

На правах рукописи

**Филатов Денис Михайлович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
АВТОНОМНЫМ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) на кафедре систем автоматического управления.

Научный руководитель: Поляхов Николай Дмитриевич  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ), профессор кафедры систем автоматического управления

Официальные оппоненты: Константинов Сергей Валентинович  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), профессор кафедры «Системы приводов авиакосмической техники»

Лукичев Дмитрий Вячеславович  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им.Д.Ф. Устинова»

Защита состоится **«25» декабря 2013 г. в 17<sup>00</sup>** часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан **«22» ноября 2013 года.**

Ученый секретарь  
диссертационного совета

М. П. Белов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Рулевой привод (РП) современного маневренного самолета представляет собой сложный мехатронный комплекс, осуществляющий преобразование гидравлической и/или электрической энергии в отклонение органов управления полетом по командным сигналам летчика и системы управления полетом (СУП). Система РП является исполнительной СУП и оказывает существенное влияние на основные характеристики летательного аппарата, такие как безопасность полета, маневренность, топливная эффективность и др.

Возрастающие требования к маневренности, безопасности, скорости и дальности полета, энергоэффективности бортовых систем и уменьшению расходов на эксплуатацию и обслуживание самолетов приводят, в свою очередь, к усилению требований как к СУП в целом, так и непосредственно к РП. Причем, достижение требуемых показателей качества напрямую зависит не только от конструктивных решений, но и в немалой степени от алгоритмов управления.

Применение рассматриваемых в диссертации в качестве объектов управления автономных электрогидравлических приводов является неотъемлемой частью перспективной концепции авиастроения – концепции "Более электрифицированного самолета". Данная концепция является промежуточным шагом для перехода к "Полностью электрифицированному самолету", одной из основных задач в рамках которой является перевод всех бортовых систем летательного аппарата, основных потребителей энергии, на электропитание. Использование автономных электрогидравлических РП позволяет отказаться от централизованной гидросистемы самолета и повысить энергоэффективность СУП, обеспечить унификацию бортового оборудования и снизить затраты на обслуживание бортовых систем.

Для управления рулевыми поверхностями первичной системы управления полетом маневренных самолетов с неустойчивой аэродинамической компоновкой наиболее перспективными на сегодняшний день являются автономные электрогидравлические приводы с комбинированным принципом регулирования. В отличие от автономных электрогидравлических приводов с объемным регулированием при комбинированном принципе регулирования используется нереверсивный насос и золотниковый распределитель, что позволяет сочетать преимущества объемного регулирования при отработке задающих воздействий с большой амплитудой и преимущества дроссельного регулирования при отработке задающих воздействий с малой амплитудой. Но при этом возникает необходимость учитывать при построении системы управления нелинейные расходные характеристики золотникового распределителя и осуществлять управление положением штока цилиндра по двум каналам.

Решению различных аспектов построения систем управления для автономных электрогидравлических приводов с комбинированным принципом регулирования посвящены работы С.В. Константинова, В.Е. Кузнецова, П.Г. Редько, О.И. Трифоновой, Ю.Г. Оболенского, О.В. Вашкевича, В.С. Хомутова, А.М. Селиванова, P. Pratumswan A. Junchangpoood, M. Xu1, B. Jin, G. Chen, J. Ni, Y. Ji, S. Peng, L. Geng, Z. Wang, L. Qiu и др.

**Целью** диссертационной работы является разработка системы управления для автономных электрогидравлических приводов с комбинированным принципом управления, обеспечивающих необходимую для устойчивости системы СУП – РП – самолет динамику и стабильность показателей качества переходных процессов при различных ограниченных параметрических и внешних возмущениях.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены **следующие задачи:**

1. Проведен анализ современных подходов к построению систем управления для автономных электрогидравлических приводов;

2. Разработана компьютерная модель автономного электрогидравлического привода с комбинированным принципом регулирования;
3. Разработан регулятор давления питания с подстраиваемым в процессе работы контурным коэффициентом регулятора тока привода насоса с использованием в качестве сигнала обратной связи оценки давления питания;
4. Разработан адаптивный регулятор сигнального типа с эталонной моделью для контура давления питания;
5. Разработан адаптивный регулятор автономного электрогидравлического привода сигнального типа с эталонной моделью с подстройкой коэффициентов алгоритма адаптации в процессе работы;
6. Разработан регулятор канала управления давлением с подстраиваемым контурным коэффициентом;
7. Разработан комплекс программного обеспечения, предназначенный для автоматизации синтеза параметров адаптивного регулятора автономного электрогидравлического привода и проведения исследования системы при различных вариациях параметров объекта управления и внешних возмущениях.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач были использованы: методы математического моделирования и теории автоматического управления; методы эволюционного моделирования; математический пакет MatLab Simulink.

**Научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Регулятор давления питания, замкнутый по оценке давления питания и регулятор контура тока привода насоса с подстраиваемым в процессе работы контурным коэффициентом;
2. Адаптивный регулятор сигнального типа с эталонной моделью для контура давления питания;
3. Адаптивный регулятор автономного электрогидравлического привода сигнального типа с эталонной моделью с подстройкой коэффициентов алгоритма адаптации в процессе работы;
4. Регулятор канала управления давлением с подстраиваемым контурным коэффициентом;
5. Комплекс программного обеспечения, предназначенный для автоматизации синтеза параметров адаптивного регулятора автономного электрогидравлического привода и проведения исследования системы при различных вариациях параметров объекта управления и внешних возмущениях.

**Новизна научных результатов.**

1. Регулятор давления питания, замкнутый по оценке давления питания и регулятор контура тока привода насоса с подстраиваемым в процессе работы контурным коэффициентом. Применение в регуляторе алгоритма оценки давления на основе измерения скорости вращения вала электродвигателя и тока позволяет построить замкнутую систему управления по давлению в линии нагнетания без использования датчика давления. Применение регулятора контура тока с подстраиваемым контурным коэффициентом обеспечивает устойчивость контура давления питания при малых открытиях окон золотникового распределителя и высокое быстродействие при больших открытиях золотникового распределителя.
2. Адаптивный регулятор сигнального типа с эталонной моделью для контура давления питания обеспечивает стабильность динамических характеристик контура давления питания при изменении в широком диапазоне расхода жидкости.
3. Адаптивный регулятор автономного электрогидравлического привода сигнального типа с эталонной моделью с подстройкой коэффициентов алгоритма адаптации в процессе работы обеспечивает выполнение требований к динамике автономного РП при различных амплитудах задающего воздействия и стабилизацию динамических характеристик при ограни-

ченных параметрических и внешних возмущениях и проявлении негативного влияния нелинейности расходных характеристик золотникового распределителя изменения объемов полостей гидроцилиндра при перемещении штока на динамику переходных процессов привода. Подстройка коэффициентов адаптации позволяет уменьшить максимальные отклонения выхода системы от эталонной модели и улучшить форму управляющего сигнала. Предложенный адаптивный регулятор содержит два модуля формирования корректирующего сигнала: для канала управления приводом золотника и для канала управления давлением.

4. Регулятор канала управления давлением с подстраиваемым контурным коэффициентом обеспечивает при малых значениях задающего сигнала требуемую динамику, а при больших значениях задающего сигнала позволяет улучшить энергоэффективность привода.

