП-Д*, оптимизированного методом последовательной коррекции с двигателем ДСЗ,6/8/10. Осциллограммы на рис. 10 показывают, что использование микропроцессора в канале обратной связи по моменту и скорости позволяет получить оптимальные переходные процессы  $i_a = f(t)$  и  $\omega = f(t)$  для электродвигателя напольного транспорта.

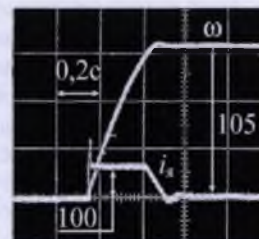


Рис. 10. Реакция системы *ШИП-Д* на ступенчатое изменение сигнала задания на скорость.

Формирование статических и динамических механических характеристик, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к системе *ИПЧ-АД* для основных механизмов экскаватора, при частотном управлении асинхронным двигателем возможно при поддержании постоянства потокосцепления в воздушном зазоре  $\psi_{\mu}$ . При этом электромагнитная постоянная времени  $T_s = L_2^2 / R_2^2$  принимает минимальное значение, при котором в системе может быть обеспечено максимальное быстродействие. Для стабилизации потока при частотно-токовым управлении асинхронным двигателем необходимо регулировать амплитуду  $I_{1\text{max}}$  фазу  $\varphi$ , и угловую скорость вращения поля статора  $\omega_{\text{озл}}$  согласно выражению:

Формирование статических и динамических механических характеристик, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к системе *ИПЧ-АД* для основных механизмов экскаватора, при частотном управлении асинхронным двигателем возможно при поддержании постоянства потокосцепления в воздушном зазоре  $\psi_{\mu}$ . При этом электромагнитная постоянная времени  $T_s = L_2^2 / R_2^2$  принимает минимальное значение, при котором в системе может быть обеспечено максимальное быстродействие. Для стабилизации потока при частотно-токовым управлении асинхронным двигателем необходимо регулировать амплитуду  $I_{1\text{max}}$  фазу  $\varphi$ , и угловую скорость вращения поля статора  $\omega_{\text{озл}}$  согласно выражению:

$$\dot{I}_1 = I_{\max} e^{j(\omega_{\text{осн}} t + \varphi)} \quad (9)$$

Введение в прямой канал управления микропроцессорного задающего генератора синусоидальных сигналов позволяет существенно упростить структуру управления системы *НПЧ-АД* и обеспечить требуемый закон частотно-токового управления. В работе предложена методика синтеза системы *НПЧ-АД*, обеспечивающую заданную точность регулирования скорости, в основу которой принят метод синтеза по *ЛАЧХ* [32].

На рис. 11 показаны осциллограммы, отражающие динамические свойства синтезированной системы на физической модели с *АД* А51-40 на частоте 15 Гц. Зависимость  $I_1 = f(t)$  характеризует ток фазы асинхронного двигателя, а  $U_{\text{ст}} = f(t)$  – напряжение, подаваемое на вход встроенного регулятора тока. Анализ этих осциллограмм показывает, что оптимизированная система *НПЧ-АД* обрабатывает заданный закон изменения скорости с удовлетворительной для экскаваторного электропривода точностью, а именно: переходный процесс скачка задания заканчивается за 2–3 колебания, при этом перерегулирование составляет

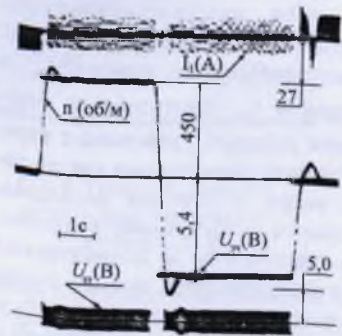


Рис. 11. Реакция системы *НПЧ-АД* на скачок задания.

10–15%; динамические ошибки находятся в заданных пределах; статическая ошибка по скорости составляет 4,4%.

