

На правах рукописи

ТИХОМИРОВА Ирина Александровна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ СО СВОЙСТВАМИ СЕЛЕКТИВНОЙ
ИНВАРИАНТНОСТИ К КОЛЕБАНИЯМ МОМЕНТА НАГРУЗКИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2018

Работа выполнена на кафедре «Электроника и микропроцессорные системы»
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Тараракин Сергей Вячеславович.

Официальные оппоненты:

Казанцев Владимир Петрович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации»;

Гасияров Вадим Рашитович, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Южно-Уральский государственный университет (национальный
исследовательский университет)», заведующий кафедрой «Мехатроника и
автоматизация».

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский
университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет
ИТМО).

Защита состоится 19 октября 2018 года в 14-00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.064.02, при ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу:
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского
государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен: http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Tikhomirova_I.A..pdf
Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «___» 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.02
кандидат технических наук

Сидоров Сергей Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Современный этап развития машиностроения характеризуется применением индивидуальных приводных устройств технологических машин широкого спектра действия в различных отраслях промышленности, что позволяет существенно упростить или полностью исключить кинематические передачи между электродвигателем (ЭД) и главным рабочим органом (РО), тем самым снизив габариты и повысив точность работы машин.

Электроприводы постоянного и переменного тока образуют в совокупности с рабочими органами машин электромеханические системы (ЭМС), которые входят как наиболее важные составляющие в такие технологические объекты, как металлорежущие станки, бумагоделательные машины, агрегаты и поточные линии текстильной промышленности, прокатные станы металлургического производства, линии по производству полимерных пленок, химических волокон, механизмы непрерывной подачи, перемещения и наматывания материалов при осуществлении процессов вытягивания, кручения, резания и т.п.

При этом РО, имеющий значительные габаритные размеры, становится доминирующим элементом механической части ЭМС. Наличие дефектов его изготовления, погрешности сборки и монтажа, а также конструктивные особенности становятся причиной появления доминирующих гармонических возмущений момента нагрузки.

Флуктуации момента нагрузки ЭД и, как следствие, скорости РО технологических машин могут вызвать существенные изменения качественных показателей готовой продукции.

Таким образом, обеспечение требуемого качества работы электропривода в широком диапазоне изменения скоростей при условии действия на объект внешних гармонических возмущений является одной из основных проблем современных ЭМС.

Возможным методом компенсации гармонических возмущений момента нагрузки является повышение быстродействия (динамической точности) ЭМС традиционных структур, построенных как на принципах подчиненного регулирования координат, так и на основе использования безынерционных регуляторов состояния (РС) или динамических (полиномиальных) регуляторов «входа-выхода» (ПР) полной размерности. Однако применение данных структурных решений может привести к существенному ухудшению качества отработки управляющего воздействия или к чрезмерным форсировкам ЭД в процессах регулирования скорости и соответствующему сокращению линейной зоны работы системы.

Указанных недостатков лишен принцип селективной (избирательной) инвариантности систем автоматического управления (САУ) к внешним возмущениям, однако степень достижения основного показателя ЭМС – качества отработки возмущения по моменту нагрузки ЭД, а также уровень сложности регуляторов, помехоустойчивость и чувствительность к вариациям

внутренних параметров в традиционных структурных решениях могут не удовлетворить проектировщика.

Цель диссертационной работы: повышение точности управления органами движения технологических машин и улучшение качества выпускаемого продукта в условиях влияния возмущений путем совершенствования структур селективно-инвариантных ЭМС и разработки эффективных методов их параметрического синтеза.

Достижение поставленной цели требует решения следующих **основных задач:**

1. Анализ потенциальных возможностей, определение перспектив и направлений развития селективно-инвариантных (СИ) ЭМС в отношении отработки доминирующих возмущений и улучшения основных показателей качества.

2. Разработка новых структурных решений, расширение функциональных возможностей и сравнительные исследования СИ ЭМС, с различными схемами компоновки внутренней модели возмущений.

3. Разработка методов оперативного автоматизированного расчета управляющих устройств в новых структурных реализациях СИ ЭМС, а также их сравнительные оценки по комплексу определяющих показателей качества.

4. Разработка и реализация принципов адаптивного управления СИ ЭМС, предназначенных для работы в широком скоростном диапазоне.

5. Практическая реализация и экспериментальные исследования ЭМС со свойствами селективной инвариантности к возмущениям момента нагрузки.

Методы исследования. При решении поставленных задач в работе используются методы пространства состояний ТАУ, аппарат теории матриц и передаточных функций, методы модального управления, редуцирования регуляторов и принципы селективной инвариантности. Исследование САУ электромеханическими системами проводится методами вычислительного эксперимента на ЭВМ, а также методами физического моделирования на экспериментальном лабораторном оборудовании.

Научная новизна работы определяется разработкой и реализацией новых подходов к решению проблемы компенсации внешних возмущений по моменту нагрузки ЭД и оптимизации работы системы по выработанному комплексу показателей качества.

1. Разработаны новые структурные решения астатических СИ ЭМС, отличительной особенностью которых является сочетание принципа внутренней модели гармонического возмущения с другими принципами ТАУ – разделением темпов движения, регулированием состояния, полиномиальным регулированием по выходу, подчиненным регулированием с последовательной коррекцией, каскадным регулированием, разделением модели возмущения на отдельные составляющие в контурах управления. Эти разработки позволяют существенно расширить возможности систем в отработке возмущений и в достижении комплекса основных показателей качества.

2. Разработаны процедуры автоматизированного расчета параметров управляющих устройств для новых структур СИ ЭМС, основанные на объединении методов параметрического синтеза безынерционных и динамических регуляторов состояния и «входа-выхода» с методами синтеза каскадных регуляторов и подчиненного регулирования координат, а также на применении метода редуцирования регуляторов путем их структурного представления в канонической форме наблюдаемости. Эти процедуры позволяют существенно облегчить и ускорить определение параметров устройств управления объектами высокого порядка.

3. Разработана методика сравнительной оценки полученных структурных реализаций СИ ЭМС по комплексу определяющих показателей качества, позволяющая выявить их характерные достоинства и недостатки при использовании того или иного сочетания принципов построения систем и облегчающая проектировщику выбор наиболее эффективного структурного решения для конкретной области практического применения электропривода.

