

На правах рукописи

МАЛАФЕЕВ Сергей Иванович

УДК 621.01+621.313

**УПРАВЛЕНИЕ ПО КРИТЕРИЮ ЭФФЕКТИВНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ
В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ**

Специальность 05.02.05 – роботы, мехатроника
и робототехнические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 2002

Работа выполнена в ООО «Компания «Объединенная энергия»,
г. Москва

Официальные оппоненты: Заслуженный конструктор
Российской Федерации,
доктор технических наук,
профессор **Б.В. Новоселов**,
ФГУП «ВНИИ «Сигнал»

доктор физико-математических
наук, профессор **С.М. Соколов**,
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

доктор технических наук,
профессор **А.С. Ющенко**,
им. Н.Э. Баумана

~~1576441~~
~~Малафеев С.И.~~
Управление по крите-
рию эффективного исп
2002 0.00

ный научный центр горного
им. А.А. Скочинского

2002 г. в 14 час.30 мин.
ого совета Д 212.141.02
ском университете им.
-я Бауманская, д. 5.

библиотеке МГТУ им.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1576441

Малафеев С.И. Управление п

1576441

Иванов
В.А. Иванов

Актуальность темы. Современная автоматизация технологических процессов и производственных комплексов основывается на широком использовании мехатронных систем различного назначения. Функциональное и конструктивное объединение электромеханических преобразователей с энергетическими и информационными компонентами в мехатронных системах определяет зависимость эффективности и качества их работы как от алгоритмов и технических средств управления, так и от энергетического обеспечения всех процессов.

Проблема эффективного использования энергетического источника сформировалась с начала практического использования электрических машин, и ее актуальность возрастала в процессе развития электромеханики и мехатроники. В настоящее время эта проблема приобрела особое значение по следующим причинам. Повышение требований к качеству процессов управления в автоматических системах предполагает оптимизацию их параметров и структуры. В мехатронных системах, отрабатывающих сложные и изменяющиеся законы управления при случайных возмущающих воздействиях, режимы работы оборудования практически всегда отклоняются от номинальных. Это приводит к снижению КПД и возрастанию потерь. Применение мощных тиристорных и транзисторных преобразователей для управления двигателями служит причиной отклонений, колебаний и искажений формы питающих напряжений и усугубляет проблему электромагнитной совместимости оборудования. Возрастание стоимости всех видов энергии в мире и обострение экологической проблемы определяют повышенную актуальность экономии энергии.

В этих условиях сформировалась актуальная научная проблема создания теории и прикладных методов анализа и синтеза систем управления, обеспечивающих рациональное использование энергетических ресурсов в мехатронных системах. Однако решение указанной проблемы в настоящее время сдерживается вследствие:

- отсутствия адекватного концептуального подхода к исследованию и проектированию систем управления, отвечающих критерию эффективного использования энергетического ресурса;
- ограниченных возможностей современных методов классической теории автоматического управления при реализации новых энергосберегающих алгоритмов управления на основе современных технических средств, в том числе микроконтроллеров;
- отсутствия специализированных технических средств обработки информации и управления для реализации алгоритмов эффективного использования энергетических ресурсов в мехатронных системах.

Существующее противоречие между практической потребностью повышения энергетической эффективности мехатронных систем, с одной стороны, и ограниченными возможностями современных методов анализа и синтеза алгоритмов управления для решения указанной проблемы, с другой стороны, определяют актуальность исследований в данном направлении.

Работа выполнялась в период с 1991 г. по 2001 г. в компании «Объединенная энергия» (г. Москва) и соответствует п. 2.1.4 «Исследования в области энергосбережения и эффективных электротехнологий» Перечня приоритетных направлений фундаментальных исследований, утвержденного Правительственной комиссией Российской Федерации по научно-технической политике 21.07.96 г.

Цель и задача работы. Цель работы состоит в повышении эффективности использования электрической энергии в мехатронных системах на основе новых алгоритмов автоматического управления и идентификации электроэнергетических процессов. Для достижения указанной цели сформулирована научная задача: провести исследования электроэнергетических процессов в мехатронных системах и разработать теоретические основы, практические алгоритмы и технические средства автоматического управления, обеспечивающие повышение эффективности использования энергетических ресурсов.

Решение этой научной задачи предполагает:

1. Составление моделей мехатронных систем, ориентированных на решение задач энергетических исследований.
2. Исследование моделей электроэнергетических процессов в мехатронных системах и разработку на основе этих моделей методов и средств идентификации энергетических характеристик.
3. Разработку методологии имитационного моделирования процессов управления и преобразования энергии в мехатронных системах.
4. Аналитическое исследование эффективности использования энергетических ресурсов в мехатронных системах.
5. Анализ и синтез структур мехатронных систем, эффективных по критерию использования энергетических ресурсов.
6. Анализ и синтез систем управления энергетическими ресурсами в электромеханических системах.
7. Разработку объектно-ориентированных технических средств для мехатронных систем, эффективных по критерию использования энергетических ресурсов.

Методы исследования. Для решения сформулированной научной проблемы использованы математические методы современной теории автоматического управления, классической электромеханики, автомати-

зированного электропривода, теории эксперимента и обработки данных. Для исследования процессов в мехатронных системах использовались натурные эксперименты и имитационное моделирование.

Основные положения, защищаемые автором.

1. Концепция управления по критерию эффективного использования энергетических ресурсов в мехатронных системах.
2. Концептуальная и математические модели энергетического и информационного ресурсов мехатронной системы и их взаимодействия.
3. Методика анализа и синтеза процессов управления и преобразования энергии в мехатронных системах, основанная на объектно-ориентированном использовании экспериментальных и аналитических методов и имитационного моделирования.
4. Методика и технические средства идентификации характеристик электроэнергетических процессов при случайных искажениях формы токов и напряжений в мехатронных системах.
5. Методы идентификации момента инерции вращающихся масс электроприводов, основанные на измерении частоты незатухающих колебаний в электромеханической системе.
6. Метод идентификации сопротивления изоляции в системах электроприводов с преобразователями рода тока и его промышленная реализация.
7. Экспериментальные и аналитические закономерности преобразования энергии в мехатронных системах и их элементах в установившихся и переходных режимах.
8. Практические методики параметрического синтеза типовых систем электроприводов по критерию минимума потерь энергии в переходных процессах.
9. Практические алгоритмы управления по критерию эффективного использования энергетических ресурсов для различных типов двигателей.
10. Алгоритмы и технические средства управления энергетическими процессами в электропитающих устройствах мехатронных систем.
11. Принципы построения и практическая реализация специализированных аналоговых и цифровых элементов и устройств управления для мехатронных систем.
12. Схемотехнические решения промышленных систем электроприводов для горных машин, автоматизированных производств топливно-энергетического комплекса и предприятий машиностроения.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

1. Впервые сформулирована концепция и исследованы свойства процессов управления по критерию эффективного использования энергетических ресурсов в мехатронных системах.

2. Разработаны основные положения анализа и синтеза систем управления по критерию эффективного использования энергетических ресурсов.

3. Разработаны принципы построения технических средств идентификации параметров электроэнергетических процессов и электрических систем.

4. Разработаны и исследованы новые методы идентификации моментов инерции вращающихся элементов электромеханических систем, основанные на измерении параметров движения в режиме колебаний.

5. Предложен, исследован и реализован новый метод контроля сопротивления изоляции в электрических системах с преобразователями рода тока.

6. Получены экспериментальные и аналитические энергетические характеристики мехатронных систем и их элементов в установившихся и переходных режимах.

7. Разработаны и исследованы методики настройки регуляторов традиционных систем приводов по критерию эффективного использования энергетического ресурса.

8. Разработаны и исследованы новые алгоритмы управления в мехатронных системах, обеспечивающие эффективное использование энергетических ресурсов.

9. Разработаны и исследованы новые алгоритмы и технические средства управления энергетическими процессами в электропитающих устройствах мехатронных систем.

10. Предложены новые схемотехнические решения промышленных систем электроприводов для автоматизированных производств различного назначения.

Практическая ценность. Составленные модели мехатронных систем и концепция управления по критерию эффективного использования энергетических ресурсов позволяют проводить целенаправленный синтез новых нелинейных структур, объектно-ориентированных подсистем и элементов электроприводов, обеспечивающих снижение потерь энергии и электромагнитную совместимость оборудования.

Разработанные методы и технические средства идентификации параметров электроэнергетических процессов служат основой практической реализации микроконтроллерных информационно-измерительных систем, энергонаблюдателей и приборов учета расхода электроэнергии. Использование новых методов идентификации моментов инерции вращающихся элементов мехатронных систем, в том числе роторов электрических ма-

шин, позволяет повысить точность измерений. Микроконтроллерные устройства, реализующие новый метод идентификации сопротивления изоляции, обеспечивают повышение надежности контроля и защиты, а также безопасности в электрических системах с преобразователями рода тока.

Методики параметрического синтеза и новые алгоритмы управления по критерию минимума потерь энергии в переходных процессах обеспечивают повышение энергетических характеристик мехатронных систем. Разработанные алгоритмы и технические средства управления энергетическими процессами в электропитающих устройствах мехатронных систем обеспечивают снижение потерь и повышение качества электроэнергии.

