

На правах рукописи



АПОЛОНСКИЙ Владимир Викторович

МЕТОДЫ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА РОБАСТНЫХ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ЛИНЕАРИЗУЕМЫХ  
ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (промышленность)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Тарарыкин Сергей Вячеславович**

Официальные оппоненты:

**Гайдук Анатолий Романович** – доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО Инженерно-технологическая академия Южного федерального университета в г. Таганроге, профессор кафедры систем управления

**Казанцев Владимир Петрович** – доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ), профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации

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

Защита состоится 9 декабря 2016 года в 14-00 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.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ИГЭУ, Ученый совет. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01.

E-mail: [uch\\_sovet@ispu.ru](mailto:uch_sovet@ispu.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Диссертация размещена: [http://ispu.ru/files/Dissertaciya\\_Apolonskiy\\_V.V.pdf](http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Apolonskiy_V.V.pdf)

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.064.02  
кандидат технических наук



Сидоров Сергей Георгиевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Современный этап развития промышленного производства требует постоянного совершенствования применяемых технологических процессов с целью повышения качества выпускаемой продукции. Выполнение данного требования невозможно без постоянной модернизации производственных мощностей и применения эффективных средств автоматизации в условиях значительно меняющихся режимных параметров оборудования при выпуске продукции широкого ассортимента.

Эффективными средствами управления технологическими переменными являются электроприводы постоянного и переменного тока, образующие в совокупности с рабочими органами машин электромеханические системы (ЭМС), входящие в состав металлорежущих станков, робототехнических комплексов, поточных линий в химической, текстильной, целлюлозно-бумажной, полиграфической, металлургической промышленности. К таким системам предъявляются наиболее высокие технические требования, что затрудняет управление ими на базе типовых регуляторов П, ПИ и ПИД видов в условиях изменения параметров технологического оборудования.

Применение адаптивных САУ, обладающих высокой степенью сложности, не всегда позволяет в полной мере разрешить проблематику параметрической грубости, поскольку для самонастройки управляющих устройств по разомкнутому циклу (режимная адаптация) требуется знать взаимосвязь параметров объекта с режимами работы оборудования, а при самонастройке по замкнутому циклу сложно обеспечить устойчивость системы при повышении быстродействия контура адаптации.

Указанных недостатков лишен робастный подход, однако применение наиболее распространенных оптимизационных методов робастного синтеза ( $H^2$  и  $H^\infty$ , LMI и  $\mu$  – методов) может давать нерациональные решения в виде регуляторов с порядком выше порядка объекта, приводить к снижению качества управления при исходных значениях параметров, а применение интервальных методов требует предварительной оценки величин отклонения параметров от номинальных значений, что составляет самостоятельную проблему.

Во многих случаях более продуктивным оказывается не стремление к абсолютно точному и математически строгому соблюдению интервальных условий робастности при синтезе САУ, а выявление закономерностей и причин повышенной параметрической чувствительности систем и поиск механизмов их преодоления на основе анализа физических особенностей управляемого объекта и модификации традиционных методов теории модального управления, в основе которых лежат работы Борцова Ю.А., Поляхова Н.Д., Путова В.В., Кузовкова Н.Т., Лозгачева Г.И., Воронова А.А., Портера Б. и др.

**Цель диссертационной работы:** разработка, исследование и программная реализация модифицированных методов модального структурно-параметрического синтеза устройств управления состоянием линеаризуемых технологических

объектов, способных обеспечить улучшение робастных свойств и других показателей качества создаваемых динамических систем.

Поставленная цель определяет необходимость решения следующих **основных задач**.

1. Анализ достижений современной теории робастного управления, определение ее проблематики и направлений развития.

2. Разработка методики детализированного анализа робастных свойств САУ с различными типами регуляторов состояния, реализующих отрицательные и положительные обратные связи по координатам состояния управляемого объекта и содержащих минимально- и неминимально-фазовые звенья в своих структурах.

3. Разработка и исследование новых структурных решений в области линейных управляющих устройств, обеспечивающих улучшение робастных свойств и других показателей качества САУ.

4. Разработка и программная реализация модальных методов параметрического синтеза модернизированных структур безынерционных и динамических регуляторов состояния робастных САУ.

5. Практическая реализация, экспериментальные исследования и проверка теоретических результатов работы на физическом лабораторном оборудовании.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач в работе используются методы пространства состояний ТАУ, математический аппарат алгебры матриц и передаточных функций, методы модального управления. Исследование САУ электромеханическими объектами проводится методами структурного анализа и численного моделирования на ЭВМ, а также методами физического моделирования на экспериментальном оборудовании.

**Научная новизна** работы состоит в разработке и реализации новых методов проектирования робастных САУ технологическими объектами с безынерционными и динамическими регуляторами состояния:

1. Разработана методика количественной оценки возможностей САУ по компенсации параметрических возмущений при сохранении устойчивости, отличающаяся использованием двухфакторных сечений пространства внутренних параметров системы, позволяющих оценить предельные величины отклонений параметров от начального значения, а также запасы устойчивости.

2. Предложено использовать линейные регуляторы состояния, основанные на введении гибких обратных связей по координатам состояния объекта и его выходной координате, а также на оптимизации передаточной функции регуляторов «входа-выхода» для улучшения робастных свойств и помехоустойчивости синтезируемых САУ.

3. Разработаны методы модального параметрического синтеза модернизированных безынерционных и динамических регуляторов состояния, позволяющие учесть введение новых структурных элементов и обеспечить заданные показатели точности и быстродействия при повышении робастных свойств САУ.

4. Разработаны методы параметрической коррекции регуляторов состояния, позволяющие осуществить перевод САУ из «зоны риска» в «зону робастности», и методы упрощения (редукции) регуляторов при выводе САУ на границу указанных зон, обеспечивающие сохранение робастных свойств при улучшении других показателей качества создаваемых систем (помехоустойчивости, простоты реализации и др.).

**Практическая ценность** работы определяется следующим:

1. Выполнена программная реализация методов параметрического синтеза управляющих устройств робастных САУ в виде безынерционных регуляторов состояния и динамических регуляторов «входа-выхода», в том числе полиномиальных регуляторов и регуляторов с асимптотическими наблюдателями состояния, позволяющая автоматизировать и ускорить расчет параметров регуляторов указанных типов.

Соответствующие программные комплексы «Sputnik» для расчета полиномиальных регуляторов и регуляторов состояния, «Skyeyes» для определения областей устойчивости САУ и программа «Синтез модальных регуляторов с гибкими обратными связями» для разработки систем управления зарегистрированы в государственном Реестре программ для ЭВМ.

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

Для автоматической настройки безынерционных и динамических регуляторов состояния разработана компьютерная программа «AutoTuner», зарегистрированная в государственном Реестре программ для ЭВМ.

**На защиту выносятся** разработанные методы аналитического исследования робастных свойств, структурно-параметрического синтеза робастных систем управления линеаризуемыми технологическими объектами и результаты их практической реализации.