Построение микропроцессорной системы управления комплексом, состоящим из нескольких автономных электромеханических рассредоточенных объектов, обуславливается необходимостью обеспечения гибкости управления, получения достоверной информации о состоянии всех объектов управления, причем с возможностью проведения поэтапного опроса их и отображения полученной информации на экране монитора, труднодостижимой для аппаратного способа реализации систем управления. В этих системах управления передача и прием управляющих и информационных сигналов от микропроцессорного участкового пульта стрельбищ к подъемным установкам мишеней производится за счет использования дополнительных элементов связи или по каналам радиосвязи, или по двухпроводной линии электропитания.

В первом варианте каждая из подъемных установок должна иметь собственный автономный источник питания в виде аккумуляторной батареи, а управление всеми установками *ПУ* производится по радиоканалу на частоте 450 мГц. Во втором варианте по силовому кабелю одновременно передается как напряжение питания для всех подъемных установок мишеней, так и высокочастотные составляющие управляющих и информационных сигналов. При

этом в обоих рассматриваемых вариантах используется один и тот же метод передачи и приема составляющих сигналов управления и информации, основанный на использовании частотной модуляции с временным распределением их по каналам управления подъемных установок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные положения и результаты, полученные в рамках диссертационной работы, сводятся к следующим основным выводам:

1. В работе проведен анализ микропроцессорных устройств и систем управления электромеханическими машинными агрегатами. Предложено все многообразие *МА* разбить на четыре класса, объединенных схожестью структур систем управления их *ЭМС*. Для каждого класса разработаны базовые схемы микропроцессорных систем управления, для которых обоснована возможность применения обобщенной методики, позволяющей проводить синтез *ЭМС*, имеющих структуру подчиненного регулирования.

2. Разработаны математическая и физическая модели режима опрокидывания инвертора; на базе комплексного расчета динамики аварийных режимов найдены аппроксимирующие зависимости для расчета и оптимизации систем управления преобразователями на основе аппарата *Matlab*. В частности, результаты моделирования на ЭВМ показали, что при одинаковых условиях возникновения режимов опрокидывания инвертора величина упругого момента в передачах механизма поворота шагающего экскаватора по предложенной системе *НПЧ-АД* снижается, по сравнению с системой *ТП-Д*, более чем в четыре раза.

3. Предложены новые научно обоснованные инженерные методики расчета силовых элементов вентильных преобразователей, обоснованы принципиальные схемы силовых преобразователей для электромеханических систем различных типов машинных агрегатов.

4. Разработаны цифровые управляющие устройства (*ЦУУ*) на микропроцессорной основе и предложены методы, обеспечивающие требуемое быстрое действие *ЦУУ* по контурам регулирования координат.

5. Разработаны методики синтеза класса *ЭМС МА*, использующих электропривода переменного и постоянного токов на основе модульного принципа формирования микропроцессорных систем управления с применением управляющих и вычислительных микроконтроллеров, произведена оптимизация параметров регулирования.

6. Впервые в систему управления главного привода металлорежущего станка предложено ввести вычислительный микроконтроллер, с помощью которого в реальном масштабе времени вычисляется сигнал, пропорциональный *ЭДС* вращения двигателя с учетом кривой намагничивания, в результате чего существенно упрощается синтез регуляторов тока возбуждения и *ЭДС*.

7. Разработана универсальная микропроцессорная система управления электроприводами промышленных роботов и манипуляторов, построенная по модульному принципу и состоящая из самостоятельных блоков, содержащих

отдельные микроконтроллеры. Применение модульного принципа позволило реализовать регуляторы скорости, тока, СИФУ и БЛ на отдельных микроконтроллерах и обеспечить оптимизацию регулирования скорости с учетом зависящего от скорости токоограничения характерного для двигателей с возбуждением от постоянных магнитов.

8. Предложен инженерный метод, позволяющий производить расчет наиболее целесообразных параметров регуляторов координат разработанных систем ТП-Д, ШИП-Д, НПЧ-АД, имеющих структуру подчиненного регулирования.