Разработанные микроконтроллерные системы управления служат основой создания перспективных электроприводов постоянного и переменного тока для горных машин, автоматизированных производств топливно-энергетического комплекса и других отраслей промышленности.

Реализация результатов работы. Теоретические результаты и практические разработки, в том числе защищенные патентами Российской Федерации, использованы в промышленных системах и устройствах электроприводов. Компания «Объединенная энергия» (г. Москва) освоила серийный выпуск следующих изделий:

Агрегат преобразовательный электроприводов вращателя и хода ПЭВХ-350/460 для буровых станков СБШ-250МНА-32 (ОАО по буровому и транспортному оборудованию «Рудормаш», г. Воронеж) и 3СБШ-200-60, 6СБШ-200-32 (Бузулукский завод тяжелого машиностроения).

Преобразовательный агрегат электропривода подъемной установки ППУ-1 для шахтных подъемов.

Агрегат тиристорный экскаваторный АТЭ-1 для управления возбуждением синхронных двигателей и электропитания аппаратуры управления экскаваторов ЭКГ-8, ЭКГ-10, ЭШ-10/70, ЭШ-15/90 и др.

Агрегат разгона главной группы серии АТЭ-РГТ для экскаваторов.

Преобразовательный агрегат электропривода толкателя ПЭТ-1 для передвижных электрифицированных объектов.

Агрегат тиристорный для управления возбуждением синхронных двигателей ВДС-1.

Агрегат коммутационный тиристорный для плавного пуска асинхронных трехфазных двигателей АКД-3.

Преобразователь электропривода открывания днища ковша экскаватора ПДК для отечественных экскаваторов ЭКГ-8, ЭКГ-10 и других.

Аппарат защиты от токов утечки «Аргус» для контроля сопротивления изоляции в электрических сетях с преобразователями рода тока.

Реле защиты от однофазных замыканий на землю ЗЗМ типа «Зеро» для сетей 3 – 35 кВ с изолированной нейтралью.

ОАО «Владимирский завод полимерного машиностроения «Полимер-Техника» внедрило в серийно выпускаемых автоматизированных линиях по производству изделий из полимерных материалов микроконтроллерные приводы червячных прессов ПЧ-32х27, ПЧ-45х25, ПЧ-63х25, ПЧ-90х25.

В Научно-исследовательском институте тракторных и комбайновых двигателей (г. Владимир) использованы методика и аппаратура для измерений параметров электроэнергетических процессов в электрических системах при искажениях формы токов и напряжений. На предприятиях ОАО «Владимирэнерго», «Ивэнерго» и «Центрэнерго» РАО «ЕЭС России» внедрены и успешно эксплуатируются электроприводы подачи топлива ПТН-1, аппараты для плавного пуска асинхронных двигателей АКД, возбуждители синхронных двигателей ВДС-1, приборы для испытаний автоматических выключателей, агрегаты для заряда и подзаряда аккумуляторных батарей, тиристорные регуляторы переменного напряжения, приборы для дистанционного контроля температуры электродвигателей. В конструкторском бюро завода «Электроприбор» (г. Владимир) внедрена система электроприводов опорно-поворотного устройства. В ООО «Завод «Автоприбор» использованы тиристорные регуляторы переменного напряжения и микроконтроллерные приводы главного движения продольно-строгальных станков. В ООО «АНКЕР» внедрены электроприводы и блоки управления для автоматизированных технологических линий.

Управление по критерию эффективного использования энергетических ресурсов, микроконтроллерные системы идентификации параметров электроэнергетических процессов, структуры и элементы микроконтроллерных электроприводов включены в программы курсов «Электромеханические системы», «Локальные системы управления», «Моделирование систем управления» для студентов Владимирского государственного университета. Программы моделирования мехатронных систем использованы в Саратовском государственном техническом университете.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 40 научно-технических конференциях, семинарах и совещаниях, в том числе:

1. IV и V Всесоюзных научно-технических конференциях «Проблемы преобразовательной техники» (Киев, 1987, 1991).
2. IV Всесоюзном совещании по робототехническим системам (Киев, 1987).
3. Всесоюзном научно-техническом совещании «Пути ускорения работ по автоматизации электромеханического производства на основе передовых технологических процессов и гибких переналаживаемых комплексов» (Суздаль, 1988).

4. IX и X Всесоюзных конференциях по постоянным магнитам (Суздаль, 1988, 1991).

5. Всесоюзной научно-технической конференции «Измерительные информационные системы» (Ульяновск, 1989).

6. Всесоюзном научно-техническом совещании «Автоматизация проектирования в электромашиностроении» (Суздаль, 1989).

7. V Всесоюзном совещании по робототехническим системам (Геленджик, 1990).

8. Всесоюзном научно-техническом совещании «Состояние и перспективы развития систем автономного электроснабжения» (Суздаль, 1991).

9. X Всесоюзной научно-технической конференции «Интеллектуальные электродвигатели и экономия электроэнергии» (Суздаль, 1991).

10. Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии (VI и IX Бенардосовские чтения)» (Иваново, 1992, 1999).

11. I - IV Международных научно-технических конференциях «Физика и радиоэлектроника в медицине и биотехнологии» (Владимир, 1994, 1996, 1998, 2000).

12. X научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» ЭПТТ-95 (Екатеринбург, 1995).

13. Всероссийской (Владимир, 1994) и Международной (Суздаль, 1996) научно-технических конференциях «Конверсия, приборостроение, рынок».

14. II Всероссийской научно-технической конференции «Методы и средства измерений физических величин» (Нижний Новгород, 1997).

15. II и III Международных научно-технических конференциях «Управление в технических системах» (Ковров, 1998, 2000).

16. 16-й Международной конференции «Гидравлика и пневматика'98» (Брно, 1998).

17. III Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2001).

Публикации. По результатам исследований опубликовано более 150 работ, в том числе 4 учебных пособия, из них 3 с грифами Минобразования, и получено 60 патентов и авторских свидетельств на изобретения.

Объём работы. Диссертация изложена на 439 с. машинописного текста, содержит введение, восемь глав, заключение, список литературы из 386 наименований, 4 приложения и иллюстрируется 99 рис.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, основные положения, вынесенные на защиту, и кратко изложено содержание диссертации.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Анализ энергетических процессов занимает центральное место при проектировании и расчетах мехатронных систем. Все алгоритмы управления могут быть реализованы только в тех случаях, если они обеспечены энергетически. При этом качество процессов управления определяется эффективностью использования электрической энергии.

Современные мехатронные системы представляют собой сложные нелинейные динамические объекты, характеризующиеся взаимосвязью процессов различной физической природы, нелинейными характеристиками электромеханического преобразования энергии, случайными изменениями управляющих и возмущающих воздействий, структурной и параметрической нестационарностью. В системах с полупроводниковыми преобразователями, регулирующими потоки энергии от источников к электродвигательным устройствам, происходят преобразования рода тока и параметров электрической энергии, сопровождающиеся снижением коэффициента мощности нагрузок, искажениями формы потребляемых токов и питающих напряжений, колебаниями и отклонениями напряжений в широком диапазоне частот.

В этих условиях исследование и моделирование энергетических процессов в мехатронных системах оказываются затруднительными как с методологической, так и с вычислительной точек зрения. Однако потребность в таких исследованиях диктуется повышением требований к качеству функционирования и совершенствованию методов проектирования мехатронных систем. При этом наибольший интерес представляет моделирование двух фундаментальных процессов – преобразования энергии и информации. Эта задача, несмотря на различные варианты постановки, не получила требуемого для практики решения.

Анализ, синтез и проектирование мехатронных систем основываются на методах теории автоматического управления, рассматривающих преимущественно информационные процессы. Энергетическим процессам изначально отводится второстепенная роль. В практике современного

электропривода преимущественно используются структуры систем с подчиненным регулированием координат и с параллельным включением обратных связей. Стандартные методы настройки регулирующих устройств электроприводов на модульный или симметричный оптимум не учитывают потери энергии, влияние источников питания и разную физическую сущность процессов регулирования тока, скорости, положения и др.

Синтез оптимальных по минимуму потерь энергии систем электроприводов представляет собой сложную задачу, во многих случаях не имеющую однозначного решения. Реализация оптимальных алгоритмов управления электроприводами, полученных для простейших моделей при множестве упрощающих допущений, приводит к сложным техническим решениям, что затрудняет их эффективное практическое использование.

Многочисленные специальные энергосберегающие алгоритмы управления двигателями постоянного и переменного тока, разработанные для установившихся режимов, не получили эффективного применения на практике, поскольку они не учитывают технологических функций электропривода. Это служит причиной потери производительности. Экстремумы энергетических характеристик во многих случаях слабо выражены, поэтому затраты на их поиск и поддержание не оправдываются.

Современное проектирование мехатронных систем основывается на методах теории автоматического управления, позволяющих синтезировать электроприводы, исходя из требований устойчивости, быстродействия, качества переходных процессов и точности в предположении, что все информационные процессы обеспечены энергетически соответствующим выбором элементов. Энергетический расчет мехатронных систем выполняется без учета особенностей и настроек регулирующих устройств, а также возможностей источников электропитания.