4. Предложен универсальный способ адаптивной перестройки параметров управляющего устройства с моделью возмущения в соответствии с изменениями рабочих скоростей ЭП, обеспечивающий компенсацию влияния гармонических колебаний момента нагрузки во всем скоростном диапазоне, а также эффективную отработку полигармонических возмущений с широким спектром гармоник.

Практическая ценность работы определяется следующим:

1. Разработаны вычислительные модели ЭМС, позволяющие проводить их всесторонние компьютерные исследования на ранних стадиях проектирования.

2. Разработана комплексная система оценок определяющих показателей качества разработанных СИ ЭМС, позволяющая выбрать оптимальное структурное решение по заданной схеме компромиссов в конкретных практических применениях.

3. Выполнена аппаратно-программная реализация экспериментального компьютеризированного стенда, позволяющего реализовать комплексные исследования электромеханических систем управления и выполнить всестороннюю оценку их показателей качества.

На защиту выносятся разработанные методы структурно-параметрического синтеза астатических селективно-инвариантных ЭМС, результаты их исследования и практической реализации.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности.

Работа соответствует формуле специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» и ее области исследований, поскольку отражает вопросы математического, имитационного и компьютерного моделирования компонентов электротехнических комплексов и систем, включая разработку, структурный и параметрический синтез алгоритмов эффективного управления электромеханическими системами, их оптимизацию.

Личное участие соискателя. Соискателем лично, под управлением научного руководителя, выполнены все основные исследования и разработки,

составляющие научную новизну и практическую ценность представленной работы.

Оценка эффективности полученных решений методом моделирования осуществлялась при участии Л.Г. Копыловой, А.И. Терехова.

Создание лабораторного стенда и проведение экспериментальных исследований САУ были выполнены совместно с Л.Г. Копыловой, С.А. Самаринским.

Связь с целевыми программами.

Результаты исследований использовались при выполнении НИР:

– по федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2016 годы» по проекту 14.574.21.007 «Разработка энергоэффективной цифровой системы управления многокоординатными обрабатывающими центрами для решения проблемы импортозамещения наукоемких средств металлообработки»;

– по гранту приоритетного направления деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» по проекту №14-19-00972 за 2014-2016 годы «Разработка методов проектирования энергоэффективных электромехатронных систем с инвариантно-робастными свойствами»;

– по проектной части государственного задания Минобрнауки №8.1373.2017/ПЧ «Разработка и микропроцессорная реализация устройств управления мехатронными системами, обеспечивающими достижение заданных робастных, селективно-инвариантных и адаптивных свойств».

Использование результатов работы в учебном процессе.

Основные результаты проведенных исследований использовались при разработке учебных курсов «Теория нелинейных и дискретных систем управления», «Современные проблемы автоматизации и управления», «Мехатроника» для студентов, обучающихся по направлениям «Электроника и наноэлектроника» и «Управление в технических системах».

Апробация работы. Материалы диссертации обсуждались и докладывались на Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии (Бенардосовские чтения)» (ФГБОУ ВПО ИГЭУ, г. Иваново 2015 год); VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (г. Саранск, 2014 год); IX Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (г. Пермь, 2016 год); Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (г. Санкт-Петербург, 2017 год).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, из которых 3 – в журналах, входящих в базу данных Scopus. Получены 4 патента РФ на 6 изобретений, из которых 3 способа и 3 устройства управления ЭМС.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 90 наименований, и 8 приложений. Работа изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 35 рисунков и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена исследованию проблематики колебаний момента нагрузки электродвигателей, оценке эффективности традиционных СИ ЭМС и определению перспектив их дальнейшего развития в направлении повышения степени инвариантности и улучшения других показателей качества.

Показано, что для механической части индивидуальных электроприводов технологических машин (рис. 1, а) характерны полигармонические возмущения момента нагрузки ЭД (рис. 1, б), обусловленные влиянием всех n роторов, среди которых доминирует исполнительный РО и первая гармоника нагрузки с частотой его вращения $M_H = M_0 + \sum_{i=1}^n M_i \sin(\omega_i t) \approx M_0 + M_1 \sin(\omega_1 t)$, где M_0 – постоянная составляющая; M_i и ω_i – амплитуда колебаний момента и скорость вращения РО.

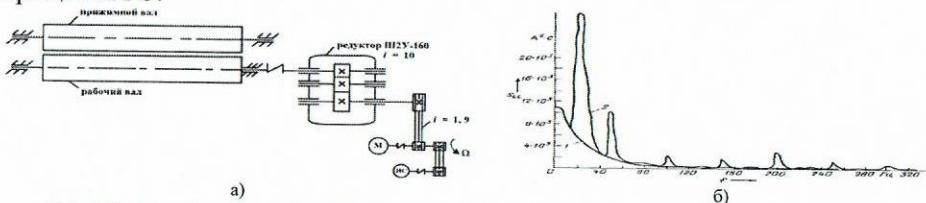


Рис. 1 Схема механической части двухвальной плюсочки с индивидуальным приводом (а) и спектрограмма тока якоря в электроприводе (б): 1 – случайная составляющая; 2 – случайная и периодическая составляющие

Эти возмущения существенно затрудняют повышение точности движений РО и, как следствие, улучшение качественных показателей выпускаемой продукции.

На примере решения задачи регулирования скорости типового ЭП с одномассовой (жесткой) механической частью выполнен структурно-параметрический синтез и сделана сравнительная оценка эффективности отработки управляющего и возмущающего воздействий традиционными ЭМС, построенными на базе каскадных регуляторов тока-скорости, полноразмерных безынерционных и динамических регуляторов состояния.

Установлено, что попытки снижения уровня пульсаций скорости РО путем увеличения общего петлевого усиления ЭМС приводят к чрезмерным форсировкам ЭД в процессах регулирования скорости и соответствующему сокращению размеров линейной зоны работы системы.

Проведенный сравнительный анализ показал, что наиболее эффективная компенсация гармонического воздействия определенной частоты ω в установившемся режиме работы ЭМС может быть обеспечена при использовании принципа селективной (избирательной) инвариантности САУ, основанного на использовании внутренней модели возмущений (МВ).

Развитие теории инвариантности связано с именами Г.В. Щипанова, В.С. Кулебакина, Н.Н. Лузина, П.И. Кузнецова, Б.П. Петрова, А.Ю. Ишлинского, В.А. Якубовича, А. И. Кухтенко, В.В. Величко, А.Р. Гайдука, Г.К. Гудвина, С.Ф. Гребе, М.Э. Сальгадо, Б.Р. Андриевского, А. Френсиса, М. Уонема, Л.И. Розоноэра и других ученых.