9. Предложена структура системы управления комплексными системами из автономных рассредоточенных объектов, расположенных на удалении от центрального пункта управления. Разработана микроконтроллерная система управления, которая позволяет передавать управляющие сигналы по заданной программе и получать информационные сигналы для отдельных объектов в реальном масштабе времени как по радиосвязи, так и по двухпроводной линии электропередач.

10. Впервые разработан компьютерный универсальный стенд для войсковых стрельбищ, который позволяет заносить необходимую программу для выполнения упражнений стрельб. Данный стенд обеспечил значительное улучшение эксплуатационных характеристик стрельбищного оборудования.

11. Корректность, точность и эффективность полученных в работе математических моделей, методик расчета и синтеза, практических рекомендаций и разработанных схемных решений подтверждены результатами промышленной эксплуатации и экспериментальными исследованиями, которые проводились как в реальных условиях эксплуатации, так и в лабораторных условиях, а также методами компьютерного моделирования в среде *Matlab* с применением *Toolbox Simulink*.

#### Список основных опубликованных работ по данной тематике:

1. Ключев В.И., Кадыров И.Ш., Частотно-токовое управление экскаваторными электроприводами по системе ПЧНС-АД // Тр. Моск. Энерг. Ин-т, Вып.570, 1982.- Москва: – С. 69-76.

2. Кадыров И.Ш., Остриров В.Н., Олифир Н.Ф. и др. Цифровой генератор синусоидальных сигналов. Авторское свидетельство СССР №10198579 Кл. Н03В 27/00, 1983.

3. Ключев В.И., Кадыров И.Ш., Остриров В.Н., Гаврилов Н.П. Устройство для регулирования напряжения на базе асинхронного двигателя. Авторское свидетельство СССР №1078579 Кл. Н02Р 13/30, 1983.

4. Кадыров И.Ш. Динамические процессы в системе ПЧНС-АД при внезапном отключении питающего напряжения // Тр. Фрун. Полит. Ин-т, Вып.33, 1986.- Фрунзе: – С. 28-35.

5. Кадыров И.Ш. Радиоуправляемое стрельбищное оборудование // Сб. материалов конференции посвященной 15-летию Инженеров Кыргызстана и 10-летию образования ИА КР, 2001. – Бишкек: Технология, – С. 501 – 505.

6. Кадыров И.Ш. Проблемы военной науки // Сб. конференции Проблемы развития военной науки. Теория и практика, 2001. – Бишкек: – С. 3-7.

7. Кадыров И.Ш. Разработка электропривода питателя сырого угля Бишкекской ТЭЦ с микропроцессорным вычислением регулируемых параметров в замкнутой системе управления // Сб. 4-й Международной конференции, АИЭС, 2004. – Алматы: - С. 229-236.

8. Кадыров И.Ш., Об особенностях формирования фазного напряжения асинхронного двигателя (АД) при питании от непосредственного преобразователя частоты (НПЧ) со свойствами источника напряжения и тока // Сб. 5-й Международной конференции, АИЭС, 2006. – Алматы: - С. 221-227.

9. Кадыров И.Ш. Разработка цифровой системы импульсно-фазового управления (СИФУ) и блока логики (БЛ) для реверсивного тиристорного преобразователя (ТП) // Известия КГТУ им. Раззакова, № 9, 2006. – Бишкек: – С. 395-400.

10. Кадыров И.Ш. Разработка микропроцессорного участкового пульта стрельбищ (МУПС) // Известия КГТУ им. Раззакова, № 10, 2006. – Бишкек: – С. 236-244.

11. Кадыров И.Ш. Об основных направлениях развития науки в филиале БГТУ «ВОЕНМЕХ» в г. Бишкеке // Сб. 1-й Международной конференции, филиал БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2006. – Бишкек: – С. 5-11.

12. Кадыров И.Ш. Разработка системы управления электроприводом по системе ШИП-Д для механизмов напольного транспорта // Сб. 1-й Международной конференции, филиал БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2006. – Бишкек: – С. 45-50.