Таким образом, повышение эффективности использования электрической энергии в мехатронных системах представляет собой важную научно-техническую проблему, имеющую большое практическое значение. Необходимость обеспечения рациональных энергетических режимов и электромагнитной совместимости всех подсистем электроприводов, снижение потерь электроэнергии при одновременном улучшении показателей качества регулирования параметров технологических процессов, с одной стороны, и ограниченные возможности современных методов и средств, используемых для этих целей, с другой стороны, определяют актуальность энергетических исследований мехатронных систем.

Объективными условиями для решения сформулированной проблемы являются современные достижения науки и техники, а именно:

- достижения силовой преобразовательной техники и микроэлектроники: силовые полупроводниковые приборы с высокими техническими

характеристиками, в том числе полностью управляемыми, и микроселектронные многофункциональные устройства управления;

- новые методы теории управления, позволяющие синтезировать алгоритмы регулирования для сложных нелинейных объектов;

- новые информационные технологии, обеспечивающие эффективное решение широкого круга задач с помощью ЭВМ.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

Для решения проблемы эффективного использования энергетических ресурсов в мехатронных системах составлена концептуальная модель, отражающая взаимосвязь энергетических и информационных процессов и основанная на описании соответствующих ресурсов. Энергетический ресурс – это источник электрической энергии, обеспечивающий возможность функционирования системы за счет использования внутренних запасов или преобразования энергии какого-либо вида в электрическую, а также устройства ее передачи к потребителю и преобразования параметров. Информационный ресурс системы управления – это реализованная в виде программ искусственная организация (статическая или динамическая), осуществляющая формирование управляющих воздействий, направленных на сохранение или заданное изменение состояния системы.

Энергетический ресурс электромеханической системы характеризуется родом тока, параметрами электрической энергии, внутренним сопротивлением источника и линии передачи и мощностью.

Основные характеристики информационного ресурса – размерность пространства измерений, точность измерений, множество операторов преобразования данных, определяющее алгоритмы регулирования и принятия решений.

Предложенное представление мехатронной системы отражает взаимосвязь энергетических и информационных процессов и является основой для исследования энергетических затрат на обеспечение устойчивости и качества регулирования, эффективности использования энергетического ресурса, методов и средств повышения эффективности использования энергетического ресурса.

Эффективность использования энергетического ресурса мехатронной системы оценивается следующими факторами: соотношениями между механической энергией движения системы с заданными параметрами, электрической энергией, потребляемой от источника электропитания, и потерями в различных элементах системы, соотношениями между токами

и напряжениями при преобразовании энергии, чувствительностью потребления электроэнергии к изменениям ее параметров.

Основные способы повышения эффективности использования энергетического ресурса состоят в улучшении энергетических характеристик всех элементов системы, управлении электроэнергетическими процессами по критерию эффективного использования энергетического источника и управлении самим энергетическим ресурсом.

Система управления, обеспечивающая эффективное использование энергетического ресурса, должна содержать средства оценки этого ресурса и воздействия на систему, обеспечивающие ее движение в соответствии с наилучшей в энергетическом смысле траекторией, т.е. для повышения эффективности использования энергетического ресурса требуется расширение информационного ресурса системы.

Все элементы мехатронной системы связаны общим энергетическим ресурсом, и для его эффективного использования необходимо управление процессами как в отдельных подсистемах, так и координация этих процессов в системе в целом, включая электропитающее устройство и технологический процесс.

Разработанные математические модели технических средств энергетического ресурса, учитывающие структуру системы, воздействия на ее входы, динамические и энергетические характеристики оборудования, позволяют аналитически исследовать и моделировать электроэнергетические процессы, оценивать их параметры, определять потери, оценивать эффективность использования энергетического ресурса и проводить сравнительный анализ технических решений.

Основу методологии анализа и синтеза систем управления по критерию эффективного использования энергетических ресурсов составляет объектно-ориентированный подход, использующий сочетание аналитических методов, экспериментальных исследований и имитационного моделирования.

Разработка практических алгоритмов управления по критерию эффективного использования энергетических ресурсов предусматривает как разработку новых объектно-ориентированных методов, так и новое использование традиционных решений: нелинейных обратных связей, ограничения переменных, переключения параметров и структур, координирующего и адаптивного управления.

Для имитационного моделирования установившихся и переходных процессов в мехатронных системах используется структурный метод, обеспечивающий повышенную по сравнению с традиционными вычислительными методами точность и устойчивость и допускающий простое объектно-ориентированное программирование и тестирование.

3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Задачи идентификации для мехатронных систем при энергетических исследованиях можно разделить на три основные группы: идентификация характеристик электроэнергетических процессов, оценивание механических параметров, характеризующих их энергетические свойства, и определение косвенных параметров, характеризующих энергетические свойства и состояние системы.

Идентификация электроэнергетических характеристик мехатронных систем с полупроводниковыми преобразователями энергии предусматривает оценку большой группы интегральных характеристик случайных несинусоидальных сигналов и их взаимосвязей при времени измерения, равном периоду питающей сети.

Разработанные методики и средства организации измерений энергетических характеристик мехатронных систем обеспечивают обработку большого количества (до нескольких десятков) сигналов по различным алгоритмам в реальном времени. Устройства реализуют быстрые помехоустойчивые алгоритмы измерений с погрешностью, не превышающей 1 %. Разработанные корреляционный метод и измерительные преобразователи составляющих отдельных гармоник несинусоидальных токов и напряжений обеспечивают при случайных изменениях сигналов получение несмещенных оценок. Дисперсии измерений уменьшаются с увеличением частоты, а при узкополосных случайных процессах практически равны нулю. Корреляция ошибок измерения синфазной и квадратурной составляющих равна нулю. Экспериментальная погрешность измерения не превышает 1 %.

Рациональная организация измерительных и вычислительных процессов достигается при использовании двухуровневых аналого-цифровых систем, в которых задачи обработки сигналов распределены между ЭВМ и интерфейсными модулями. Первый уровень обработки сигналов организован с помощью блока специализированных преобразователей параметров электроэнергетических процессов. На втором уровне по программам ЭВМ выполняются анализ данных, выбор алгоритмов расчетов, вычисление энергетических характеристик, статистическая обработка, регистрация, запоминание и вывод результатов в необходимой форме, а также ряд других функций, свойственных конкретным задачам. Все вычислительные процедуры, кроме статистических, осуществляются в течение одного периода сети.

Рассмотренная схема организации измерений энергетических характеристик отличается эффективным сочетанием достоинств аналоговых (высокое быстродействие, простота, широкие возможности использования различных по принципу действия датчиков и преобразователей) и цифровых (широкие функциональные возможности, высокая точность, уникальные сервисные функции) технических средств.

Компьютерный комплекс контроля и управления, использующий разработанные преобразователи параметров электроэнергетических процессов и специальные программные средства, обеспечивает полный объем научно-исследовательских испытаний мехатронных систем.

Важнейшим параметром механической подсистемы, определяющим энергетические характеристики мехатронной системы, является момент инерции. Для его идентификации разработаны новый способ и группа методов измерения. Определение моментов инерции производится по параметрам незатухающих колебаний в электромеханической системе. Колебательная система реализована на основе двухфазной синхронной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов. Одна из обмоток машины подключается к источнику постоянного тока, благодаря чему ротор устанавливается в начальное положение $\varphi = 0$. Вторая обмотка подключается к выходу усилителя сигнала положительной обратной связи по скорости. При этом в системе устанавливаются автоколебания, частота которых является функцией момента инерции вращающихся масс и величины постоянного тока в первой обмотке. Определение моментов инерции может быть выполнено по результатам двух или трех опытов с эталонными телами (метод эталонных тел), по параметрам резонансного режима (резонансный метод) или по энергетическим характеристикам колебаний (энергетический метод). Основная приведенная погрешность не превышает 1 % в диапазоне измеряемого параметра от 2 % до 300 % от значения собственного момента инерции приводного двигателя. Особенность методов заключается в возможности измерений моментов инерции роторов электрических машин в собранном состоянии.

Для расширения информационного ресурса мехатронной системы с целью повышения эффективности использования энергетического ресурса предложено использование измерительной информации о состоянии системы, включающей характеристики нагрузок, параметры шумовых излучений, температуру окружающей среды, сопротивление изоляции и ошибки контуров регулирования. В системах управления электроприводами с обратными связями большой объем информации о состоянии системы содержится в сигналах ошибок регулирования. Сигнал рассогласования локальной системы с отрицательной обратной связью позволяет оценивать статические, динамические и энергетические характеристики и может

быть использован для формирования ограничений. Для систем управления разработаны специальные астатические регуляторы с контролем сигнала ошибки и адаптацией закона регулирования к изменениям режима работы.

Для идентификации сопротивления изоляции в электрических системах с преобразователями рода тока разработан и реализован метод контроля сопротивления, основанный на использовании специального тестового сигнала в виде последовательности разнополярных импульсов специальной формы. Устройства, реализующие предложенный метод, обеспечивают измерение активного сопротивления изоляции при времени измерения 40...140 мс.

