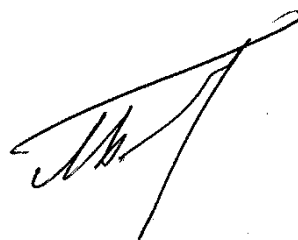


На правах рукописи



Белов Михаил Петрович

**ТЕОРИЯ, ИНФОРМАЦИОННОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ СИСТЕМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН И КОМПЛЕКСОВ**

Специальность: 05.09.03. - Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург

2016

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), кафедре Робототехники и автоматизации производственных систем

Научный консультант:

Новиков Владислав Александрович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Онищенко Георгий Борисович,
доктор технических наук, профессор -
профессор кафедры «Электротехники»
ФГБОУ ВО Московского политехниче-
ского университета.

Мещеряков Виктор Николаевич,
доктор технических наук, профессор -
заведующий кафедры «Электропривода»
ФГБОУ ВПО Липецкого государственного
технического университета.

Ефимов Александр Андреевич,
доктор технических наук, профессор –
профессор кафедры «Управление в техни-
ческих системах» ФГАОУ ВПО Санкт-
Петербургского государственного универ-
ситета аэрокосмического приборострое-
ния

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится 28 декабря 2016 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте
<http://www.eltech.ru>

Автореферат разослан «27» сентября 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



В. Д. Гончаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. По официальным данным уровень износа оборудования в большинстве отраслей промышленности РФ составляет в среднем 30-60%. Полностью изношена пятая часть всех производственных фондов, а ежегодно обновляется в последние пять лет не более 2 – 2,5%. Повышение цен на электроэнергию и контроль качества электроэнергии создают новые проблемы для отечественного производства, приводящие его к нерентабельности в условиях свободного рынка. В существенной степени обновление и рентабельность производства связываются с использованием возможностей современных автоматизированных электроприводных систем (АЭПС) и новых высокоавтоматизированных технологий.

Проектирование АЭПС для технологических машин и комплексов (ТМиК) выполняется в настоящее время с использованием инжиниринговых средств. Эти средства включает в себя компьютерные средства для: структурного синтеза, расчета режимов работы приводов и механизмов, выбора силовых модулей (питающих, приводных, тормозных, фильтрующих, защитных и др.) и модулей управления (процессорных, интерфейсных, информационных, технологических и др.), образующих конфигурацию комплектного электропривода или комбинацию комплектных электроприводов, адаптированных к объекту. Такие средства инжиниринга разрабатываются производителями и формализованы до стадии получения спецификации на заказ электрооборудования. Они являются частью маркетинга, обеспечивающего рынок сбыта продукции.

Особое место в проектировании АЭПС занимает исследование и обоснование принимаемых решений в части взаимного согласования оборудования в составе комплекса. Это согласование касается взаимосвязанных электромагнитной, механической и технологической подсистем комплекса.

Математическое описание технологических подсистем содержит описания физических процессов, характерных для той или иной технологии. Как правило, в составе этих описаний используются эмпирические зависимости регулируемых переменных от многих переменных, характеризующих вид исполнительного органа (инструмента), обрабатываемого вещества, особенности технологии.

Компьютерные исследования АЭПС выполняются по его модели, под которой понимается формализованное описание объекта, системы объектов, процесса или явления. С появлением вычислительной техники новых поколений и совершенствованием методов её использования наметился новый системный подход к организации процесса проектирования на ПК, заключающийся в создании крупных программных комплексов, построенных по модульному принципу с универсальными информационными и управляющими связями между модулями. При решении задач данного класса используются единые информационные массивы, организованные в банки данных.

В настоящее время хорошо разработаны методы и алгоритмы позволяющие: исследовать режимы работы электроприводных систем (ЭПС); анализировать их качество; принимать оптимальное решение; исследовать динамику ЭПС, содержащих элементы с нелинейными характеристиками; рассчитывать оптимальные процессы при наличии ограничений; исследовать динамику стохастических систем и т.д.

В этих условиях перспективными направлениями повышения эффективности проектирования ЭПС являются создание и внедрение новых современных технологий в области моделирования ЭПС, которые основаны не только на применении классических методов, но и на применении интеллектуальных методов (эволюционных, визуального моделирования и др.). Адекватные решения современных задач в области АЭПС можно получить, если исходить не из идеализированных процессов, происходящих под действием постоянных во времени нагрузок при данном режиме, а из реальных процессов с учетом как детерминированных, так и случайных факторов.

К настоящему времени накоплен большой опыт по исследованию и синтезу основных подсистем и ЭПС в целом. Вопросам теории и разработки методов исследования, синтеза ЭПС посвящены

работы: Башарина А. В., Браславского И. Я., Бычкова М. Г., Бычкова Ю. А., Водовозова В. М., Герман-Галкина С. Г., Глазунова В. Ф., Иванова Г. М., Ильинского Н. Ф., Имаева Д. Х., Козярука А. Е., Мещерякова В. Н., Новикова В. А., Онищенко Г. Б., Осипова О. И., Постникова Ю. В., Сабина Ю. А., Слежановского О. В., Соколовского Г. Г., и др. авторов. Моделированию посвящены работы: Бусленко Н. П., Вавилова А. А., Емельянова С. В., Моисеева Н. Н., Колганова А. Р., Советова Б. Я., Яковлева С. А. и др. Адаптивному управлению посвящены работы: Ивахненко А. Г., Красовского А. А., Костюка В. И., Ли И. Т., Петрова Б. Н., Поляхова Н. Д., Путова В. В., Терехова В. А., Рутковского В. Ю., Солодовникова В. В., Фомина В. Н., Фрадкова А. Л., Цыпкина Я. З., и др.

Работы известных ученых, выполненные в различное время, в разных научных школах, не содержат комплексного метода, направленного на повышение эффективности проведения компьютерного исследования, синтеза и моделирования ЭПС и эффективного её использования при проектировании и рабочем функционировании (эксплуатации) ЭПС.

Рассмотренный в диссертационной работе комплекс задач сформулирован в контексте проблемы совершенствования методов и средств компьютерного структурного и параметрического синтеза и исследования ЭПС. В основу концепции принятия оптимальных решений заложены блочно-модульные принципы построения АЭПС, структурные преобразования и визуализация динамических процессов, методики типизации и унификации моделей компонентов, оценка стоимости электроприводных средств и средств автоматизации, использование современных программных средств. А подкрепляются проводимые разработки результатами выполненных научно-исследовательских работ и проведением комплексных исследований на моделях АЭПС.

Цель работы и задачи исследования. Цель диссертационной работы состоит в разработке научно обоснованных компьютерных технологий, предназначенных для решения задач синтеза и исследования эффективных АЭПС технологических машин и комплексов на стадиях их проектирования и эксплуатации.

Для достижения цели поставлены следующие основные задачи:

1. Провести анализ ТМиК непрерывных производств с целью выявления особенностей построения их систем управления, режимов работы и технологических процессов.
2. Выполнить комплексную оценку компьютерных средств и методов инжиниринга АЭПС. Разработать концепции и принципы, существенно повышающие эффективность проведения компьютерного исследования и синтеза АЭПС на стадиях проектирования и эксплуатации ТМиК.
3. Провести анализ информационного и программного обеспечения АЭПС.
4. Выполнить унификацию математического описания компонентов, комплектов и групп комплектов АЭПС. Разработать компьютерные методы синтеза электромагнитных, механических и технологических подсистем, электромеханической и механико-технологической систем.
5. Провести анализ современных методов и подходов к автоматической оптимизации динамических систем, разработать научно обоснованные алгоритмы автоматической оптимизации АЭПС с учетом производительности, динамической точности технологии и энергосбережения.
6. Разработать базу математических и компьютерных моделей компонентов, комплектов и групп комплектов АЭПС, методов синтеза и оптимизации электромеханической и механикотехнологической систем. На основе этой базы разработать информационную и программную систему с возможностью варьирования моделей компонентов и комплектов и выполнения моделирования подсистем и систем в целом на микро- и макроуровнях.
7. Провести анализ компьютерных сред и программного обеспечения для задач принятия оптимальных решений при проектировании и эксплуатации АЭПС ТМиК.
8. В рамках выполненного комплекса НИР (по хоздоговорам, грантам, целевым программам) обобщить проведенные теоретические и экспериментальные исследования конкретных АЭПС для

технологических комплексов: прокатного стана, участка резки листового проката, дробильного комплекса, стана холодной прокатки, продольно-резательного станка.

Методы исследования. Основные результаты диссертационной работы получены на базе фундаментальных законов и уравнений электромагнитного поля, электродинамики и теории электрических цепей. Используются аналитические и численные методы решения дифференциальных уравнений; теории случайных процессов; методы компьютерного моделирования; методы преобразования структурных схем; методы аналитической геометрии.

Достоверность полученных результатов исследования определяется корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений и адекватностью используемых при исследовании математических моделей и методов, а также подтверждается физическими и математическими экспериментами и практическими испытаниями в реальных условиях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Концепция принятия оптимальных решений при проектировании и эксплуатации интегрированных электроприводных систем технологических машин и комплексов, при обоснованном представлении систем, применяемых в различных технологиях, в виде электромагнитных, механических и технологических взаимосвязанных подсистем, имеющих собственные задачи синтеза и оптимизации на стадиях проектирования и эксплуатации.

2. Метод синтеза систем в соответствии с обобщенными критериями, имеющими стоимостные и иные оценки и содержащими частные критерии, отражающие базовые показатели эффективности систем в виде качества технологии, динамической точности, производительности, энергосбережения и дополнительные показатели, рассматриваемые как ограничения. Использование динамической декомпозиции, обеспечивающей доминирование основных каналов регулирования электромагнитных, механических и технологических переменных систем над каналами взаимосвязей соответствующих переменных, образуемых при выполнении технологии.

3. Методика типизации и унификации моделей компонентов, комплектов и групп комплектов систем, учитывающих электромагнитные, механические, технологические и энергетические процессы в электроприводных системах; методика формирования моделей блоков-комплексов на основании типовых, унифицированных моделей компонентов систем.

4. Адаптивные поисковые методы автоматического управления динамическими процессами и оптимизацией процессов в каждой из подсистем и в системе управления в целом с учетом возможных неопределенностей в параметрах и условиях эксплуатации систем.

5. Компьютерные технологии структурного и параметрического синтеза и оптимизации систем, основанных на интеллектуальных (генетических, нейросетевых, нечеткологических) алгоритмах и оформленных в виде информационной и программной систем.

6. Анализ информационного и программного обеспечения АЭПС и разработка основ информационной системы с открытыми и пополняемыми базами моделей, данных и методов.

7. Комплекс расчетно-теоретических и компьютерных исследований, выполненных с применением разработанных методов и современных компьютерных технологий и обеспечивающих высокую эффективность в достижении целей исследования.

Научная значимость и новизна работы. В диссертационной работе впервые комплексно решен ряд важнейших задач, позволяющих производить синтез, исследование и оптимизацию АЭПС с использованием компьютерных технологий, учитывающих особенности построения АЭПС, и всю совокупность режимов ее работы в технологическом комплексе. Это позволяет значительно повысить эффективность проектирования АЭПС, снизить технологические потери на стадии рабочего функционирования АЭПС с учётом ее взаимодействия с технологической средой и влияния случайных факторов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Концепция принятия оптимальных решений при проектировании и эксплуатации АЭПС

технологических машин и комплексов, базируется на совокупности обобщенных и частных критериях структурного и параметрического синтеза по базовым показателям эффективности систем в виде качества технологии, производительности, энергосбережения, динамической декомпозиции, разработанной базе математических моделей компонентов, и комплектов систем, информационной и программной систем.

2. В методе синтеза АЭПС используется совокупность обобщенных критериев для подсистем технологических машин и комплекса и алгоритм определения весовых коэффициентов критериев, базирующихся на стоимостных оценках компонентов вариативной оптимизации АЭПС. Задача синтеза рассматривается с учетом адаптивных алгоритмов в подсистемах комплекса и в системе в целом. Динамическая декомпозиция основывается на оценке установленных соотношений корней динамической матриц, описывающих отдельные системы и их взаимосвязи в технологии.

3. Методики типизации и унификации моделей нацелены на микро- и макро моделирование и предусматривают расширение моделей компонентов подсистем комплекса с учетом показателей обобщенных и частных критериев оптимизации подсистем и систем в целом. Модели наиболее развитой взаимосвязанной механической подсистемы и механико-технологической системы АЭПС имеют формализованную типовую запись в виде передаточных матриц, элементы которой не зависят от сложности структуры системы и числа обобщенных координат записываются по разработанной методике в соответствии с собственными значениями динамической матрицы всей системы и динамических матриц частей этой системы.

Математические модели АЭПС в технологическом процессе имеют переменную структуру в соответствии с меняющимися параметрами процесса, характеризующими взаимодействие исполнительных органов технологического оборудования через обрабатываемый материал в конкретные промежутки времени технологического процесса (модели АЭПС мелкосортного стана горячей прокатки, продольно-резательного станка и др.).

4. Адаптивные поисковые методы с автоматической настройкой параметров применяются в каждой из подсистем и в системе в целом и решают как локальные задачи параметрической настройки АЭПС, так и настройки показателей эффективности технологий, выполняемых технологическими машинами и комплексами. Автоматическая оптимизация технологических процессов с натяжением материала (мелкосортный стан горячей прокатки, бумагоделательная машина, продольно и поперечно резательные станки) предусматривает оценку рассогласования соотношения скоростей смежных машин (агрегатов), на основании которой производится коррекция скоростного режима машин, а также осуществляется минимизация среднеквадратичной ошибки по натяжению путем подстройки параметров регуляторов. Разработанные способы настройки скоростных режимов технологических комплексов минимизируют расход электроэнергии за счет коррекции сигнала задания, поступающего на входы систем управления скоростью машин технологического комплекса. Выбор оптимальной скорости осуществляется системой автоматической оптимизации, выполняющей функции оценки затрат электроэнергии на деформацию материала, выработки оценки функционала качества, выработки управляющего воздействия для реализации режима оптимизации (АЭПС дробильно-технологического комплекса, мелкосортного стана горячей прокатки).

5. Компьютерные технологии структурного и параметрического синтеза и оптимизации АЭПС, оформленные в виде информационной и программной систем соответствуют блочно-модульной идеологии построения АЭПС, учитывают параметрическую неопределенность в реализации технологического процесса и базируются на выполненной классификации АЭПС и разработанной базе математических моделей компонентов, и комплектов систем и методов оптимизации.