Типовым решением поставленной задачи является ЭМС, представленная на рис. 2, имеющая контур управления с объединенным ПР «входа-выхода», содержащем в своем составе МВ с формирующим полиномом $G(s) = s^2 + \omega_1^2$.

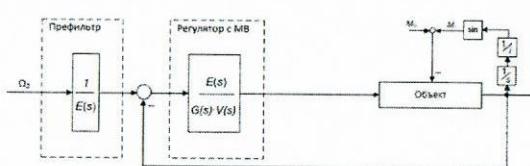


Рис. 2 Структурная схема традиционной СИ ЭМС

Здесь приняты обозначения: $E(s)$ – полином числителя ПФ регулятора, $V(s)$ – вспомогательный полином, обеспечивающий техническую реализуемость регулятора.

Сравнительный анализ частотных портретов исследуемых вариантов систем (рис. 3) позволил установить высокую эффективность СИ ЭМС не только на частоте ω_1 настройки МВ, но и на других частотах, включая нулевую частоту (постоянную составляющую возмущения), что придает ей способность лучше отрабатывать несинусоидальные периодические возмущения момента нагрузки с широким спектром гармоник.

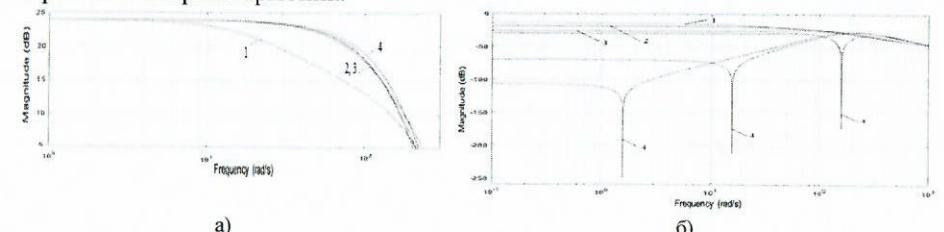


Рис. 3 Амплитудно-частотные характеристики по управляющему (а) и по возмущающему (б) воздействиям для ЭМС: с РТ и РСК (графики 1), с РС (графики 2), с ПР (графики 3) и с внутренней МВ (графики 4)

Однако в силу ограниченного набора используемых принципов управления возможности типовых СИ ЭМС в улучшении инвариантных свойств, обеспечении эффективности в широком скоростном диапазоне, перераспределении акцентов на различные показатели качества оказываются исчерпанными. Кроме того, для них характерны повышенная сложность управляющих устройств, чувствительность к вариациям внутренних параметров и пониженная помехоустойчивость.

Дальнейшее развитие СИ ЭМС предложено осуществлять путем их структурного совершенствования на основе расширенного состава используемых принципов управления (разделения движений и локализации, регулирования состояния, каскадного и подчиненного регулирования координат, разделения модели возмущения, адаптивного управления и др.), разработки более эффективных управляющих устройств и методов их автоматизированного синтеза.

Во второй главе диссертации выполняется структурно-параметрический синтез и проводятся сравнительные исследования различных вариантов астатических СИ ЭМС с объединенной моделью возмущения, сформированных на основе расширенного состава принципов управления. Разрабатывается методика сравнения и структурной оптимизации систем по заданному комплексу определяющих критерии качества.

При синусоидальном внешнем воздействии с постоянным смещением полином, формирующий модель возмущения, приобретает вид

$$G(s) = s \cdot (s^2 + \omega_1^2),$$

отражающий наличие в регуляторе интегральной и колебательной составляющих управления.

В этом случае синтез объединенного регулятора в типовой структуре СИ ЭМС (рис. 2), обозначенной как О(ПРМВ), осуществляется путем решения полиномиального уравнения вида

$$A(s) \cdot s \cdot F(s) + B(s) \cdot E(s) = D(s),$$

где $E(s)$ и $s \cdot F(s)$ – полиномы числителя и знаменателя передаточной функции (ПФ) регулятора, $D(s)$ – желаемый характеристический полином.

Существенное упрощение регулятора достигается в системе, обозначенной как ПРМВ-РС(б), структурная схема которой представлена на рис. 4, а.

Она содержит «быструю» внутреннюю подсистему на базе безынерционного РС,

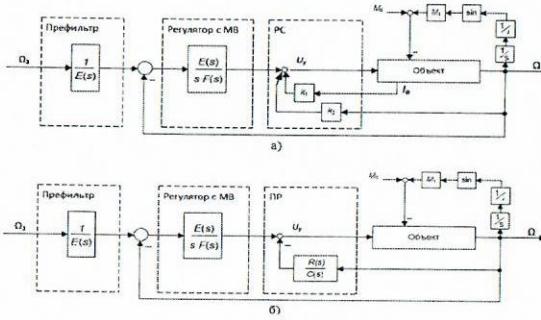


Рис. 4 Структурные схемы различных вариантов астатических СИ ЭМС

настраиваемую на быстродействие в (5-7) раз выше, чем у внешнего контура. При расчете внешнего ПР с МВ здесь используется уравнение синтеза

$$P(s) \cdot s \cdot F(s) + Q(s) \cdot E(s) = D(s),$$

где $P(s)$ и $Q(s)$ – характеристический полином и полином воздействия ПФ внутренней подсистемы, которая может быть принята безынерционной.

Тот же принцип разделения движения (РД) может быть реализован в системе, обозначенной как ПРМВ-ПР(б) при измерении лишь выходной координаты объекта (рис. 4, б). В этом случае «быстрая» внутренняя подсистема строится на основе ПР по уравнению синтеза

$$A(s) \cdot C(s) + B(s) \cdot R(s) = P(s),$$

где $R(s)$ и $C(s)$ – полиномы числителя и знаменателя ПФ регулятора. Расчет внешнего ПР с МВ осуществляется так же, как это выполнялось для предыдущей структуры.

ЭМС типа ПРМВ-ПР(б) лучше отрабатывает возмущения по моменту нагрузки, но ее помехоустойчивость при этом снижается.

Повысить устойчивость разрабатываемых ЭМС к воздействию помех в измерительных каналах оказывается возможным путем определенного снижения темпа процессов внутренних подсистем с РС и ПР (рис. 4 б, в). При этом умеренно (в 2-2,5 раза) ускоренная внутренняя подсистема аппроксимируется апериодическим звеном первого порядка, после чего осуществляется синтез внешнего ПР, содержащего МВ. Синтезированные по такому принципу последовательной коррекции варианты СИ ЭМС обозначены в работе соответственно как П(ПРМВ-РС) и П(ПРМВ-ПР).