**Соответствие содержания диссертации паспорту специальности.**

Работа соответствует **формуле специальности** 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» и ее **области исследований**, поскольку отражает вопросы математического, информационного, алгоритмического и машинного обеспечения создания автоматизированных систем управления динамическими объектами, включая методологию исследования и проектирования, формализованное описание и алгоритмизацию, оптимизацию и имитационное моделирование функционирования систем, повышение их эффективности.

**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 А.А. Анисимова, А.И. Терехова и В.В. Тютюкова.

Создание лабораторного стенда и проведение экспериментальных исследований САУ были выполнены совместно с А.А. Анисимовым.

**Связь с целевыми программами.** Результаты диссертации использовались при выполнении НИР по:

- ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009-2010 г.г.) по проекту № 2.1.2/4285 «Развитие теории робастного координирующего управления многосвязными мехатронными объектами»;

- федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009-2011 г.г.) по теме «Создание энергосберегающих электромеханотронных модулей и систем на основе конечно-элементного компьютерного моделирования и синергетического управления в реальном времени» № 02.74.11.0067;

- грантам Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ России НИШ – 5921.2008.8, НИШ – 4108.2010.8, НИШ – 1559.2012.8.

### **Использование результатов работы в учебном процессе**

Разработанные на основе результатов исследований программные комплексы «Sputnik», «Skyeyes», «AutoTuner» и программа «Синтез модальных регуляторов с гибкими обратными связями», предназначенные для исследования областей устойчивости и параметрического синтеза робастных САУ, их оптимизации и настройки, внедрены на кафедре «Электроника и микропроцессорные системы» ИГЭУ.

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

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались и обсуждались на Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологий (Бенардосовские чтения)» (ИГЭУ, г. Иваново, 2011-2015 г.г.); 4-ой Всероссийской мультikonференции по проблемам управления МКПУ-2011 (НИИ ВМС ЮФУ, г. Таганрог, 2011 г.); Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Электронные приборы, системы и технологии» (ТПУ, г. Томск, 2011 г.); Всероссийской молодежной конференции «Автоматизация и информационные технологии» АИТ-2012 (МГТУ «Станкин», 2012 г.); VII Международной (VIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012 (ИГЭУ, г. Иваново 2012 г.); Отчетной конференции молодых ученых ИГЭУ «Энергия инновации – 2013» (ИГЭУ, г. Иваново, 2014 г.); VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (г. Саранск, 2014 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 4 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, из которых одна - в журнале «Известия РАН. Теория и системы управления», входящем в базы данных Web of Science и Scopus. Получены 4 свидетельства РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 152 наименования, и 8 приложений. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка и 33 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

**Первая глава** диссертации посвящена анализу наиболее распространенных технологических объектов, определению требований к их системам управления, оценке проблематики управления состоянием таких объектов и формированию круга задач, которые необходимо решить для существенного повышения параметрической грубости САУ в реальных условиях эксплуатации.

Наиболее широкое применение для управления скоростными режимами технологических машин самого различного назначения, а также физико-механическими параметрами вырабатываемого продукта получили ЭМС, относящиеся к классу линеаризуемых объектов и представленные на рис. 1, а и рис.2, а, где СП – силовой преобразователь, ЭД – электродвигатель, КП – кинематическая передача, РО – рабочий орган;  $u$ ,  $u_{1,2}$  – управляющие воздействия;  $C_{12}$  – коэффициент жесткости;  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  – угловые скорости ЭД и РО;  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  – линейные скорости РО,  $h$  – высота перемещения измерительного ролика.

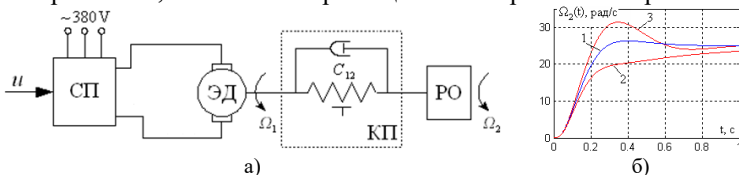


Рис. 1. Функциональная схема двухмассовой ЭМС (а) и ее переходные характеристики с безынерционным РС (б)

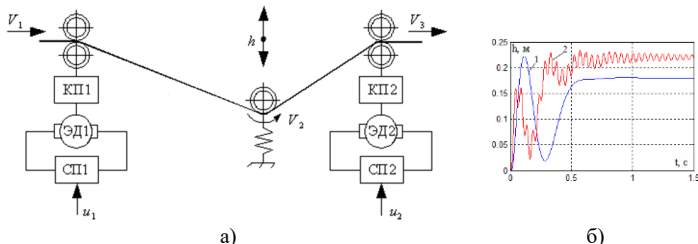


Рис. 2. Функциональная схема системы транспортирования материала (а) и ее переходные характеристики с безынерционным РС (б)

Повышение технологических требований к ЭМС в отношении точности и быстродействия приводит к усложнению их динамических моделей и проявлению явных и скрытых факторов сложности, что делает целесообразным управление такими объектами с использованием безынерционных и динамических регуляторов и наблюдателей состояния (РС и НС).

Однако наиболее острая проблематика современных САУ технологическими объектами заключается в неопределенности и неточности их математических моделей, обусловленных как погрешностями их идентификации, так и вариациями внутренних параметров при изменениях режимов работы и внешних условий эксплуатации.

Так на рис. 1, б приведены переходные характеристики двухмассовой ЭМС с безынерционным РС при исходной жесткости КП (графики 1) и при ее изменении на -50% и +50% (графики 2 и 3), а также аналогичные зависимости для системы транспортирования материала (рис. 2, б, графики 1,2) при исходном и повышенном в 4,5 раза модуле упругости материала. Они показывают, что реальные изменения даже одного параметра объекта могут приводить к неудовлетворительному качеству управления, реализуемого традиционными методами, что требует применения специальных мер адаптации САУ к вариациям параметров или приравнивания ими параметрических возмущений.

Более простой альтернативой адаптивным алгоритмам является применение методов робастного модального управления, реализуемого в рамках концепции «физической» или прикладной ТАУ. Оно основывается на предварительной оценке системных свойств управляемого объекта (управляемости, наблюдаемости, вырожденности), анализе распределения нулей и полюсов и на стремлении к исключению дестабилизирующих (положительных) обратных связей и неминимально-фазовых звеньев из состава регуляторов и наблюдателей состояния при их структурно-параметрическом синтезе.

В этом направлении разработаны достаточно эффективные методы улучшения робастных свойств синтезируемых САУ и сформирован ряд условий достижения низкой параметрической чувствительности в определенной области, называемой «зоной робастности», и характеризующейся отсутствием положительных обратных связей и неминимально-фазовых звеньев в структурах регуляторов.