6. Анализ информационного и программного обеспечения АЭПС и разработка основ информационной системы с открытыми и пополняемыми базами моделей, данных и методов, обеспечи-

вающих проектирование и эксплуатацию АЭПС технологических машин и комплексов с оптимальными показателями эффективности.

7. Комплекс расчетно-теоретических и компьютерных моделей, разработанный в ряде выполненных НИР с учетом особенностей АЭПС технологических машин и комплексов, включает в себя помимо переменных, используемых в традиционных моделях ЭПС показатели обобщенных и частных критериев структурной и параметрической оптимизации, базовые показатели эффективности систем в виде качества технологии, производительности, энергосбережения.

Практическая ценность работы заключается в решении комплексной научно-технической проблемы создания новых компьютерных технологий для решения задач синтеза и исследования ЭПС, повышении эффективности на стадиях проектирования и эксплуатации ее жизненного цикла ЭПС с учетом их взаимодействия и влияния случайных факторов. Совокупность полученных теоретических и практических результатов создает объективные предпосылки для расширения областей применения и внедрения в практику компьютерных технологий с целью эффективности применения ЭПС.

Реализация результатов работы. Основные результаты работы получены и использованы при выполнении госбюджетных НИР, проводимых в СПбГЭТУ ГБ/РАПС-16 «Разработка и исследование моделей систем управления и автоматизации электротехнических комплексов, технологических процессов и подвижных объектов», ГТАТ/РАПС-21 «Разработка компьютерных методов исследования, синтеза и автоматической оптимизации электромеханических комплексов управления»; ГТАТ/РАПС-25 «Разработка методов синтеза и принципов построения энергосберегающих электромеханических комплексов управления» и хоздоговорных НИР, выполняемых по заказам предприятий и организаций, связанных с разработкой новых систем управления, энергосберегающих технологий. РАПС-41 «Исследование путей повышения качества управления технологическими переменными в картоноделательном производстве средствами компьютеризированных электромеханических комплексов»; РАПС-43 «Разработка проекта модернизации системы управления приводами стана 250 с переходом на микропроцессорную технику»; РАПС-46 «Исследование электромеханических систем ножниц с катящимся резом и выдача рекомендаций для проектирования»; САУ-54 «Автоматизация технологических комплексов средствами компьютеризированных электромеханических систем»; САУ 68 «Разработка теоретических основ и принципов создания современных информационно-управляющих систем в электротехнических, мехатронных и электротехнологических комплексах для промышленных и транспортных объектов»

Материалы диссертации, касающиеся компьютерных технологий для решения задач синтеза и исследования автоматизированных электромеханических комплексов, используются в учебных дисциплинах для студентов направлений 13.03.02 "Электроэнергетика и электротехника" а также магистрантов и аспирантов в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 3 Всесоюзной научно - технической конференции "Динамика станочных систем гибких автоматизированных производств", 24-26 мая 1988 г., Тольятти; 1 Международной (XII Всероссийской) конференции "Автоматизированный электропривод", 26-28 сентября 1995 г. Санкт - Петербург; научно - техническом семинаре "75 лет отечественной школы электропривода", 24-26 марта 1997 г. Санкт-Петербург; 2 Международной (XIII Всероссийской) конференции "Проблемы автоматизированного электропривода", 23-25 сентября 1998 г. Ульяновск; III Международной конференции по автоматизированному электроприводу, Нижний Новгород, сентябрь 2001 г.; семинаре «Школа обмена опытом: Системы управления в черной металлургии, передовой опыт; инструментарий - анализ предложений мировых лидеров; оптимизация энергоснабжения на предприятиях металлургической промышленности» (Санкт-Петербург, декабрь 2002 г.); международной научно-

технической конференции "Современные технологии, материалы, машины и оборудование" Могилев, 16 – 17 мая 2002 г.; Научной конференции «Энергоресурсосбережение на предприятиях металлургической и горной промышленности (новые решения)» (Санкт-Петербург, январь 2004 г.); IV Международной конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (Магнитогорск, сентябрь 2004 г.); V Международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007, Санкт-Петербург, 18-21 сентября 2007 г.; VII международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. Иваново, 2-4 октября 2012 г.; научных конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Санкт-Петербург, 1982, ..., 2015 г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 90 работ, в числе которых 4 монографии, 42 статьи, из них 32 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, 7 авторских свидетельств и свидетельств на полезные модели, 12 алгоритмов и программ, 25 тезисов докладов на конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 197 наименования и 4 приложений. Общий объем диссертации 400 страниц текста (без приложения), включая 115 рисунка и 24 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана преемственность проводимых исследований с фундаментальными результатами по проблемам компьютерных технологий для решения задач синтеза и исследования автоматизированных электромеханических комплексов, полученных в научных школах СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПбПУ, НМСУ «Горный», МЭИ(ТУ), УГТУ (УПИ), ИГЭУ и др. Отражена научная проблема, актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту, изложены сведения о научной значимости и практической ценности, реализации и апробации работы.

В первой главе проведен анализ технических, информационных и программных средств современных АЭПС ТМиК. Сформулированы критерии синтеза ЭПС. Раскрыта структура комплекса, даны обобщенные математические модели подсистем комплекса. Раскрыто первое научное положение – научная концепция принятия оптимальных решений при проектировании и эксплуатации АЭПС ТМиК, при обоснованном представлении систем, применяемых в различных технологиях, в виде электромагнитных, механических и технологических взаимосвязанных подсистем, имеющих собственные задачи синтеза и оптимизации на стадиях проектирования и эксплуатации.

Для современных промышленных механизмов, агрегатов и комплексов характерным является то, что они имеют широкий диапазон напряжений питающей электросети, мощностей, скоростей, режимов работы и перегрузочную способность электродвигателей. К ним также предъявляются различные требования к регулированию скорости (рабочему диапазону, плавности изменения и точности поддержания заданной скорости) и динамическим показателям качества процесса регулирования (быстродействию, перерегулированию и др.).

Многие механизмы (например, конвейеры) требуют обеспечения пуска под нагрузкой, а некоторые (например, центробежные вентиляторы главного проветривания шахт, дробилки крупного дробления) обладают значительными инерционными массами. В современных промышленных механизмах, агрегатах и комплексах применяются регулируемые и не регулируемые, редукторные и безредукторные с тихоходными двигателями привода. ЭПС представляют из себя многодвигательные системы, работающие в различных режимах. В работе рассмотрены характеристики АЭПС следующих технологических комплексов: непрерывный сортовой прокатный стан 250; комплекс ножниц листового прокатного стана (рисунок 1); картоноделательная машина, камнедробильный комплекс. Для координированного управления механизмами машин применяются различные наборы средств и алгоритмов управления. Кроме управления электромагнитными и механиче-

скими переменными выполняется управление технологическими переменными, по которым оценивается качество изделий, производимых машиной.

Развитие электроприводной техники идет по пути, применения многополюсных линейных и вращательных двигателей, объединения электродвигателей с исполнительными органами рабочей машины, систем управления многоосевыми движениями для различных технологий, максимально-го упрощения кинематических передач, создания высокодинамичных ЭПС. Общим здесь является тенденция к усилению влияния высокодинамичных ЭПС на технологию, путем расширения полос пропускания систем регулирования скорости и положения исполнительных органов. Унифицированные ЭПС выполняются, как правило, на базе комплектных электроприводов переменного тока, а в отдельных случаях и постоянного тока.

Управляемые преобразователи электроэнергии выполняются главным образом как полупроводниковые преобразователи в виде неуправляемых и управляемых выпрямителей, автономных инверторов напряжения и тока, инверторов, ведомых сетью, преобразователей частоты с непосредственной связью. Виды преобразователей и их комбинации определяются типом электродвигателя и задачами управления, мощностью, диапазоном регулирования, необходимостью рекуперации энергии в сеть, влиянием преобразователей на питающую сеть.

Обеспечение требуемых информационных взаимосвязей компонентов интегрированных ЭПС технологических комплексов достигается посредством сетей и коммуникационных интерфейсов.

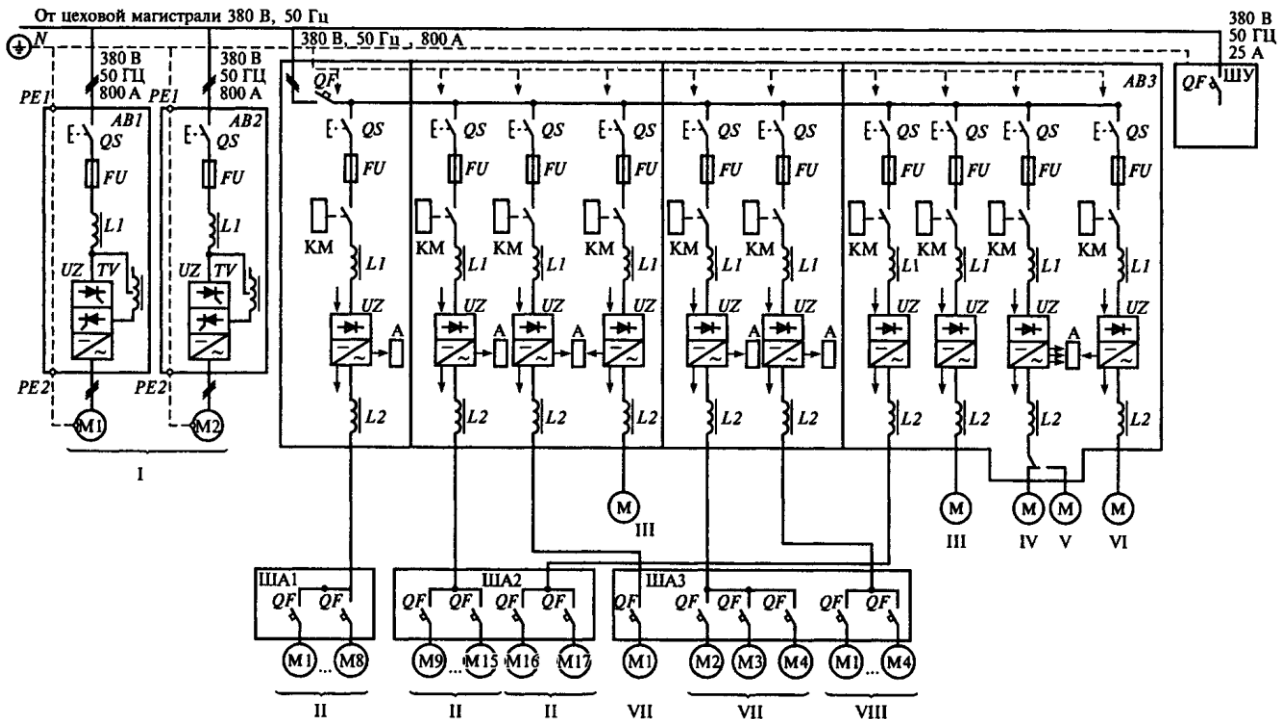


Рисунок 1 – Электрическая принципиальная схема АЭПС комплекса резки листового проката

Основываясь на блочно-модульных принципах построения современных компьютерных СУ электроприводами машин и комплексов (как в части технических средств, так и в части программных и алгоритмических средств) структурную схему СУ технологическим комплексом, выполненной на базе АЭПС, можно представить в виде трехуровневой иерархической схемы (рисунок 2). В работе рассмотрены характеристики и математическое описание электромагнитной, механической и технологической подсистем комплекса.

Взаимосвязанная электромагнитная подсистема (ЭП). Управление взаимосвязанными электромагнитными переменными имеет место при управлении электродвигателями постоянного и переменного токов, так как необходимо осуществить независимое управление электромагнитным моментом и потоком. Значительно более разнообразными могут быть варианты взаимосвязей в том

случае, когда много электродвигателей и управляемых полупроводниковых преобразователей составляют единую сложную систему ЭПС ТМиК.

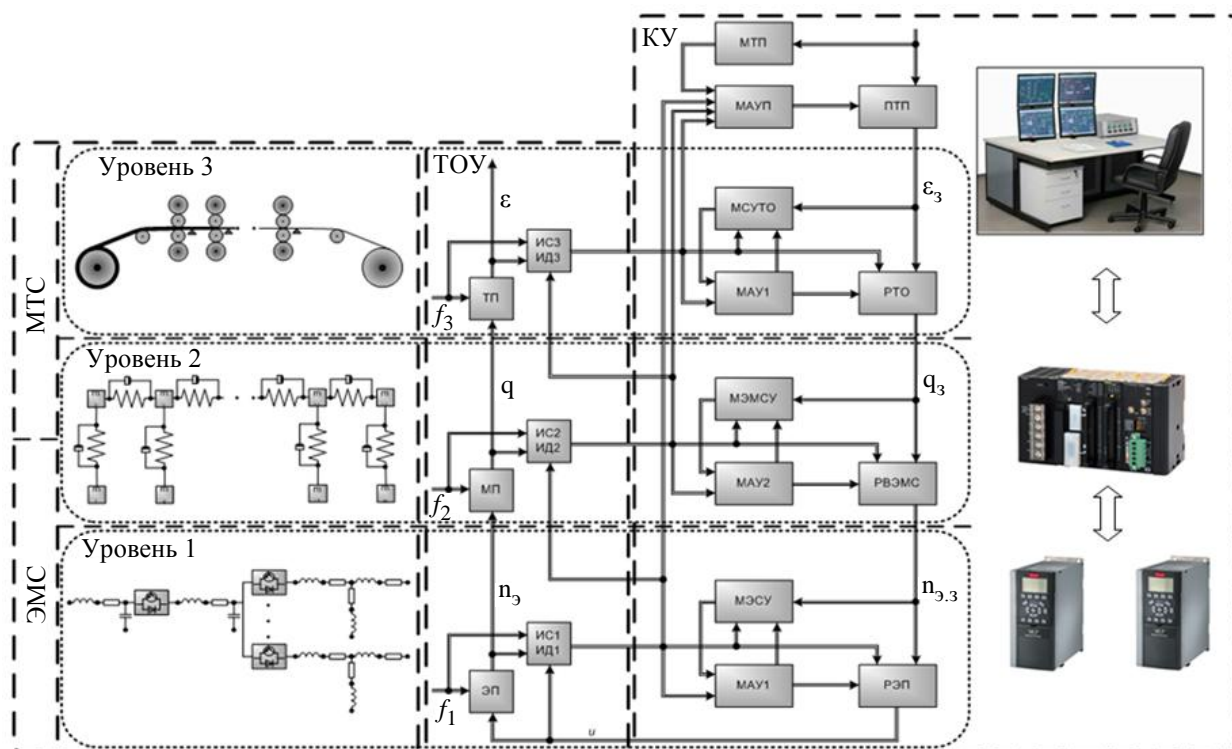


Рисунок 2 – Типовая алгоритмическая структурная схема комплекса

Применяются системы с параллельным и последовательным включениями управляемых преобразователей, с параллельным и последовательным включениями электродвигателей. Математические описания ЭП выполняется методами теории цепей и теории поля, изучаемыми в «Теоретической электротехнике» и в «Теории электропривода». Первые методы базируются на уравнениях Кирхгофа, которые отражают зависимости между напряжениями и токами в контурах и узлах электрических схем, а вторые – на уравнениях Максвелла, связывающих векторы магнитной и электрической напряженности, индукции, смещения и плотности тока в произвольной точке электромагнитного поля.