5. Комплекс программного обеспечения, предназначенный для автоматизации синтеза параметров адаптивного регулятора автономного электрогидравлического привода и проведения исследования системы при различных вариациях параметров объекта управления и внешних возмущениях, реализует применение генетических алгоритмов для нахождения оптимальных параметров адаптивных регуляторов, обеспечивает автоматизированное выполнение исследований системы при различных параметрических и внешних возмущениях, сохранение, обработку, анализ и визуализацию результатов исследования.

**Достоверность научных положений, результатов и выводов.** Достоверность научных положений и результатов, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается корректным использованием методов математического моделирования, теории автоматического управления.

#### **Практическая ценность работы.**

1. Регулятор давления питания, замкнутый по оценке давления питания, с использованием компенсирующей обратной связи по оценке потока жидкости, проходящего через золотниковый распределитель, и регулятора контура тока привода насоса с подстраиваемым в процессе работы контурным коэффициентом позволяет использовать при управлении только информацию с датчиков тока и скорости вращения вала, что дает возможность упрощения аппаратной реализации системы управления и повышает ее надежность. Применение настройки контурного коэффициента контура тока как функции смещения золотника позволяет оптимизировать быстродействие контура давления в зависимости от динамики изменения потока жидкости.

2. Адаптивный регулятор сигнального типа с эталонной моделью для контура давления питания позволяет стабилизировать динамические характеристики контура давления питания, что позволяет усилить робастные свойства контура и упростить настройку внешнего контура управления.

3. Адаптивный регулятор автономного электрогидравлического привода сигнального типа с эталонной моделью с подстройкой коэффициентов алгоритма адаптации в процессе работы обеспечивает требуемые динамические характеристики автономного РП при различных амплитудах задающего воздействия и при ограниченных внешних и параметрических возмущениях, что позволяет обеспечить устойчивость контура СУП – РП – самолет.

4. Регулятор канала управления давлением с подстраиваемым контурным коэффициентом обеспечивает необходимую для одновременного управления по двум каналам динамику канала давления и позволяет улучшить энергоэффективность автономного РП.

5. Комплекс программного обеспечения, предназначенный для автоматизации синтеза параметров адаптивного регулятора автономного электрогидравлического привода и проведения исследования системы при различных вариациях параметров объекта управления и внешних возмущениях позволяет существенно упростить процедуру настройки параметров системы управления и сократить время исследования системы.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы использованы в следующих НИР:

1. Создание механотронных комплексов управления движением маневренных самолетов, государственный контракт П-979 ИКН/САУ-93. Источник финансирования – ФЦП. Сроки– 20.05.10-26.11.12

2. Создание архитектуры интеллектуальной системы управления механотронными рулевыми комплексами самолетов, № гос. регистрации: ПСП №11611. Источник финансирования – персональный грант правительства Санкт-Петербурга для студентов и аспирантов вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга 2011 года. Сроки: 1.05.2011-31.12.2011.

Практическая полезность подтверждается актом использования на предприятии ОАО «ВОСХОД», а также в учебном процессе СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

**Апробация результатов работы.** Основные положения работы докладывались на следующих научных семинарах и конференциях: на третьем всероссийском форуме студентов, аспирантов, молодых ученых (Санкт-Петербург, 28-30 октября 2009 г), XIV Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. (Санкт-Петербург, 23-25 июня 2011), на 64-66 научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ЭТУ (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», февраль 2011-2013 гг.), всероссийской научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» (Москва, 25 - 26 июня 2012).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 9 статей, 5 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 2 статьи, опубликованные в изданиях, включенных в базу SCOPUS, 2 статьи в других изданиях и 6 докладов на международных и межрегиональных научных конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы и двух приложений. Основная часть работы изложена на 120 страницах машинописного текста. Работа содержит 50 рисунков и 15 таблиц, список литературы содержит 80 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, перечислены основные научные результаты диссертационной работы, кратко изложено содержание диссертации по главам.

**В первой главе** представлен обзор и сравнение современных вариантов исполнения системы РП. Сформулированы основные требования, предъявляемые в настоящее время к перспективным РП. Рассмотрены особенности конструкции и требования к автономному РП с комбинированным принципом регулирования.

Одной из основных тенденций развития авиастроения является увеличение роли бортовых систем в процессе управления полетом. При этом возрастают требования к маневренности, безопасности, скорости и дальности полета, энергоэффективности бортовых систем и, в частности, к РП.

Потенциал улучшения данных показателей закладывается на этапе выбора рациональной конструкции привода. Однако большинство из указанных показателей напрямую зависят не только от конструктивных решений, но и в немалой степени от алгоритмов управления. С точки зрения построения системы управления наиболее важными являются динамические характеристики РП.

Наиболее распространенным на сегодняшний день вариантом исполнения системы РП является система электрогидравлических РП, получающих энергию от централизованной гидросистемы. При таком варианте построения РП представляет собой электрогидравлический привод с дроссельным принципом управления. Достоинствами подобного варианта исполнения системы РП являются: высокий подтвержденный уровень безотказности, высокие удельные энергетические показатели (около 3,2 кг/кВт), высокая динамическая жесткость привода. К недостаткам можно отнести высокое энергопотребление, нелинейные характеристики золотниковых распределителей; большую массу и необходимый монтажный объем централизованной гидросистемы.

Другим путем развития систем РП является отказ от обеспечения энергией РП с помощью централизованной гидросистемы и переход к автономным (в смысле гидравлики) приводам. Подобный переход является одним из ключевых компонентов концепции «полностью электрический самолет». Под «полностью электрическим самолетом» понимается самолет с единой централизованной системой электроснабжения в качестве источника вспомогательной энергии, обеспечивающей все энергетические потребности самолета.

Создание автономного РП подразумевает решение двух задач: выбор типа электродвигателя и механического преобразователя. В качестве электродвигателя могут быть использованы следующие три типа двигателей: бесконтактный двигатель постоянного тока, асинхронный и индукторный двигатели. Наиболее конкурентоспособными в настоящее время являются бесконтактные двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. В роли механического преобразователя может выступать редуктор или гидроусилитель.

С точки зрения простоты конструкции наиболее предпочтительным выглядит электро-механический привод с планетарным редуктором и шарико-винтовой передачей. В основном электро-механические РП применяются в качестве РП вторичной системы управления и органов механизации крыла.

Другим вариантом исполнения автономного РП является автономный привод с гидравлической передачей. В таком приводе механическая энергия вращательного движения электропривода преобразуется в насосе в гидравлическую энергию потока жидкости, которая с помощью силового цилиндра переходит в механическую энергию поступательного движения. По принципу управления автономные электрогидравлические приводы подразделяются на: приводы с объемным регулированием, приводы с дроссельным регулированием и приводы с комбинированным регулированием. Упрощенная схема автономного электрогидравлического привода с комбинированным принципом регулирования приведена на рис. 1.