13. Кадыров И.Ш. Разработка мехатронных систем управления лабораторным стендом автоматической роторной линии // Сб. 2-й Международной конференции, филиал БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2008. – СПб: – С. 72-78.

14. Кадыров И.Ш., Полянинов Г.А. Разработка пульта управления стрельбищным оборудованием // МАШИНОВЕДЕНИЕ сб. науч. трудов ИМ НАН КР, вып. 5, 2006.– Бишкек: Илим – С. 129 – 138.

15. Кадыров И.Ш., Постнов А.А. Применение компьютерной математики *Matlab* при проектировании систем управления тиристорным преобразователем // Известия КГТУ им. Раззакова, № 8, 2006. – Бишкек: – С. 141-147.

16. Кадыров И.Ш., Полянинов Г.А., Постнов А.А. Разработка цифрового управляющего устройства (ЦУУ) для электропривода постоянного тока с реверсивным тиристорным преобразователем (РТП) // Сб. 5-й Международной конференции, АИЭС, 2006. – Алматы: – С. 242-247.

17. Кадыров И.Ш. Динамические процессы, происходящие в электроприводах шагающего экскаватора в режиме опрокидывания инвертора // Известия ОшТУ №2, 2007. – Ош: – С. 98-104

18. Кадыров И. Ш. Динамические процессы, возникающие в передачах механизма поворота шагающего экскаватора в режиме опрокидывания инвертора // Известия ОшТУ №2, 2007. – Ош: – С. 94-97

19. Кадыров И.Ш. Проектирование электромеханических систем для машин автоматического действия. – Бишкек: Издательство КГТУ, 2006. – 211 с.



20. Кадыров И.Ш. Принципы, методы и алгоритмы построения микропроцессорных систем управления электромеханическими машинными агрегатами. – Бишкек: Издательство КГТУ, 2007. – 206 с.
21. Кадыров И.Ш. Исследование динамических процессов в передачах механизма поворота экскаватора – драглайна при внезапном отключении питающего напряжения // Научно-технический журнал «Горное оборудование и электромеханика», №6, 2008. – Москва:– С. 29-32.
22. Кадыров И.Ш. Исследование динамических процессов в электромеханической системе землеройной машины при внезапном отключении питающего напряжения // Научно-технический журнал «Горное оборудование и электромеханика», №7, 2008. – Москва:– С. 26-30.
23. Кадыров И.Ш. Выбор оптимальной конструкции полуавтоматического дозирующего устройства для расфасовки жидких препаратов // Известия КГТУ им. Раззакова, № 13, 2008. – Бишкек: – С. 151-156.
24. Кадыров И.Ш. Разработка системы управления для полуавтоматического дозирующего устройства // Сб. 2-й Международной конференции, филиал БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2008. – СПб.: – С. 59-65.
25. Кадыров И.Ш., Г.А. Полянинов, С.У. Султанбеков, А.А. Постнов. Разработка микропроцессорной системы управления установкой для подъема и опускания целей // Известия КГТУ им. Раззакова, № 11, 2007. – Бишкек: – С. 128-135.
26. Кадыров И.Ш., Постнов А.А., Васильева Л.В. Алгоритм работы цифрового регулятора скорости с переменными коэффициентами, с функцией ограничения тока якоря двигателя в зависимости от скорости вращения // Сб. 1-й Международной конференции, ИА КР, 2007. – Бишкек: – С. 349-353.
27. Кадыров И.Ш., Полянинов Г.А.. Разработка системы управления тиристорного электропривода с коллекторным двигателем для швейной машины. – Известия КГТУ им. Раззакова, № 12, 2007. – Бишкек: – С. 127-131.
28. Кадыров И.Ш, Полянинов Г.А., Бочкарев И.В. Модернизация системы тиристорного возбуждения синхронного генератора малой гидроэлектростанции. Известия КГТУ им. Раззакова, № 12, 2007. – Бишкек: – С. 18-21.
29. Абдраимов С.А., Кадыров И.Ш. Анализ динамических процессов механической части электропривода машин-манипуляторов // Известия КГТУ им. Раззакова, № 11, 2007. – Бишкек: – С. 7-9.
30. Абдраимов С.А., Кадыров И.Ш. Кинематический анализ механической части манипуляционных систем // Сб. 1-й Международной конференции. ИА КР, 2007. – Бишкек: – С. 346-349.
31. Бочкарев И.В., Кадыров И.Ш., Галбаев Ж.Т. Разработка электропривода постоянного тока с цифровым управляющим устройством для робототехнических и мехатронных систем // Сб. 2-й Международной конференции, ИА НАН КР, 2007. – Бишкек: – С. 269-276.
32. Бочкарев И.В., Кадыров И.Ш. Микропроцессорное устройство управления по системе «Непосредственный преобразователь частоты – АД» электропривода экскаватора // Научно-технический журнал МО и Н РФ «Известия вузов. Электромеханика», №5, 2007. – Новочеркасск: – С. 25-30.