Электромагнитная подсистема комплекса с электроприводами переменного тока имеет сложную взаимосвязанную структуру, содержащую большое число электронных и электротехнических устройств. Для исследования процессов, происходящих в этой подсистеме применяют методы матричного анализа, которые обычно применяют для исследования и расчета сложных электрических цепей разветвленной структуры. Это позволяет формализовать процесс составления уравнений электромагнитного баланса цепи и применить, например метод контурного анализа или узловых токов. Для динамического исследования сложных электрических цепей применяют уравнения состояния, которые представляют собой систему уравнений Коши в нормальной форме.

Взаимосвязанная механическая подсистема (МП). Рассматриваются взаимосвязанные много-массовые МП, управление которыми осуществляется многодвигательными электроприводами. Если исходить из предположения, что взаимосвязь механической и электромагнитной подсистем оказывается слабой (а, по существу, это предположение связано с оценкой влияния обратных связей по ЭДС двигателей на динамику сепаратных СУ), то МП может рассматриваться независимо от ЭП. Математические описания МП выполняются методами, изучаемыми в «Теоретической механике», в частности, используются уравнения Лагранжа.

Если в многомассовой упругой МП в явном виде отсутствуют звенья с распределенными параметрами, то МП может быть представлена в виде многих элементов с сосредоточенными массами, соединенных между собой безмассовыми упругими связями. Под действием нескольких вход-

ных переменных МП будет совершать основное движение и колебательные движения относительно основного. Взаимосвязанная МП описывается в векторно-матричной форме $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}\mathbf{q} = \mathbf{F}(t)$ где $\mathbf{q} = [q_1 q_2 \dots q_k]^T$ – k -й вектор обобщенных координат; $\mathbf{M}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ – симметричные $k \times k$ матрицы соответственно коэффициентов инерции, демпфирования и жесткостей ($\mu_{ij} = \mu_{ji}, c_{ij} = c_{ji}$); $\mathbf{F}(t)$ – обобщенная возмущающая сила периодически изменяющаяся с течением времени. Колебания МП всегда являются затухающими из-за влияния восстанавливающих сил системы, поэтому математическое описание МП следует выполнять с учетом этих сил. Однако делать это можно только для простых случаев или после упрощения исходной модели системы, в связи с тем, что полная математическая модель МП может оказаться сложной и обращение с ней в задачах анализа и синтеза взаимосвязанных СУ станет практически невозможным. Поэтому целесообразно, вначале составить детализированное математическое описание МП без учета демпфирующих сил, выполнить ее упрощение таким образом, чтобы с достаточной точностью отразить динамические свойства системы в заданных полосах частот сепаратных подсистем, а затем уже в упрощенных моделях учесть силы демпфирования. Исходя из этого взаимосвязанная МП описывается в векторно-матричной форме $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}\mathbf{q} = 0$. После преобразования исходного уравнения для исследования МП используют уравнение (без учета внешних сил) $(\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} - \lambda\mathbf{I})\bar{\mathbf{q}}_0 = 0$, где \mathbf{I} – единичная матрица, можем определить вектор $\bar{\mathbf{q}}_0$ как собственный вектор матрицы $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}$, а λ как ее собственные значения. Для многих вариантов механизмов, имеющих одну степень свободы это уравнение может быть записано в более простом виде $(\mathbf{G} - \lambda\mathbf{I})\bar{\mathbf{q}}_0 = 0$, где $\mathbf{G} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}$. Собственные значения $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$ матрицы \mathbf{G} определяют собственные частоты колебаний механической подсистемы $\omega_{y1} = \sqrt{\lambda_1}, \omega_{y2} = \sqrt{\lambda_2}, \dots, \omega_{yk} = \sqrt{\lambda_r}$.

Взаимосвязанная технологическая подсистема (ТП). Математическое описание ТП содержит описания физических процессов, характерных для той или иной технологии. Часто эти описания включают в себя эмпирические формулы с разнообразными значениями коэффициентов, зависящих от многих факторов важных для конкретной технологии. Имеется большое количество ТМиК с распределенными параметрами, которые описываются уравнением

$$F \left(x_1, x_2, \dots, x_n, \varphi, \frac{\partial \varphi}{\partial x_1}, \frac{\partial \varphi}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial \varphi}{\partial x_n}, \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2}, \dots, \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) = 0,$$

где φ – искомая функция (фазовая координата); x_i – пространственные координаты (переменные АЭПС); n – количество пространственных координат.

Для построения компьютерных моделей ТП с распределенными параметрами используют фундаментальные физические законы. К ним относятся прежде всего законы сохранения (массы, энергии, количества движения). В наиболее общем виде описание технологической подсистемы выполняется также в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{f}, t)$ или

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u} + \mathbf{D}(\mathbf{x}, t)\mathbf{f}; \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t), \mathbf{B}(\mathbf{x}, t), \mathbf{D}(\mathbf{x}, t)$ – матрицы состояния, управления и возмущения соответственно; \mathbf{C} – масштабная матрица; $\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{f}, \mathbf{y}$ – векторы переменных состояния, управления, возмущения и измеряемых переменных соответственно. Аналогичное описание применяется и для других подсистем АЭПС.

Для рассмотренных подсистем АЭПС определены задачи оптимизации ЭПС ТМиК на стадиях проектирования и эксплуатации в соответствии с обобщенными и частными критериями оптимиза-

ции. Наиболее простой метод формирования обобщенного критерия заключается в том, что один из критериев q_k принимается в качестве обобщенного, а все остальные учитываются в виде ограничений, определяющих область допустимых альтернатив

$$Q = q_k \begin{cases} q_i \geq q_i^{(0)}; & i = \overline{1, l}; \\ q_i < q_i^{(0)}; & i = \overline{l+1, n}; i \neq k, \end{cases}$$

где $q_i^{(0)}$ – величины, определяющие допустимые значения по всем критериям, кроме q_k .

Задача синтеза МП формулируется по результатам синтеза ТП из условия получения заданных полос пропускания контуров регулирования механических переменных и соответственно заданных частот упругих колебаний многомассовой механической подсистемы (ММП). При исследовании ММП возникают следующие задачи: 1) определения структуры механической модели ММП, обеспечивающей при m входных и r выходных переменных оптимальное решение задачи управления ЭПС и соответственно технологией; 2) анализа и синтеза ММП, в соответствии с которыми на стадии проектирования находятся такие сочетания инерционно-жесткостных и демпфирующих параметров, которые обеспечивают динамическую декомпозицию и малую интенсивность колебаний механизмов в заданных полосах частот сепаратных подсистем управления.

Задача синтеза ЭП формулируется из условия получения минимумов динамических ошибок при воспроизведении управляющих воздействий для формирования электромагнитных моментов электроприводов. Синтез ЭП из этого условия сводится к синтезу системы векторного управления частотно-регулируемым асинхронным или синхронным электродвигателем с заданной полосой пропускания управляющих воздействий. В конечном счете, это чаще всего сводится к определению нужного значения частоты модуляции инвертора напряжения.

При проектировании ЭПС важной оценкой в критериях оптимизации является стоимость применяемых в АЭПС компонентов. Оптимизация СУ АЭПС по стоимости реализации осуществляется на стадиях синтеза принципа действия и при структурном синтезе. Тогда оценки удобно использовать в нормированном виде, представляя их как отношения текущих оценок к их базисным значениям. В качестве базисных (заданных) значений могут быть приняты как усредненные значения мировых цен, определяемые по ценам рынка, так и максимальные или минимальные значения.

В таком случае, без учета ограничений имеем

$$Q = b_1 \left(\frac{q_1(\mathbf{a})}{q_{1\text{зад}}} \right) + b_2 \left(\frac{q_2(\mathbf{a})}{q_{2\text{зад}}} \right) + b_3 \left(\frac{q_3(\mathbf{a})}{q_{3\text{зад}}} \right),$$

где $q_i(\mathbf{a})$, $q_{i\text{зад}}$, $i = \overline{1, 3}$ – текущая и заданная оценка трех частных критериев.

Для многоагрегатных рабочих машин и технологических комплексов обобщенный критерий, содержащий вышеуказанные оценки, может быть записан в следующем виде:

$$Q' = \left[\sum_{i=1}^k B_i q'_i(\mathbf{a}) + \sum_{j=1}^n B_j q'_j(\mathbf{a}) + \sum_{f=1}^h B_f q'_f(\mathbf{a}) \right],$$

где $q'_i(\mathbf{a})$, $q'_j(\mathbf{a})$, $q'_f(\mathbf{a})$ – потери соответственно производительности, качества технологии, энер-

горесурсов; B_i, B_j, B_f – весовые коэффициенты потерь, $\mathbf{a} = [a_i, a_j, a_f]$; $i = \overline{1, k}$; $j = \overline{1, n}$; $f = \overline{1, h}$.

В автоматическом режиме осуществляется минимизация обобщенного критерия качества с учетом динамической точности системы, качества технологии, энергетических и технологических ограничений.

Остановимся на критерии, характеризующем динамическую точность ЭПС. Рассматривая r выходных переменных ЭПС с учетом их вклада в формирование показателя качества технического

объекта, определим обобщенный критерий качества через частные критерии с учетом нормы вектора оценок, вектора варьируемых параметров \mathbf{a} и ограничений переменных в следующем виде:

$$Q'' = \sum_{i=1}^g b_i \sum_{j=1}^r b_{ij} \sigma_{ij}(\mathbf{a}); \sigma_{ij}(\mathbf{a}) \leq c_i, i = \overline{g+1, r}; \mathbf{a} \in M_a, \text{ где } b_i - \text{коэффициенты веса выходных пере-}$$

менных; c_i – значения ограничений по оценкам частных критериев качества; $\sigma_{ij}(\mathbf{a})$ – элементы

матрицы $\sigma'(\mathbf{a}) = [\sigma_{ij}(\mathbf{a})]$, $i, j = \overline{1, n}$; M_a – замкнутое множество допустимых значений \mathbf{a} . Обобщен-

ный критерий характеризующий динамическую точность системы запишем в виде

$$Q^* = \min \left[Q = \sum_{i=1}^g b_i y_i^2(\mathbf{a}) \right], \text{ при } y_i^2(\mathbf{a}) \leq \frac{1}{9} c_i, i = \overline{g+1, r}, \mathbf{a} \in M_a, \text{ где } y_i^2 - \text{средний квадрат динамиче-}$$

ских отклонений i -й координаты ЭПС.

Таким образом, научную концепцию принятия оптимальных решений при проектировании и эксплуатации АЭПС ТМиК можно сформулировать следующим образом: 1. Имеется техническое задание, которое определяет основные характеристики ТМиК. 2. Из всего многообразия компонентов и критериев качества (обобщенных и частных) производится структурный и параметрический синтез АЭПС ТМиК. Частные критерии включают стоимостную оценку синтезируемой структуры ТМиК. 3. В связи с тем, что ТМиК имеет несколько взаимосвязанных подсистем (МП, ЭМ, ТП), влияющих на ее технологические параметры, одновременно выполняется и синтез этих подсистем. Поэтому концепция предусматривает исследование взаимосвязанных подсистем и СУ АЭПС в целом на микро и макро уровнях, с использованием современных эволюционных алгоритмов. Процесс принятия оптимальных решений является многоитерационным. 4. Так как существует параметрическая неопределенность, кроме традиционных методов применяются генетические алгоритмы и нейронные сети. 5. Модели подсистем ЭПС и системы в целом, применяемые для исследования, синтеза, и оптимизации, также применимы и для управления ЭПС на стадии эксплуатации. 6. Эффективность проектирования и эксплуатации повышается за счет разработанного информационного и программного обеспечения.

Во второй главе раскрывается третье положение, выносимое на защиту. Рассмотрены принципы типизации и унификации моделей ЭПС, модели компонентов ЭПС на микро- и макроуровнях, унифицированные модели типовых компонентов и комплектов подсистем комплекса. Модели блоков-комплексов, учитывающие электромагнитные, механические, технологические и энергетические процессы в ЭПС.

Типизация как эффективный метод стандартизации применяется ко многим объектам: технологическим процессам; технологическим агрегатам; СУ технологическими агрегатами и процессами; программному обеспечению СУ; изделиям общего назначения; руководящим техническим материалам и т. п. Особенно эффективна типизация в применении к СУ ТМиК и соответствующим им моделям. Имеется много машин и механизмов, выполняющих одинаковые или аналогичные операции в технологических процессах разных отраслей промышленности. Объединяя их в типовые функциональные группы можно существенно облегчить разработку СУ и обеспечить экономичную технологию проектирования компьютерных СУ ТМиК.

Аналогическая ситуация имеет место и при математическом описании отдельных компонентов ЭПС и ЭПС в целом. Для разных вариантов выполнения системы, рассмотрение которой выполняется на механико-технологическом уровне электромагнитные и механические подсистемы могут иметь эквивалентные математические описания, являющиеся типовыми для данной группы оборудования. Высокая степень типизации и унификации моделей дает возможность сократить сроки проектирования и изготовления изделий, повысить производительность труда, повысить ка-

чество, надежность и долговечность изготавливаемых изделий. Унификация позволяет снизить стоимость производства новых изделий, повысить уровень автоматизации производственных процессов. Объектами унификации в настоящей работе являются компоненты АЭПС ТМиК, математические и компьютерные модели. Унификация схем осуществляется на основе определенного их подобия в выполнении аналогичных функций.

Эффективным действием для достижения типизации и унификации моделей ЭПС является классификация технологических функций ЭПС. В главе 1 рассмотрены виды современных технологий, основанных на управляемых электродвижениях исполнительных органов механизмов, машин и комплексов. Реализация этих движений выполняется средствами унифицированных электроприводов, адаптированных к конкретной технологии.