Однако, остается нерешенной задача установления количественной взаимосвязи размеров областей устойчивости САУ на базе различных типов регуляторов с диапазонами вариаций внутренних параметров объекта и регулятора при наличии как отрицательных, так и положительных обратных связей по координатам состояния, а также при формировании минимально- и неминимально-фазовых звеньев в структурах динамических регуляторов «входа-выхода».

Не менее важной является задача повышения робастных возможностей САУ путем корректировки известных методов синтеза регуляторов состояния и модификации их структурных решений в направлении снижения параметрической чувствительности систем при сохранении или улучшении других показателей

качества.

В процессе структурно-параметрического синтеза САУ всегда целесообразно рассматривать также вопросы возможного редуцирования (упрощения) регуляторов с целью исключения обратных связей по труднодоступным координатам состояния объекта или понижения порядка полиномов динамических регуляторов.

Все это требует разработки и программного воплощения соответствующих методов автоматизированного синтеза модернизированных регуляторов робастных САУ, их цифровой реализации и оценки эффективности путем проведения вычислительных и натурных экспериментов на моделях и реальном оборудовании.

**Во второй главе** диссертации проводятся исследования и формируется методика оценки робастных свойств САУ с базовыми типами линейных регуляторов состояния. На основе полученных результатов формулируются рекомендации относительно размещения динамических характеристик САУ как в «зонах робастности», так и в «зонах риска».

Базовые варианты структур одноканальных систем управления с безынерционными регуляторами состояния (РС), с регуляторами и наблюдателями состояния (РНС) и с динамическими полиномиальными регуляторами (ПР) представлены соответственно на рис. 3, а, б, в.

Здесь приняты обозначения:  $s$  – комплексная переменная Лапласа;  $y_1(s)$ ,  $y(s)$  – входной и выходной сигналы;  $u(s)$  – входной сигнал объекта;  $x(s)$  – вектор координат состояния объекта;  $B(s)$  и  $A(s)$  – полиномы числителя и знаменателя передаточной функции объекта;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – матрицы состояния, входа и выхода объекта и наблюдателя;  $K$ ,  $K'$  – матрицы коэффициентов РС;  $L$  – матрица подстройки НС;  $R(s)$ ,  $C(s)$  – полиномы числителя и знаменателя передаточной функции ПР.

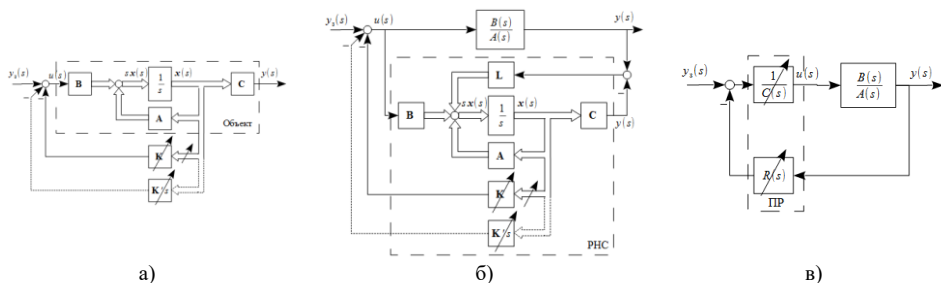


Рис. 3. Структурные схемы систем модального управления с безынерционным РС (а), с наблюдателем состояния (б) и с динамическим ПР (в)

Первоначально были исследованы САУ с объектами первого и второго порядков, для которых получены аналитические условия устойчивости при наличии и отсутствии положительных обратных связей по координатам состояния и выходной координате.

Для анализа объектов высокого порядка был предложен подход, в основе

которого лежит метод регулярного сканирования параметров модели и оценки устойчивости замкнутой системы по Гурвицу на каждой итерации с формированием областей устойчивости и неустойчивости САУ. Блок-схемы соответствующих алгоритмов построения этих областей для САУ с безынерционным РС и динамическим ПР представлены соответственно на рис. 4, а, б. Они реализуются авторской программой численных расчетов «Skyeyes», интегрируемой в среду программного комплекса MatLab.

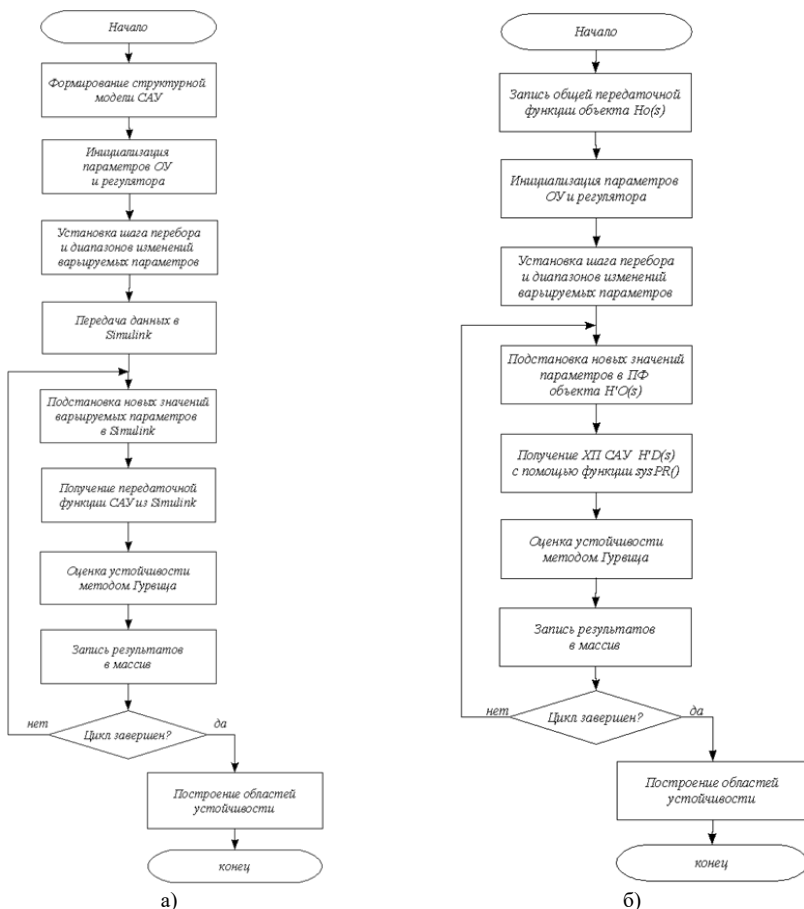


Рис. 4. Блок-схемы алгоритмов построения областей устойчивости для САУ с РС (а) и ПР (б)

В качестве иллюстрации на рис.5 приведены сечения многомерных областей состояния САУ (здесь и далее точками обозначены области устойчивости, треугольниками – области потери устойчивости, звездой – начальные значения параметров) с двухмассовым объектом (рис.1, а) при использовании

безынерционного и динамического регуляторов с различными настройками, переводящими систему как в «зону робастности», так и в «зону риска».