Однако применение принципа последовательной коррекции (П) из-за погрешностей аппроксимации внутренних подсистем звеньями более низкого порядка ухудшает отработку возмущений по моменту нагрузки в сравнении с другими вариантами СИ ЭМС. Кроме того, возрастает суммарный порядок звеньев регуляторов таких систем.

Определенный компромисс между чувствительностью к помехам и к вариациям внутренних параметров могут представлять системы, построенные по аналогичному каскадному принципу (рис. 4 а, б), но без понижения порядка и аппроксимации внутренних подсистем регулирования скорости.

Синтез таких вариантов СИ ЭМС, обозначенных как К(ПРМВ-РС) и К(ПРМВ-ПР), проводится в два этапа по направлению от внешнего контура к внутреннему. На первом этапе при решении уравнения синтеза

$$P(s) \cdot s \cdot F(s) + Q(s) \cdot E(s) = D(s)$$

вычисляются значения коэффициентов полинома $E(s)$ регулятора с МВ, а также величина среднегеометрического корня полинома $P(s)$, определяющая компромиссное быстродействие внутренней подсистемы.

На втором этапе синтезируются регуляторы внутренней подсистемы (РС или ПР). При этом в качестве желаемого принимается полином $P(s)$, полученный на первом этапе синтеза.

Объединение модальных методов параметрического синтеза регуляторов состояния и «входа-выхода» с методами синтеза каскадных регуляторов, а также использование современных компьютерных программ обеспечивают оперативный автоматизированный расчет параметров управляющих устройств во всех предложенных структурах СИ ЭМС.

Конкретные выражения ПФ и параметров регуляторов синтезированных систем при управлении единым электромеханическим объектом представлены в табл. 1.

Таблица 1. Структуры и параметры синтезированных регуляторов

№ САУ	Тип САУ	Исп. принципы управления	Структура и параметры регулятора	
1	О(ПРМВ)	ПР, МВ	$\frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{14,055s^4 + 4275,467s^3 + 685261,526s^2 + 57562089,6s + 2014679638,06}{s \cdot (s^2 + 1,57) \cdot (s + 1210)}$	
2	ПРМВ-(РС)б	РС, РД, ПР, МВ	$K = [-0,177 - 7,7]; \frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{2700s^2 + 315881,04s + 12320100}{s \cdot (s^2 + 1,57^2)}$	
3	ПРМВ-(РД)б	РД, МВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,0264s^2 + 7,536}{0,0005s + 1}; \frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{2700s^2 + 315881,04s + 12320100}{s \cdot (s^2 + 1,57^2)}$	
4	П(ПРМВ-РС)	П, РС, ПР, МВ	$K = [-0,084 - 1,59]; \frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{5,33s^3 + 157497s^2 + 157495,89s + 5906250}{s \cdot (s^2 + 1,57^2)}$	
5	П(ПРМВ-ПР)	П, ПР, МВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,0123s^2 + 0,593}{0,0005s + 1}; \frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{5,33s^3 + 1574,97s^2 + 157495,89s + 5906250}{s \cdot (s^2 + 1,57^2)}$	
6	К(ПРМВ-РС)	КР, РС, ПР, МВ	$K = [-0,14 - 4,64]; \frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{2,85s^3 + 1369,9s^2 + 123284,6s + 4438668,94}{s \cdot (s^2 + 1,57^2)}$	
7	К(ПРМВ-ПР)	КР, ПР, МВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,021s + 4,64}{0,0005s + 1}; \frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{2,85s^3 + 13699s^2 + 1232846s + 443866894}{s \cdot (s^2 + 1,57^2)}$	

Существенное снижение степени сложности полученных структур СИ ЭМС может быть достигнуто применением предложенного метода редукции «технически реализуемых» ПР «входа-выхода» на основе двухходовой (расширенной) канонической формы наблюдаемости (КФН) по схеме, представленной на рис. 5.

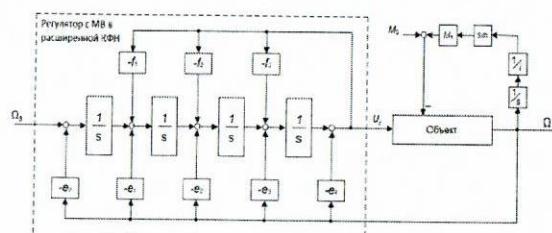


Рис. 5 Структурная схема объединенного регулятора в расширенной КФН

Путем проведения вычислительных экспериментов с моделями синтезированных систем выполнено их сравнительное исследование по комплексу определяющих показателей качества. Оценивались раздельная отработка постоянной и колебательной

составляющих момента нагрузки, диапазон допустимых (по условиям устойчивости) вариаций момента инерции РО и максимальное значение запаздывания сигнала в силовом преобразователе, а также помехоустойчивость к воздействию «белого шума» и суммарный порядок динамических звеньев регулятора (степень сложности).

Полученные результаты наглядно отражают достоинства, недостатки и области предпочтительного использования разработанных вариантов СИ ЭМС, что существенно облегчает выбор структурного решения по заданной схеме компромиссов в конкретных практических применениях.

В третьей главе диссертации выполняются структурно-параметрический синтез и сравнительные исследования вариантов СИ ЭМС, сформированных с использованием дополнительного принципа разделения модели возмущения (PMB) на интегральную и колебательную составляющие при их попарном переносе в состав «быстрой» внутренней подсистемы.

Соответствующие структурные решения СИ ЭМС, полученные при переносе во внутренний контур управления интегральной и колебательной составляющих МВ, в том числе по способу, изложенному в патенте РФ на изобретение № 2608081, представлены на рис.6 (а, б) и (в).

Названия полученных структурных решений СИ ЭМС сформированы аналогично вариантам систем с объединенной моделью возмущения с тем отличием, что индексами «и» и «к» отмечено соответственно наличие интегральной и колебательной составляющих МВ в регуляторах внешней или внутренней подсистем.