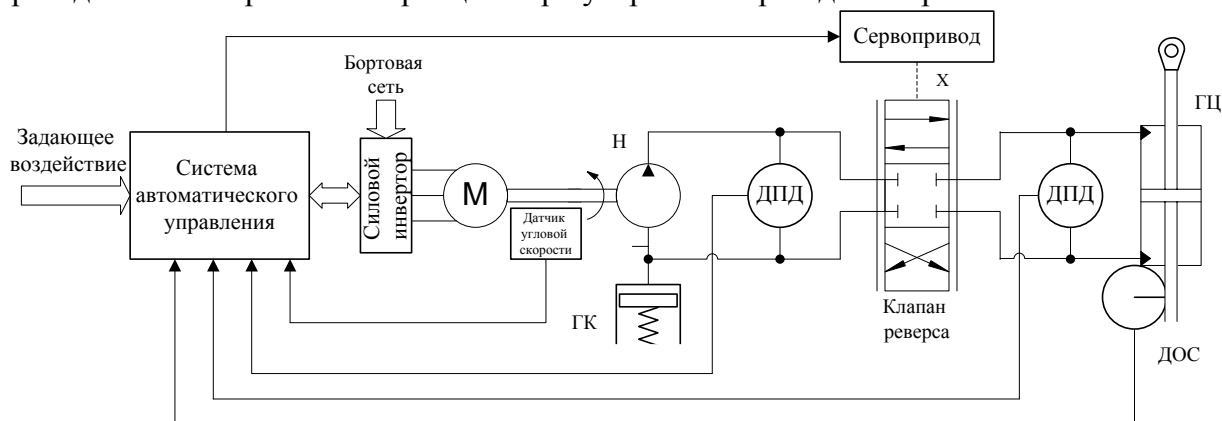


Рис. 1. Упрощенная схема автономного электрогидравлического привода с комбинированным принципом регулирования

Исходя из специфики комбинированного принципа регулирования, оборудование, входящее в состав автономного РП можно условно разделить на следующие подсистемы: подсистема канала объемного регулирования, подсистема дроссельного канала регулирования, гидромеханическая подсистема и подсистема управления.

Основными особенностями конструкции автономного РП, оказывающими негативное влияние на динамические показатели, являются нелинейность расходных характеристик золотникового распределителя, упругость крепления привода и механических связей привода и нагрузки. Эффективное подавление негативного влияния указанных факторов может быть осуществлено реализацией в подсистеме управления специальных корректирующих алгоритмов, в том числе адаптивных и интеллектуальных. Другой функцией подсистемы управления является комбинирование объемного и дроссельного принципа регулирования, позволяющее при должном уровне динамических показателей обеспечивать улучшение энергоэффективности РП.

**Во второй главе** приведено математическое описание автономного электрогидравлического привода с комбинированным принципом регулирования структурированное по подсистемам, предложенным в первой главе, а также разработанные компьютерные модели для каждой подсистемы.

Математическая модель гидромеханической подсистемы описывает динамические процессы преобразования гидравлической энергии потока жидкости в перемещение массы инерционной нагрузки  $m_n$ , приведенной к штоку цилиндра, с учетом конструктивных особенностей механических связей и действия внешней возмущающей силы.

Нелинейная математическая модель гидромеханической подсистемы без учета упругости механической связи цилиндра с основанием и при допущении, что все механические связи в системе являются абсолютно жесткими в виде системы дифференциальных уравнений в форме Коши имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dy_m}{dt} = v_m \\ \frac{dv_m}{dt} = \frac{A_1}{m} p_1 - \frac{A_2}{m} p_2 - \frac{K_{\text{вТ}}}{m} v_m - \frac{1}{m} F_{\text{в}} \\ \frac{dp_1}{dt} = -\frac{BA_1}{A_1 y_m + V_{01}} v_m + \frac{BK_{\text{пер.}}}{A_1 y_m + V_{01}} p_1 - \frac{BK_{\text{пер.}}}{A_1 y_m + V_{01}} p_2 + \frac{B}{A_1 y_m + V_{01}} Q_1 \\ \frac{dp_2}{dt} = -\frac{BA_2}{-A_2 y_m + V_{02}} v_m + \frac{BK_{\text{пер.}}}{-A_2 y_m + V_{02}} p_1 - \frac{BK_{\text{пер.}}}{-A_2 y_m + V_{02}} p_2 + \frac{B}{-A_2 y_m + V_{02}} Q_2 \end{cases} \quad (1)$$

где через  $y_m$  обозначено перемещение нагрузки,  $v_m$  - скорость штока,  $K_{\text{вТ}}$  - коэффициент вязкого трения,  $p_1$  и  $p_2$  - давление в левой и правой полостях гидроцилиндра соответственно,  $F_{\text{в}}$  - внешняя возмущающая сила,  $A_1$  и  $A_2$  - эффективные площади поршня в левой и правой полостях гидроцилиндра соответственно,  $m$  - масса поршня гидроцилиндра с приведенной к ней инерционной нагрузкой,  $B$  - модуль объемной упругости смеси жидкости и воздуха,  $V_{01}$  - начальный объем левой полости гидроцилиндра,  $V_{02}$  - начальный объем правой полости гидроцилиндра,  $K_{\text{пер.}}$  - коэффициент перетечек,  $Q_1$  - объемный расход жидкости, поступающей в левую полость гидроцилиндра при положительном перемещении поршня,  $Q_2$  - объемный расход жидкости, вытекающей из правой полости гидроцилиндра при положительном перемещении поршня.

Компьютерная модель гидромеханической подсистемы состоит из двух блоков: «Cylinder» и «Plant». Входными сигналами блока «Cylinder» являются: объемные расходы жидкости левой и правой полости гидроцилиндра, скорость перемещения штока цилиндра и



его координата. Действие предохранительного клапана локальной гидросистемы учитывается с помощью функции ограничения накапливаемого значения в интеграторах модели данного блока. Выходными сигналами блока являются: давление в левой и правой полостях гидроцилиндра и усилие, развиваемое на штоке цилиндра.

Блок «Plant» содержит модель перемещения инерционной нагрузки под действием внешних сил и усилия на штоке. На вход данной подсистемы подаются усилие на штоке цилиндра и внешняя возмущающая сила. Функция ограничения накапливаемого значения в интеграторе реализует учет реального ограничения перемещения штока цилиндра. Также в блоке «Plant» реализован алгоритм сброса значения скорости и расчета силы нормальной реакции опоры, возникающей при достижении поршнем упора (крайнего положения).

Математическое описание подсистемы дроссельного канала регулирования состоит из системы нелинейных алгебраических уравнений, описывающих зависимость изменения расхода жидкости через окна золотникового распределителя от величины смещения золотника  $x_3$  и значений давлений в полостях цилиндра и линии питания  $p_{\text{п}}$  и линии слива  $p_{\text{сл}}$  при положительном (2, 3) и отрицательном (4, 5) смещениях золотника и линейных дифференциальных уравнений второго порядка (6), описывающих динамику замкнутого сервопривода с адаптивным законом управления сигнального типа, управляющего перемещением золотника:

$$Q_1 = k_x(x_3)x_3 \cdot \sqrt{|p_{\text{п}} - p_1|} \cdot \text{sign}(p_{\text{п}} - p_1), \quad (2)$$

$$Q_2 = k_x(x_3)x_3 \cdot \sqrt{|p_2 - p_{\text{сл}}|} \cdot \text{sign}(p_2 - p_{\text{сл}}), \quad (3)$$

$$Q_1 = k_x(x_3)x_3 \cdot \sqrt{|p_1 - p_{\text{сл}}|} \cdot \text{sign}(p_1 - p_{\text{сл}}), \quad (4)$$

$$Q_2 = k_x(x_3)x_3 \cdot \sqrt{|p_{\text{п}} - p_2|} \cdot \text{sign}(p_{\text{п}} - p_2), \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_3}{dt} = x_{\text{зв}} \\ \frac{dx_{\text{зв}}}{dt} = -\frac{K_{\text{сп}}}{T_{\text{сп}}} x_3 - \frac{1}{T_{\text{сп}}} x_{\text{зв}} + \frac{K_{\text{сп}}}{T_{\text{сп}}} U_x \end{cases}, \quad (6)$$

где  $k_x(x_3)$  – коэффициент проводимости окон, учитывающий также потери на местных гидравлических сопротивлениях в корпусе гидроагрегата (зависимость коэффициента проводимости окон от величины смещения может быть приближенно описана как кусочно-линейная функция),  $x_3$  и  $x_{\text{зв}}$  – переменные состояния, причем через  $x_3$  обозначим перемещение золотника (выход сервопривода);  $K_{\text{сп}}$  и  $T_{\text{сп}}$  – параметры модели, описывающие динамику сервопривода;  $U_x$  – сигнал, задающий смещение золотника.