Исследования показывают, что наблюдается скачкообразное ухудшение робастных свойств САУ при появлении дестабилизирующих связей и звеньев в составе регуляторов и наблюдателей состояния, которое может быть вызвано относительно небольшими изменениями заданного быстродействия. Однако даже в таких «зонах риска» могут существовать определенные области вариаций внутренних параметров, в пределах которых система сохраняет свою работоспособность и стабильное качество переходных процессов. Размеры этих областей зависят от свойств объекта, а также от структуры и настройки системы управления.

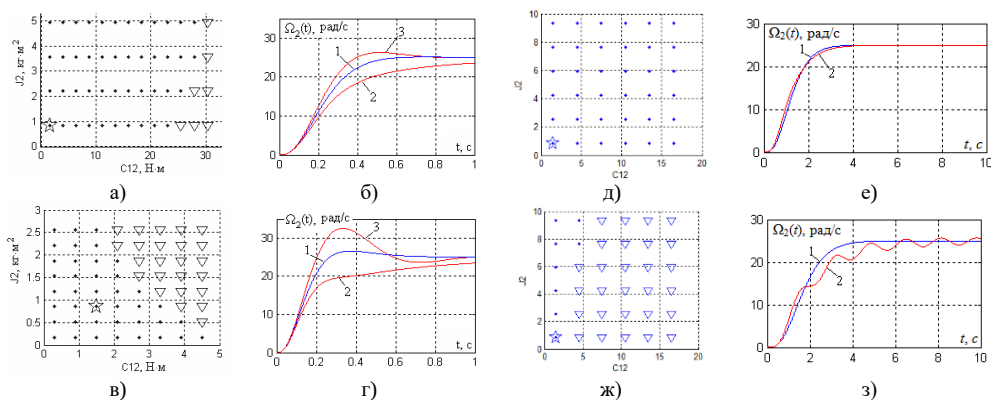


Рис. 5. Области робастной устойчивости и переходные характеристики для САУ с РС (а, б, в, г) и САУ с ПР (д, е, ж, з) в «зоне робастности» (а, б, д, е) и в «зоне риска» (в, г, ж, з).

Применение разработанной методики и построение областей робастной устойчивости САУ при вариациях параметров объекта и наблюдателя позволяет наглядно представить границы их допустимых отклонений, выявить имеющиеся резервы системы при работе в «зонах робастности» и «зонах риска», оценить возможность и целесообразность ее эксплуатации в этих условиях.

**В третьей главе** диссертации рассматриваются методы повышения робастных свойств синтезируемых систем путем коррекции параметров регуляторов (распределения полюсов), применения дополнительных обратных связей по производным координат состояния объекта и его выходной координате (гибких ОС), а также выбора оптимальной структуры используемых полиномиальных регуляторов.

Применение стандартных распределений полюсов (Ньютона, Бесселя, Баттерворта и др.) не гарантирует стабильность динамических показателей САУ при вариациях внутренних параметров.

Необходимое повышение робастных свойств САУ может достигаться коррекцией принятого распределения полюсов, осуществляющей перевод системы

из «зоны риска» в «зону робастности». Она реализуется путем замены дестабилизирующих коэффициентов обратных связей или параметров полиномов регуляторов состояния и «входа-выхода» более благоприятными значениями с соответствующим изменением их знака.

Так анализ областей робастной устойчивости САУ с РС при вариациях параметров регулятора на рис. 6 наглядно показывает возможность и целесообразность изменения положительного значения коэффициента  $k_3$  на отрицательное с соответствующей коррекцией распределения полюсов для достижения более высокой параметрической грубости системы. Здесь графики 1 соответствуют исходным значениям параметров двухмассового объекта, а графики 2 – увеличению жесткости КП на 30%.

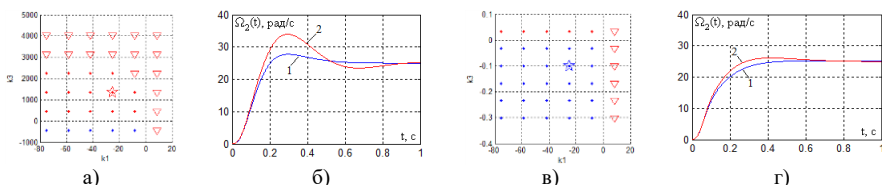


Рис. 6. Области устойчивости относительно параметров регулятора  $k_1$  и  $k_3$  и переходные характеристики САУ с РС до коррекции (а, б) и после коррекции регулятора (в, г).

Аналогичные исследования, проведенные для САУ объектом (рис. 2, а) с безынерционным РС, а также для САУ с ПР «входа-выхода» объектом (рис. 1, а), также подтверждают эффективность метода коррекции полюсов, реализуемого заменой неблагоприятных коэффициентов регулятора.

Таким образом, применение сечений пространства состояний системы относительно параметров регулятора позволяет выявить и реализовать возможные резервы повышения ее робастных свойств путем коррекции неблагоприятных значений этих параметров.

В качестве метода расширения «зоны робастности» предлагается использование дополнительных степеней свободы (матрица  $\mathbf{K}'$  на рис.3) в виде гибких ОС по координатам состояния объекта для РС, координатам наблюдателя для РНС и дополнительной производной выходной координаты для ПР.

Для расчета параметров дополнительного канала управления по производным координат состояния в структуре регулятора состояния или наблюдателя применяется метод независимого формирования динамических и статических показателей качества.

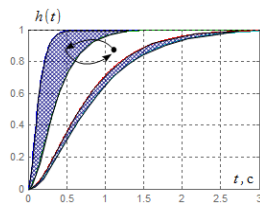


Рис. 7. «Зоны робастности» САУ с РС

В этом случае матрица  $\mathbf{K}$  безынерционных ОС (рис. 3, а) рассчитывается для «ускоренного» характеристического полинома  $D(s) = s^n + d_{n-1}s^{n-1} + \dots + d_1s + d_0$ , перемещающего САУ в «зону робастности» (левая заштрихованная область на рис. 7), методом модально управления. Матрица гибких ОС  $\bar{\mathbf{K}}' = [\bar{k}'_1 \quad \bar{k}'_2 \quad \dots \quad \bar{k}''_n]$ , возвращающих систему к

заданному быстродействию, формируется исходя из описания объекта в форме Фробениуса и условия равенства знаменателя передаточной функции замкнутой САУ желаемому характеристическому полиному  $D'(s) = s^n + d'_{n-1}s^{n-1} + \dots + d'_1s + d'_0$  и рассчитывается, исходя из соотношений:  $\bar{k}'_n = 1 - d'_0 / d'_0$ ;  $\bar{k}'_{n-1} = d'_{n-1} - d'_{n-1}(1 - \bar{k}'_n)$ ; ....;  $\bar{k}'_2 = d'_2 - d'_2(1 - \bar{k}'_n)$ ;  $\bar{k}'_1 = d'_1 - d'_1(1 - \bar{k}'_n)$ .