При введении интегральной составляющей в структуру внутренней подсистемы синтез астатического РС_и ведется модальным методом расширенного пространства состояний объекта, а синтез астатического ПР_и осуществляется путем решения полиномиального уравнения вида

$$A(s) \cdot s \cdot C(s) + B(s) \cdot R(s) = P(s).$$

При расчете регулятора РР_к внешнего контура с колебательной составляющей МВ используется полиномиальное уравнение синтеза

$$P(s) \cdot F(s) + Q(s) \cdot E(s) = D(s).$$

При использовании принципа подчиненного регулирования с разделением модели возмущения появляется возможность аппроксимации внутренней подсистемы апериодическим звеном не только 1-го, но и 2-го порядка –

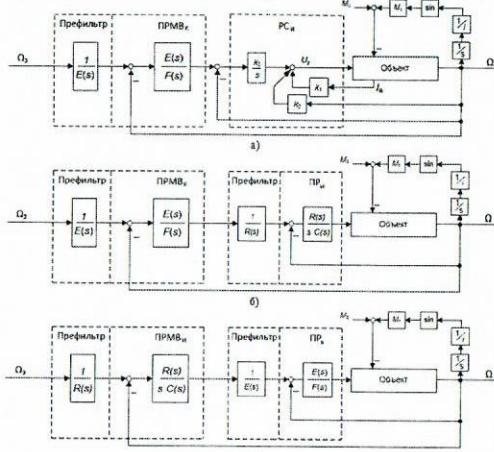


Рис. 6 Структурные схемы различных вариантов астатических СИ ЭМС с разделенной МВ

для повышения точности. Соответствующий вариант СИ ЭМС обозначен в работе как П2(ПРМВ_к-РС_и).

При переносе колебательной составляющей МВ в «быструю» внутреннюю подсистему расчет ее регулятора ПРМВ_к осуществляется решением полиномиального уравнения

$$A(s) \cdot F(s) + B(s) \cdot E(s) = P(s),$$

а для синтеза внешнего регулятора ПР_и используется следующее уравнение синтеза

$$P(s) \cdot s \cdot C(s) + Q(s) \cdot R(s) = D(s).$$

Полная информация о структурах и параметрах регуляторов, синтезированных для управления единым электромеханическим объектом различными вариантами СИ ЭМС, представлена в табл. 2.

Таблица 2. Структуры и параметры синтезированных регуляторов с разделенной МВ

№ САУ	Тип САУ	Исп. принципы управления	Структура и параметры регулятора
1	ПРМВ _к - (РС _и) _б	РС, РД, ПР, РМВ	$K = [-0,4 \ -48 \ -13424]; \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{160s + 6397,535}{(s^2 + 1,57^2)}$
2	ПРМВ _к - (ПР _и) _б	ПР, РД, РМВ	$\frac{R(s)}{s \cdot C(s)} = \frac{75,753s^2 + 39456,328s + 7432506,236}{s \cdot (s + 2950)}, \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{160s + 6397,535}{(s^2 + 1,57^2)}$
3	П(ПРМВ _к - РС _и)	П, РС, ПР, РМВ	$K = [-0,18 \ -10,53 \ -1377,68]; \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{1,106s^2 + 246,387s + 9607,213}{(s^2 + 1,57^2)}$
4	П ₂ (ПРМВ _к - РС _и)	П, РС, ПР, РМВ	$K = [-0,18 \ -10,53 \ -1377,68]; \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,0001s^3 + 0,56s^2 + 156,04s + 5849,785}{(s^2 + 1,57^2) \cdot (0,0005s + 1)}$
5	П(ПРМВ _к - ПР _и)	П, ПР, РМВ	$\frac{R(s)}{s \cdot C(s)} = \frac{32,8829s^2 + 11623,763s + 1,468}{s \cdot (s + 1950)}, \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{1,106s^2 + 246,387s + 9607,213}{(s^2 + 1,57^2)}$
6	К(ПРМВ _к - РС _и)	КР, РС, ПР, РМВ	$K = [-0,14 \ -6,21 \ -627,07]; \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,0019s^3 + 1,159s^2 + 194,375s + 6995,935}{(s^2 + 1,57^2) \cdot (0,0005s + 1)}$
7	К(ПРМВ _к - ПР _и)	КР, ПР, РМВ	$\frac{R(s)}{s \cdot C(s)} = \frac{19,902s^2 + 5601,9s + 559479,3}{s \cdot (s + 1950)}, \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,002s^3 + 1,159s^2 + 194,375s + 6995,9}{(s^2 + 1,57^2) \cdot (0,0005s + 1)}$
8	ПР _и - (ПРМВ _к) _б	ПР, РД, РМВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{55483119209,648}{s}, \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{184,983s^3 + 170967,568s^2 + 77060211,62s + 1387083975}{(s^2 + 1,57^2) \cdot (s + 4450)}$

Степень сложности управляемых устройств в полученных системах также может быть снижена путем их представления в КФН по схеме рис. 5. Однако, определенным недостатком регуляторов, представленных в расширенной КФН, является более сложная процедура их программной реализации.

Методом компьютерного моделирования с постановкой вычислительных экспериментов проведены сравнительные исследования разработанных систем по всему комплексу определяющих показателей качества. Установлено, что применение принципа РМВ позволяет достичь гораздо большего разнообразия значений показателей качества при существенном улучшении отработки возмущений по моменту нагрузки ЭД. Приведенные на рис. 7 частотные портреты всех синтезированных систем позволяют сделать их сравнительную оценку по эффективности отработки возмущений в широком диапазоне скоростей электроприводов.

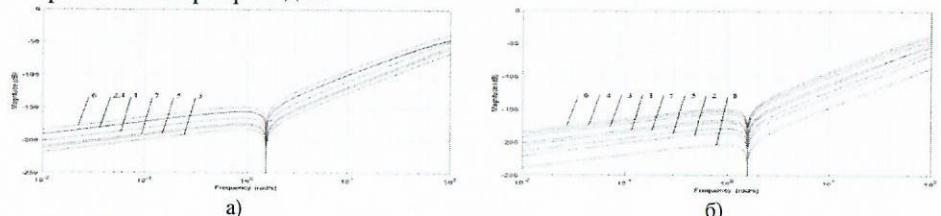


Рис. 7 Амплитудно-частотные характеристики по возмущающему воздействию для ЭМС: а – астатических с единой МВ; б – астатических с разделиной МВ (номера графиков соответствуют номерам систем в табл. 1, 2)

Проведенные исследования также показали, что с увеличением порядка динамической составляющей МВ, вводимой в состав «быстрой» подсистемы, возрастает чувствительность СИ ЭМС к влиянию факторов, не учтенных при ее синтезе, в частности к запаздыванию сигнала в силовом преобразователе. Это делает более предпочтительными те варианты СИ ЭМС, в которых внутренняя подсистема содержит более простую интегральную составляющую МВ.