Достоверность полученных результатов и количественных оценок подтверждена результатами экспериментальных исследований разработанных устройств и систем в лабораторных и промышленных условиях.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

Аналитические исследования закономерностей преобразования энергии в типовых системах регулирования скорости с двигателями постоянного тока свидетельствуют о том, что энергия, потребляемая из сети, и потери в якорной обмотке при переходном процессе, вызванном изменением сигнала задания, прямо пропорциональны квадрату напряжения задания, возрастают с увеличением коэффициента передачи регулятора по закону, близкому к квадратичному, прямо пропорциональны моменту инерции вращающихся масс. КПД системы уменьшается с увеличением коэффициента передачи регулятора и не может превышать 50 %. Оптимальный по критерию использования активной энергии переходный процесс в зависимости от соотношения электромеханической и электромагнитной постоянных времени может быть колебательным или аperiodическим. Увеличение коэффициента передачи регулятора по сравнению с оптимальным значением приводит к резкому возрастанию потерь в якорной обмотке. Переходная составляющая энергии потерь при изменении момента нагрузки прямо пропорциональна квадрату его значения и не зависит от напряжения задания. Потери в переходных режимах, вызванные изменениями задающего напряжения, значительно превышают потери, обусловленные изменениями момента нагрузки.

На рис. 1 показаны зависимости энергии E_n , потребляемой электрическим двигателем от источника при переходном процессе, КПД η , времени регулирования t_p и перерегулирования σ от параметров ПИ-регуляторов тока $k_{рТ}$ и $T_{рТ}$ и скорости $k_{рс}$ и $T_{рс}$.

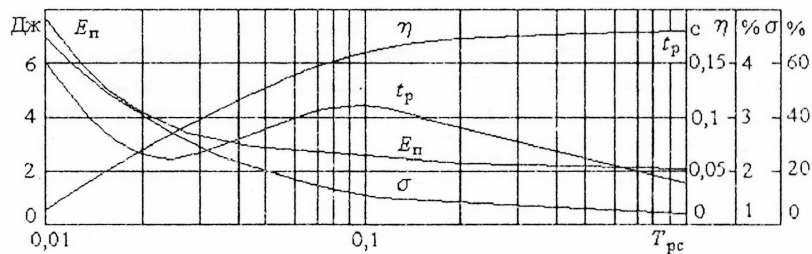
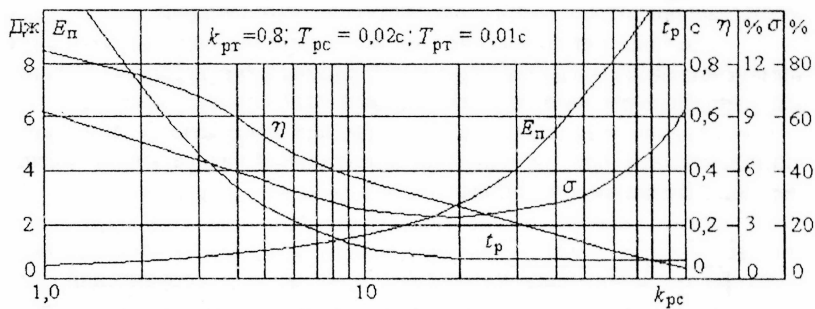
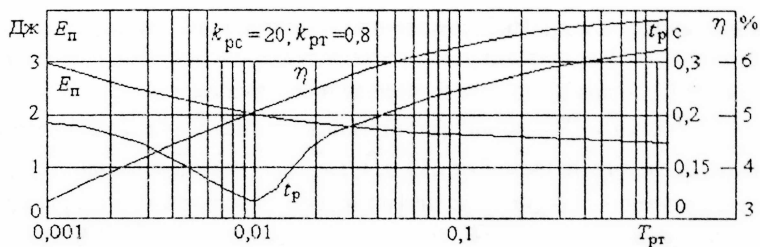
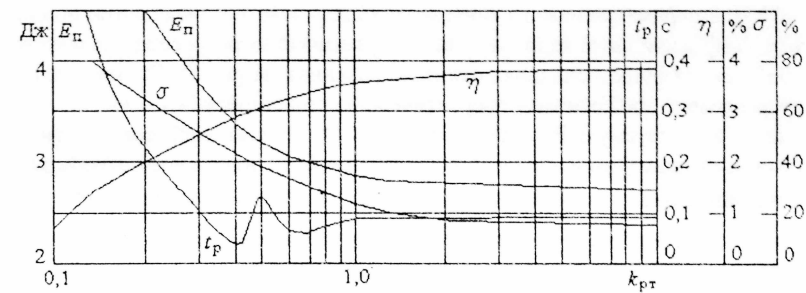


Рис. 1

Для параметрического синтеза типовых мехатронных систем по критерию эффективного использования энергетических ресурсов используется обобщенная функциональная схема, показанная на рис. 2. Система условно разделена на 2 части – энергетическую подсистему ЭП и информационную подсистему ИП. Энергетическая подсистема включает источник питания с выходным напряжением e , преобразовательное устройство с коэффициентом передачи k_y , питающую линию с сопротивлением r_n , а также двигатель постоянного тока. В модели двигатель представлен в виде двух накопителей энергии: электрической (индуктивность L якорной обмотки) и механической (вращающаяся масса с приведенным моментом инерции J), и диссипативных элементов (активные сопротивления ротора r и питающей сети r_n). Информационная подсистема ИП отражает информационный ресурс привода и содержит датчики напряжения u , тока i , и скорости Ω , с коэффициентами передачи соответственно k_u , k_i и k_Ω , блок обработки информации, формирующий сигнал управления преобразовательным устройством $F(u, i, \Omega, u_3)$, где u_3 – сигнал задания.

Управление по критерию эффективного использования энергетического ресурса в мехатронной системе реализуется при обеспечении информационной подсистемой следующих основных функций:

- следящее регулирование тока в функции момента нагрузки с минимальной интегральной квадратичной ошибкой без перерегулирования или с минимальным перерегулированием;
- следящее регулирование скорости (или напряжения) в функции сигнала задания при минимальной интегральной квадратичной оценке переходной составляющей тока;

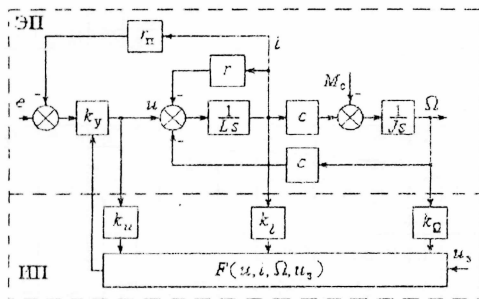


Рис. 2

- формирование ограничений по мгновенному току, действующему значению тока, усредненному на скользящем интервале, и температуре силовых элементов;

- формирование статических характеристик системы, обеспечивающих заданные технологические функции и рациональные режимы работы оборудования.

Для классической системы электропривода с подчиненным регулированием координат получены формулы оптимальных параметров ПИ-регуляторов тока и скорости (при $T_M > T_\Sigma$):

$$k_{\text{PT}} = \frac{r}{k_i k_y}; T_{\text{PT}} = \frac{T_\Sigma T_M}{T_M - T_\Sigma}; k_{\text{PC}} = \frac{ck_i (T_\Sigma + T_M)^2}{2rk_\Omega T_\Sigma T_M}; T_{\text{PT}} = \frac{6T_\Sigma T_M}{T_M - T_\Sigma}.$$

Разработанные методики параметрического синтеза типовых систем электроприводов обеспечивают уменьшение потерь при переходных процессах по сравнению с традиционными настройками до 50 % в электроприводах с подчиненным регулированием координат.

Разработанный программный комплекс параметрического синтеза мехатронных систем, использующий имитационное моделирование типовых структур, обеспечивает определение оптимальных по критерию эффективного использования энергетического ресурса значений параметров регулирующих устройств, а также сравнительный анализ различных технических решений.

5. СИНТЕЗ СТРУКТУР МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ, ЭФФЕКТИВНЫХ ПО КРИТЕРИЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Синтез новых алгоритмов, обеспечивающих эффективное использование энергетических ресурсов в мехатронных системах, предполагает использование нелинейных законов управления. Простым способом снижения потерь в системе является применение дополнительных обратных связей по мощности и мощности потерь. Такие обратные связи могут быть подчиненными или переключаемыми в зависимости от режима работы. При этом обеспечиваются заданные статические характеристики системы и квазиоптимальные по критерию минимума потерь переходные процессы.

На рис. 3 показаны графики переходных процессов в классической следящей системе с подчиненным регулированием координат и системе с подчиненным контуром мощности. За счет обратной связи по мощности потери энергии при переходном процессе уменьшаются в два раза по сравнению со случаем традиционной структуры с оптимальной настройкой при близких показателях качества. При этом диаграммы тока, скорости и положения практически совпадают с графиками оптимальных про-

цессов, теоретически полученными на основе принципа максимума Понтрягина.