На заключительном этапе синтеза осуществляется перевод РС в естественные координаты объекта управления в соответствии с выражением:  $\mathbf{K} = \bar{\mathbf{K}}\mathbf{U}\mathbf{U}^{-1}$ , где  $\bar{\mathbf{U}} = [\bar{\mathbf{B}} \quad \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{B}} \quad \bar{\mathbf{A}}^2\bar{\mathbf{B}} \quad \dots \quad \bar{\mathbf{A}}^{n-1}\bar{\mathbf{B}}]$  и  $\mathbf{U} = [\mathbf{B} \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \mathbf{A}^2\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}]$  – матрицы управляемости объекта, представленного в форме Фробениуса и реальных координатах.

Анализ зоны устойчивости и переходных характеристик САУ с безынерционным РС (рис. 8 а, б) показывает относительно малый запас устойчивости при вариации параметров  $C_{12}$  и  $J_2$  и, как следствие, их существенное влияние на качество переходных процессов. Здесь график 1 соответствует начальным значениям параметров ОУ, а график 2 - их увеличению на 30%.

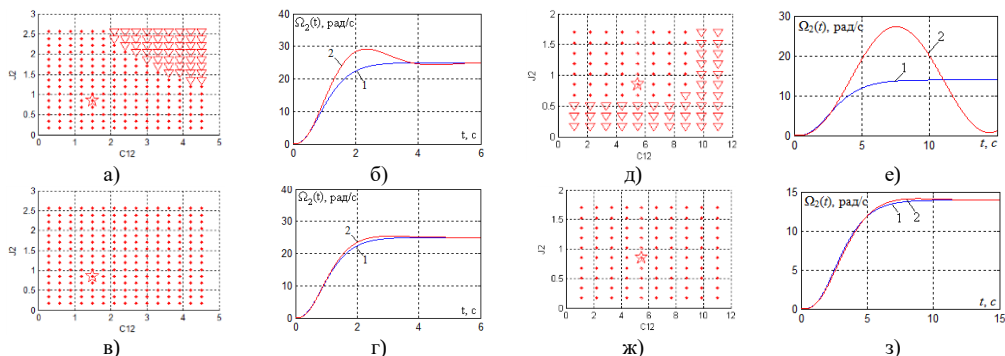


Рис. 8. Области устойчивости и переходные характеристики для САУ с РС (а, б, в, г) и ПР (д, е, ж, з).

Применяя предложенный метод синтеза РС с гибкими ОС и проводя сравнение полученных областей устойчивости и графиков переходных процессов (рис. 8, в, г), можно сделать вывод о значительном снижении чувствительности системы к указанным вариациям параметров объекта.

Аналогичные исследования были проведены для САУ с РС объектом (рис. 2, а), а также для САУ с РНС (рис. 3, б) объектом (рис. 1, а), которые показали, что введение дополнительного канала по производным координат состояния объекта или наблюдателя позволяет существенно улучшить робастные свойства системы относительно изменения параметров как ОУ, так и наблюдателя.

Для САУ с ПР «входа-выхода» (рис. 3, в) предлагается введение дополнительной производной по выходной координате путем задания следующих соотношений степеней полиномов регулятора и объекта:

$$\deg R(s) = \deg A(s); \quad \deg C(s) = 0, \quad \deg D(s) = \deg A(s).$$

В этом случае система алгебраических уравнений синтеза ПР будет иметь на одну переменную больше количества уравнений, что позволит независимо задавать коэффициент петлевого усиления системы.

$$\begin{cases} c_0 + b_m r_n = 1, \\ \dots\dots\dots \\ a_1 c_0 + a_0 c_1 + b_1 r_0 + b_0 r_1 = d_1, \\ a_0 c_0 + b_0 r_0 = d_0. \end{cases}$$

Его увеличение формирует более глубокую обратную связь по выходной координате объекта, что благоприятно сказывается на робастных свойствах САУ.

Приведенные на рис. 8 (д, е) области устойчивости и переходные характеристики САУ с ПР наглядно иллюстрируют ее высокую чувствительность к вариациям параметров  $J_2$  и  $C_{12}$ , что приводит к потере устойчивости системы при их 25% - ном изменении. Введение дополнительной производной выходного сигнала позволяет расширить «зону робастности» САУ и обеспечить стабильный характер переходных процессов при 90%-ном изменении указанных параметров объекта (рис. 8, ж, з).

Таким образом, использование дополнительных степеней свободы в виде гибких ОС по координатам состояния объекта для РС, координатам наблюдателя для РНС и дополнительной производной выходной координаты для ПР способствует существенному улучшению робастных свойств САУ.

В качестве способа расширения области робастности для САУ с ПР (рис. 3, в) была также предложена структурная оптимизация регулятора, заключающаяся в выборе оптимальной степени полинома  $C(s)$ , при которой минимальным повышением порядка регулятора достигается наиболее существенное повышение параметрической грубости и помехоустойчивости системы.

В ходе исследований было выявлено, что при наличии «быстрых» нулей ОУ рациональным структурным решением является выбор ПР с первой степенью полинома  $C(s)$ , что позволяет расширить «зону робастности» САУ (рис. 9, а) с одновременным улучшением фильтрации помех.

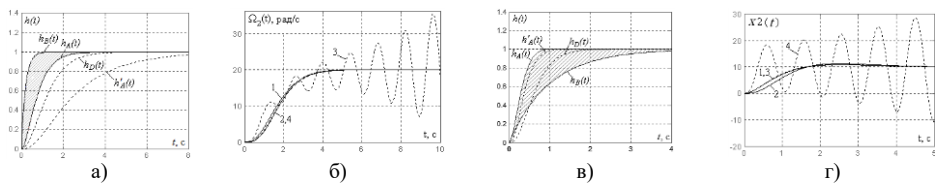


Рис. 9. Области параметрической грубости и переходные характеристики САУ с «быстрыми» (а,б) и «медленными» (в,г) нулями

На рис. 9, б представлены соответствующие переходные характеристики 1, 2 САУ таким объектом с исходными параметрами при  $\deg C(s) = 0$ ,  $\deg C(s) = 1$ , а также аналогичные графики 3, 4 при изменении одного из параметров на 70%. Они наглядно иллюстрируют достижение положительного результата на базе ПР с повышенной степенью полинома  $C(s)$ .

Присутствие в объекте «медленных» нулей требует особого внимания

проектировщика САУ, поскольку применение ПР с ненулевой степенью полинома  $C(s)$  в этом случае может привести к значительному сокращению или полному исчезновению «зоны робастности» (рис. 9, в). Соответствующие переходные характеристики 1, 2 такой САУ, полученные для исходных параметров объекта при  $\deg C(s) = 0$ ,  $\deg C(s) = 1$ , а также аналогичные графики 3,4 при увеличении одного из параметров всего на 11% представлены на рис. 9 г.