В каждой группе выделяются типовые функциональные модули, для которых формируется библиотека программных моделей, отражающих динамические процессы в модулях и алгоритмы управления в соответствии с заданными функциями управления движением и технологией. Такие алгоритмы разрабатываются на основе типовых функций управления, используемых во всех группах технологического оборудования: соотношением моментов нагрузки электроприводов, имеющих механическую связь; скоростью и соотношением скоростей; положением и соотношением положений электроприводов, имеющих механические взаимосвязи; одновременное управление соотношением скоростей и положений, применяемое в агрегатах прокатного производства; соотношением скоростей и натяжений (усилий); скоростями и натяжениями полосовых материалов с реализацией тормозных режимов электроприводов на сматывающих устройствах, управление натяжением в зоне обработки полотна и линейной скоростью в наматывающем устройстве; технологическими переменными через переменные электроприводов (скорости, положения и др.) и переменными исполнительных устройств иного вида (давление, температура, подача эмульсий и др.).

В соответствии с типизацией и унификацией функций, выполняемых ЭПС, а также их блочно-модульного построения базу математических моделей компонентов ЭПС механизмов, агрегатов, машин и комплексов целесообразно формировать в соответствии со следующей классификацией: 1. **База математических моделей типовых электротехнических и электронных компонентов:** Э.1. Электрические машины; Э.2. Электронные компоненты; Э.3. Коммутационные и защитные электрические аппараты; Э.4. Сети электропитания и распределительные сети; Э.5. Информационные сети; 2. **База математических моделей типовых механических компонентов:** М.1. Механические компоненты, обеспечивающие линейные движения ИО; М.2. Механические компоненты, обеспечивающие угловые и вращательные движения ИО; М.3. Механические синхронизаторы движений ИО; 3. **База математических моделей типовых электромеханических комплексов электроприводных систем:** ЭК.1. Однодвигательные системы; ЭК.2. Однодвигательные высокодинамичные системы; ЭК.3. Многодвигательные высокодинамичные системы; ЭК.4. Сервосистемы; 4. **База математических моделей типовых технологических компонентов и комплексов:** А. Типовые компоненты и комплекты технологий обработки и переработки веществ: Т.1. Нагнетание жидкостей и газов; Т.2. Физическая переработки веществ с использованием вращательных движений исполнительного органа машины; Т.3. Металлообработка, дерево- и камнеобработка; Т.4. Технологии прокатки; кузнечной, прессовой и штамповочной обработки; Т.5. Технологии резания неподвижного и подвижного материала; Т.6. Горнодобывающие технологии; Т.7. Технологии транспортирования и обработки гибких материалов; Т.8. Технологии, связанные с пространственными движениями исполнительных органов машин; Б. Типовые компоненты транспортных и подъемно-транспортных технологий: Т.9. Транспортные технологии; Т.10. Подъемно-транспортные технологии; Т.11. Транспортно-манипуляционные технологии; В. Типовые компоненты мониторинговых и контрольно-испытательных технологий: Т.12. Мониторинговые технологии; Т.13. Контрольно-испытательные технологии.

Для разработки базы моделей применяется моделирование на микро- и макроуровнях. Микроуровень – это нижний иерархический уровень моделирования систем. На этом уровне осуществляется детальное описание не только физических свойств отдельных компонентов подсистем, но и СУ АЭПС в целом, а также тепловых и электромагнитных полей. На макроуровне осуществляют проектирование различных ТМиК. Объекты проектирования рассматриваются как сложные технические системы, состоящие из совокупности взаимодействующих компонентов и имеющих сложную неоднородную структуру.

Построение математической модели технического объекта осуществляется на основе его динамической модели, которая является абстрактным отображением основных физических свойств технического объекта и характеристик его взаимодействия с внешней средой. Такой подход позволяет избежать необоснованной избыточности в его математическом описании. Но при этом должна быть обеспечена адекватность математической модели. Для моделирования на макроуровне используют различные методы: функционально законченных элементов, сеток и сосредоточенных масс. Математическая модель непрерывной динамической системы с сосредоточенными параметрами описывается уравнениями состояния вида (1).

В качестве примера унифицированных моделей типовых электротехнических и электронных компонентов электромагнитной подсистемы покажем **Э.1. Электрические машины**. Рассмотрим основные динамические модели электродвигателей переменного тока при частотном регулировании частоты вращения. Ориентируемся на обобщающие выводы, сделанные в работе Г. Г. Соколовского, принимая во внимание ориентацию вращающейся системы координат $d - q$ такой, что направление оси d совпадает с вектором потокосцепления ротора.

ПЧ–АД без учета насыщения магнитной системы. Уравнения для составляющих тока статора i_{1d} и i_{1q} потокосцепления ротора ψ_2 и частоты роторной ЭДС ω_p имеют вид:

$$i_{1d} = \frac{1/R_1}{\sigma T_{1p}} u_{1d} - R_1 i_{1d} + \omega_{0эл} \sigma T R_1 i_{1q} - k_2 p \psi_2 ; i_{1q} = \frac{1/R_1}{\sigma T_{1p}} u_{1q} - R_1 i_{1q} + \omega_{0эл} \sigma T R_1 i_{1d} - k_2 \omega_{0эл} \psi_2 ;$$

$$\psi_2 = \frac{1}{T_2 p} L_m i_{1d} - \psi_2 ; \omega_p = \frac{k_2 R_2 i_{1q}}{\psi_2}.$$

Формула электромагнитного момента и основного уравнения механики: $M_d = \frac{3}{2} p_n k_2 \psi_2 i_{1q}$;

$p\omega = \frac{M_d - M_c}{J}$, где M_c – момент нагрузки; J – момент инерции. Равенство частот вращения:

$\omega_{0эл} = \omega_{pn} + \omega_p$. Направление оси d ориентировано по вектору потокосцепления ротора.

Аналогично составлено математическое описание и алгоритмические структурные схемы для систем: ПЧ–АД с учетом насыщения магнитной системы; ПЧ–СД, двигатель без демпферной обмотки; ПЧ–СД, двигатель с демпферной обмоткой; ПЧ–СД, двигатель с постоянными магнитами.

Э.2. Электронные компоненты. В базу моделей включены выпрямители (шести и двенадцатипульсные, многопульсные, активные, параллельно включенные выпрямители); инверторы напряжения (двухуровневые, трехуровневые, многоуровневые, параллельно включенные инверторы); преобразователи частоты; устройства плавного пуска. В качестве примера рассмотрим активный выпрямитель.

Система управления выпрямителя контролирует линейные напряжения, фазные токи источника питания, выпрямленное напряжение преобразователя и формирует импульсы управления транзисторами. При этом СУ решаются следующие задачи: стабилизации выпрямленного напряже-

ния на заданном уровне путем воздействия на амплитуду заданных фазных токов сети; формирования фазных токов сети, близких по форме к синусоиде путем воздействия на напряжение управления; поддержания заданного коэффициента мощности сети путем воздействия на напряжение управления; передачи энергии из сети переменного напряжения в цепь постоянного напряжения и в противоположном направлении.

В СУ имеется также регулятор действующего напряжения сети u_s . Он введен в систему, поскольку при выполнении расчетов задается обычно не ЭДС сети, а напряжение. Этот регулятор контролирует мгновенные значения напряжений сети, определяет действующие значения напряжений, и воздействует на амплитуду ЭДС сети E_{sm} , обеспечивая выход системы на заданный режим работы, в котором напряжение сети равно заданному значению. Предполагается, что транзисторный преобразователь работает в режиме синусоидальной широтно-импульсной модуляции.

Методика унификации заключается в следующем: 1. Разрабатывают типовые структуры ЭПС для выполнения определенных функций и с определенными выходными технологическими переменными. 2. В них выделяют типовые подсистемы и компоненты; 3. Разрабатывают унифицированные модели механических подсистем и электромеханических систем с помощью передаточных матриц. 4. Разрабатывают математическое описание подсистем (электромагнитной, механической, технологической) и типовой структуры в целом, используя принцип наследования и дружественных классов объектно-ориентированного программирования. 5. Определяют входные и выходные переменные и параметры АЭПС. 6. Проводят исследование, как отдельных подсистем, так и ЭПС в целом.

В третьей главе раскрываются второе, четвертое и пятое положения, выносимые на защиту. Рассмотрены вопросы, связанные с принятием оптимальных решений на стадиях разработки и эксплуатации АЭПС технологических комплексов, проведено исследование и ранжирование методов оптимизации. Разработаны методы: принятия оптимальных решений на стадиях разработки и эксплуатации ЭПС. Рассмотрены принципы действия и алгоритмы функционирования систем автоматической оптимизации ЭПС в процессе их эксплуатации.

Любая АЭПС ТМиК может быть реализована на различных компонентах и с разными взаимосвязями между ними. В связи с этим возникает проблема синтеза (выбора) при заданных ресурсах такой структуры, которая минимизирует (максимизирует) (в общем случае векторный) критерий качества функционирования системы. Важным при этом является их выбор и компоновка под конкретную АЭПС ТМиК с учетом ее функционирования в технологическом процессе. Структурный и параметрический синтез динамической системы осуществляется по обобщенным и частным критериям, изложенным в первой главе.

Среди различных методов решения задач структурного синтеза наибольшее распространение в системах автоматизированного проектирования получили методы, принадлежащие к классу комбинаторно-логических. В работе представлен пример структурного синтеза СУ механизма нажимных винтов с помощью генетико - морфологического метода. Для отбора структуры построения АЭПС механизма применяются радиальная базисная нейронная сеть (НС) и генетические алгоритмы (ГА).

Особенностями задачи оптимизации параметров АЭПС являются следующие: 1) исходные модели ЭПС представляются в виде сложных структурных схем со значительным числом блоков; 2) оптимизация по различным параметрам (натяжение, энергопотребление, точность и др.) предполагает гибкое формирование различных функционалов качества.

В настоящее время существует две группы методов применения НС для синтеза параметров регуляторов АЭПС: 1) прямые методы, основанные на непосредственном управлении объектом с

помощью НС; 2) непрямые методы, когда НС используется для выполнения вспомогательных функций управления, таких как фильтрация шума или идентификация динамического объекта.

Анализируя типовые группы оборудования была составлена таблица, в которой приведены данные по НС, которые применялись для синтеза регуляторов.

Таблица. Данные по нейронным сетям

Типовая группа оборудования	Количество слоев НС	Количество нейронов в слое НС
Насосы, компрессоры, вентиляторы, мельницы, дефибреры, смесители, центрифуги.	1	2
Металло-, дерево- и камнеобрабатывающие станки.	1-2	до 10
Обжимное, кузнечное, пресловое и штамповочное	1	до 6
Гильотинные, барабанные, летучие ножницы, дисковые и ленточные пилы, резательные станки	до 2	до 8
Роторные и ковшовые экскаваторы, угледобывающие машины, буровое оборудование	до 3	до 6
Предназначенное для транспортирования и обработки гибких материалов	до 2	до 12
Промышленные манипуляторы и роботы	до 2	до 20
Краны, транспортеры, конвейеры, рольганги, моно-рельсы, лифты, электротранспорт	до 2	до 12

Для оптимизации параметров нейронных регуляторов АЭПС ТМиК в диссертации применяется алгоритм обучения "с учителем". Как отмечалось ранее СУ строятся с учетом особенностей технологического процесса. А это означает то, что при изменении технологических переменных необходимо изменять параметры регуляторов в СУ ЭПС. Кроме того, дополнительные трудности получения адекватного математического описания обусловлены наличием реальных помех. Поэтому в таких условиях также рационально использовать НС.

На каждом этапе принятия оптимального решения используют различные модели, методы моделирования и обработки результатов моделирования, принятия решения. На этапе синтеза принципа действия отыскивают принципиальные положения, физические, социальные (например, загрязнение окружающей среды) и т.п. эффекты, которые составят основу функционирования разрабатываемой ЭПС. На этом этапе критериями отбора могут являться характеристики физических процессов, происходящих в ЭПС (например, температура нагрева электродвигателя, вибрации, шум и т. д.). На этом этапе разрабатываются модели на микроуровне.

На этапе структурного синтеза на основе выбранного принципа действия создаются варианты: структур, схем, алгоритмов и др. На этом этапе разрабатываются модели на макроуровне. На этапе параметрического синтеза отыскиваются значения параметров объекта, удовлетворяющих техническому заданию на разработку. На этом этапе разрабатываются модели на микроуровне.

Таким образом, оптимальный выбор решения, во-первых, является многоступенчатым, во-вторых многоитерационным, и в-третьих многокритериальным. Получение оптимального решения на определенном этапе не всегда является оптимальным для следующего этапа, поэтому приходится возвращаться к предыдущему этапу.

Основная задача эксплуатации ЭПС это обеспечение выпуска качественной продукции при оптимальной производительности. Все это обеспечивается только при соответствующем качестве управления. Так в процессе производства продукции могут меняться: 1. режимы работы ЭПС; 2. информационный поток данных; 3. напряжение (искажение напряжения в питающей сети); 4. свойства обрабатываемого вещества (материала); 5. свойства обрабатывающего инструмента; 6. параметры аппаратных средств, входящих в компоненты ЭПС и др. В процессе работы могут возникать

аварийные ситуации. Исходя из этого для выполнения поставленных задач, необходимо принимать решение об оперативном вмешательстве в процесс производства.

Контроллер снимает в течение всего времени рабочего функционирования ЭПС тренды информации и заносит их в журнал событий. В качестве параметров трендов являются: вибрации, акустический шум, нагрев отдельных элементов машины, скорость, перемещение, электрические параметры, включающие в себя отклонения токов и напряжений от номинальных значений (по амплитуде, частоте, фазе), толщина, натяжение и т. п.. Для оптимального управления ЭПС все данные, снимаемые с датчиков поступают на технологический контроллер, в систему принятия решения (СПР) обрабатываются и архивируются. Построенный по этим значениям график позволяет оценить динамику технологического процесса.

Задачи оптимизации ЭПС на стадии эксплуатации рассматривают в трех аспектах, а именно: 1) обеспечение технико-экономической эффективности работы ЭПС, определение оптимальных параметров агрегатов ТМиК применительно к конкретным условиям эксплуатации; 2) синтез оптимальных параметров регуляторов СУ; 3) задачи автоматической оптимизации в целях уменьшения энергопотребления.

В первом случае должны рассматриваться следующие характеристики: расход на эксплуатацию ТМиК; ущерб от снижения качества готового продукта; годовой фонд работы ЭПС; производительность агрегатов и т. п.