На примере двухканального электропривода технологического агрегата для обработки ленточного материала показана высокая эффективность разработанных СИ ЭМС в отработке несинусоидальных периодических возмущений моментов нагрузки ЭД с широким спектром гармоник при многократном снижении отклонений натяжения обрабатываемого полотна.

В четвертой главе диссертации решается задача адаптивной перестройки параметров управляющего устройства с МВ в соответствии с изменениями рабочих скоростей ЭП для более полной компенсации возмущений по моменту нагрузки во всем скоростном диапазоне.

На примере системы, обозначенной как К(ПРМВ-РС) и представленной на рис. 4, а, показано, что при изменении уровня скорости ЭП относительно величины, принятой при настройке регулятора с МВ, степень подавления гармонических возмущений снижается (рис. 8).



Рис. 8 Переходные процессы для системы К(ПРМВ-РС) при работе на номинальной скорости $\Omega = 157$ рад/с

Разработанный и признанный изобретением согласно патенту РФ № 2565490 способ адаптивной компенсации влияния гармонических колебаний момента нагрузки в ЭМС предполагает одновременную коррекцию коэффициентов регулятора и внеконтурного формирователя в соответствии с изменениями угловой скорости РО – ω_1 .

Решение полиномиального уравнения синтеза регулятора внешнего контура управления для системы К(ПРМВ-РС) позволяет получить выражения коэффициентов полиномов передаточных функций $E(s)$ и $F(s)$ с возможностью их изменения в соответствии с текущим уровнем угловой скорости РО

$$e_0 = \frac{d_0}{b_0}; e_1 = \frac{d_1 - \frac{d_4}{4} \omega_1^2}{b_0}; e_2 = \frac{d_2 - d_4 \omega_1^2}{b_0}; e_3 = \frac{d_3 - \frac{d_4}{4} \omega_1^2}{b_0}, f_0 = \omega_1^2,$$

где коэффициенты d_0, d_1, d_2, d_3 и d_4 соответствуют желаемому ХП синтезируемой системы $D(s)$ с принятым при настройке значением Ω_0 , b_0 – свободный член полинома числителя ПФ исходного объекта. Такие же зависимости $e_1(\omega_1), e_2(\omega_1), e_3(\omega_1)$ присущи и полиному внеконтурного формирователя (рис. 9).

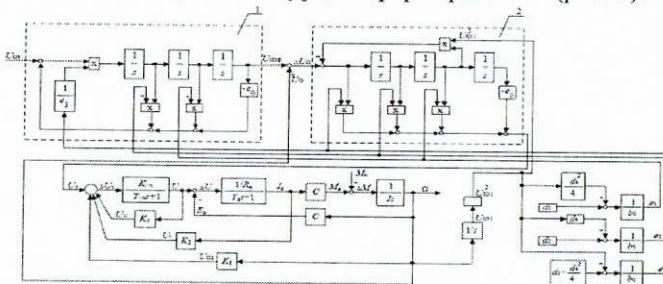


Рис. 9 Структурная схема системы управления с каналом адаптации

В данной системе текущее значение скорости рабочего органа вводится в управляющее устройство как переменная, в зависимости от которой перестраиваются коэффициенты внеконтурного формирователя и регулятора с внутренней моделью возмущения.

Для удобства сопряжения канала адаптации с блоками формирователя

$\frac{1}{E(s)}$ и регулятора $\frac{E(s)}{s \cdot F(s)}$ последние могут быть выполнены в КФУ.

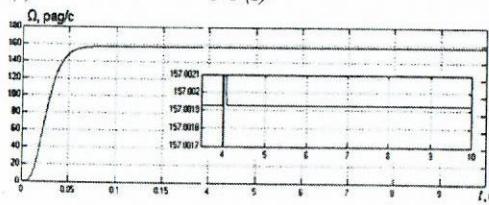


Рис. 10. Переходные процессы по скорости в адаптивной ЭМС при $\Omega = 157$ рад/с.

Одновременная согласованная перестройка параметров внутренней МВ других звеньев управляющего устройства позволяет сохранять не только устойчивость, но и заданное качество переходных процессов адаптивной СИ ЭМС в широком диапазоне скоростей.

Это иллюстрируют переходные характеристики, полученные путем компьютерного моделирования системы при воздействии гармонического момента нагрузки на скорость, многократно (в 10 раз) превышающей расчетное значение (рис. 10).

Предложенный способ адаптивной компенсации влияния гармонических возмущений носит универсальный характер и может быть применен ко всем синтезированным ранее структурам СИ ЭМС.

Так же с применением адаптивной перестройки параметров МВ будет достигнута эффективная отработка не только синусоидальных, но и сложных несинусоидальных периодических возмущений с широким спектром гармоник, что подтверждается высоким качеством работы полученных ранее вариантов СИ ЭМС в широком частотном диапазоне и наглядно иллюстрируется их частотно-временным анализом, проведенным в главе 3.

В пятой главе на основе применения принципов физического моделирования ЭМС в реальном масштабе времени осуществляется аппаратно-программная реализация и комплексные экспериментальные исследования различных вариантов селективно-инвариантных мехатронных систем.

Основной задачей экспериментальных исследований является оценка эффективности разработанных модификаций СИ ЭМС в условиях воздействия возмущений характерных для реальных технологических объектов.

Практическая реализация и экспериментальные исследования разработанных СИ ЭМС проводились на базе лабораторного стенда (рис. 11) с использованием технологии быстрого прототипирования (Rapid Control Prototyping (RCP)), реальных компонентов ЭП, а также микропроцессорного контроллера и управляющей ЭВМ.