Техническая реализуемость таких ПР обеспечивается их «цифровым перепроектированием» с использованием метода Эйлера.

Таким образом, выбор оптимальной структуры ПР при синтезе САУ должен основываться на предварительном анализе нулей и полюсов передаточной функции управляемого объекта.

**В четвертой главе** решаются задачи упрощения структуры (редуцирования) регуляторов за счет исключения обратных связей по отдельным координатам состояния управляемого объекта, а также на основе уменьшения степеней полиномов передаточных функций ПР при обеспечении требуемых показателей качества и робастных свойств синтезируемых САУ.

Такое редуцирование реализуется определенным выбором распределения полюсов синтезируемой САУ, обеспечивающим размещение ее переходной характеристики на границе «зоны робастности» при обнулении коэффициента ОС по трудноизмеримой координате состояния (для САУ с РС) или обнулении коэффициента при старшей степени  $s$  полинома  $R(s)$  (для САУ с ПР).

Для САУ с РС выражение желаемого характеристического полинома представляют как функцию от среднегеометрического корня (СГК)  $\Omega_0$  в численно-символьной форме

$$D(s) = s^n + d'_{n-1} \Omega_0 s^{n-1} + \dots + d'_1 \Omega_0^{n-1} s + \Omega_0^n,$$

где  $d'_1 \dots d'_{n-1}$  – числовые значения коэффициентов выбранного распределения.

Затем составляют численно-символьное выражение матрицы коэффициентов РС для объекта, представленного в форме Фробениуса

$$\bar{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} a_0 - \Omega_0^n & a_1 - d'_1 \Omega_0^{n-1} & \dots & a_{n-1} - d'_{n-1} \Omega_0 \end{bmatrix},$$

и осуществляют переход к численно-символьному представлению матрицы коэффициентов регулятора в реальных координатах объекта с использованием матрицы преобразования  $\mathbf{P}_U$ .

$$\mathbf{K}^T = (\bar{\mathbf{K}} \mathbf{P}_U)^T = \begin{bmatrix} p_{11} a_0 - p_{11} \Omega_0^n + p_{21} a_1 - p_{21} d'_1 \Omega_0^{n-1} + \dots + p_{n1} a_{n-1} - p_{n1} d'_{n-1} \Omega_0 \\ p_{12} a_0 - p_{12} \Omega_0^n + p_{22} a_1 - p_{22} d'_1 \Omega_0^{n-1} + \dots + p_{n2} a_{n-1} - p_{n2} d'_{n-1} \Omega_0 \\ \dots \\ p_{1n} a_0 - p_{1n} \Omega_0^n + p_{2n} a_1 - p_{2n} d'_1 \Omega_0^{n-1} + \dots + p_{nn} a_{n-1} - p_{nn} d'_{n-1} \Omega_0 \end{bmatrix}.$$

Приравнивание к нулю коэффициента ОС по той координате состояния, измерение которой затруднительно, и решение полученного уравнения относительно  $\Omega_0$  позволяют определить соответствующие значения СГК, при которых возможно редуцирование регулятора.

В качестве иллюстрации на рис. 10 приведены области устойчивости и

переходные характеристики САУ двухмассовым объектом (рис. 1) с полным набором ОС (а, б) при  $\Omega_0 = 11,6 \text{ с}^{-1}$  и обнуленным коэффициентом ОС по моменту нагрузки ЭД (в, г) при  $\Omega_0 = 12,6 \text{ с}^{-1}$ .

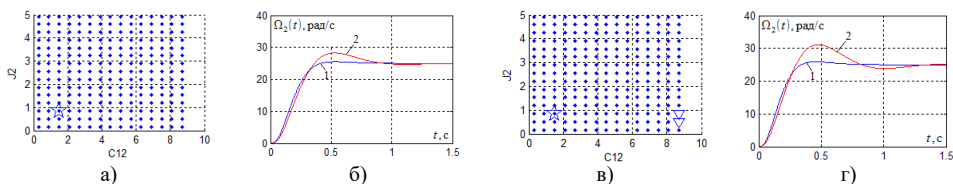


Рис. 10. Области устойчивости (а, в) и переходные характеристики (б, г) для САУ с РС

Здесь графики 1 соответствуют исходным значениям параметров объекта, а графики 2 – измененным на 50% значениям параметров  $C_{12}$  и  $J_2$ .

Результаты свидетельствуют о возможности исключения из управления одной из координат состояния объекта при сохранении показателей быстродействия и параметрической грубости.

Для САУ с ПР «входа-выхода» аналитический поиск «точек вырождения» передаточной функции регулятора осуществляется путём составления и решения системы линейных алгебраических уравнений синтеза относительно коэффициентов полиномов  $R(s)$ ,  $C(s)$ , а также неизвестной величины СГК  $\Omega_0$  с условием обнуления коэффициента полинома  $R(s)$  при старшей производной  $s$ :

$$\begin{cases} c_0 = 1; & a_3c_0 + b_1r_2 = d_3'\Omega_0; & a_2c_0 + b_1r_1 + b_0r_2 = d_2'\Omega_0^2; \\ a_1c_0 + b_1r_0 + b_0r_1 = d_1'\Omega_0^3; & a_0c_0 + b_0r_0 = d_0'\Omega_0^4; & \dots \end{cases}$$

На рис. 11, а представлена переходная характеристика 1 для САУ двухмассовым объектом (рис. 1) с ПР третьего порядка при  $\Omega_0 = 9.2 \text{ с}^{-1}$  и расположении динамической характеристики системы внутри «зоны робастности». Она показывает значительное влияние на работу системы аддитивной помехи в канале обратной связи в виде белого шума.

Упрощение регулятора при значительном улучшении помехоустойчивости САУ (график 1 на рис. 11, б) достигается понижением порядка ПР до второго при задании значения СГК  $\Omega_0 = 9.2 \text{ с}^{-1}$ , т.е. при незначительной корректировке времени переходного процесса.

Важно отметить, что такое редуцирование регуляторов не придает им неминимально-фазовый характер, не выводит синтезируемые САУ за пределы «зоны робастности» и не вызывает существенных изменений их показателей параметрической грубости. Это наглядно иллюстрируют соответствующие переходные характеристики 2 на рис. 11, полученные при увеличении параметров  $J_2$  и  $C_{12}$  на 40% от их исходных значений.

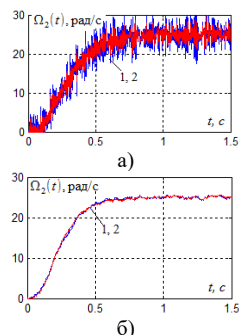


Рис. 11. Переходные характеристики САУ с ПР

В отличие от известных методов редуцирования

регуляторов, разработанный подход основывается на модификации классического метода модального управления и сохраняет для разработчика возможность формирования качества переходных процессов на стадии синтеза САУ.