Во втором случае применяются методы оптимизации для нахождения оптимальных параметров регуляторов СУ, обеспечивающих требуемые динамические характеристики СУ АЭПС (рисунок 3).

В третьем случае задачи автоматической оптимизации разбивается на две подзадачи: 1. Обеспечение минимального электропотребления для заданной производительности ЭПС при произвольном временном варьировании технологических параметров. 2. Обеспечение максимальной производительности ЭПС при ограничении мощности электропотребления в системах автономного питания при произвольном временном варьировании технологических параметров. Система автоматической оптимизации (рисунок 3), использующая поисковые методы, решает сформулированные ранее задачи оптимизации с помощью блока автоматической оптимизации (БАО) с векторным оператором $F_{\text{БАО}}$. Блок оптимизации, реализуемый программным путем на промышленном компьютере, состоит из трех модулей: подпрограммы оценки составляющих баланса энергии агрегата (оператор $F_{\text{БЭ}}$), подпрограмма оценки функционала качества (оператор $F_{\text{БОК}}$), подпрограмма оптимизации с выработкой управляющего воздействия (оператор $F_{\text{у.в.}}$) для реализации режима оптимизации.

Векторный оператор $F_{\text{пр.обр.вещ.}}$ представляет собой математическое описание агрегата ТМиК. В главе 5 рассмотрен пример реализации поставленных задач оптимизации на примере дробильного комплекса.

Методика синтеза заключается в следующем: 1. Анализируются технологические переменные и параметры АЭПС ТМиК и влияние на них подсистем ЭПС. 2. Осуществляется исследование, синтез и оптимизация подсистем ЭПС по критериям, разработанным в 1-й главе. На этапе оптимизации существует локальная оптимизация (уровень подсистемы) и глобальная оптимизация всей ЭПС.

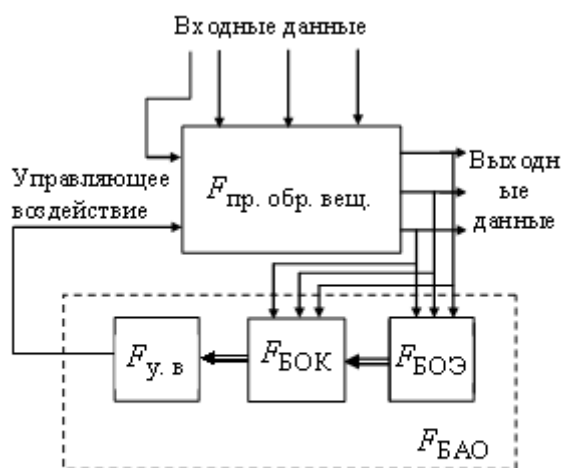


Рисунок 3 – Адаптивная система управления технологическим комплексом

Таким образом, можно сказать, что осуществляется синтез "снизу вверх" или "сверху вниз" от подсистемы к системе в целом. 3. Применяется база данных и моделей, приведенная в главе 2. 4. В связи с тем, что синтез отдельных подсистем ЭПС не всегда дает оптимальные параметры всей СУ АЭПС, применяется многоитерационный процесс оптимизации. 5. В случае когда существует параметрическая неопределенность для решения поставленной задачи применяются НС и ГА.

В четвертой главе проанализировано информационное и программное обеспечения АЭПС ТМиК на стадиях их проектирования и эксплуатации. Разработана информационная система, основанная на концепции принятия оптимальных решений при проектировании и эксплуатации АЭПС ТМиК. Проведено обоснование и выбор программных средств информационной системы для решения типовых задач оптимизации АЭПС ТМиК. Разработаны компьютерные модели блоков-комплексов и алгоритмы управления базами данных в информационной системе АЭПС.

Информационная система поддерживается различными данными (справочными, расчетными, экспериментальными), необходимыми как для проектирования АЭПС, так и их эксплуатации. Данные информационной системы представлены в различном виде (например, число, таблица, графическая зависимость) и формате (например, в виде реального аналогового или цифрового сигнала, радиосигнала при беспроводной передаче сигнала и т. д.).

Информационная система имеет два раздела: проектирование и эксплуатация (рисунок 4).

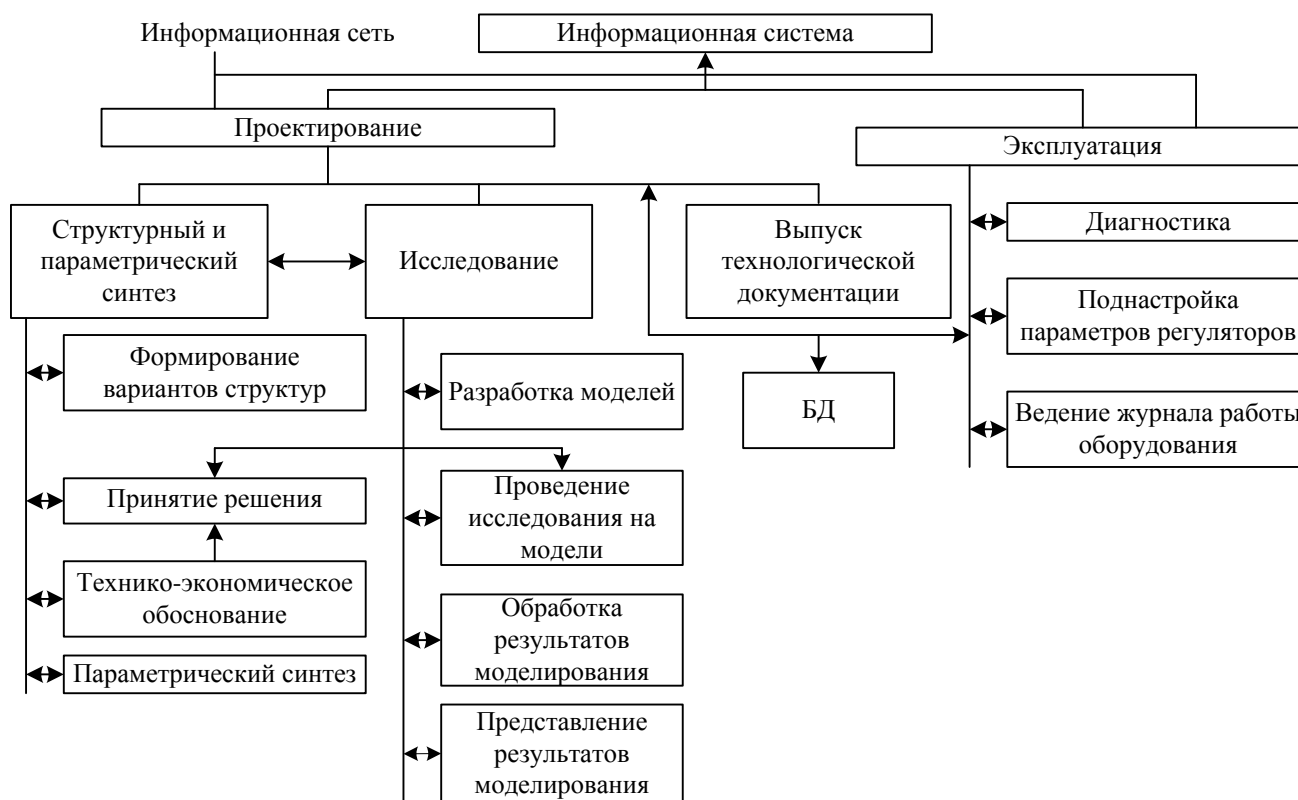


Рисунок 4 – Информационная система

Общим для этих двух разделов является наличие информационной сети (вычислительной и промышленной). Но если в первом разделе информационная сеть решает задачи доступа проектировщиков по сети к программному обеспечению и базам данных, то во втором разделе информационная сеть решает задачи: координации работы механизмов, агрегатов и комплексов; их диагностирование; адаптации системы управления к изменяющимся технологическим параметрам при их рабочем функционировании; передаче данных между ними. Различием разделов информационной сети является их архитектура и протоколы передачи данных.

Программное обеспечение, используемое при создании новых и модернизации действующих АЭПС ТМиК, весьма разнообразно и охватывает широкий круг решаемых задач.

Программные средства проектирования АЭПС ТМиК включают в себя компьютерные средства для расчета режимов работы приводов и механизмов, выбора силовых модулей (питающих, приводных, тормозных, фильтрующих, защитных и др.) и модулей управления (процессорных, интерфейсных, информационных, технологических и др.), образующих конфигурацию комплектного электропривода или комбинацию комплектных электроприводов, адаптированных к объекту.

Такие средства инжиниринга разрабатываются производителями и формализованы до стадии получения спецификации на заказ электрооборудования. Они являются частью маркетинга, обеспечивающего рынок сбыта продукции.

К иным инжиниринговым средствам относятся средства автоматизации проектирования электротехнического оборудования, находящегося в составе машин и комплексов. Особое место в проектировании АЭПС ТК занимает исследование и обоснование принимаемых решений в части взаимного согласования оборудования в составе АЭПС. Это согласование касается взаимосвязанных электромагнитной, механической и технологической подсистем АЭПС.

Ведущие производители средств автоматизации, такие как «Siemens», «ABB», «Omron», «Schneider Electric» и другие, разрабатывают современные программные продукты («Siemens» – Drive ES, «ABB» – Drive Ware™, «Schneider Electric» – PowerSuite, «Omron» – CX-Server), позволяющие: проектировать системы управления; выбирать средства автоматизации; производить пуско-наладочные работы; оптимизировать режимы работы компьютеризированных ЭПС; выполнять диагностирование. Для моделирования СУ АЭПС используются различные программные продукты: специализированные пакеты; библиотеки программ; математические системы программирования. Хорошо разработаны методики и алгоритмы, позволяющие исследовать режимы работы сложных СУ АЭПС; анализировать их качество, рассчитывать частотные характеристики и импульсные переходные функции; исследовать динамику сложных систем, содержащих элементы с нелинейными характеристиками; рассчитывать оптимальные процессы при наличии ограничений; исследовать динамику стохастических систем, и т. д.

При выборе программного продукта учитывают следующее: вид математического описания исследуемой АЭПС; особенности представления данных модели; порядок дифференциальных уравнений, или порядок и вид матрицы (симметричная, избыточная, вырожденная и т. д.), или количество структурных элементов графа, которым описывается АЭПС; вид представления результатов расчета; количество и вид нелинейных характеристик, описывающих управляющие и возмущающие воздействия; возможность гибкого изменения математической модели; технологию функционирования математического ядра моделирующей программы.

Для параметрической оптимизации АЭПС ТМиК применен математический пакет MATLAB Optimization Toolbox. В настоящее время для наглядности моделирования структурно-сложных гибридных (цифровых) систем, в том числе и АЭПС применяются визуальные средства моделирования. Их условно можно разделить на три группы: пакеты «компонентного моделирования»; пакеты «физического моделирования»; пакеты, ориентированные на схему гибридного автомата. К этим средствам относятся: язык моделирования UML (Unified Modeling Language); инструментальная среда Model Vision Stadium; программная среда LabVIEW.

В ряде случаев (когда недостаточно данных) для синтеза и исследования АЭПС применяют эволюционные алгоритмы с использованием нейронных сетей и генетических алгоритмов. На рисунке 5 приведена структура нейропакета, применяемая для решения этих задач.

Для моделирования типовых компонент: электронных устройств; полупроводниковых преобразователей; электрических машин применяется большое количество программных средств (перечисленных в работе), но наиболее часто применяют Matlab Toolbox Sim Power System.

Если исходить из блочно-модульного принципа построения ЭПС, то модель ЭПС типового промышленного механизма должна иметь структуру, показанную на рисунке 6.

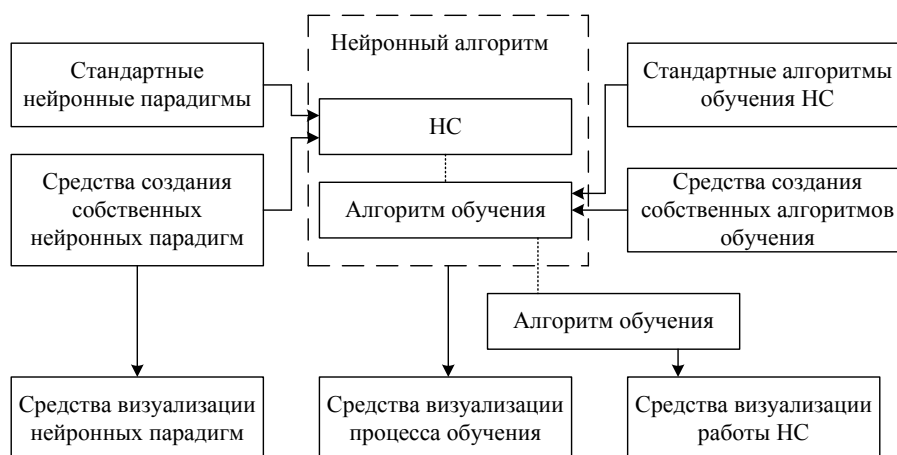


Рисунок 5 – Структура нейропакета

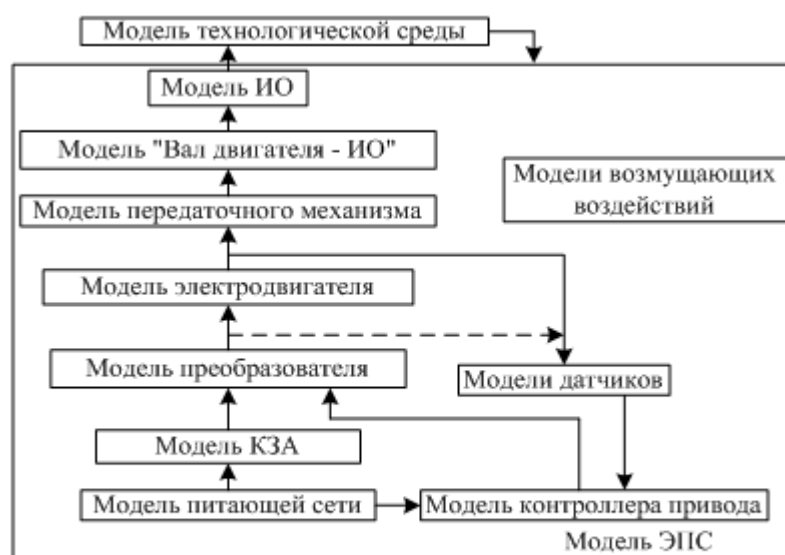


Рисунок 6 – Структура модели ЭПС типового промышленного механизма

Контролируемыми переменными на выходе модели ЭПС типового промышленного механизма являются скорость и/или перемещение.