Компьютерная модель подсистемы дроссельного канала регулирования представлена блоком «Klapan reversa». Входными переменными данного блока являются: давление питания, давление в линии слива, давление в левой и правой полостях гидроцилиндра и сигнал, задающий смещение золотника. Выходными переменными блока являются: поток жидкости, проходящий через золотниковый распределитель в гидроцилиндр, и значения потоков втекающих и вытекающих из полостей гидроцилиндра.

Математическая модель подсистемы объемного канала регулирования содержит описание усилителя мощности с широтно-импульсной модуляцией, бесщеточного двигателя постоянного тока, нерегулируемого аксиально-поршневого насоса и описание процесса формирования давления в магистрали питания автономного привода. Математическая модель подсистемы объемного канала регулирования представлена системой дифференциальных уравнений (7), в которой приняты следующие обозначения:  $U_{\text{д}}$  – напряжение питания, прикладываемое к обмоткам электродвигателя привода насоса,  $T_{\text{ум}}$  – постоянная времени усилителя мощности, определяемая частотой широтно-импульсной модуляции,  $K_{\text{ум}}$  – передаточный коэффициент уси-

лителя мощности, задающий соотношение между входным сигналом усилителя мощности  $U_{ум}$  и напряжением питания на выходе преобразователя,  $\omega$  – скорость вращения электродвигателя;  $J$  – суммарный момент инерции ротора двигателя и насоса;  $K_{вгд}$  – суммарный коэффициент вязкого трения двигателя и насоса;  $C_m$  – конструктивный коэффициент момента двигателя;  $I_я$  – ток обмоток двигателя;  $M_n$  – момент нагрузки, создаваемый насосом;  $C_e$  – конструктивный коэффициент ЭДС двигателя;  $L_я$  и  $R_я$  – индуктивность и сопротивление обмоток двигателя соответственно,  $V_{хар}$  – характерный объем насоса,  $p_{п}$  – давление питания,  $p_{сл}$  – давление слива,  $r$  – коэффициент утечек в аксиально-поршневом насосе,  $V_{п}$  – объем полости линии нагнетания до золотникового распределителя,  $Q_3$  – расход жидкости, проходящей через окна золотника в гидроцилиндр.

$$\begin{cases} \frac{dU_d}{dt} = -\frac{1}{T_{ум}} U_d + \frac{K_{ум}}{T_{сп}} U_{ум} \\ \frac{dI_я}{dt} = -\frac{R_я}{L_я} I_я - \frac{C_e}{L_я} \omega + \frac{1}{L_я} U_d \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{C_m}{J} I_я - \frac{K_{вгд}}{J} \omega - \frac{1}{JV_{хар}} p_{п} + \frac{1}{JV_{хар}} p_{сл} \\ \frac{dp_{п}}{dt} = \frac{BV_{хар}}{V_{п}} \omega - \frac{Br}{V_{п}} p_{п} + \frac{Br}{V_{п}} p_{сл} - \frac{B}{V_{п}} Q_3 \end{cases} \quad (7)$$

В компьютерной модели подсистемы объемного канала регулирования представлена блоком «Dvigel+nasos», на вход которого подается сигнал задания напряжения питания на обмотках двигателя и поток жидкости, проходящий через золотниковый распределитель в гидроцилиндр. Выходными переменными являются: давление в линии питания, скорость вращения вала двигателя и ток, потребляемый двигателем. Также в компьютерной модели реализованы ограничение на максимальное напряжение питания, подводимое к обмоткам двигателя, и ограничение давления в локальной гидросистеме (действие предохранительного клапана).

Математическое описание автономного электрогидравлического привода с комбинированным принципом регулирования составляется на основе уравнений и систем (2 – 7) и представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений десятого порядка. Компьютерная модель представляет собой подсистему составленную из описанных выше блоков.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы разработки регулятора давления питания, замкнутого по оценке давления питания; регулятора контура тока привода насоса с подстраиваемым в процессе работы контурным коэффициентом; адаптивного регулятора для контура давления питания; адаптивного регулятора автономного электрогидравлического привода и регулятора канала управления давлением.

Для системы управления приводом насоса предложен алгоритм оценки давления питания по измерениям тока и скорости вращения привода, позволяющий построить замкнутую по давлению питания систему управления без использования датчика давления:

$$\widehat{p}_{п} = \frac{1}{V_{хар}} \left( \frac{I_я C_m}{T_{ф} P + 1} - \frac{\omega K_{вгд}}{T_{ф} P + 1} - \frac{\omega J P}{(T_{ф} P + 1)^2} \right), \quad (8)$$

где  $\widehat{p}_{п}$  – оценка давления питания;  $V_{хар}$  – характерный объем насоса;  $I_я$  – ток якорной цепи;  $C_m$  – конструктивная электродвигателя;  $\omega$  – скорость вращения привода;  $K_{вгд}$  – коэффициент вязкого трения электродвигателя и насоса;  $J$  – суммарный момент инерции электродвигателя и насоса;  $T_{ф}$  – постоянная времени фильтра,  $P$  – оператор Лапласа.

Проведен анализ влияния параметров предложенного алгоритма на точность полученной оценки давления питания. При максимальном завышении оценки давления (увеличение  $C_m$  на 5%, уменьшение  $V_{\text{хар}}$  на 5%, уменьшение  $K_{\text{вгд}}$  на 30%) и при максимальном занижении оценки (увеличение  $C_m$  на 5%, уменьшение  $V_{\text{хар}}$  на 5%, уменьшение  $K_{\text{вгд}}$  на 30%) максимальное отклонение оценки давления от истинного значения не превышает 5%. Это позволяет сделать вывод о приемлемости точности, предоставляемой предложенным алгоритмом оценки давления, с учетом того, что во внешнем контуре применяется адаптивный закон управления, обеспечивающий коррекцию влияния изменений коэффициента передачи замкнутого контура давления питания, вызванных погрешностями алгоритма оценки давления питания.

Для оценки влияния малой постоянной времени фильтров проведен ряд моделирований контура давления питания, замкнутого по оценке давления питания. Результаты моделирования для различных значений коэффициента  $K_{Q_3}$ , позволяющего учесть влияние потока жидкости, проходящей через золотниковый распределитель в гидроцилиндр, представлены на рис. 2.