33. Бочкарев И.В., Кадыров И.Ш., Гунина М.Г., Галбаев Ж.Т. Разработка и компьютерное моделирование позиционных электроприводов для автоматизированных станков и роботов // Известия КРСУ им. Б.Н. Ельцина, Том 7, № 12, 2007. – Бишкек: – С. 88-94
34. Бочкарев И.В., Кадыров И.Ш., Галбаев Ж.Т. Выбор оптимальных параметров силовых элементов широтно – импульсного преобразователя системы управления электроприводом постоянного тока // Проблемы автоматизации и управления: Научно-техн. журнал ИА НАН КР, 2007. – Бишкек: Илим – С.185-189.
35. Бочкарев И.В., Кадыров И.Ш. Разработка системы управления установки для подъема и опускания мишеней // Известия КРСУ им. Б.Н. Ельцина, Том 8, №1, 2008. – Бишкек: – С. 89-93
36. Кадыров И.Ш., Бочкарев И.В. Алгоритмы синтеза систем управления электроприводами постоянного и переменного тока для шагающих экскаваторов // Вестник ПГУ, №2, 2008. – Павлодар: – С. 67-77.
37. Кадыров И.Ш. Микропроцессорная система управления полуавтоматическим дозирующим устройством // Сб. Международной конференции. «Телекоммуникационные и информационные технологии. Состояние и перспективы развития», 2008. – Бишкек: ОАО «Кыргызтелеком», – С. 225-230.
38. Бочкарев И.В., Кадыров И.Ш. Оптимизация параметров устройства управления электромеханической системой экскаваторов // Научно-технический журнал «Электротехника», № 2, 2009. – Москва: – С. 2-7.

## РЕЗЮМЕ

Кадыров Ишенбек Шакирович

### РАЗРАБОТКА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАШИННЫХ АГРЕГАТОВ

Диссертация представлена на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.

**Ключевые слова:** микропроцессорные системы управления, электромеханические системы технологических установок, микропроцессорные вычислительные устройства, элементы и устройства задания движения рабочего органа.

**Объектом исследования** являются электромеханические системы: «Тиристорный преобразователь - двигатель» (ТП-Д); «Широтно – импульсный преобразователь - двигатель» (ШИП-Д); «Непосредственный преобразователь частоты - асинхронный двигатель» (НПЧ-АД).

**Аппаратура:** АВМ, IBM PC Pentium IV, пакеты Matlab 5.0, P-CAD.

**Полученные результаты.** Разработаны, обоснованы и применены новые методики синтеза последовательной коррекции с подчиненным регулированием координат в системах ТП-Д, ШИП-Д, НПЧ-АД при включении микро-

процессорных управляющих устройств в прямой канал системы управления и микропроцессорных вычислительных устройств – в канал обратной связи.

**Новизна результатов:**

- Предложен и обоснован новый метод исследования аварийных режимов в электроприводах землеройных машин и методы оценки ударных воздействий на механическую и электрическую части ЭМС.

- Разработаны новые методы расчета силовых элементов преобразовательных устройств систем ТП-Д, ШИП-Д, НПЧ-АД.