В случае если строится модель агрегата (рисунок 7), то эта модель будет построена из нескольких типовых модулей (рисунок 6). Из рисунок 7 видно, что связующим для моделей ЭПС в составе агрегата является технологический процесс. К модели агрегата добавляются: модель технологического контроллера, выполняющего функции централизованного управления и модель информационной среды (сети среднего уровня управления).

Так, как в состав автоматизированного технологического комплекса (АТК) входят n агрегатов, то его модель можно представить в виде, показанном на рисунке 8. Как видно из рисунка 8 в модель добавлена модель обрабатываемого вещества (материала).

Кроме этого необходимо иметь модель информационной сети описывающей верхний уровень управления. В модели АЭПС АТК взаимосвязь агрегатов осуществляется не только через контролируемые переменные технологического процесса, но и через переменные подсистем комплекса (например, через моменты или усилия при выравнивании нагрузки). Таким образом, моделирование АТК сводится к сборке модели комплекса из моделей нижних уровней (агрегата и электропривода) с учетом режимов его функционирования и свойств обрабатываемого материала.

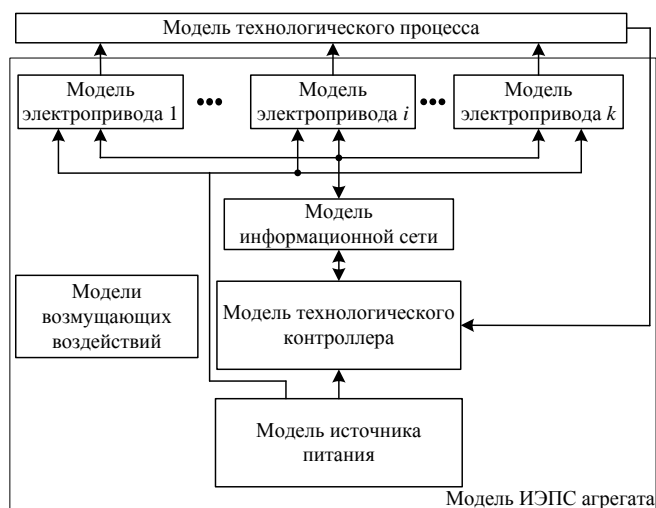


Рисунок 7 – Структура модели АЭПС агрегата

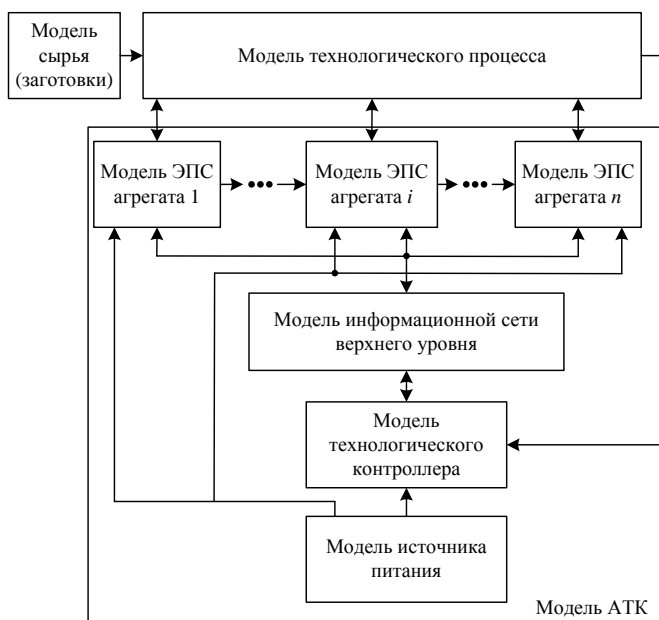


Рисунок 8 – Структура модели АЭПС ATK

С целями: значительного сокращения сроков создания АЭПС; повышение качества АЭПС; снижения числа возможных ошибок в технической документации и связанных с этим ускорением монтажа, наладки и ввода в эксплуатацию разработана база данных и моделей. База состоит из следующих разделов: 1. каталожные данные фирм, выпускающих средства автоматизации; 2. модели электротехнических изделий (выпрямители, инверторы, ПЧ, электрические машины, фильтры, автоматические выключатели и. т. д); 3. параметры обрабатываемых материалов и др.

В пятой главе рассмотрен комплекс расчетно-теоретических и компьютерных моделей АЭПС ТМиК, выполненных с применением современного инструментального средства в среде Matlab/Simulink. Рассмотрены прикладные решения конкретных задач оптимизации и повышения эффективности АЭПС технологических комплексов, являющихся объектами выполненных НИР: дробильно-технологического комплекса; стана холодной прокатки; мелкосортного стана горячей прокатки; участка резки листового проката; продольно-резательного станка.

Остановимся в реферате на одной из задач оптимизации – задачи автоматической оптимизации скоростного режима стана горячей прокатки. Эта задача с учетом энергосбережения относится к задачам динамической оптимизации, выполняемых в условиях реального времени прокатки. Для заданных параметров прокатки минимизируется расход удельной энергии при изменении теплового состояния заготовки изменением скоростного режима прокатки

$v = [v_1, v_2, \dots, v_n]^T$, где $v_i, i = \overline{1, n}$ – скорости прокатки в каждой клетке стана.

С учетом того, что скорости клеток взаимосвязаны коэффициентами соотношения скоростей, вектор v определяется через скорость первой клетки v_1 . В качестве функционала качества применяется оценка $Q_2 = \int N_{\text{пр}}(t, \sigma, \delta, \gamma, a) dt / \int m(t) dt$, где $N_{\text{пр}}$ – мощность, затрачиваемая на деформацию металла в валках прокатной клетки; σ, δ, γ – векторные величины, характеризующие, соответственно, свойства обрабатываемого вещества качество используемого инструмента и параметры технологической среды; a – вектор, содержащий варьируемые переменные (скорость прокатки); t – текущее значение массы одной заготовки. Минимизация оценки Q_2 выполняется варьированием скорости v_1 . Температурный режим прокатки сортовой стали в виде функциональных зависимостей заложен в разработанные компьютерные модели процесса прокатки. С помощью этих моделей проведены исследования энергетических показателей комплекса прокатного стана, подтверждаю-

шие унимодальный характер зависимости удельного расхода электроэнергии от скорости прокатки. Чем ниже скорость прокатки, тем меньше затраты электроэнергии на обжатие металла в валках, однако при этом увеличивается продолжительность нахождения металла в валках каждой из клетей и время работы на холостом ходу клетей, незадействованных в деформации металла. Повышаются также интенсивность охлаждения прокатываемой заготовки из-за более длительного ее взаимодействия с окружающей средой и перерасход электроэнергии на деформацию охлажденного проката. На высоких скоростях прокатки наблюдается обратный эффект.

На рисунке 9 представлены энергетические показатели процесса прокатки в черновой группе клетей непрерывного мелкосортного стана 250 в рабочем диапазоне скоростей.

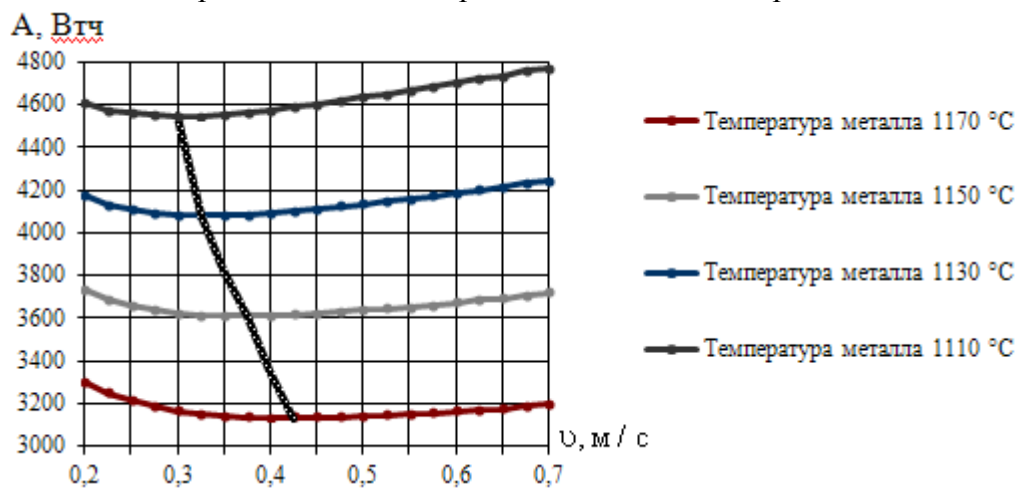


Рисунок 9 – Энергетические показатели процесса прокатки

Указаны затраты электроэнергии на прокатку одной заготовки (сечение – 100×100, длина – 6м) с момента входа заготовки в первую клетю до момента ее выхода из седьмой клетки. Представленные результаты исследований показывают необходимость оптимизации скоростного режима прокатки с целью минимизации удельного расхода электроэнергии для отдельной партии заготовок. Смена сортамента или изменение режима нагрева металла в газовой печи (и как следствие изменение температуры заготовки на выходе из печи) приводят к смещению точки минимума. Это обстоятельство требует возобновления процедуры оптимизации или автоматической коррекции скоростного режима в соответствии с заложенными функционалами.

Выбор оптимального скоростного режима, с точки зрения минимума расхода электроэнергии, достигается оценкой энергозатрат группы клетей на холостом ходу, оценкой удельного расхода электроэнергии по группам клетей на обжатие металла и, в соответствии с принятым алгоритмом оптимизации, выходом на оптимальную скорость прокатки. Основные зависимости, определяющие затраты электроэнергии при прокатке в одной клетю, устанавливаются из уравнения баланса мощностей: $N_c = N_{пр} + N_{тр} + N_k + N_{д.п} + N_{и} + N_e + N_3$ где N_c – мощность, потребляемая из сети; $N_{пр}$ – мощность, затрачиваемая на деформацию металла в клетю; $N_{тр}$ – мощность потерь из-за наличия трения в механической части привода; N_k – мощность, затрачиваемая на изменение кинетической энергии движущихся элементов механической части электропривода; $N_{д.п}$ – мощность, затрачиваемая на деформацию элементов механической части электропривода; $N_{и}, N_e$ – доли мощности, затрачиваемые в индуктивных и емкостных элементах электрической части электропривода; N_3 – мощность активных потерь в обмотках элементов электрической части. Экономичность работы электропривода оценивается на заданном временном интервале t_0 в виде отношения затрачен-

ной энергии обработки $A_{\text{пр}} = \int N_{\text{пр}}(t)dt$ к потребляемой за это время электроэнергии $A_{\text{с}} = \int N_{\text{с}}(t)dt$, т. е. $\eta = A_{\text{пр}} / A_{\text{с}}$. Производительность комплекса может быть оценена на том же интервале t_0 в виде $\Pi = \int m(t)dt / t_0$. Функционалом качества системы принята оценка Q_2 на интервале времени t_0 . Получить такую оценку можно с использованием оценки электромагнитной мощности электропривода $N(t) = M(t)\omega(t)$ за вычетом составляющих мощностей $N_{\text{тр}}, N_{\text{к}}, N_{\text{д.п.}}, N_{\text{и.}}, N_{\text{е.}}, N_{\text{э.}}$. В качестве t_0 следует принять время нахождения металла в рабочих валках группы клетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения в области интегрированных электроприводных систем технологических машин и комплексов, внедрение которых вносит значительный вклад в создание новой высокоавтоматизированной техники, обладающей высокой эксплуатационной эффективностью. Выполненная в соответствии с системно-техническим подходом диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения. Предложенные автором решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

Задачи, поставленные в начале диссертационной работы, отражают основные тенденции развития интегрированных электроприводных систем технологических машин и комплексов. Это неоднократно отмечалось на международных, всероссийских и межвузовских конференциях, где прошла апробация научных результатов работы.

Основные результаты по теоретической и практической разработке проблемы, связанной с актуальностью компьютерных технологий для решения задач исследования, синтеза и оптимизации АЭПС ТМиК и методов повышения их эффективности на стадиях проектирования и эксплуатации состоят в следующем:

1. Проведенный анализ современных СУ АЭПС ТМиК позволил сформулировать требования к СУ АЭПС ТМиК, на основании которых были обобщены принципы построения и выявлены тенденции их развития. Анализ также показал, что один и тот же промышленный механизм может иметь большое множество реализаций, это возможно из-за большого числа средств автоматизации. На рынке средств автоматизации в настоящее время присутствует большое количество фирм, их продукция имеет схожие технические параметры и при этом разную стоимость. В этой связи для проектирования эффективных СУ АЭПС ТМиК была разработана научная концепция принятия оптимальных решений при разработке и эксплуатации АЭПС технологических машин и комплексов.

2. На качество управления технологическим процессом оказывают влияние взаимосвязанные подсистемы СУ АЭПС: электромагнитная, механическая и технологическая. Каждая из этих подсистем вносит свой вклад в качество управления. Поэтому в работе рассмотрены особенности их построения и задачи оптимизации их параметров. Поэтому разработан метод эволюционного синтеза систем в соответствии с обобщенными критериями, имеющими стоимостные и иные оценки и содержащими частные критерии, отражающие базовые показатели эффективности систем в виде качества технологии, динамической точности, производительности, энергосбережения и дополнительные показатели, рассматриваемые как ограничения. Использован метод динамической декомпозиции, обеспечивающий доминирование основных каналов регулирования электромагнитных, механических и технологических переменных систем над каналами взаимосвязей переменных, образуемых при выполнении технологии.

3. Для проведения исследования, синтеза и оптимизации первостепенное значение имеет

разработка математических моделей, отражающих реальные условия протекания технологических процессов на ТМиК. Разработаны методики: типизации и унификации моделей компонентов, комплектов и групп комплектов систем, учитывающих электромагнитные, механические, технологические и энергетические процессы в электроприводных системах; формирования моделей блоков-комплексов на основании типовых, унифицированных моделей компонентов систем. Разработанные модели представляют собой совокупность моделей компонентов. Научная новизна заключается в том, что математические модели с целью повышения их точности и достоверности учитывают особенности реализации СУ, технологические переменные и физико-химические свойства обрабатываемого материала на ТМиК.