**В пятой главе** на основе применения принципов физического моделирования ЭМС в реальном масштабе времени осуществляется аппаратно-программная реализация и экспериментальные исследования разработанных систем управления с цифровыми динамическими регуляторами.

Основной задачей экспериментальных исследований является оценка эффективности разработанных методов синтеза робастных САУ на реальных физических объектах.

Для проведения экспериментов использовалась физическая модель двухмассовой ЭМС, реализованная на базе многодвигательного стенда, структурная схема которого представлена на рис. 12.

В структуру экспериментального стенда входят:

- электромеханическая часть, состоящая из управляемых электроприводов на базе двигателей постоянного тока ДК 1–1.7-110-АТ с измерителями углового перемещения ВЕ-178А5 и силовых преобразователей типа ТПЕ-110;
- микропроцессорная часть, включающая микроконтроллер LPC2294 с ядром ARM7TDMI-S, схемы аналогового и дискретного ввода-вывода, а также логической обработки сигналов;
- информационно-управляющая часть, состоящая из ЭВМ и панели управления.

Взаимодействие между каналами обеспечивается микропроцессорной системой управления по интерфейсам CAN и RS-232.

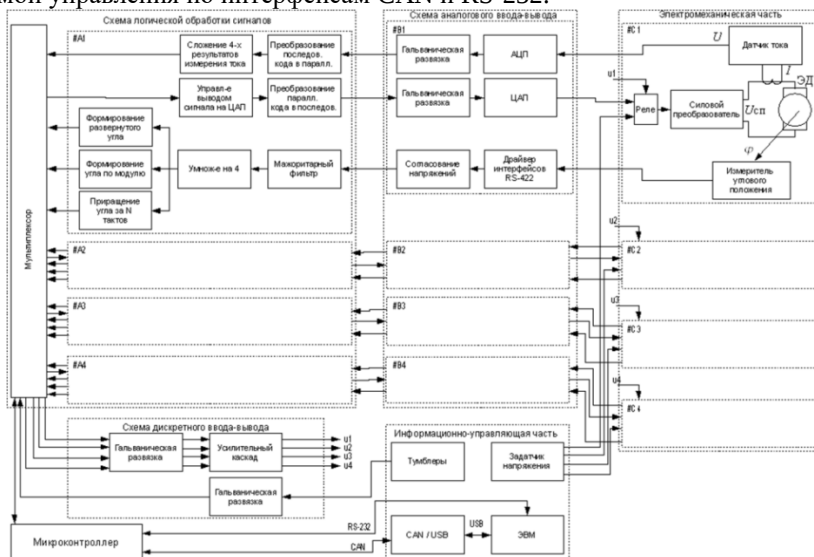


Рис. 12. Структурная схема лабораторного стенда

На рис. 13 представлены функциональная (а) и структурная (б) схемы ЭМС, где  $\Omega_3$  – сигнал задания;  $R_{\Omega 1}$  – цифровой регулятор скорости; ЦАП 1, 2 – цифро-аналоговые преобразователи;  $R_{1, 2}$  – аналоговые регуляторы тока; СП 1, 2 – силовые преобразователи напряжения; М 1, 2 – двигатели постоянного тока; ИУ 1, 2 – измерители углового положения;  $C_{12}$ ,  $K_d$  – коэффициенты жесткости и вязкого трения кинематической передачи;  $K_m$  – масштабирующий коэффициент;  $K_{1,2}$  – коэффициенты передачи 1-го и 2-го каналов электропривода.

Техническая реализация физической модели двухмассовой ЭМС выполнена на базе двух каналов экспериментального стенда (рис. 12), объединенных общей микропроцессорной системой управления. При этом цифровые регуляторы реализованы с использованием операционной системы реального времени, разработанной в соответствии со стандартом языка высокого уровня Forth.

В рассматриваемой физической модели (рис. 13, б) все переменные состояния объекта доступны для измерения, что позволяет реализовать как динамические ПР «входа-выхода», так и безынерционные РС.

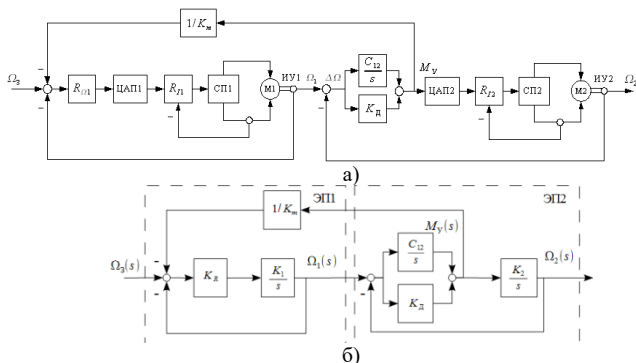


Рис. 13. Функциональная (а) и структурная (б) схемы двухмассовой ЭМС

В таблице приведены результаты синтеза САУ с ПР различных типов, где  $t$  – время переходного процесса.

Таблица

| Тип регулятора | $t$ , с | $\Omega_0$ , $c^{-1}$ | $r_2$   | $r_1$  | $r_0$  | $c_1$ | $c_0$  |
|----------------|---------|-----------------------|---------|--------|--------|-------|--------|
| ПР 2/0         | 1.3     | 4.00                  | 0.19    | 1.91   | 3.10   | --    | 0.48   |
| ПР 2/0         | 1.8     | 3.20                  | -0.0212 | 0.92   | 0.78   | --    | 1.06   |
| ПР 2/1         | 2.0     | 3.73                  | 1.1312  | 6.6248 | 6.0603 | 1.0   | 4.7803 |
| ПР 1/0         | 1.78    | 3.27                  | 0       | 1.0    | 0.94   | --    | 1.0    |

Сравнительный анализ переходных характеристик САУ с ПР одинаковой структуры при  $\Omega_0 = 4 \text{ c}^{-1}$  («зона робастности») и  $\Omega_0 = 3.2 \text{ c}^{-1}$  («зона риска») показывает существенное ухудшение робастных свойств САУ при появлении неминимально-фазовых звеньев регулятора (рис. 14, а, б, где график 1 соответствует расчетным параметрам объекта, график 2 – увеличению  $C_{12}$  на 40%).

Введение в структуру регулятора звена с передаточной функцией  $1/C(s)$  позволяет расширить область робастности САУ, что обеспечивает снижение ее чувствительности к изменению упругости механической передачи (рис. 14, в).