- Разработаны структуры управления систем ТП-Д, ШИП-Д, НПЧ-АД, реализованных аппаратными средствами с использованием аналоговых и цифровых микросхем.

- Разработаны микропроцессорные управляющие устройства для ЭМС постоянного и переменного тока: генератор синусоидальных сигналов; регуляторы скорости и тока; система импульсно-фазового управления и блок логики.

- Разработана единая методика синтеза систем ТП-Д, ШИП-Д, НПЧ-АД при включении микропроцессорных устройств в прямой канал и канал обратной связи системы управления ЭМС.

- Разработана микропроцессорная система управления комплекса из систем рассредоточенных объектов по радиосвязи и по линии электропередач.

**Область применения.** Электромеханические системы машинных агрегатов машиностроительного производства, горнодобывающей отрасли и др.

**Рекомендации по использованию.** Основные научные положения, разработанные методики инженерного проектирования ЭМС МА, предложенные практические рекомендации и технические решения могут быть использованы при разработке новых и модернизации существующих ЭМС технологического оборудования.

**RESUME**

Kadyrov Ishenbek SHakirovich

**WORKING OUT OF HIGH-SPEED MICROPROCESSOR ACTUATION DEVICES FOR ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF MACHINE UNITS.**

The dissertation is presented on competition of a scientific degree of a Dr.Sci.Tech. on a specialty 05.13.05 – Elements and devices of a computer facilities and control system.

**Keywords:** microprocessor control system, electromechanical system of technological installations, microprocessor computers, task elements and devices of movement of working bodies.

**Object of the research** is electromechanical systems: "Teristor converter - the engine" (TC-E); "Width – impulse converter - the engine (WIC-E); "Direct converter of frequency - an asynchronous engine" (DCF-AE).

**Equipment:** ABM, IBM PC Pentium IV, packets Matlab 5.0, P-CAD.

**The received results.** New techniques of synthesis of consecutive correction with the subordinated in system TC-E, WIC-E, DCF-AE are developed, proved and

applied at inclusion of microprocessor actuation devices in the direct channel of a control system and microprocessor computers – in the feed-back channel.

**Novelty of results:**

- The new methods of research of emergency operation in electro drive digging machines and methods of estimation of percussion influences on mechanical and electric parts of EMS is required and proved.

- New methods of calculation of power elements of converting devices of systems TC-E, WIC-E, DCF-AE are developed.

-Structures of management of system TC-E, WIC-E, DCF-AE realized by hardware with using of analogue and digital microcircuits are developed.

- Microprocessor actuation devices of EMS constant and an alternating current are developed: generator of sinusoidal signals; regulators of speed and a current; system of pulse – phase management and the logic block.

- Common methods of synthesis of systems TC-E, WIC-E, DCF-AE is developed at inclusion of microprocessor devices in the direct channel and the channel of a feedback of a control systems of EMS.

- The microprocessor control systems of a complex from systems of the dispersed objects on a radio communication and on a line of electricity transmission.

**Scope.** Electromechanical systems of machine units of machine – building manufacture, mining branch, etc.

**Recommendations of use.** The basic scientific positions, developed techniques of engineering designed of EMS MA and offered practical recommendations and technical decisions can be used during working out new and modernizations existing EMS technical equipment.

**РЕЗИЮМЕ**

Кадыров Ишенбек Шакирович

**МАШИНАЛЫК АГРЕГАТТАРДЫН ЭЛЕКТРОМЕХАНИКАЛЫК СИСТЕМДЕРИ ҮЧҮН ТЕЗ АРАКЕТ ЭТҮҮЧҮ МИКРОПРОЦЕССОРДУК БАШКАРЫЛУУЧУ ТҮЗҮЛҮШҮН ИШТЕП ЧЫГУУ**

05.13.05- башкаруу системасы жана эсептөөчү техниканын түзүлүшү жана элементи кесибчилиги боюнча техника илимдеринин доктору илимий даражасына сунушталган илимий иш.