4. В настоящее время доля затрат на электроэнергию в себестоимости готовой продукции составляет от 5% до 10 %. Этот процент может быть снижен за счет совершенствования действующей СУ путем введения системы автоматической оптимизации в СУ АЭПС ТМиК. При структурном синтезе и автоматической оптимизации, возникает параметрическая неопределенность, в этом случае наиболее эффективным является применение поисковых методов оптимизации, а также применение нейросетевых технологий и генетических алгоритмов. В этой связи в работе разработаны адаптивные поисковые методы управления динамическими процессами и оптимизации процессов в каждой из подсистем и в СУ в целом с учетом возможных неопределенностей в параметрах и условиях эксплуатации систем. Структура поисковой системы автоматической оптимизации содержит блоки: оценок составляющих энергий, оптимизации и исполнения, обеспечивающих изменение частоты движений рабочих органов АЭПС ТМиК при изменении размеров и физических свойств обрабатываемого вещества в соответствии с заданными критериями оптимизации.

5. В настоящее время существует большое количество программных средств, предназначенных для решения определенного круга задач (например, моделирование электронных схем). Для решения же выше поставленных задач необходимо применение комплекса программных средств. При этом возникает сложность в выборе и координации применения того или иного программного продукта для решения текущей задачи с многими условиями. Для этого была разработана информационная система, в основе которой лежит библиотека моделей и программные средства. Были разработаны компьютерные технологии вариативно-структурного и параметрического синтеза и оптимизации систем, основанных на эволюционных (генетических, нейросетевых, нечеткологических) алгоритмах и оформленных в виде информационной системы с соответствующим программным обеспечением.

6. Комплекс расчетно-теоретических и компьютерных исследований, выполненных с применением разработанных методов и современных компьютерных технологий и обеспечивающих высокую эффективность в достижении целей исследования. Компьютерное моделирование позволило провести исследования, позволяющие оценить достоверность разработанных моделей, выдать рекомендации по построению АЭПС дробильно-технологического комплекса, мелкосортного прокатного стана горячей прокатки, продольно-резательного станка и др..

Материалы диссертации используются также в учебных дисциплинах для студентов направлений 13.03.02 "Электроэнергетика и электротехника" а также магистрантов и аспирантов в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Внедрение результатов работы на ОАО Ижсталь, ОАО "Колпинский НИиПКИ метмаш" способствует дальнейшему совершенствованию технологических процессов и энергосбережению. С помощью разработанных методов и алгоритмов, моделирующих функциональные действия АЭПС, созданы соответствующие промышленные системы. Все это в совокупности является решением комплексной и актуальной научно-технической проблемы, обеспечивающей высокоэффективное ис-

пользование компьютерных технологий для решения задач исследования, синтеза и оптимизации АЭПС ТМиК. Научные результаты и выводы обоснованы теоретически и подтверждаются результатами исследований при помощи моделирования на ПК.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Белов М. П., Голубев Ф. Н., Латышко В. Д. Построение непрерывной полезной составляющей выпрямленной Э.Д.С. преобразователя с нулевыми вентилями при произвольном изменении сигнала управления / М.П. Белов, Ф.Н. Голубев, В.Д. Латышко // Известие ЛЭТИ: сб. науч. тр. – Л., 1980. Вып. 268, С. 67–72.
2. Белов М.П., Михальченко Г. Ф., Суслов В. Е. Структурный синтез прецизионных электроприводов при конечном времени наблюдения / М.П. Белов, Г.Ф. Михальченко, В.Е. Суслов // Известие ЛЭТИ: сб. науч. тр. – Л., 1983. Вып. 331, С. 50–55.
3. Белов М.П., Баранов С. Н., Михальченко Г. Ф., Суслов В. Е. Вопросы построения прецизионных систем стабилизации скорости с управлением от МикроЭВМ / М.П. Белов, С.Н. Баранов, Г.Ф. Михальченко, В.Е. Суслов // Известие ЛЭТИ: сб. науч. тр. – Л., 1984. Вып. 344, С. 40–45.
4. Белов М.П., Новиков В. А., Путьков В. Ф. Синтез на ЭВМ упругих механических систем в составе комплексов управления / М.П. Белов, В.А. Новиков, В.Ф. Путьков // Известие ЛЭТИ: сб. науч. тр. – Л., 1985. Вып. 354, С. 22–30.
5. Белов М.П., Новиков В. А. Синтез на ЭВМ нестационарных систем управления электроприводами с алгоритмами фазовой самонастройки / М.П. Белов, В.А. Новиков // Известие ЛЭТИ: сб. науч. тр. – Л., 1986. Вып. 369, С. 13–18.
6. Белов М. П., Новиков В. А. Автоматизация синтеза прецизионных микропроцессорных комплексов управления взаимосвязанными электроприводами / М.П. Белов, В.А. Новиков // Известие ЛЭТИ: сб. науч. тр. – Л., 1988. Вып. 404, С. 89–94.
7. Белов М.П., Карьков Л. М., Путьков В. Ф. Аппаратная реализация измерителя угловой скорости бесконтактного моментного двигателя на базе датчика положения ротора / М.П. Белов, Л.М. Карьков, В.Ф. Путьков // Известие ЛЭТИ: сб. науч. тр. – Л., 1991. Вып. 441, С. 24–28.
8. Белов М. П., Вакуленко К. В. Микропроцессорная система управления сложным оптико-механическим объектом / М.П. Белов, К.В. Вакуленко // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»: сб. науч. тр. – СПб. – 1995. Вып. 480. С. 74–81.
9. Белов М. П., Аль-Джабари Р. Ф., Новиков В. А. Алгоритмические и вычислительные ресурсы систем автоматической оптимизации технологического оборудования / М.П. Белов, Р. Ф. Аль-Джабари, В. А. Новиков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»: сб. науч. тр. – СПб. – 1997. Вып. 513. С. 75–84.
10. Белов М.П., Аль-Джабари Р. Ф. Оптимизация электромеханических систем дробильных агрегатов / М.П. Белов, Р. Ф. Аль-Джабари // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»: сб. науч. тр. – СПб. – 1998. Вып. 519. С. 81–93.
11. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Типовые алгоритмы управления взаимосвязанными электроприводами / М.П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов // Электротехника, М.: 1998. – №6. – С. 7–15.
12. Белов М. П., Аль-Джабари Р. Ф., Новиков В. А. Электросбережение в электроприводах дробильных комплексов / М.П. Белов, Р. Ф. Аль-Джабари, В. А. Новиков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехнология, электротехника и электромеханика": сб. науч. тр. – СПб. – 2000. Вып. 1. С. 17–24.
13. Белов М. П., Горелов С. А., Новиков В. А. Компьютерные исследования промышленных электромеханических комплексов / М.П. Белов, С.А. Горелов, В.А. Новиков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Автоматизация и управление": сб. науч. тр. – СПб. – 2002. – Вып. 1. С. 15–19.

14. Белов М.П., В.А. Новиков, А.А. Сушников Актуальные задачи модернизации автоматизированных электроприводов технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, А. А. Сушников // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехника": сб. науч. тр. – СПб. 2002. – Вып. 2. – С. 8–14.
15. Белов М.П., Сушников А.А. Математические модели электромеханических систем непрерывных сортовых прокатных станков с учетом энергосбережения / М.П. Белов, А. А. Сушников // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехника": сб. науч. тр. – СПб. 2003. – Вып. 1. – С. 21–28.
16. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н., Сушников А.А. Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов, А.А. Сушников // Электротехника, М.: – 2003. – № 5. – С. 12–16.
17. Belov M. P., Sepp Y. I., Addasi E. S. Analysis of the modern electric drives applied in stone crusher complexes IEEE Proceedings of St. Petersburg IEEE Chapters. –2003. – P. 73–77.
18. Белов М.П., Козлова Л.П., Новиков В.А. Автоматическая оптимизация энергосберегающих электроприводов технологических комплексов / М.П. Белов, Л.П. Козлова, В.А. Новиков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Автоматизация и управление": сб. науч. тр. – СПб. 2003. – Вып. 1. С. 28–33.
19. Белов М.П., Рассудов Л. Н., Тигист Т. Т. Расчет переходных процессов в магистральных трубопроводах на основе инвертирования трансцендентных передаточных функций / М.П. Белов, Л.Н. Рассудов, Т.Т. Тигист // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехника": сб. науч. тр. – СПб. 2003. – Вып. 1. С. 1–8.
20. Белов М. П., Горелов С. А., Новиков В. А Инжиниринговые средства для проектирования электромеханических систем и комплексов / М.П. Белов, С.А. Горелов, В.А. Новиков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 6. – С. 33–38.
21. Белов М. П. Компьютерные методы оптимизации / М.П. Белов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехника": сб. науч. тр. – СПб. 2004. – Вып. 1. С. 12–19.
22. Белов М.П., Арефьев Д.Б., Щелков П.О. Современные методы синтеза электромеханических систем с распределенными параметрами / М.П. Белов, Д.Б. Арефьев, П.О. Щелков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехника": сб. науч. тр. – СПб. 2004. – Вып. 1. С. 56–60.
23. Belov M. P., Sepp Y. I. Energy efficient means for computerized electric drives to be used in the equipment of crushing and mill processes. – IEEE Proceedings of St. Petersburg IEEE Chapters. –2005. –v 2, P. 69–73
24. Белов М. П. Компьютерные методы исследования с визуализацией динамических процессов в автоматизированных электромеханических комплексах / М.П. Белов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехника": сб. науч. тр. – СПб. 2012. – Вып. 4. С. 67–75.
25. Белов М. П. Подход к моделированию электромеханических комплексов / М.П. Белов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехника": сб. науч. тр. – СПб. 2012. – Вып. 3. С. 45–53.
26. Белов М. П. Применение современных методов управления автоматизированными электроприводами промышленных механизмов и агрегатов / М.П. Белов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехника": сб. науч. тр. – СПб. 2012. – Вып. 9. С. 93–100.
27. Белов М.П. Применение генетических алгоритмов для параметрической оптимизации электромеханических систем дробильных агрегатов / М.П. Белов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехника": сб. науч. тр. – СПб. 2013. – Вып. 8. С. 55–59.
28. Белов, М.П., Золотов О.И., Малыгина Л.А. Применение генетических алгоритмов для оптимизации процесса передачи данных в инфокоммуникационных системах / М.П. Белов, О.И. Золотов, Л.А. Малыгина / Известия высш. учеб. заведений России. Радиоэлектроника: сб. статей – М. 2013. № 5. С. 33–41.
29. Белов М. П., Губин А.Н. Особенности разработки системы управления электроприводами механизмов робота-штабелера автоматизированного склада / М.П. Белов, А.Н. Губин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехника": сб. науч. тр. – СПб. 2014. – Вып. 6. С. 61–69.
30. Белов М. П., Козлова Л. П., Новиков В. А. Унификация моделей электроприводов в системах регулирования технологических переменных / М.П. Белов, Л. П. Козлова, В. А. Новиков // Из-

вестия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехника": сб. науч. тр. – СПб. 2015. – Вып. 9. С. 34–41.

31. Нуриахметов Р. М., Новиков В. А., Белов М. П. Система управления движением механизмов крана с предотвращением раскачивания груза / Р. М. Нуриахметов, В. А. Новиков, М.П. Белов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехника": сб. науч. тр. – СПб. 2015. – Вып. 10. С. 56–62.

32. Белов М. П., Кахоров Р. А., Новиков В. А., Проков А. А. Развитие энергосберегающих электроприводных систем и способов повышения их эффективности в технологиях / М.П. Белов, Р. А. Кохоров, В. А. Новиков, А. А. Прокопов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» / Серия "Электротехника": сб. науч. тр. – СПб. 2016. – Вып. 5. С. 78–90.

Авторские свидетельства, алгоритмы

33. А.с. 1117809 СССР, МКИ Н 02 Р 5/16. Цифровой электропривод постоянного тока / М.П. Белов, С.Н. Баранов, Г.Ф. Михальченко, В.Е. Суслов (СССР). – 1984. – № 37.

34. А.с. 1241394 СССР, МКИ Н 02 Р 5/06. Электропривод постоянного тока с упругими связями / М.П. Белов, Г.Ф. Михальченко, В.А. Новиков, В.Е. Суслов (СССР). – 1986. – № 24.

35. А.с. 1399880 СССР, МКИ Н 02 Р 5/16. Цифровой электропривод постоянного тока / М.П. Белов, С.Н. Баранов, Г.Ф. Михальченко, С.В. Копысов (СССР). – 1988. – № 20.

36. Пат. 2079868 Российская Федерация, МКИ G 05 В 13/02. Система управления объектом с транспортным запаздыванием / М.П. Белов, В.А. Новиков, Б.И. Хань Шаокунь. – 1997. – № 14

37. Пат. 2160638 РФ, МКИ В 02 С 25/00. Способ автоматического регулирования процесса измельчения в роторной дробилке и устройство для его осуществления / М.П. Белов, В.А. Новиков, Р. Ф. Аль-Джабари. – 2000. – № 35.

38. Пат. на полезную модель № 47779. Устройство автоматического регулирования натяжения в межклетевом промежутке прокатного стана [Текст] / Белов М. П., Новиков В. А., Сушников А. А. Оpubл. 10.09.2005, Бюл. № 25.

39. Пат. № 2263552. Способ настройки непрерывного прокатного стана [Текст] / Белов М.П., Новиков В.А., Сушников А.А. Оpubл. 10.11.2005, Бюл. № 31.

40. ГосФАП: Инв. № 50850000013. Алгоритм расчета передаточных функций многомерной системы / М.П. Белов, Л.Ю. Силукова. – 1984. – 52 с., Алгоритмы и программы: Бюл. / ВНИЦ-Центр., опубл. 1985. – № 4 (76). – С. 63.

41. ГосФАП: Инв. № 50850000015. Алгоритм расчета коэффициентов матрицы по коэффициентам характеристического полинома / М.П. Белов, В.А. Новиков. – 1984. – 46 с. Алгоритмы и программы: Бюл. / ВНИЦ-Центр., опубл. 1985. – № 4 (76). – С. 64.

42. ГосФАП: Инв. № 50870000874. Алгоритм приведения передаточных функций к простому виду / М.П. Белов, Г.Ф. Михальченко. – 1987. – 43 с. Алгоритмы и программы: Бюл. / ВНИЦ-Центр., 1987. – № 4 (84). – С. 6.

43. ГосФАП: Инв. № 50870000314. Алгоритм ввода в ЦВМ нелинейных характеристик с применением модифицированных алгоритмов вычисления конечных разностей и разностных отношений / М.П. Белов, Г.Ф. Михальченко, Л.Н. Лазовой. – 1987. – 46 с. Алгоритмы и программы: Бюл. / ВНИЦ-Центр., 1987. – № 9 (89). – С. 11.