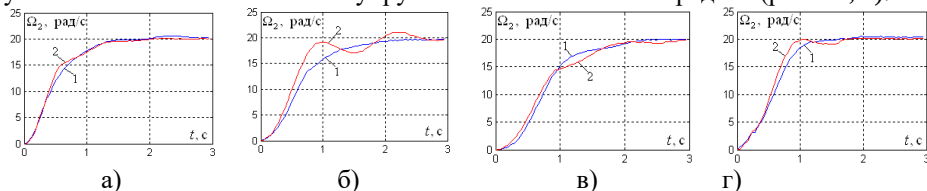


Рис. 14. Графики переходных процессов при  $\Omega_0 = 4 \text{ c}^{-1}$  PR 2/0 (а), и  $\Omega_0 = 3.2 \text{ c}^{-1}$  PR2/0 (б),  $\Omega_0 = 3.73 \text{ c}^{-1}$  PR 2/1 (в) и  $\Omega_0 = 3.27 \text{ c}^{-1}$  PR 1/0 (г)

Редукция регулятора PR 2/0 и его приведение к виду PR 1/0 на границе «зоны робастности» с исключением второй производной из процесса управления позволяет сохранить робастные свойства САУ (рис.14, г) при одновременном повышении ее помехоустойчивости.

Аналогичные эксперименты, проведенные для САУ с РС, показали возможность редукции регулятора путем исключения ОС по скорости первой массы при сохранении робастных свойств системы, а также расширение «зоны робастности» при использовании производных по координатам состояния объекта.

Экспериментальные исследования ЭМС в реальном элементном исполнении позволили практически подтвердить эффективность разработанных методов структурно-параметрического синтеза робастных САУ.

### Заключение

Возрастающий уровень сложности и повышение требований к качеству работы технологических объектов в условиях их параметрической неустойчивости вынуждают разработчика применять управляющие устройства высокого порядка и более сложные процедуры их структурно-параметрического синтеза. В этом отношении хорошие перспективы имеют безынерционные и динамические регуляторы состояния, синтезируемые в рамках теории робастного модального управления.

Построение сечений областей робастной устойчивости САУ с использованием разработанного алгоритмического и программного обеспечения позволяет наглядно представить границы допустимых отклонений параметров, при которых система сохраняет работоспособность, и определить потенциальные возможности ее функционирования как в «зоне робастности», так и в «зоне риска».

Повышение робастных свойств САУ позволяют обеспечить методы трансформации стандартного распределения полюсов путем коррекции параметров регуляторов, формирующих дестабилизирующие ОС; методы, основанные на введении в структуру регулятора дополнительных производных по координатам состояния объекта или наблюдателя, а также методы рационального выбора структуры динамического PR с учетом особенностей управляемого объекта.

Расположение динамической характеристики САУ на границе «зоны робастности» позволяет получить редуцированный регулятор за счет обнуления

одного из коэффициентов обратной связи РС или старшей производной полинома числителя передаточной функции ПР, повысить помехоустойчивость системы при сохранении робастных свойств и других показателей качества.

Применение принципов физического моделирования САУ в реальном масштабе времени обеспечивает высокую оперативность и наглядность практической оценки эффективности разработанных теоретических методов.

Предложенные решения поставленных задач и полученные результаты, определяющие развитие методов синтеза робастных систем управления технологическими объектами, свидетельствуют о достижении поставленной цели диссертационной работы.

### **Основное содержание диссертации изложено в следующих работах**

#### **Статьи в изданиях по перечню ВАК РФ**

1. Тарарыкин С.В., Аполонский В.В., Терехов А.И. Исследование влияния положительных обратных связей на робастные свойства систем автоматического управления с регуляторами состояния // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. №3. – С. 9-16.

2. Тарарыкин С.В., Аполонский В.В., Терехов А.И. Исследование влияния структуры и параметров полиномиальных регуляторов «входа-выхода» на робастные свойства синтезируемых систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. №11. – С. 2-9.

3. Аполонский В.В., Тарарыкин С.В. Методы синтеза редуцированных регуляторов состояния линейных динамических систем // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014, № 6, – С. 25–33.

4. Тарарыкин С.В., Аполонский В.В. Методы синтеза редуцированных полиномиальных регуляторов динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление, 2015 г., Том 16, №2, – С. 75-81.

#### **Другие публикации по теме диссертации**

1. Тарарыкин С.В., Аполонский В.В. Понижение порядка полиномиальных регуляторов динамических систем // Вестник науки Сибири. 2013. № 3 (9). – С.96-100.

2. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В., Аполонский В.В. Анализ и синтез параметрически грубых систем с комбинированными регуляторами состояния / 4-я Всероссийская мультikonференция по проблемам управления // Материалы 4-й Всероссийской мультikonференции. Т.2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 19-22.

3. Аполонский В.В., Анисимов А.А., Тарарыкин С.В. Системы робастного модального управления с комбинированными регуляторами состояния // Сборник научных трудов I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Электронные приборы, системы и технологии» / под ред. О.А. Кожемяк, Е.Ю. Киселевой; Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 10-13.

4. Аполонский В.В., Тарарыкин С.В. Робастное модальное управление в условиях параметрической неопределенности объекта // Материалы всероссийской

молодежной конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2012)». Второй том. Сборник докладов. - М.: МГТУ «Станкин», 2012. – С. 15-19.

5. Аполонский В.В., Терехов А.И. Применение гибких обратных связей для робастного управления состоянием электромеханических систем // Труды VII Международной (VIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». - Иваново, 2012. – С. 61-64

6. Тарарыкин С.В., Аполонский В.В. Понижение порядка полиномиальных регуляторов динамических систем // Энергия инновации – 2013: материалы отчетной конференции молодых ученых ИГЭУ, 27 – 31 января 2014 г. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2014. – С.133-136.

7. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В., Аполонский В.В. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) 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. 138-144.

8. Аполонский В.В. Экспериментальные исследования цифровых робастных систем автоматического управления на базе безынерционных и динамических регуляторов состояния // Материалы Международной науч. – техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2015. – С. 232-237.

#### **Статьи в зарубежных изданиях**

V. V. Apolonskii and S. V. Tararykin Methods for the Synthesis of Reduced State Controllers of Linear Dynamic Systems // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2014, Vol. 53, No. 6, pp. 799–807. © Pleiades Publishing, Ltd., 2014. ISSN 1064-2307.

#### **Свидетельства о государственной регистрации программ**

1. Аполонский В.В., Анисимов А.А., Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011614853 «Программный комплекс для расчета полиномиальных регуляторов и регуляторов состояния «Sputnik» от 22.06.2011.

2. Аполонский В.В., Анисимов А.А., Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012611287 «Программа для определения области устойчивости систем автоматического управления «Skyeyes» от 31.01.2012.

3. Аполонский В.В., Тарарыкин С.В., Анисимов А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012617024 «Программа для автоматической настройки безынерционных и динамических регуляторов состояния «AutoTuner» от 06.08.2012.

4. Аполонский В.В., Анисимов А.А., Тарарыкин С.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013617932 «Синтез модальных регуляторов с гибкими обратными связями» от 27.08.2013.

Аполонский Владимир Викторович  
Методы структурно-параметрического синтеза робастных систем  
управления состоянием линеаризуемых динамических объектов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_. \_\_. 2016 г. Формат 60х84 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.