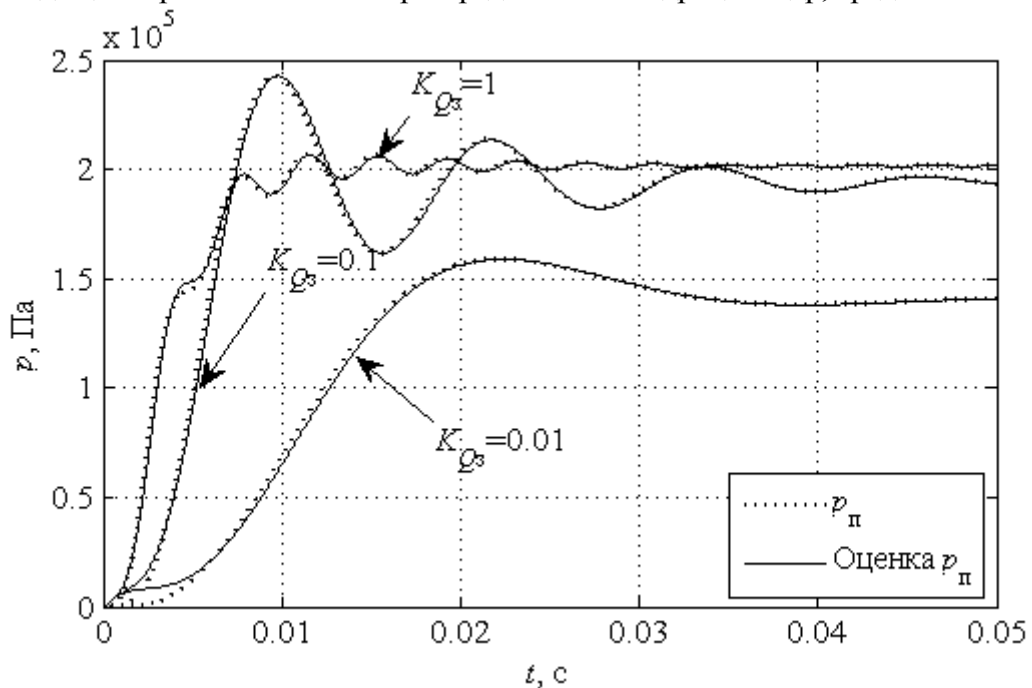


Рис. 2. Графики изменения давления и оценки давления

По результатам моделирования можно сделать вывод, что наибольшее отклонение оценки от реального значения давления происходит в начале переходного процесса, а запаздывание, вносимое инерционностью каналов измерения и фильтрацией незначительно.

Для управления давлением питания в работе используется система управления, построенная по каскадному принципу, состоящая из регулятора тока и регулятора давления. В контуре тока привода насоса предложено использовать регулятор, с передаточной функцией вида:

$$W_{\text{рт}}(P) = \frac{K_{\text{рт}}(x_3)(T_{\text{я}}P + 1)(T_{\text{ум}}P + 1)}{P(T_{\text{ф}}P + 1)}, \quad (9)$$

где  $K_{\text{рт}}(x_3)$  – контурный коэффициент, значение которого изменяется в зависимости от степени открытия окон золотникового распределителя. При реализации предложенного регулятора также учитывается необходимость ограничения накапливаемого в интеграторе значения, что вызвано наличием ограничения на максимальное напряжение питания обмоток двигателя.

Для управления давлением питания в работе применяется ПИД-регулятор с ограничением накапливаемого значения в интеграторе, обусловленным ограничением максимального рабочего тока двигателя. На рис. 3 представлены графики переходных процессов в контуре давления питания с предложенной системой управления при различных значениях смещения золотника. В качестве задающего воздействия используется ступенчатая функция с амплитудой 1000 кПа.

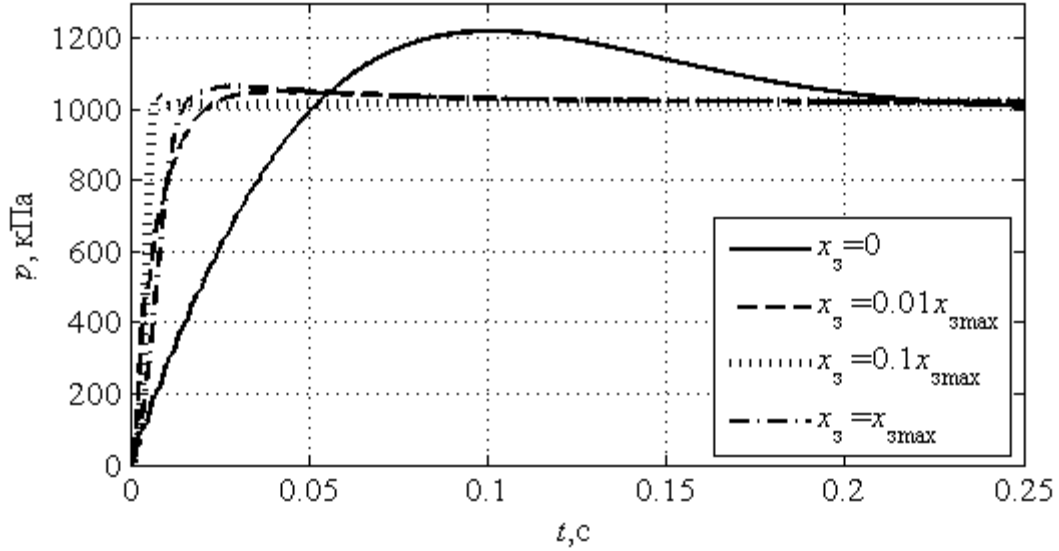


Рис 3. Переходные процессы по давлению с подстройкой контурного коэффициента регулятора тока

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что предложенный алгоритм управления контуром давления обеспечивает устойчивость системы при широком диапазоне изменений расхода жидкости  $Q_3$ , проходящей через окна золотника в гидроцилиндр, и высокие динамические характеристики при больших значениях расхода жидкости  $Q_3$ . Переходные процессы при предложенном законе управления не обладают ярко выраженным колебательным характером, что обеспечивает корректность работы алгоритма оценки давления.

Для стабилизации динамических характеристик контура давления питания при широком диапазоне изменения расхода  $Q_3$  в контур дополнительно к предложенному закону управления введен адаптивный закон управления с настройкой сигнального типа с эталонной моделью:

$$\begin{cases} U_{адpн} = f_{огр} (u_{адpн}, u_{адpн \min}, u_{адpн \max}) \\ u_{адpн} = K_1 \left( 1 + K_2 \frac{P}{T_\phi P + 1} \right) (p_{эм} - \widehat{p}_н), \\ p_{эм} = \frac{g_{pн}}{(T_1 P + 1)(T_2^2 P^2 + 2\xi T_2 P + 1)} \end{cases} \quad (10)$$

где  $U_{адpн}$  – сигнал адаптивной коррекции для контура давления питания;  $f_{огр}$  – функция ограничения:

$$f_{огр}(x) = \begin{cases} x_{\max}, & \text{при } x > x_{\max} \\ x, & \text{при } x_{\min} \leq x \leq x_{\max}; \\ x_{\min}, & \text{при } x < x_{\min} \end{cases} \quad (11)$$

$u_{адрп}$ ,  $u_{адрп\ min}$ ,  $u_{адрп\ max}$  – сигнал адаптивной коррекции, его максимальное и минимальное значение соответственно (задание глубины адаптации);  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты сигнального алгоритма адаптации;  $p_{эм}$  – выход эталонной модели;  $g_{рп}$  – сигнал задания давления питания;  $T_1$ ,  $T_2$  и  $\xi$  – постоянные времени и коэффициент демпфирования эталонной модели контура давления питания соответственно. Порядок эталонной модели был выбран на основе анализа расположения нулей и полюсов замкнутого контура давления питания определенных по упрощенной линеаризованной модели в различных режимах, а желаемая динамика эталонной модели выбиралась исходя из максимального быстродействия при максимальном смещении золотника  $x_3$  с учетом ограничений на максимальный ток двигателя.