44. ГосФАП: Инв. № 50870000315. Алгоритм вычисления динамических и статистических оценок точности работы микропроцессорных систем управления взаимосвязанными электроприводами / М.П. Белов, Г.Ф. Михальченко, Л.Ю. Силукова. – 1987. – 59 с. Алгоритмы и программы: Бюл. / ВНИЦ-Центр., 1987. – № 9 (89). – С. 11.

45. ГосФАП: Инв. № 50870000318. Алгоритм моделирования волновых возмущений в микропроцессорных системах управления взаимосвязанными электроприводами / М.П. Белов, Г.Ф. Михальченко, В.А. Новиков, Л.Ю. Силукова. – 1987. – 42 с. Алгоритмы и программы: Бюл. / ВНИЦ-Центр., 1987. – № 9 (89). – С. 12.

46. ГосФАП: Инв. № 50870000313. Алгоритм расчета функций чувствительности частотных характеристик системы управления / М.П. Белов, Д.Х. Имаев, Л. Б. Пошехонов, В. А. Новиков. – 1987. – 49 с. Алгоритмы и программы: Бюл. / ВНТИЦентр., 1987. – № 9 (89). – С.11.

47. ГосФАП: Инв. № 50870000312. Алгоритм параметрического синтеза многомассовых электромеханических объектов управления / М.П. Белов, В.А. Новиков, В.Ф. Путьков. – 1987. – 47 с. Алгоритмы и программы: Бюл. / ВНТИЦентр., 1987. – № 9 (89). – С.11.

48. ГосФАП: Инв. № 50870000316. Алгоритм эквивалентирования многомассовых электромеханических объектов управления (МЭОУ) моделями приведенного порядка с сохранением физической значимости / М.П. Белов, В.А. Новиков, В.Ф. Путьков. – 1987. – 52 с. Алгоритмы и программы: Бюл. / ВНТИЦентр., 1987. – № 9 (89). – С.12.

49. ГосФАП: Инв. № 50870000871. Алгоритм определения чувствительности параметров передаточных функций многомассовых объектов управления с упругими связями к изменениям конструктивных параметров / М.П. Белов, В.А. Новиков, В.Ф. Путьков. – 1987. – 63 с. Алгоритмы и программы: Бюл. / ВНТИЦентр., 1988. – № 3 (92). – С. 4.

50. ГосФАП: Инв. № 50870000873. Алгоритм спектрального анализа временных рядов / М.П. Белов, Г.Ф. Михальченко. – 1987. – 39 с. Алгоритмы и программы: Бюл. / ВНТИЦентр., 1988. – № 4 (93). – С. 6.

51. ГосФАП: Инв. № 50870000872. Алгоритм синтеза прецизионной цифровой системы управления с помощью функций чувствительности / М.П. Белов, Г.Ф. Михальченко, С.В. Копысов. – 1987. – 53 с. Алгоритмы и программы: Бюл. / ВНТИЦентр., 1988. – № 4 (93). – С. 6.

Монографии

52. Белов М. П. Моделирование компьютеризированных электроприводных систем: монография / М. П. Белов; СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб.: ООО "Технолит", 2008. – 208 с.

53. Компьютерные технологии в задачах синтеза и исследования автоматизированных электромеханических комплексов: монография / М.П. Белов ; СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – 158 с.

54. Современные подходы к структурно - параметрическому синтезу, исследованию и управлению автоматизированными электроприводами промышленных агрегатов: монография / М.П. Белов; СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – 206 с.

55. Моделирование в электротехнике: монография / М.П. Белов; СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 242 с.

Другие публикации

56. Белов М. П. Основные источники возмущающих воздействий в цифровом электроприводе постоянного тока и способы их компенсации / М.П. Белов // сб. науч. тр. ПВУРЭ. – Л., 1983. – Вып. 1(6). С. 76–82.

57. Белов М.П. Реализация программных регуляторов на микроЭВМ / М.П. Белов // сб. науч. тр. Ин-та технической кибернетики АН БССР. – Минск., 1984. – Вып. 1, С.123–133.

58. Белов М. П., Шипуль Т. П. Исследование динамической модели прецизионного электропривода постоянного тока на ЭВМ / М.П. Белов, Т.П. Шипуль // ЦНИИМЭСХ Нечерноземной зоны СССР. – Минск: Ураджай, 1985. – Вып. 28, С. 99–107.

59. Белов М.П., Рассудов Л. Н., Тигист Т. Т. Расчет переходных процессов в магистральных трубопроводах на основе инвертирования трансцендентных передаточных функций [Текст] / М.П. Белов, Л.Н. Рассудов, Т.Т. Тигист; М-во образования Рос. Федерации. – М., 2002. – 23 с. – Деп. в ВИНТИ 10.04.02, № 658 В2002.

60. Белов М.П., Муравьева Е.Г. Разработка средств моделирования автоматизированных электромеханических комплексов / М.П. Белов, Е.Г. Муравьева // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. под ред. С. И. Лукьянова, Д. В. Швидченко. – Магнитогорск:

МГТУ, 2004. – Вып. 8. С. 80–84

61. Белов М.П., Муравьёва Е. Г. Компьютерные средства для решения задач исследования систем автоматизированных электроприводов производственных машин и технологических комплексов / М.П. Белов, Е.Г. Муравьёва // Проблемы машиноведения и машиностроения. Межвуз. сб. науч. тр. – СПб.: СЗТУ, 2004. – Вып. 32. С. 124–132

62. Белов М.П., Муравьёва Е.Г., Новиков В.А. Нейросетевая система управления клетями прокатного стана / М.П. Белов, Е.Г. Муравьёва, В.А. Новиков // Проблемы машиноведения и машиностроения. Межвуз. сб. науч. тр. – СПб.: СЗТУ, 2004. – Вып. 33. С. 84–92

63. Белов М. П. Автоматизация синтеза и исследования микропроцессорных систем управления прецизионными взаимосвязанными электроприводами : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л.: ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), – 1989. – 16 с.

64. Белов М.П., Золотов О.И., Малыгина Л.А. Управление инфокоммуникационной системой передачи данных на базе нейронных сетей / М.П. Белов, О.И. Золотов, Л.А. Малыгина // Компоненты и технологии (Components & Technologies). – 2013. – № 11, С. 166–168.

65. Белов М.П., Золотов О.И., Малыгина Л.А. Оптимизация работы блочно-модульной системы обработки данных с использованием генетических алгоритмов/ М.П. Белов, О.И. Золотов, Л.А. Малыгина // Компоненты и технологии (Components & Technologies). – 2013. – № 12, С. 148–151.

Выступления на конференциях

66. Белов М. П., Новиков В.А., Путьков В.Ф. Синтез на ЭВМ многомассовых электромеханических объектов управления с упругими связями. Динамика станочных систем гибких автоматизированных производств / М.П. Белов, В.А. Новиков, В.Ф. Путьков // Автоматизированный электропривод: Тезисы докладов 3-й Всесоюзной научно - технической конференции. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 1988. – С. 162–163.

67. Белов М.П., Имаев Д.Х., Ковальски З., Пошехонов Л.Б. Анализ и синтез электромеханических систем управления с использованием инструментального средства CLASSIC / М.П. Белов, Д.Х. Имаев, З. Ковальски, Л.Б. Пошехонов // Автоматизированный электропривод: Тезисы докладов 1-ой Международной (XII Всероссийская) конференции. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1995. – С. 29–33.

68. Белов М.П., Новиков В.А. Автоматическая оптимизация взаимосвязанных электромеханических систем управления технологическими объектами / М.П. Белов, В.А. Новиков // Автоматизированный электропривод: Тезисы докладов 1-ой Международной (XII Всероссийская) конференции. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1995. – С. 43–47.

69. Белов М. П., Аль-Джабари Р.Ф., Новиков В.А. Типовые алгоритмы управления взаимосвязанными электроприводами / М.П. Белов, Р. Ф. Аль-Джабари, В.А. Новиков // 75 лет отечественной школы электропривода: Тезисы докладов научно - технического семинара. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1997. – С. 15–17.

70. Белов М.П., Новиков В.А. Компьютерные средства для исследования электромеханических систем технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков // 75 лет отечественной школы электропривода: Тезисы докладов научно - технического семинара. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1997. – С. 22–24.

71. Белов М.П., Новиков В.А. Энергосбережение в электромеханических системах дробильных комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков // Проблемы автоматизированного электропривода: Тезисы 2-ой Международной (XIII Всероссийская) конференции. – Ульяновск: Изд-во УТУ. –1998. –С. 37–40.

72. Белов М.П., Горелов С.А. Компьютерная система моделирования технологических объектов / М.П. Белов, С.А. Горелов // Автоматизация и информатизация в машиностроении (АИМ 2000): Сб. тр. Первой международной электронной научно-технической конференции. – Тула: ТулГУ. 2000. – С. 55–58.

73. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Унификация режимов и алгоритмов управления компьютеризированными электроприводами в соответствии с технологическими функциями / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов // Автоматизированный электропривод: Материалы III Международной конференции по автоматизированному электроприводу. – Н.Новгород: НГТУ. 2001. – С. 15–18.

74. Белов М.П., Горелов С.А., Новиков В.А. Объектно - ориентированный подход при компьютерном исследовании промышленных электромеханических комплексов / М.П. Белов, С.А. Горелов, В.А. Новиков // Современные технологии обучения: Материалы VIII Международной конференции "СТО-2002", СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2002. – С. 154–157.

75. Белов М.П., Тигист Т.Т., Коточигов А.М., Мядзель В.Н. Метод расчета переходных процессов в магистральных трубопроводах с учетом затухания / М.П. Белов, Т.Т. Тигист, А.М. Коточигов, В.Н. Мядзель // Современные технологии, материалы, машины и оборудование: Материалы международной научно-технической конференции, Могилев. 2002. – С. 427–428.

76. Белов М.П., Новиков В.А., Горелов С.А., Сушников А.А. Компьютерные методы обработки алгоритмов управления машинами и комплексами металлургического производства / М. П. Белов, В.А. Новиков, С.А. Горелов, А.А. Сушников // Школа обмена опытом: Системы управления в черной металлургии, передовой опыт; инструментарий - анализ предложений мировых лидеров; оптимизация энергоснабжения на предприятиях металлургической промышленности: Тезисы докладов семинара, СПб: Изд-во СПбГПИ. 2002. – С. 17–18.

77. Белов М.П., Новиков В.А., Сушников А.А. Энергосберегающие режимы управления электроприводами непрерывных прокатных станов / М.П. Белов, В.А. Новиков, А. А. Сушников // Энергоресурсосбережение на предприятиях металлургической и горной промышленности (новые решения): Тезисы докладов научно - технической конференции, СПб: ГПИ, 2004. – С. 24–25.

78. Белов М.П., Новиков В.А., Сушников А.А. Оптимизация режимов управления электроприводами непрерывных прокатных станов по критериям энергосбережения / М. П. Белов, В. А. Новиков, А. А. Сушников // Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития: Тр. IV Международной конференции по автоматизированному электроприводу, Магнитогорск: МГТУ, 2004. – Ч. II. – С. 238–240.

79. Белов М.П., Новиков В.А. Инжиниринговые средства электроприводных систем / М.П. Белов, В. А. Новиков // Труды V Международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007, СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. – С. 33–35

80. Белов М. П. Специализированное программное обеспечение средств автоматизации / М.П. Белов // Сборник научных статей к юбилею кафедры процессов управления и информационных систем, СПб: СЗТУ, 2010. С. 19–34.

81. Белов М.П. Применение «Soft-computing» методов для управления электроприводами / М.П. Белов // Труды VII международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012, Иваново: ИГЭУ, 2012. – С. 74–77.

82. Белов М. П. Применение современных методов управления в информационно - управляющих системах / М.П. Белов // Труды II международной научно - технической и научно - методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании», СПб: Изд-во СПбГУТ. 2013. – С. 146–150.

83. Белов М. П. Разработка базы моделей сложных промышленных механизмов и агрегатов / М.П. Белов // Мягкие вычисления и измерения: Сборник докладов XVII Международной конференции, СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – С. 89–92.

84. Белов М. П. Применение нечеткого управления и нейронных сетей в системах управления насосами / М.П. Белов // Мягкие вычисления и измерения: Сборник докладов XVII Международной конференции, СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – С. 97–99.

85. Белов М.П., Золотов О.И. Применение генетических алгоритмов для оптимизации переда-

чи данных в промышленных сетях / М.П. Белов, О.И. Золотов // Мягкие вычисления и измерения: Сборник докладов XVII Международной конференции, СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – С. 156–158.

86. Белов М. П. Особенности сбора и передачи данных о технологических переменных в систему управления мелкосортно-проволочного прокатного стана 250 / М.П. Белов // Актуальные проблемы Инфотелекоммуникаций в науке и образовании : Сборник научных статей III Международной научно-технической конференции, СПб: Изд-во СПбГУТ, 2014. С. – 402–405.

87. Белов М.П. Интеллектуализация электроприводных систем / М.П. Белов // Автоматизированный электропривод АЭП-2014: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции, Саранск: Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 55–58.

88. Белов М.П., Новиков В.А. Принятие решений по совокупности альтернатив при разработке электроприводных систем для технологий / М.П. Белов, В.А. Новиков // Автоматизированный электропривод АЭП-2014: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции, Саранск: Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 292–297.

89. Белов М. П. Эволюционный синтез интегрированных электроприводных систем с учетом микро и макро моделирования / М.П. Белов, В.А. Новиков // Мягкие вычисления и измерения: Сборник докладов XVIII Международной конференции, СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – С. 340–344.

90. Белов М. П. Оптимизация параметров нейронных сетей генетическим алгоритмом в системах управления электромеханическими объектами / М.П. Белов, О.И. Золотов // Мягкие вычисления и измерения: Сборник докладов XVIII Международной конференции, СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. –С. 336–340.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем:

[9–13, 15, 17, 39–50, 57, 58] – разработка программного обеспечения и компьютерных моделей, проведение вычислительных экспериментов, общий анализ;

[14, 18, 20, 23, 29, 31–38, 60, 61, 67, 73, 75] – проектирование технических решений, обработка результатов;

[1–8, 16, 19, 22, 28, 30, 63–66, 68–72, 74, 76, 82, 85–90] – разработка основных теоретических положений, выполнение расчетов.

Подписано в печать 26.09.16. Формат 60*84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 2,0.
Тираж 100 экз. Заказ ____.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательства СПбГЭТУ "ЛЭТИ"

Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ"
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5