Вторым перспективным направлением синтеза алгоритмов управления по критерию эффективного использования энергетических ресурсов является координирующее управление, предусматривающее согласованное взаимодействие в системе нескольких контуров. Для различных приложений разработаны алгоритмы управления, использующие структурно-временную декомпозицию, специальные регулирующие устройства: конкурирующие, корректирующие, координирующие и др., а также многоуровневые структуры.

При использовании конкурирующих регуляторов в мехатронной системе обеспечивается переключение обратной связи в зависимости от значений сигналов, пропорциональных току, мощности или мощности потерь. В любом режиме работы системы в подчиненном контуре регулирования с помощью специального логического устройства всегда включается обратная связь по параметру, имеющему наибольшее по модулю значение, т.е. всегда действует более сильная обратная связь из нескольких возможных вариантов. Переключение параметра обратной связи происходит при равенстве двух переключаемых сигналов, благодаря чему практически отсутствует переходный процесс.

Рациональным техническим решением является применение корректирующего контура регулирования скорости в электроприводе с обратной связью по напряжению. В такой системе содержится три основных регулятора: тока, скорости и напряжения, а также функциональный преобразователь, выполняющий переключение регуляторов. При большой ошибке по

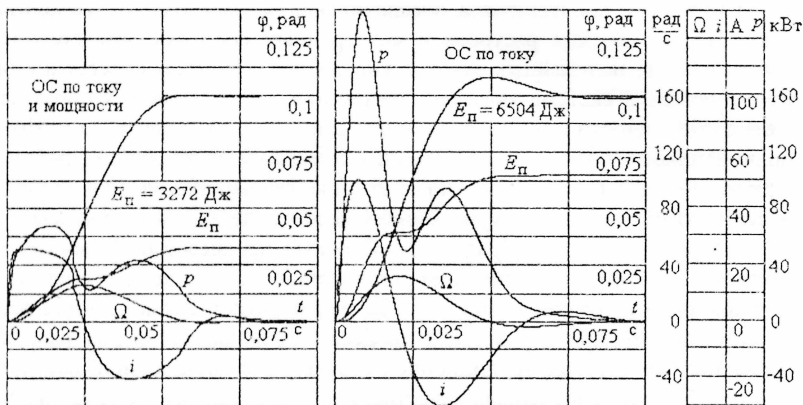


Рис. 3

скорости включается обратная связь по напряжению, а при малой - обратная связь по скорости. В результате обеспечиваются высокие энергетические характеристики при переходных процессах и точность в установившихся режимах. В предложенной системе по сравнению с традиционной потребление энергии при переходном процессе уменьшается в 21 раз, перерегулирование не превышает 8 % (в традиционной системе оно составляет 42 %). Время регулирования при больших отклонениях определяется электромеханической постоянной времени двигателя.

Координирующие астатические регуляторы позволяют разрешить противоречие между точностью и быстродействием системы, с одной стороны, и эффективным использованием энергетического ресурса, с другой стороны, и реализовать гармоничное управление в мехатронных системах. В установившемся режиме в системе осуществляется астатическое регулирование, обеспечивающее компенсацию потерь. При переходных процессах пропорциональный регулятор определяет динамику обмена энергией между элементами системы и источником. В случае если ошибка регулирования ϵ в течение времени $t \geq T_d$ превышает по модулю значение ϵ_0 или совершает незатухающие колебания, что свидетельствует о нарушениях в системе управления или объекте, на выходе регулирующего устройства формируется сигнал об аварийном состоянии системы. Диаграммы переходных процессов в мехатронной системе с координирующим астатическим регулятором при изменении сигнала задания и момента нагрузки показаны на рис. 4. По сравнению с традиционной системой

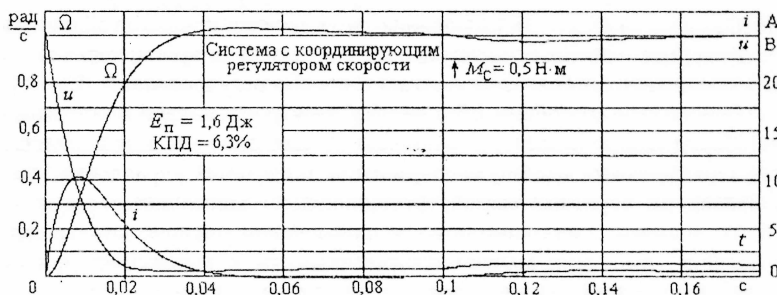


Рис. 4

потребление энергии при переходном процессе уменьшено в 2,5 раза, время регулирования снижено в 1,8 раза, перерегулирование не превышает 4 %.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ЭЛЕКТРОПИТАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Электропотребление в мехатронных системах характеризуется искажениями формы токов и напряжений и сдвигом по фазе основной гармоники тока относительно напряжения в питающей сети. Потери в сети при снижении коэффициента мощности нагрузки возрастают обратно пропорционально его квадрату. Повышение эффективности передачи энергии от источника к потребителю достигается применением компенсирующих устройств для повышения коэффициента мощности и качества электрической энергии, снижением токов, потребляемых электродвигателями, а также использованием алгоритмов управления, обеспечивающих электромагнитную совместимость оборудования.

В основу разработки автоматических регуляторов для быстродействующих тиристорно-реакторных компенсирующих устройств положены следующие технические решения: регулирование квадратурной составляющей основной гармоники тока питающей сети, корреляционный метод измерения регулируемого параметра; совмещение во времени процедур измерения и формирования импульсов управления тиристорами; интегральное преобразование сигналов и их цифровая обработка, предусматривающая микроконтроллерную реализацию. В результате этого обеспечиваются повышенная точность регулирования за счет повышенной точности измерения параметров режима и астатического закона регулирования и высокая помехоустойчивость, обусловленная двойным интегрированием сигналов, пропорциональных составляющим тока. При этом достигается время регулирования 5 мс.

Основными способами обеспечения электромагнитной совместимости оборудования в электромеханических системах являются плавный пуск электрических машин, использование в системах управления электроприводами обратных связей, функционально зависящих от режима работы системы электропитания, и применение технических средств управления, имеющих малую чувствительность к искажениям формы токов и напряжений, отклонениям и колебаниям напряжения.

Для регулирования режима работы синхронных двигателей разработаны автоматические системы, обеспечивающие адаптивное управление компенсацией потери напряжения и реактивного тока в сети при максимальном использовании энергетического ресурса двигателя при приоритетном выполнении приводных функций. В основу принципа действия систем положено регулирование реактивного тока двигателя и напряжения

в сети с адаптивным ограничением в зависимости от величины полного тока.

7. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ, ЭФФЕКТИВНЫХ ПО КРИТЕРИЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕСУРСА

Реализация разработанных методов и алгоритмов управления по критерию эффективного использования энергетических ресурсов предполагает применение специальных технических средств, обеспечивающих реализацию требуемых алгоритмов управления, электромагнитную совместимость оборудования, удовлетворительную работу средств управления при ухудшении электромагнитной среды, высокую надежность при тяжелых условиях эксплуатации и малые потери. В основу разработки новых элементов и средств управления для мехатронных систем положены следующие технические решения: применение перспективных микроконтроллеров, в первую очередь с RISC-архитектурой; объектная ориентация схемотехнических решений; рациональное сочетание аналоговых и цифровых устройств управления; синтез специальных алгоритмов аналогового и цифрового преобразования информации.

Для систем управления электроэнергетическими процессами разработаны новые средства обработки сигналов, отличающиеся повышенным быстродействием, которое достигнуто использованием двух- или многоканальных структур, усреднением на скользящем интервале, а также измерением параметров процессов путем интегрирования за определенную часть периода. Время измерения равно периоду T или части периода ($T/2$, $T/3$, $T/6$) питающей сети. Особый интерес представляет реализация двух-отсчетных измерительных преобразователей, выполняющих точное измерение параметра за период T , например, с помощью корреляционного метода, быстрое измерение параметра, например, с помощью метода интегрирования за часть периода, и выбор результата по определенному алгоритму в зависимости от соотношения выходных сигналов точного и быстрого отсчетов и режима работы системы.

Для управления тиристорными преобразователями разработаны аналого-цифровые и цифровые устройства и системы управления, принцип действия которых основан на интегрировании входных сигналов. Устройства отличаются повышенной помехоустойчивостью, высокой точностью регулирования угла включения и позволяют реализовывать объектно-ориентированные микроконтроллерные схемы тиристорных преобразователей.

Разработанные схемы интегрирующих широтно-импульсных преобразователей характеризуются высокой помехоустойчивостью, линейной статической характеристикой без зоны нечувствительности при малых сигналах и обеспечивают поочередное управление силовыми ключами.

Для контроля и учета расхода электроэнергии разработаны микроконтроллерные приборы и системы, позволяющие объективно оценивать эффективность использования энергетического ресурса.

8. ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕСУРСА

Промышленная реализация принципов управления по критерию эффективного использования энергетических ресурсов в мехатронных системах основана на использовании следующих основных технических решений:

- многоконтурная структура, использующая подчиненное регулирование координат и координирующее управление;
- расширенный информационный ресурс системы управления за счет использования микроконтроллерных средств обработки информации;
- гибкая структура системы управления, предусматривающая программную реализацию объектно-ориентированных вариантов;
- рациональное сочетание аналоговых и цифровых средств управления;
- минимальное количество элементов настройки;
- стабильность характеристик за счет программной реализации основных функций управления;
- специализированный человеко-машинный интерфейс, использующий эффективные средства обработки и представления информации о состоянии системы;
- расширенная диагностика системы и элементов на основе микроконтроллерных средств управления.