На рис. 4 представлены графики переходных процессов в системе без использования адаптивного регулятора (серый цвет) и с использованием адаптивного регулятора (черный цвет) при различных значениях смещения золотника с учетом динамики движения золотника. Учет динамики золотникового распределителя осуществлялся подачей при моделировании сигнала смещения золотника, полученного путем подачи ступенчатого воздействия через колебательное звено, отражающее динамику привода золотника. В качестве задающего воздействия для регулятора давления используется ступенчатая функция с амплитудой 1000 кПа.

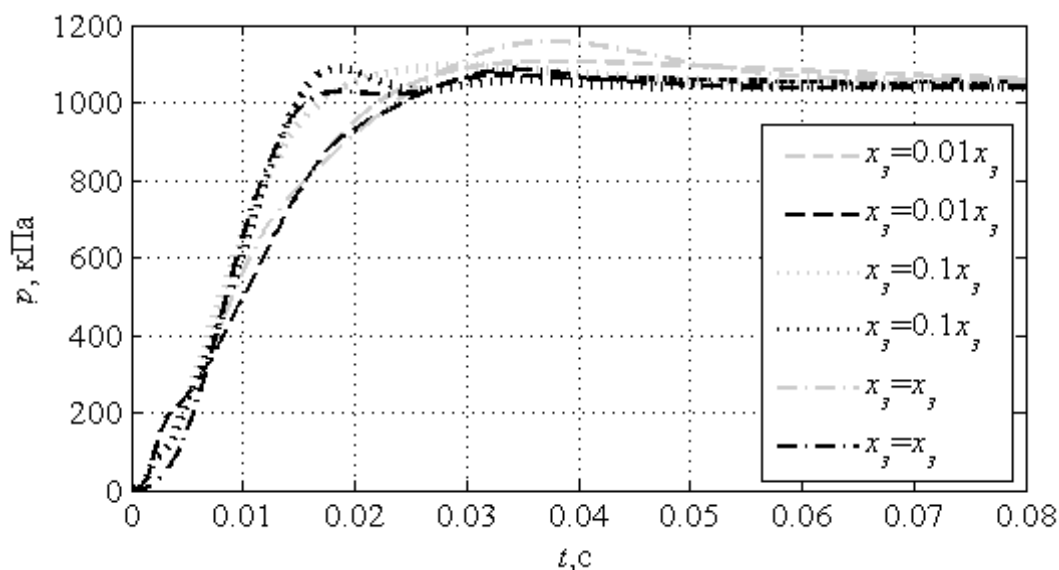


Рис. 4 Переходные процессы в контуре давления с учетом динамики золотникового распределителя

Проведенные исследования показали, что предложенный адаптивный регулятор позволяет улучшить динамические характеристики контура давления питания при больших значениях смещения золотника (более 10% от максимального значения), особенно ярко эффект от внедрения адаптивного закона управления наблюдается при учете динамики золотникового распределителя.

В качестве базового закона управления автономным электрогидравлическим приводом с комбинированным принципом регулирования в данной работе предложено использовать комбинацию пропорционального и адаптивного закона управления в канале дроссельного регулирования и комбинацию пропорционально-дифференциального закона управления и адаптивного закона управления в объемном канале управления. В обоих каналах регулирования применяются адаптивные законы управления сигнального типа. Для формирования адаптивной составляющей сигнала управления регуляторы в обоих каналах используют одну и ту же эталонную модель, но имеют при этом отдельные наборы коэффициентов. Применение адаптив-

ного регулятора при управлении автономным РП с комбинированным принципом регулирования обосновано необходимостью обеспечивать требуемый для устойчивости контура «СУП–РП–самолет» вид частотных характеристик замкнутого РП, как при малых, так и при больших амплитудах управляющих сигналов.

В качестве эталонной модели предложена система третьего порядка с учетом ограничений, присущих реальному приводу, удовлетворяющая требованиям, предъявляемым к виду частотных характеристик замкнутого РП. Для упрощения реализации адаптивных алгоритмов управления в работе предложено формировать сигнал адаптивного регулятора с использованием разности только выходной переменной и ее первой производной эталонной модели и РП. С учетом предложенного упрощения запишем закон управления автономным электрогидравлическим приводом с комбинированным принципом регулирования:

$$\begin{cases} U_{адх} = f_{огр}(u_{адх}, u_{адх \min}, u_{адх \max}) \\ u_{адх} = K_{1x}(e + K_{2x}(e_p)de) \\ u_{адп} = K_{1p}(e + K_{2p}de) \end{cases} \quad (12)$$

где  $U_{адх}$  – сигнал адаптивной коррекции для контура положения в канале управления дроссельным распределителем;  $u_{адх \min}, u_{адх \max}$  – максимальное и минимальное значение сигнала адаптивной коррекции соответственно (задание глубины адаптации);  $K_{1x}$  и  $K_{2x}(e_p)$  – коэффициенты сигнального алгоритма адаптации канала управления дроссельным распределителем;  $e$  – рассогласование между движением объекта управления и эталонной моделью,  $de$  – рассогласование между скоростью смещения штока эталонной модели и производной смещения штока РП, рассчитанной с учетом фильтрации;  $e_p$  – ошибки регулирования  $u_{адп}$  – сигнал адаптивной коррекции для контура положения в канале управления давлением;  $K_{1p}$  и  $K_{2p}$  – коэффициенты сигнального алгоритма адаптации канала управления давлением. Графики переходных процессов движения штока эталонной модели и РП представлены на рис. 5 при различных значениях амплитуды задающего воздействия. Для удобства отображения переходные процессы нормированы по отношению к задающему воздействию. Управляющее воздействие в виде ступенчатой функции подается в момент времени  $t = 0.1$  с.