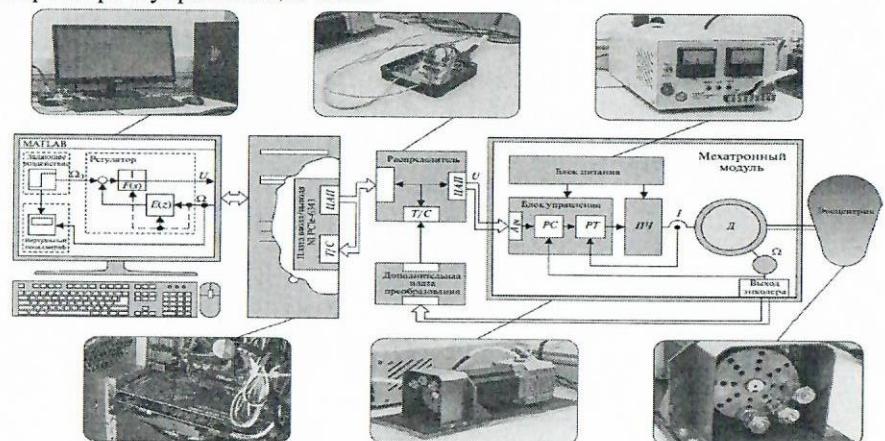


Рис. 11. Функциональная схема и внешний вид основных элементов стенда, разработанного с использованием технологии быстрого прототипирования. РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; ПЧ – преобразователь частоты; Д – двигатель; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; Т/С (Timer/Counter) – таймер/счетчик; АИ – аналоговый вход; $F(s), E(z)$ – полиномы регулятора внешнего контура; Ω_d, Ω – заданное и текущее значение угловой скорости двигателя; U – напряжение управления; I – ток двигателя.

В структуру экспериментального стенда входят:

- электромеханическая часть, состоящая из интегрированного сервопривода серии СПШ, выполненного на базе ЭД переменного тока и преобразователя частоты, в котором используется векторное управление переменными;
- микропроцессорная часть, включающая в свой состав схему аналогового и дискретного ввода-вывода, плату сопряжения NI PCIe-6343, имеющую интерфейс PCI Express;
- информационно-вычислительная часть, состоящая из ЭВМ с программным комплексом MATLAB, включающим библиотеку реального времени Real-Time Windows Target, обеспечивающую выполнение моделей пакета Simulink в реальном времени в среде операционной системы Windows при взаимодействии с внешними объектами.

Для проведения экспериментов использовалась ЭМС, включающая внутренние контуры управления, построенные по принципу подчиненного регулирования координат на базе регуляторов тока и скорости и внешний контур управления, содержащий математическую модель гармонической составляющей момента нагрузки и имеющий структуру ПР входа-выхода.

Регуляторы внутренних контуров реализованы в блоке управления мехатронного модуля и построены с помощью специализированной программы «Мотомастер» посредством технологического USB-интерфейса.

Для создания внешнего гармонического возмущения на вал двигателя устанавливался механический эксцентрик. Изменяя взаимное расположение и вес дополнительных грузов эксцентрика можно влиять как на амплитуду гармонических составляющих момента нагрузки, так и на состав гармоник. Дополнительное гармоническое возмущение на валу двигателя оказывает существенное влияние на скорость его вращения (рис. 12, а).

Регулятор внешнего контура выполнен в виде блок-схемы средствами Simulink программного комплекса MATLAB.

Стендовым испытаниям был подвергнут адаптивный вариант системы. На рис. 12, б, в приводятся графики переходного процесса при пуске с достижением скорости 40 рад/с и 20 рад/с соответственно. Период дискретизации информационно-управляющих сигналов составляет 1 мс. Гармоническое возмущение в ходе эксперимента действовало постоянно. Канал адаптации (см. рис. 11) при этом активизировался, а параметры модели возмущения автоматически перестраивались при изменениях рабочей скорости.

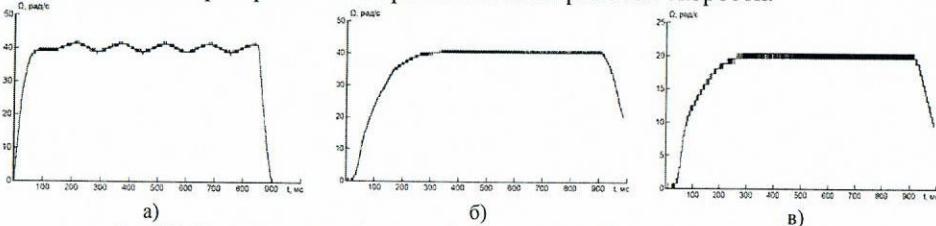


Рис. 12. Результаты экспериментальных исследований исследуемой системы

Полученные графики переходных процессов, показывают высокое качество отработки возмущений по моменту нагрузки и стабильные динамические показатели системы в широком скоростном диапазоне.

Аналогичным образом на экспериментальном стенде исследовались другие варианты СИ мехатронных систем различной степени сложности. Они в значительной степени подтвердили полученные ранее результаты моделирования и вычислительных экспериментов, но позволили отразить специфику работы реальных физических элементов ЭМС (исполнительного двигателя, управляемого преобразователя, аналоговых и дискретных датчиков) в условиях воздействия на мехатронный модуль реальных возмущений.

Заключение

1. Флуктуации моментов нагрузки и, как следствие, колебания угловых скоростей электродвигателей и рабочих органов технологических машин могут приводить к существенному ухудшению потребительских свойств выпускаемой продукции из-за снижения точности изготовления изделий, погрешностей формирования их геометрических и весовых параметров, нестабильности оптических, электротехнических и других показателей качества.

2. Наиболее высокими потенциальными возможностями в отработке внешних гармонических воздействий обладают ЭМС, построенные по принципу селективной (избирательной) инвариантности с использованием внутренней модели возмущения.

Однако в своих традиционных исполнениях СИ ЭМС имеют ряд существенных недостатков, к которым следует отнести: повышенную сложность управляющих устройств и чувствительность систем к вариациям внутренних параметров, пониженную помехоустойчивость, а также ограниченные возможности дальнейшего улучшения инвариантных свойств и их дополнения другими показателями качества по желанию проектировщика.

3. Сочетание принципа селективной инвариантности с такими принципами ТАУ, как разделение темпов движения локальных подсистем управления, регулирование состояния по внутренним координатам и по выходу САУ, каскадное и подчиненное регулирования координат, а также разделение модели возмущения на отдельные составляющие с их перемещением в контуры «быстрых» и «медленных» подсистем, позволяет получить новые структурные решения СИ ЭМС, более эффективные в достижении заданного качества управления.

При этом эффект компенсации гармонического возмущения достигается не только на частоте настройки его модели, но в значительной мере сохраняется и на других частотах в скоростном диапазоне ЭМС, подтверждая робастные свойства синтезированных систем.

4. Объединение модальных методов параметрического синтеза безынерционных и динамических регуляторов состояния и «входа-выхода» с методами синтеза каскадных регуляторов и подчиненного регулирования координат, а также применение метода редуцирования регуляторов на основе их структурного представления в канонической форме наблюдаемости позволяет

реализовать оперативный автоматизированный расчет параметров управляющих устройств для всех разработанных структур СИ ЭМС.