**Маанилүү сөздөр:** микропроцессордук башкаруу системи, тестөө орнотмолорунун электромеханикалык системи, микропроцессордук эсептөө түзүлүшү, иштөөчү бөлүктүн кыймылдатуучу элементтер жана түзүлүштөр.

**Изилденүүчү объект** болуп төмөнкүлөр эсептелинет: «тиристордук өзгөрткүч-кыймылдаткыч» (ТӨ-К); «Жазы-импульстук өзгөрткүч – кыймылдаткыч» (ЖИӨ-К); «Түздөн-түз жыштык өзгөрткүч-кыймылдаткыч» (Т-ТЖӨ-К).

**Аппараттар:** АЭМ, ЭЭМ PC Pentium IV, Matlab 5.0, P-CAD.

**Алынган жыйынтыктар.** Микропроцессордук башкаруучу түзүлүшүн башкарылуучу системанын түз каналына жана микропроцессордук эсептөөчү

орнотмонун – тескери каналына кошууда ТӨ-К, ЖИӨ-К, Т-ТЖӨ-К баш ийип башкарылуучу систем координаттары менен удаалаш жөндөлүүчү жаңы ыкмалары иштелип чыкты, негизделди жана колдонулду.

**Жыйынтыктардын жаңылыгы:**

- Жер казуучу машиналардын электр кыймылга келтиргичтеринин авария учурун изилдөөнүн жаңы ыкмасы жана ЭМСнин механикалык, электр бөлүгүнө сокку таасирлерин баа берүү ыкмалары негизделди жана сунушталды.

- ТӨ-К, ЖИӨ-К, Т-ТЖӨ-К системдеринин өзгөрткүч түзүлүштөрүнүн күчтүк элементерин эсептөөнүн жаңы ыкмалары иштелип чыкты.

- ТӨ-К, ЖИӨ-К, Т-ТЖӨ-К системдеринин аналогдук жана сандык микросхемдерди колдонулуучу аппаратык бөлүктөр менен ишке ашкан башкаруу тармагы иштелип чыкты.

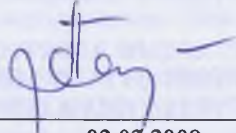
- Турактуу жана өзгөрмө токтун ЭМС үчүн төмөнкү микропроцессордук башкаруучу түзүлүштөр иштелип чыкты: синусоидалдык белги берүүчү өндүргүч, токту жана ылдамдыкты башкаргыч, импульстук-фазалык башкаруу системасы жана логика бөлүгү.

- ТӨ-К, ЖИӨ-К, Т-ТЖӨ-К системдерин синтездөөдө ЭМСке микропроцессордук түзүлүштү түз канал жана тескери канал байланыш башкаруу системин кошууда жаңы ыкма иштелип чыкты.

- Чачыраган радиобайланыш түйүндөрү жана электрберүүчү линиясы системаларынан турган комплексти микропроцессордук башкаруу системасы иштелип чыкты.

**Колдоонуу областы.** Машина куру өндүрүшүндөгү машиналык агрегаттардын электромеханикалык системдеринде, ТОО-кен тармагында, ж.б.

**Колдонуу үчүн көрсөтмөлөр.** Негизги илимий абалдары, ЭМС МАды инженердик долборлоодо иштелип чыккан ыкмалар, сунушталган колдонмолор, көрсөтмөлөр, жана техникалык чечимдер жаңы же мурун бар технологиялык оборудованилардын ЭМСин жаңылоодо колдонсо болот.



Подписано к печати 02.02.2009 г. Формат бумаги 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офс. Печать офс. Объем 2,625 п.л. Тираж 100 экз. Заказ

Издательство Кыргызского Государственного технического университета

720044, Бишкек, ул. Сухомлинова, 20.

Отпечатано в ИЦ "Техник" КГТУ, т.: 42-14-55, 54-29-43

E-mail: [ict@ktu.aknet.kg](mailto:ict@ktu.aknet.kg), [teknik@netbox.ru](mailto:teknik@netbox.ru)