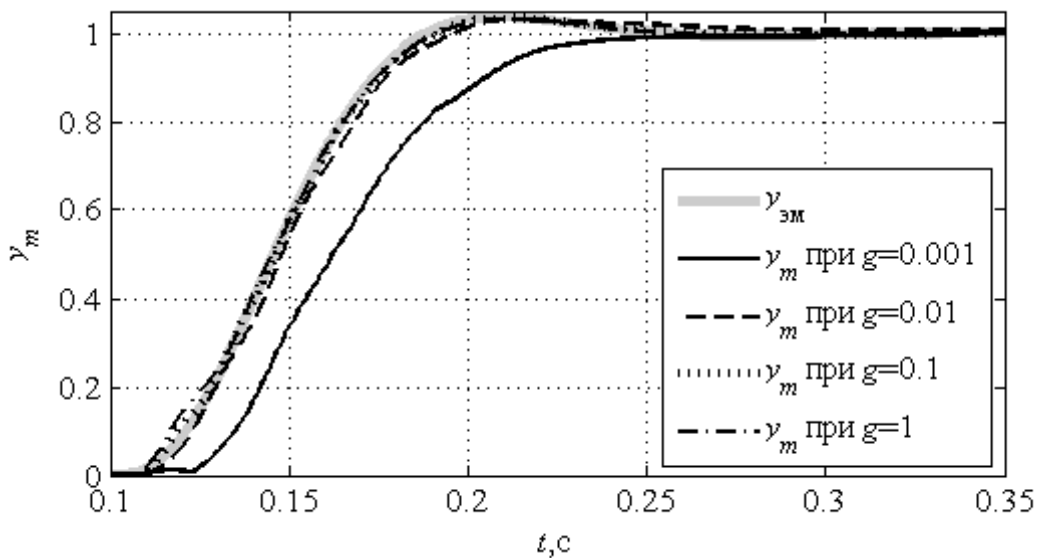


Рис. 5 Переходные процессы эталонной модели и рулевого привода

Проведенные исследования показали, что использование адаптивного закона управления позволяет стабилизировать динамические характеристики автономного электрогидравлического привода при различных амплитудах задающего воздействия, уменьшить влияние нелинейностей расходных характеристик золотникового распределителя, изменения соотношения объемов левой и правой полости гидроцилиндра при перемещении штока на динамику привода и уменьшение влияния внешних возмущений. Однако качество работы предложенного алгоритма зависит от амплитуды задающего воздействия, причем максимальное отклонение движения поршня РП от эталонной модели наблюдается при сверх малых амплитудах задающего воздействия ( $g = 0.001$ ). Для улучшения динамических характеристик автономного электрогидравлического привода с комбинированным принципом регулирования введем в канал объемного регулирования настраиваемый контурный коэффициент, зависящий от амплитуды ошибки, и дополнительную форсирующую связь по скорости смещения штока модели, позволяющую форсировать процесс на начальном этапе при малых амплитудах.

$$U_p = K_p(e_p) \left( |u_{адп}| + \max(K_{dde} |de_p|, K_{дуэм} |dy_{эм}|) + K_{рп} e_p \right), \quad (13)$$

где  $K_p(e_p)$  – контурный коэффициент, подстраиваемый в зависимости от величины ошибки регулирования  $e_p$ ;  $K_{dde}$  – коэффициент при производной ошибки регулирования  $de_p$ ;  $K_{дуэм}$  – коэффициент при производной от выходной координаты эталонной модели  $dy_{эм}$  (скорости смещения штока модели);  $K_{рп}$  – коэффициент при ошибке регулирования. Нормированные графики переходных процессов движения штока эталонной модели и РП представлены на рис. 6.

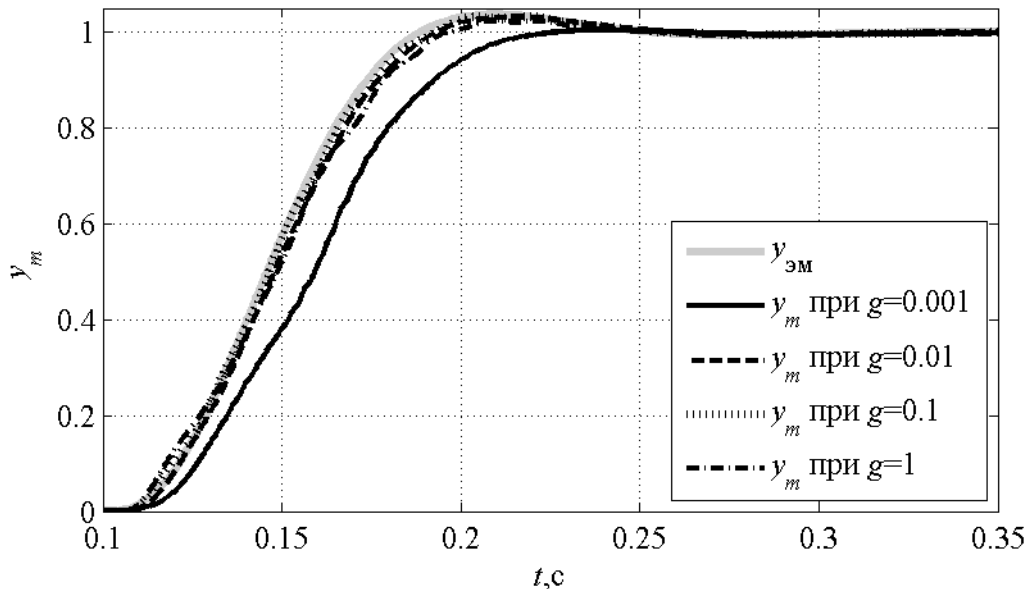


Рис. 6. Переходные процессы эталонной модели и рулевого привода

Введение настраиваемого контурного коэффициента в контуре давления и дополнительной форсирующей связи позволило улучшить вид переходных процессов при малых и сверхмалых амплитудах задающего воздействия. На рис. 7 представлены частотные характеристики автономного электрогидравлического привода с предложенной системой управления при различных значениях амплитуд задающего воздействия, полученные экспериментальным путем с помощью серий моделирования. Серым цветом обозначены графики полученные для амплитуды, равной 10% от максимальной, черным цветом – для амплитуды, равной 0,1% от максимальной, также на

рис. 7 обозначены границы, определяющие допустимую с точки зрения устойчивости контура СУП–РП–самолет область для частотных характеристик РП переднего горизонтального оперения, задающего наиболее жесткие требованиями к динамике РП.

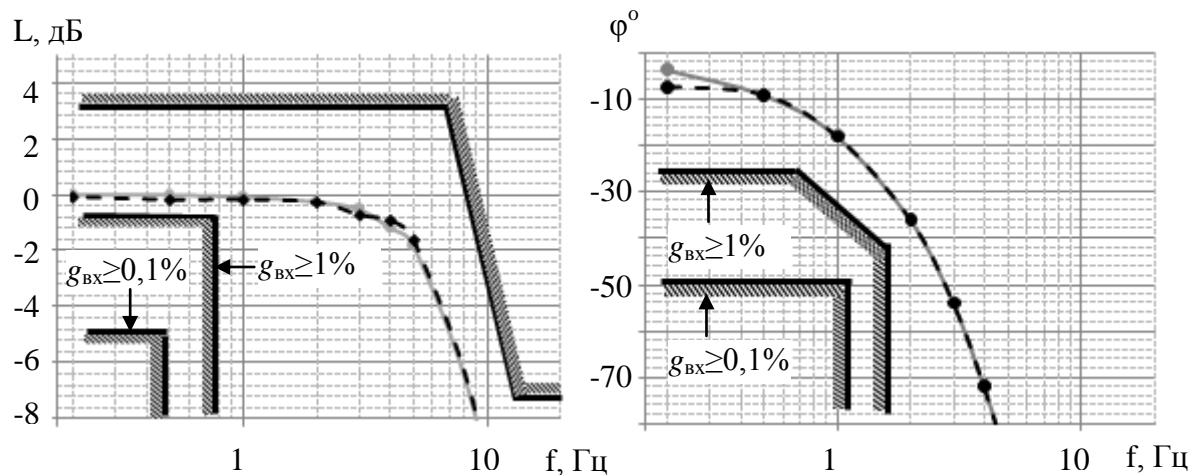


Рис. 7. Частотные характеристики автономного электрогидравлического привода с предложенной системой управления

Проведенные исследования показывают, что предложенная система управления удовлетворяет заданным требованиям к виду частотных характеристик как для РП горизонтального оперения, так и для РП переднего горизонтального оперения современных и перспективных РП маневренных самолетов с неустойчивой аэродинамической компоновкой.

**В четвертой главе** осуществляется разработка комплекса программного обеспечения, предназначенного для автоматизации синтеза параметров адаптивного регулятора автономного электрогидравлического привода, реализующего применение генетических алгоритмов для нахождения оптимальных параметров адаптивных регуляторов и обеспечивающего автоматизированное выполнение исследований системы при различных параметрических и внешних возмущениях, сохранение, обработку, анализ и визуализацию результатов исследования.