Разработанные алгоритмы и технические средства управления реализованы в серийно выпускаемом электрооборудовании для горных машин компанией «Объединенная энергия» (г. Москва) и автоматизированных линий по производству изделий из полимеров ОАО «Владимирский завод полимерного машиностроения «Полимер-Техника».

Продукция компании поставляется на российские предприятия, специализирующиеся на выпуске горных машин: ОАО «Рудгормаш» (г. Воронеж), ОАО «Бузулукский завод тяжелого машиностроения», ОАО

«Ижорские заводы», ОАО «Самараэлектроштит», горно-обогатительные комбинаты: ОАО «Апатит» (г. Кировск), ОАО «Лебединский ГОК» (г. Губкин), ОАО «Оленегорский ГОК» (г. Оленегорск), ОАО «Стойленский ГОК» (г. Старый Оскол), ОАО «Карельский окатыш», угольные разрезы Кузбасса, Саха-Якутии, Тувы, Приморского и Красноярского краев и Казахстана, а также на добывающие предприятия Индии и Монголии.

Опыт эксплуатации различных видов продукции в разных условиях и климатических зонах – от Крайнего Севера до влажных тропиков, накопленный в течение 10 лет, свидетельствует о высоком техническом уровне изделий и больших перспективах их широкого использования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в настоящей работе, позволили получить следующие результаты.

1. Разработаны основы прикладной теории процессов управления по критерию эффективного использования энергетических ресурсов в мехатронных системах. В соответствии с предложенной концептуальной моделью мехатронной системы энергетический ресурс – это источник электрической энергии, обеспечивающий возможность функционирования системы за счет использования внутренних запасов или преобразования энергии какого-либо вида в электрическую, а также устройства ее передачи к потребителю и преобразования параметров. Информационный ресурс системы управления представляет собой реализованную в виде программ искусственную организацию, осуществляющую формирование управляющих воздействий, направленных на сохранение или заданное изменение состояния системы.

2. Сформулированы основные положения синтеза алгоритмов и средств управления, обеспечивающих эффективное использование энергетических ресурсов в мехатронных системах. Реализация указанных управлений осуществляется, во-первых, при учете собственного информационного ресурса объекта и, во-вторых, за счет расширения информационного ресурса системы управления. При этом управление процессами осуществляется как в отдельных подсистемах, так и в системе в целом; величины запаздываний и погрешности при измерениях и обработке сигналов не должны превышать значений, при которых существует принципиальная возможность воздействия на электрические процессы в условиях необратимой диссипации энергии.

3. Для количественной оценки эффективности использования энергетического ресурса введены коэффициенты эффективности использования

активной и полной энергии и коэффициент эффективности преобразования электрической энергии, учитывающие соотношения между затраченной энергией, потерями и изменением электропотребления при отклонениях параметров технологического процесса от заданных значений.

4. Разработана методика анализа и синтеза процессов управления и преобразования энергии в мехатронных системах, основанная на объектно-ориентированном использовании экспериментальных и аналитических методов и имитационного моделирования. При построении математических моделей, а также аналитических исследованиях используется аппарат дифференциальных уравнений, структурных схем и направленных графов. В основу имитационного моделирования положен структурный метод численного решения нелинейных дифференциальных уравнений. Для экспериментальных исследований и идентификации разработаны специализированные измерительные станции.

5. Разработаны и исследованы алгоритмы и специализированные микроконтроллерные технические средства для идентификации параметров электроэнергетических процессов при случайных искажениях формы токов и напряжений. Корреляционный метод измерения параметров основной и высших гармоник напряжения и тока, а также составляющих мощности обеспечивает получение несмещенных оценок с минимальной дисперсией при малой чувствительности к изменениям частоты периодических сигналов и высокой помехоустойчивости. Компьютерный комплекс для исследований энергетических процессов в мехатронных системах имеет двухуровневую структуру с распределенной между ЭВМ и интерфейсными модулями обработкой информации.

6. Разработаны и исследованы новые методы идентификации моментов инерции вращающихся масс приводов по параметрам процессов в электромеханической колебательной системе, выполненной на основе двухфазной синхронной машины с активным ротором, с обратной связью по скорости. Основная приведенная погрешность измерений не превышает 1 % в диапазоне изменений параметра от 2 % до 300 % от собственного момента инерции приводного двигателя. Разработан и реализован метод измерения моментов инерции роторов электрических машин в собранном состоянии.

7. Для повышения эффективности использования энергетического ресурса мехатронной системы предложено расширение информационного ресурса системы управления путем использования информации о нагрузках, шумовых излучениях, температуре, сопротивлении изоляции и ошибках локальных контуров регулирования. Исследованы модели ограниченных, обусловленных возможностями энергетического ресурса. Разработаны и исследованы технические средства для контроля сопротивления

изоляции в системах с преобразователями рода тока, температуры, электрических нагрузок и специальные астатические регуляторы с контролем сигнала ошибки.

8. Выполнены экспериментальные исследования и сравнительный анализ энергетических характеристик мехатронных систем и их элементов (двигателей постоянного тока, тиристорных и транзисторных преобразователей, трансформаторов). Получены количественные оценки коэффициентов эффективности использования активной и полной мощности и преобразования энергии в функции механической нагрузки и скорости двигателя.

9. Для типовых систем электроприводов постоянного тока выполнен анализ закономерностей преобразования энергии при переходных процессах. В электроприводах с обратной связью по скорости при линейных характеристиках элементов потери энергии в переходных процессах определяются величиной и знаком изменения задающего напряжения, моментом нагрузки, их соотношениями и параметрами регуляторов. Энергия, потребляемая из сети, и потери в якорной обмотке возрастают с увеличением коэффициента передачи регулятора скорости по закону, близкому к квадратичному, и прямо пропорциональны моменту инерции вращающихся масс.

10. Разработаны практические методики параметрического синтеза регуляторов по критерию эффективного использования энергетического ресурса для традиционных систем электроприводов с параллельным включением обратных связей, с подчиненным регулированием координат и обратной связью по напряжению. Полученные расчетные формулы для параметров типовых регулирующих устройств обеспечивают формирование динамики мехатронной системы, адекватной динамическим характеристикам и энергетическим возможностям электромеханических преобразователей. В системе электропривода с предложенными настройками энергия, потребляемая из сети при переходном процессе, уменьшается в два раза по сравнению с аналогичной системой при стандартных настройках регуляторов. Разработаны программные средства для параметрического синтеза мехатронных систем.

11. Разработаны и исследованы новые структуры мехатронных систем с управлением по критерию эффективного использования энергетического ресурса. В системах с дополнительными обратными связями по мощности и мощности потерь потребляемая при переходных процессах энергия уменьшается в два раза по сравнению с традиционными структурами при близких показателях качества регулирования. Улучшение показателей качества регулирования при снижении потребляемой энергии в 2,5 раза и более достигается при использовании конкурирующих, коррек-

тирующих и координирующих регулирующих устройств.

12. На основе анализа энергетических процессов в электропитающих устройствах мехатронных систем сформулированы основные положения выбора методов и средств управления энергетическим ресурсом, обеспечивающих повышение эффективности передачи энергии от источника к приводу и электромагнитную совместимость оборудования. Разработаны новые алгоритмы управления и структуры регуляторов для быстроедействующих компенсирующих устройств, возбудителей синхронных двигателей и систем ограничения пусковых токов мощных двигателей.

13. Для реализации методов и алгоритмов управления по критерию эффективного использования энергетических ресурсов в мехатронных системах разработаны и реализованы микроконтроллерные технические средства обработки информации об энергетических процессах, устройства для управления тиристорными и транзисторными преобразователями энергии, приборы контроля и учета электропотребления. Новые элементы и устройства обеспечивают реализацию требуемых алгоритмов регулирования, электромагнитную совместимость оборудования, повышенную помехоустойчивость и высокую надежность при тяжелых условиях эксплуатации.

14. Разработаны, исследованы и реализованы объектно-ориентированные микроконтроллерные системы электроприводов для горнодобывающей промышленности, энергетики и машиностроения.

Основные публикации по теме диссертации

1. Горлов В.Н., Малафеев С.И. Основы вычислительных методов. – Владимир: ВлГУ, 1997. – 172 с.
2. Малафеев С.И., Малафеева А.А. Системы автоматического управления. – Владимир: ВлГУ, 1998. - 152 с.
3. Микроконтроллеры PIC16C84X. Архитектура, программирование и применение / С.И. Малафеев, А.А. Малафеева, В.С. Мамай и др. - Владимир: ВлГУ, 1999. - 180 с.
4. Копейкин А.И., Малафеев С.И. Управляемые электромеханические колебательные системы. – Владимир: Посад, 2001. – 128 с.
5. Малафеев С.И., Мамай В.С., Немонтов В.А. Аналого-цифровая система электропривода опорно-поворотного устройства // Вопросы оборонной техники. Серия 9. 1992. Вып. 2 (198). - С. 19 – 22.
6. Тиристорные агрегаты для возбуждения синхронных двигателей и электропитания аппаратуры управления одноковшовых экскаваторов / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, А.Г. Павлович, Н.А. Серебренников // Промышленная энергетика. 1993. № 2. - С. 26 - 29.