5. Результаты проведенных компьютерных исследований разработанных вариантов СИ ЭМС по комплексу показателей качества отражают их достоинства, недостатки, определяют области предпочтительного использования, чем облегчают проектировщику выбор оптимального структурного решения по заданной схеме компромиссов в конкретных практических применениях электропривода.

6. Реализация принципа адаптации с использованием предложенного алгоритма перестройки параметров управляющих устройств с моделью возмущения в зависимости от уровня рабочей скорости электропривода позволяет обеспечить наиболее полную компенсацию гармонических колебаний момента нагрузки электродвигателя в широком скоростном диапазоне с сохранением условий устойчивости системы.

7. Разработанный экспериментальный стенд, содержащий реальные устройства силовой и информационно-управляющей электроники, исполнительные электродвигатели с источниками механических колебаний нагрузки, и полученные результаты проведенных натурных испытаний СИ ЭМС, подтверждают практическую реализуемость предложенных научно-технических решений и их высокую эффективность в достижении поставленной цели диссертационной работы.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах

Статьи в изданиях по перечню ВАК РФ

1. S. V. Tararykin, L. G. Kopylova, I. A. Tikhomirova Structural and parametric synthesis and optimization of controllers of selective-invariant electromechanical systems with harmonic load torque // Russian Electrical Engineering, 2015, No. 5, pp. 296 – 303.

2. Тихомирова И. А., Копылова Л. Г., Таraryкин С. В. Анализ структурных реализаций селективно-инвариантных электромеханических систем // Вестник ИГЭУ – 2015. №5. – С. 47 – 54.

3. S. V. Tararykin, I. A. Tikhomirova, L. G. Kopylova Application of the principle of harmonic-disturbance model separation for structural-parametric construction of selectively invariant electromechanical systems // Russian Electrical Engineering, 2016, No. 12, pp. 684 – 692.

4. S. V. Tararykin, I. A. Tikhomirova, L. G. Kopylova A comparative analysis of the efficiency of selectively invariant electromechanical systems // Russian Electrical Engineering, 2017, No. 3, pp. 170 – 177.

5. Тютиков В.В., Копылова Л.Г., Тихомирова И.А., Шляцкая Е.М. Сокращение порядка управляющего устройства при синтезе САУ полиномиальным методом // Вестник ИГЭУ – 2017. №5. – С. 44 – 52.

Другие публикации по теме диссертации

1. Копылова Л. Г., Тихомирова И. А., Таraryкин С. В. Структурно-параметрический синтез астатических систем управления электроприводами с гармоническими возмущениями момента нагрузки // Труды VIII Международной

(XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (7-9 октября 2014 г.): в 2 т. Т. 1 / отв. за вып. И. В. Гуляев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 46-51.

2. Таraryкин С. В., Копылова Л. Г., Тихомирова И. А. Структурно-параметрический синтез и оптимизация регуляторов селективно-инвариантных электромеханических систем с гармоническим моментом нагрузки // Электротехника. – 2015. №5. – С. 62 – 70.

3. Копылова Л. Г., Тихомирова И. А., Таraryкин С. В. Разделение модели гармонического возмущения при структурно-параметрическом синтезе астатических систем управления электроприводами // Материалы Международной науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2015. – С. 220-224.

4. Тихомирова И. А., Копылова Л. Г., Таraryкин С. В. Частотный анализ инвариантных свойств электромеханических систем // Материалы Международной науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2015. – С. 224-229.

5. Таraryкин С. В., Тихомирова И. А., Копылова Л. Г. Применение принципа разделения модели гармонического возмущения в структурно-параметрическом синтезе селективно-инвариантных электромеханических систем // Электротехника. – 2016. №12. – С. 51 – 60.

6. Копылова Л. Г., Таraryкин С. В., Тихомирова И. А. Структурно-параметрический синтез астатических систем управления электроприводами на основе разделения модели гармонического момента нагрузки // Труды IX Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (3-7 октября 2016 г.) – Пермь: Изд-во Пермского. ун-та, 2016. – С. 174-178.

7. Таraryкин С. В., Тихомирова И. А., Копылова Л. Г. Сравнительный анализ эффективности селективно-инвариантных электромеханических систем // Электротехника. – 2017. №3. – С. 78 – 85.

8. Копылова Л. Г., Самаринский С. А., Таraryкин С. В., Тихомирова И. А. Многофункциональный стенд для экспериментальных исследований прецизионных мехатронных систем // Приборы и техника эксперимента. – 2017. №1. – С. 158 – 160

9. L. G. Kopylova, S. V. Tararykin, I. A. Tikhomirova Structural and parametric synthesis of astatic control systems for electric drives based on separation of harmonic load torque model // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017.

Статьи в зарубежных изданиях

L. G. Kopylova, S. A. Samarincky, S. V. Tararykin, I. A. Tikhomirova Development and practical application of a multifunctional test bench for experimental research of precise mechatronic systems // Indian Journal of Science and Technology, 2016, No. 9, pp. 162 – 169.

Патенты на изобретение

1. Таарыкин С. В., Копылова Л. Г., Терехов А. И., Тихомирова И. А.

Патент РФ на изобретение №2565490 «Способ адаптивной компенсации влияния гармонических колебаний момента нагрузки в электромеханической системе и устройство для его осуществления» от 17.09.2015.

2. Таарыкин С. В., Копылова Л. Г., Терехов А. И., Тихомирова И. А.

Патент РФ на изобретение №2608081 «Способ компенсации влияния гармонических колебаний момента нагрузки в электромеханической системе и устройство для его осуществления» от 13.01.2017.

3. Таарыкин С. В., Копылова Л. Г., Терехов А. И., Тихомирова И. А.

Патент РФ на изобретение №2648930 «Способ устранения влияния гармонических возмущений момента нагрузки в электромеханической системе» от 28.03.2018.

4. Таарыкин С. В., Копылова Л. Г., Терехов А. И., Тихомирова И. А.

Патент РФ на изобретение №2650341 «Устройство для устранения влияния гармонических возмущений момента нагрузки в электромеханической системе» от 11.04.2018.

Тихомирова Ирина Александровна

Разработка и исследование электромеханических систем со свойствами
селективной инвариантности к колебаниям момента нагрузки

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____.2018 г. Формат 60x84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № _____.
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет

имени В.И.Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.