Программный комплекс выполнен на базе инструментария, предоставленного MathWorks и реализует выполнение следующих функций:

1. Вычисление оптимальных значений коэффициентов адаптивного регулятора контура положения в автоматическом режиме с использованием генетического алгоритма. Критерием оптимизации служит минимальное время затухания отклонения переходного процесса системы от эталонной модели. Начальная популяция сформирована по результатам проведенных ранее исследований и состоит из 20 особей, представляющих собой пары коэффициентов адаптивного регулятора. Реализована функция мутации, в которой каждая хромосома родителя суммируется со случайным образом сгенерированным числом с распределением Гаусса, результат берется по модулю. Сформированные в результате выполнения генетического алгоритма коэффициенты адаптивного регулятора сохраняются в файл с расширением \*.mat.

2. Проведение исследований системы адаптивного закона управления автономным электрогидравлическим приводом с комбинированным принципом регулирования при различных задающих воздействиях, для которых в режиме диалога с пользователем задаются такие параметры как тип воздействия, амплитуда, частота и другие. Возможно задание как определенного вида, так и некоторого семейства входных воздействий, для которых проводится серия моделирований с последующей визуализацией результатов, а также сохранением их в файле с рас-



ширением \*.mat. По результатам исследований проводится анализ отклонений полученных переходных процессов от эталонной модели в соответствии с заданными критериями.

3. Проведение исследований системы адаптивного закона управления автономным электрогидравлическим приводом с комбинированным принципом регулирования при ограниченных параметрических возмущениях, которые также задаются в режиме диалога с пользователем в виде вектора изменения параметров системы. По результатам исследований проводится анализ отклонений полученных переходных процессов от эталонной модели с последующей визуализацией результатов.

### **Заключение**

В соответствии с поставленными в диссертационной работе целью и задачами, были изучены современные подходы к разработке автономных РП маневренных самолетов, выявлены основные требования, предъявляемые к системам управления автономными РП, на основе математического описания создана компьютерная модель, позволяющая производить исследования систем управления, разработана система управления и проведены ее исследования, разработан программный комплекс, обеспечивающий поиск оптимальных настроек предложенных адаптивных законов управления и автоматизацию проведения исследований.

Созданная компьютерная модель учитывает основные особенности исследуемого привода: нелинейные характеристики золотникового распределителя, нелинейное влияние перемещения поршня на динамику формирования усилия на штоке, взаимное влияние каналов управления, ограничения на напряжение питания, максимальный рабочий ток привода, максимальное давление в локальной гидросистеме, влияние сил трения, утечек и перетечек, что обуславливает достоверность результатов исследований, полученных при компьютерном моделировании.

Разработанная система управления использует в качестве входных переменных только сигналы с датчика положения штока, датчика тока привода и датчика скорости вращения вала привода, что позволяет упростить конструкцию автономного привода, снизить его стоимость и стоимость его обслуживания и повысить его надежность. Исследования предложенной системы управления показали, что ее применение позволяет обеспечивать требуемые для устойчивости контура СУП – РП – самолет динамические характеристики при ограниченных параметрических и внешних возмущениях.

Разработанный программный комплекс позволяет существенно упростить процедуру настройки параметров адаптивных законов управления, примененных в предложенной системе управления и автоматизировать рутинную часть исследований, что дает возможность ускорить процесс разработки автономных РП с предложенной системой управления.

### **Публикации по теме диссертации**

#### **Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:**

1. Филатов, Д.М. Компьютерное моделирование аксиально-поршневого насоса [Текст] / Д.М. Филатов [и др.] // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Сер. Автоматизация и управление. – 2011. – Вып. 3. – С. 45–51
2. Филатов, Д.М. Адаптивно-нечеткие регуляторы систем управления техническими объектами [Текст] / А.В. Вейнмейстер, Н.Д. Поляхов, И.А. Приходько [и др.] // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ" Сер. Автоматизация и управление. - 2012. – Вып. 4. – 59–66.
3. Филатов, Д.М. Исследование и улучшение динамических характеристик электрогидростатических рулевых систем с помощью адаптивных регуляторов с эталонной моделью

[Текст] / В.Е. Кузнецов, Н.Д. Поляхов, Д.М. Филатов [и др.] // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Сер. Автоматизация и управление. - 2012. – Вып. 5. – 74–81.

4. Филатов, Д.М. Методы оценки состояния технических систем [Текст] / А.В. Беспалов, Н.Д. Поляхов, Д.М. Филатов [и др.] // Полет. Общероссийский научно-технический журнал.- 2011.- № 12.- С. 36–42.

5. Филатов, Д.М. Демпфирование упругих колебаний рулевого привода средствами модально-адаптивного управления [Текст] / В.Е. Кузнецов., А.В. Кузнецов, Д.М. Филатов [и др.] // Полет. Общероссийский научно-технический журнал.- 2012.- № 2. - С. 51–54.

**Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в базу SCOPUS:**

6. Denis M. Filatov. Modelling of an electro-hydraulic forklift in Matlab Simulink / Tatiana A. Minav, Denis M. Filatov [at alias] // International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.MO.S) Vol. 4, n.2, April 2011.

7. Self-tuning-parameter fuzzy PID speed control in an electro-hydraulic forklift / Tatiana A. Minav, Denis M. Filatov [at alias] // International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Vol. 4, n. 1, 2012. – P.9–15.

**Статьи, опубликованные в других изданиях:**

8. Филатов, Д.М. Вопросы расчета параметров адаптивного регулятора в системе с эталонной моделью и сигнальной адаптацией. [Текст] / В.Б. Второв, Д.М. Филатов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб., 2009. – № 10 –с. 39–46.

9. Denis M. Filatov. Aircraft steering actuators: state and prospects / Denis M. Filatov, E. Anushina, A Stotckaia // Proceeding of the IEEE Russia. North West Section, vol. 3, 2012. – P. 43–47.

**Другие публикации:**

10. Филатов, Д.М. Интеллектуальная система управления рулевым приводом самолета [Текст] / Д.М. Филатов // 64 научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета: Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб., 2011.–с. 154–158.

11. Филатов, Д.М. Адаптивно-нечеткая система управления рулевым приводом самолета [Текст] / Д.М. Филатов, В.Е. Кузнецов, О.Э. Якупов // Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов: Сборник докладов IX Всероссийской научн.техн.конф. 25 - 26 июня 2012, МАИ – М.: МАИ-Принт, 2012. – С.277–282.

12. Филатов, Д.М. Компьютерное моделирование динамических процессов в автономном электрогидравлическом приводе с комбинированным регулированием [Текст] / Д.М. Филатов // Наука и инновации в технических университетах: Материалы Третьего Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых, – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С.25–26.

13. Филатов, Д.М. Разработка интеллектуальных законов управления автономным электрогидростатическим приводом [Текст] / Д.М. Филатов // Пятнадцатая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов: – СПб.: ЦОП РГГМУ, 2010. – С.230.

14. Филатов, Д.М. Создание архитектуры интеллектуальной системы управления мехатронными рулевыми комплексами самолетов [Текст] / Д.М. Филатов // Шестнадцатая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов – СПб.: ЦОП РГГМУ, 2011. – С.98.

15. Филатов, Д.М. Adaptive control for electro-hydraulic drive with neuro-fuzzy algorithms [Текст] / Д.М. Филатов, Т.А. Минав, Е.С. Анушина [и др.] // Сборник трудов XIV Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2011), СПб, 2011 – том 1, стр. 289–292.