7. Малафеев С.И., Мамай В.С. Широтно-импульсный преобразователь интегрирующего типа // Электротехника. 1993. № 2. - С. 48 - 50.
8. Малафеев С.И., Мамай В.С. Имитационное моделирование процессов в системе электроснабжения // Известия вузов и энергетических объединений СНГ. 1993. № 3 - 4. - С. 31 - 34.
9. Малафеев С.И., Киселева Н.О. Программный комплекс для имитационного моделирования и настройки регуляторов электромеханических систем // Техническая электродинамика. 1993. № 5. - С. 55 - 58.
10. Малафеев С.И., Мамай В.С. Электронные счетчики электрической энергии для промышленных измерений // Приборы и системы управления. 1994. № 1. - С. 23 - 25.
11. Малафеев С.И., Мамай В.С. Тиристорный зарядно-подзарядный преобразователь // Промышленная энергетика. 1994. № 1. - С. 11 - 13.
12. Малафеев С.И., Мамай В.С. Электропривод открывания днища ковша экскаватора // Промышленная энергетика. 1994. № 4. - С. 9 - 10.
13. Копейкин А.И., Малафеев С.И. Измерение моментов инерции с помощью автоколебательной электромеханической системы // Измерительная техника. 1994. № 4. - С. 31 - 32.
14. Малафеев С.И., Мамай В.С., Павлович А.Г. Анализатор электроэнергетических процессов в системах электроснабжения карьеров // Горный вестник. 1994. № 2. - С. 56 - 60.
15. Малафеев С.И. Аналого-цифровые устройства управления тиристорами // Электротехника. 1995. № 1. - С. 50 - 53.
16. Малафеев С.И., Лыков А.Ю., Спорыхин В.В. Исследование системы электропривода с импульсным датчиком скорости с помощью имитационного моделирования // Техническая электродинамика. 1995. № 2. - С. 33 - 35.
17. Малафеев С.И. Измерение синфазной и квадратурной составляющих основной гармоники несинусоидального тока // Электричество. 1995. № 4. - С. 44 - 47.
18. Малафеев С.И., Мамай В.С. Аппаратура управления исполнительными механизмами постоянной скорости // Приборы и системы управления. 1996. № 11. - С. 35 - 36.
19. Малафеев С.И. Автоматическая система управления тиристорно-реакторным компенсатором // Электричество. 1997. № 6. - С. 13 - 18.
20. Малафеев С.И., Мамай В.С., Серебренников Н.А. Система управления возбуждением синхронного двигателя // Промышленная энергетика, 1998. № 8. - С. 21 - 25.
21. Система электроприводов хода бурового станка / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, П.М. Афанасьев и др. // Промышленная энергетика. 1999. № 1. - С. 36 - 38.

22. Малафеев С.И., Лыков А.Ю. Исследование и моделирование моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора // Известия вузов. Приборостроение. 1999. № 3 – 4. - С. 51 – 55.

23. Микроконтроллерное устройство для защиты электрической сети от однофазных замыканий на землю / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, В.И. Микрюков и др. // Электротехника. 2000. № 1. - С. 40 - 42.

24. Копейкин А.И., Малафеев С.И., Галас В.П. Измерение моментов инерции вращающихся элементов электромеханических систем // Привод и управление. 2000. № 2. - С. 28 – 30.

25. Малафеев С.И., Бахирев А.В. Двухканальная система дистанционного контроля температуры // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2000. № 12. - С. 25 – 26.

26. Контроль сопротивления изоляции в электрических сетях с преобразователями рода тока / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, С.В. Кононов и др. // Проектирование и технология электронных средств. 2001. № 3. – С. 48 – 53.

27. Malafeev S.I., Malafeeva A.A. Chaotic movements in nonlinear servomechanisms // 16th International Conference «Hydraulics and pneumatics'98». The Conference Proceeding. Brno. 1998. - P. 203 – 207.

28. Малафеев С.И. Снижение потерь энергии в регулируемых электроприводах // IX Всесоюзная научно-техническая конференция «Электродвигатели переменного тока средней и малой мощности». Тезисы докладов. Суздаль, 12 - 16 марта 1990 г. – Владимир, 1990. - С. 135 - 136.

29. Малафеев С.И. О повышении энергетических характеристик систем приводов для робототехники и автоматизированных производств // V Всесоюзное совещание по робототехническим системам. Тезисы докладов (Геленджик, октябрь 1990г.). Ч. 1. - М., 1990. - С. 147 - 148.

30. Малафеев С.И. Исследование и моделирование электроэнергетических процессов в технических системах с полупроводниковыми преобразователями // Проблемы преобразовательной техники. V Всесоюзная научно-техническая конференция. Киев, 16 - 20 сентября 1991 г. Тезисы докладов. Часть III. Киев: ИЭД АН УССР. 1991. - С. 99 - 101.

31. Малафеев С.И. Идентификация и оптимизация электроэнергетических процессов в нелинейных системах // Состояние и проблемы развития систем автономного электроснабжения. Краткие тезисы докладов к всесоюзному научно-техническому совещанию (Суздаль, 24 - 26 сентября 1991 г.). - Л., 1991. - С. 37.

32. Малафеев С.И. Об использовании биологических критериев качества в автоматических системах управления // Физика и радиоэлектроника в медицине и биотехнологии. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. - Владимир, 18 - 20 мая 1994 г. - Владимир: ВлГТУ. 1994. - С. 154 - 157.

33. Малафеев С.И. Электроприводы постоянного тока для тяжелых условий эксплуатации // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро-технологий» (IX Бенардосовские чтения). – Иванов: ИГЭУ, 1999. – С. 219.

34. Малафеев С.И., Малафеева А.А., Лыков А.Ю. Практические алгоритмы оптимального распределения нагрузки между параллельно работающими агрегатами // Электроника, информатика и управление. Вып. 2. – Владимир: ВлГУ, 2001. – С. 12 –15.

35. Малафеев С.И. Управление по критерию эффективного использования энергетических ресурсов в электромеханических системах // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности. Материалы третьей Российской научно-технической конференции. – Ульяновск: УГТУ, 2001. – С. 121 –124.

36. А. с. 1145438 СССР, МКИ H02P5/06. Электропривод постоянного тока / В.П. Комлев, А.А. Малафеева, С.И. Малафеев. – Оpubл. 15.03.85, № 10.

37. А. с. 1467694 СССР, МКИ H02 M 1/08. Устройство для импульсно-фазового управления тиристором / С.И. Малафеев. - Оpubл. 23.03.89. Бюл. № 11.

38. Патент 1485141 РФ, МКИ G01 R 19/0. Измерительный преобразователь синфазной и квадратурной составляющих основной гармоники несинусоидального тока / С.И. Малафеев, В.С. Мамай. - Оpubл. 07.06.89. Бюл. № 21.

39. Патент 1494167 РФ, МКИ H02 M 1/08. Формирователь импульсов управления тиристором / С.И. Малафеев, В.С. Мамай. - Оpubл. 15.07.89. Бюл. № 26.

40. А. с. 1555674 СССР, МКИ G01 R 19/06. Устройство для измерения активной и реактивной составляющих переменного тока / С.И. Малафеев. - Оpubл. 07.04.90. Бюл. № 13.

41. А.с. 15576773 СССР, МКИ H03 K 7/08. Устройство для управления широтно-импульсным усилителем мощности / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, А.А. Андреев. - Оpubл. 15.04.90. Бюл. № 14.

42. Патент 1584032 РФ, МКИ H02 J 3/18. Регулятор статического компенсирующего устройства / С.И. Малафеев, В.С. Мамай. - Оpubл. 07.08.90. Бюл. № 29.

43. Патент 1594645 РФ, МКИ H02 J 3/18. Автоматический регулятор конденсаторной батареи / С.И. Малафеев, В.С. Мамай. - Оpubл. 23.09.90. Бюл. № 35.

44. Патент 1594646 РФ, МКИ H02 J 3/18. Способ управления компенсирующим устройством / С.И. Малафеев. - Оpubл. 23.09.90. Бюл. № 35.

45. А. с. 1660157 СССР, МКИ Н03 К 7/08. Широтно-импульсный преобразователь для управления усилителем мощности / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, А.М. Лихтциндер. - Оpubл. 30.06.91. Бюл. № 24.

46. А. с. 1689862 СССР, МКИ G01 R 19/06. Измерительный преобразователь составляющих основной гармоники переменного тока / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, М.В. Киров. - Оpubл. 07.11.91. Бюл. № 41.

47. Патент 1697067 РФ, МКИ G05 F 1/70. Регулятор конденсаторной батареи / С.И. Малафеев, В.С. Мамай. - Оpubл. 07.12.91. Бюл. № 45.

48. А. с. 1695479 СССР, МКИ Н02 Р 5/06. Регулируемый электропривод постоянного тока / С.И. Малафеев. - Оpubл. 30.11.91. Бюл. № 14.

49. А. с. 1704145 СССР, МКИ Н02 J 3/18. Автоматический регулятор компенсирующего устройства / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, А.Г. Павлович, Н.А. Серебренников. - Оpubл. 07.01.92. Бюл. № 1.

50. А. с. 1712893 СССР, МКИ G01 R19/06. Преобразователь синфазной и квадратурной составляющих основной гармоники переменного тока / С.И. Малафеев, Т.Ф. Черашева. - Оpubл. 15.02.92. Бюл. № 6.

51. А. с. 1714766 СССР, МКИ Н02 М 1/08. Формирователь импульсов управления для тиристорного преобразователя / С.И. Малафеев, Н.В. Морозова. - Оpubл. 23.02.92. Бюл. № 7.

52. Патент 1718375 РФ, МКИ Н03 К 7/08. Широтно-импульсный модулятор для управления усилителем мощности / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, А.М. Лихтциндер. - Оpubл. 07.03.92. Бюл. № 9.

53. А. с. 1721705 СССР, МКИ Н02 J 3/18. Регулятор компенсирующего устройства / С.И. Малафеев. - Оpubл. 23.03.92. Бюл. № 11.

54. А. с. 1737619 СССР, МКИ Н02 J 3/18. Способ компенсации потерь напряжения в питающей сети / С.И. Малафеев. - Оpubл. 30.05.92. Бюл. № 20.

55. Патент 1739470 РФ, МКИ Н02 Р 9/14. Устройство для возбуждения синхронного двигателя / С.И. Малафеев. - Оpubл. 07.06.92. Бюл. № 21.

56. А. с. 1744769 СССР, МКИ Н02 К 29/14. Вентильный электропривод / С.И. Малафеев, М.В. Андрианов. - Оpubл. 30.06.92. Бюл. № 24.

57. Патент 1764032 РФ, МКИ G 05 В 11/0. Электромеханическая следящая система / С.И. Малафеев. - Оpubл. 23.09.92. Бюл. № 35.

58. Патент 1774821 РФ, МКИ Н02 Р 7/62, Н01 F 7/18. Линейный следящий электропривод / С.И. Малафеев. - Оpubл. 23.10.89. Бюл. № 35.

59. А. с. 1780030 СССР, МКИ G 01 R 19/12. Устройство для измерения скорости изменения переменного напряжения / С.И. Малафеев. - Оpubл. 07.12.92. Бюл. № 45.

60. А. с. 1837394 СССР, МКИ Н03 М 1/60; G01 R 19/06. Преобразователь составляющих основной гармоники переменного тока в код / С.И. Малафеев, В.С. Мамай. - Оpubл. 30.08.93. Бюл. № 32.

61. Патент 20013171 РФ, МКИ G05 F 1/44. Устройство для регулирования переменного напряжения / С.И. Малафеев, В.С. Мамай. - Оpubл. 15.11.93. Бюл. № 41 – 42.

62. Патент 2001498 РФ, МКИ H02 P 5/06. Регулируемый электропривод постоянного тока / С.И. Малафеев. - Оpubл. 15.10.93. Бюл. № 37.

63. Патент 2002294 РФ, МКИ G 05 F 1/44. Устройство для стабилизации переменного напряжения / С.И. Малафеев. - Оpubл. 30.10.93. Бюл. № 39 – 40.

64. Патент 2006058 РФ, МКИ G05 F 1/44. Устройство для ограничения переменного напряжения / С.И. Малафеев. - Оpubл. 15.01.94. Бюл. № 1.

65. Патент 2009455 РФ, МКИ G01 M 1/10. Способ измерения момента инерции твердого тела / А.И. Копейкин, С.И. Малафеев. - Оpubл. 15.03.94. Бюл. № 5.

66. Патент 2009601 РФ, МКИ H02 M 1/08. Формирователь импульсов управления для тиристора / С.И. Малафеев. - Оpubл. 15.03.94. Бюл. № 5.

67. Патент 2018138 РФ, МКИ G01 R 19/06. Устройство для измерения активной и реактивной составляющих тока / С.И. Малафеев. - Оpubл. 15.08.94. Бюл. № 15.

68. Патент 2025890 РФ, МКИ H02 P 7/00. Способ управления синхронным двигателем в режиме колебаний / А.И. Копейкин, С.И. Малафеев. - Оpubл. 30.12.94. Бюл. № 24.

69. Патент 2050550 РФ, МКИ G01 R 11/00. Электронный счетчик электроэнергии / С.И. Малафеев. - Оpubл. 20.12.95. Бюл. № 35.

70. Патент 2050687 РФ, МКИ H02P 7/62. Электропривод колебательного движения / А.И. Копейкин, С.И. Малафеев. - Оpubл. 20.12.95. Бюл. № 35.

71. Патент 2065660 РФ, МКИ H02P 5/06. Автоматизированный электропривод постоянного тока / С.И. Малафеев. - Оpubл. 20.08.96. Бюл. № 23.

72. Патент 2068614 РФ, МКИ H02 P 5/06. Система электропривода / С.И. Малафеев. - Оpubл. 27.10.96. Бюл. № 30.

73. Патент 2068615 РФ, МКИ H02 P 5/06. Экскаваторный электропривод / С.И. Малафеев. - Оpubл. 27.10.96. Бюл. № 30.

74. Патент 2076439 РФ, МКИ H02 P 7/62. Способ формирования колебаний синхронного двигателя // С.И. Малафеев, А.А. Малафеева, А.Ю. Лыков. - Оpubл. 27.03.97. Бюл. № 9.

75. Патент № 2077036 РФ, МКИ G 01 M 1/10. Резонансный способ измерения моментов инерции изделий типа тел вращения / А.И. Копейкин, С.И. Малафеев. - Оpubл. 10.04.97. Бюл. № 10.

76. Патент 2079962 РФ, МКИ H02 P 5/06. Способ управления электроприводом / С.И. Малафеев. - Оpubл. 20.05.97. Бюл. № 14.

77. Патент 2093836 РФ, МКИ G01 R 11/00 Счетчик электрической энергии / С.И. Малафеев, В.С. Мамай. - Оpubл. 20.10.97. Бюл. № 9.

78. Патент 2093839 РФ, МКИ G01R 19/06. Способ измерения активного тока трехфазной сети / С.И. Малафеев. - Оpubл. 20.10.97. Бюл. № 29.

79. Патент 2093840 РФ МКИ G01 R 19/06. Способ измерения активной и реактивной составляющих тока трехфазной симметричной сети / С.И. Малафеев. - Оpubл. 20.10.97. Бюл. № 29.

80. Патент 2093841 РФ, МКИ G01 R 19/06. Измерительный преобразователь гармонических составляющих тока и напряжения / С.И. Малафеев. - Оpubл. 20.10.97. Бюл. № 29.

81. Патент 2103715 РФ, МКИ G05 B11/36. Способ формирования ПИ-закона регулирования / С.И. Малафеев. - Оpubл. 27.01.98. Бюл. № 3.

82. Патент 2103804 РФ, МКИ H03 F 3/217; H03 K 7/08. Усилитель мощности для управления исполнительным двигателем переменного тока / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, А.Ю. Лыков. - Оpubл. 27.01.98. Бюл. № 3.

83. Патент 2122268 РФ, МКИ H02H3/16. Устройство для направленной защиты электрической сети от однофазных замыканий на землю / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, В.И. Микрюков, Н.А. Серебренников. - Оpubл. 20.11.98. Бюл. № 32.

84. Патент 2122277 РФ, МКИ H02 P7/36. Устройство для управления возбуждением синхронного двигателя / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, Н.А. Серебренников. - Оpubл. 20.11.98. Бюл. № 32.

85. Патент 2135764 РФ, МКИ E21 B 47/00. Устройство для измерения глубины скважины при бурении / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, О.Б. Баев, Н.А. Серебренников. - Оpubл. 27.08.99. Бюл. № 24.

86. Патент 2144679 РФ, МКИ G01 R27/18; H02 H3/16. Способ контроля сопротивления изоляции и защиты электрической сети / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, Н.А. Серебренников и др. - Оpubл. 20.01.00. Бюл. № 2.

87. Патент 2150727 РФ, МКИ G05 B 11/36; 23/02. Способ формирования ПИ-закона регулирования и диагностики автоматической системы / С.И. Малафеев, А.А. Малафеева, А.В. Бахирев. - Оpubл. 10.06.00. Бюл. № 16.

88. Патент 2172936 РФ, МКИ G01 M1/10. Способ измерения момента инерции тела / А.И. Копейкин, С.И. Малафеев. - Оpubл. 27.08.01. Бюл. № 24.



Изд. лиц. № 020275 от 13.11.96. Подписано в печать 26.02.02.
Формат 60×84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Times.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 100 экз.
Заказ

ООО «Издательство «Посад»
Адрес: 600001, Владимир, пр-т Ленина, 22