

*На правах рукописи*



Алексеевков Артем Сергеевич

УЛУЧШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И  
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ АВИАЦИОННОГО  
РУЛЕВОГО ГИДРОПРИВОДА С КОМБИНИРОВАННЫМ  
РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ  
ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ

Специальность: 05.02.02 - «Машиноведение, системы приводов и  
детали машин»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2014

Работа выполнена на кафедре «Системы приводов авиакосмической техники» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
**Селиванов Александр Михайлович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор кафедры «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»  
**Попов Дмитрий Николаевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Паровых и газовых турбин, отдела гидромеханики и гидравлических машин» федерального Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ"  
**Зуев Юрий Юрьевич**

**Ведущая организация:** ГИЦ ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», г. Жуковский

Защита состоится «3» декабря 2014 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, А80, г. Москва, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, главный административный корпус, зал заседаний ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Ваш отзыв на автореферат в количестве двух экземпляров, заверенных печатью, просьба направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.07



к.т.н, доцент Степанов В.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В последние годы в авиационной промышленности происходит интенсификация работ по созданию «более электрических самолетов». Эти работы охватывают как область пассажирских и транспортных самолетов, так и область маневренных самолетов. В результате работ осуществляется замена некоторой части гидравлического комплекса управления и энергопитания, в том числе части электрогидравлических рулевых приводов, ставших традиционными исполнительными механизмами систем управления полетом, на приводы с электрическим энергопитанием. Сама концепция большей электрификации бортовых систем не является новой. Однако лишь в последние 10–15 лет благодаря достижениям электротехнических отраслей промышленности, появилась реальная возможность создания достаточно надёжных рулевых приводов с электрическим энергопитанием, имеющих приемлемую для авиационной техники энергоотдачу.

Концепция большей электрификации бортовых систем управления принципиально позволяет сократить количество бортовых централизованных гидравлических энергосистем и является привлекательной для авиакомпаний, поскольку позволяет повысить экономическую эффективность пассажирских и транспортных самолётов. В настоящее время самолеты с повышенным уровнем электрификации систем управления и рулевых приводов в частности из ряда проектных документаций воплощаются в реальные конструкторские решения. Такие решения нашли применение на современном пассажирском самолете Airbus A-380, маневренном самолете F-35, транспортном самолете Airbus A-400M и др. В отечественной авиационной промышленности работы по созданию авиационных электрифицированных систем управления проводятся в ЦАГИ, МАИ, МГТУ им. Баумана, ОКБ «Родина», ОАО «ПМЗ «Восход», ОАО «Электропривод» и других институтах, НИИ и ОКБ.

Проведённый в диссертационной работе обзор современных авиационных рулевых приводов с электрическим энергопитанием показывает, что в настоящее время перспективными решениями в данной области являются *электрогидростатические, гибридные* и электрогидравлические рулевые приводы с *комбинированным регулированием скорости*.

Электрогидростатические приводы состоят из бесколлекторного электродвигателя и гидростатической передачи. Гидростатическая передача такого привода, в свою очередь, состоит из нерегулируемого насоса и гидравлического цилиндра, поступательное перемещение штока которого преобразуется в отклонение рулевой поверхности. По архитектуре электрогидростатических приводов, особенностям их построения и областям применения имеется довольно обширная библиография. Такие приводы применяются на современном пассажирском самолете Airbus A-380, а сама идея использовать в бортовом комплексе управления A-380 приводы с электрическим энергопитанием позволила исключить одну централизованную гидросистему. Стоит отметить, что электрогидростатические приводы на указанном самолете

используются в качестве резервных рулевых приводов. Это означает, что они включаются в работу только после выхода из строя основных приводов с дроссельным регулированием скорости или питающих их централизованных гидросистем.

Целесообразность применения гидростатических приводов в резервном канале управления на начальных этапах электрификации бортовых систем управления вызвала появление так называемых *гибридных приводов*. Гибридные приводы или приводы *EBHA* (*Electrical Backup Hydraulic Actuators*) в своем традиционном исполнении объединяют в одной конструкции *дроссельный привод* с питанием от централизованной гидросистемы и *гидростатический привод* с питанием от электрической энергетической системы самолета, работающие попеременно на один общий гидроцилиндр. Электрический энергетический канал в таком приводе является резервным и включается только после отказа основного (гидравлического) энергетического канала. Такие решения применяются на самолетах *Airbus A-380, A-400M*, самолете *Gulfstream G-650* и др.

Несмотря на привлекательность использования гибридных приводов в бортовых системах управления с электрическим энергопитанием при сохранении высоконадёжного гидравлического канала, гибридным приводам *EBHA*, в их традиционном исполнении, присущи существенные недостатки. Среди них наиболее важные следующие:

- Увеличенный вес гибридного рулевого привода по сравнению с традиционным дроссельным или электрогидростатическим приводом, вызванный объединением в одной конструкции двух указанных типов приводов.
- Худшие по сравнению с дроссельными приводами динамические характеристики в области малых сигналов управления с амплитудами 0,25...5% от максимального сигнала при работе привода *EBHA* от электрического энергетического канала.
- Уменьшенная динамическая жёсткость гидростатического привода по сравнению с жёсткостью традиционных гидроприводов с дроссельным регулированием, ухудшающая антифлаттерные показатели таких приводов.
- Более узкая полоса пропускания гибридного привода в режиме работы от электрического энергетического канала, вызванная инерционностью нагруженного электродвигателя.

Перечисленные выше недостатки гибридных приводов *EBHA*, за исключением увеличенного веса, обусловлены применением в резервном канале такого привода гидростатической передачи. Это означает, что переход на электрический канал питания неизбежно связан с ограничениями на режимы управления, поскольку электрогидростатическая передача в приводе *EBHA* не обеспечивает полноценное управление рулевой поверхностью в области малых амплитуд управляющих сигналов, что, в свою очередь, затрудняют применение таких приводов на основных рулевых поверхностях, таких как руль направления, руль высоты и элероны.

В лаборатории гидроприводов летательных аппаратов кафедры №702 МАИ под научным руководством доцента Селиванова А.М. в течение ряда лет ведутся научно-исследовательские работы по созданию перспективных решений в области рулевых электрогидравлических приводов с электрическим энергопитанием. Результаты работ опубликованы в ряде статей, в том числе с участием автора. В этих работах было показано, что использование принципа *комбинированного регулирования скорости (КРС)* выходного звена для привода с электрогидростатической передачей энергии от электрической энергосистемы самолета позволяет существенно уменьшить фазочастотные и амплитудно-частотные искажения при обработке приводом малых (до 5%) амплитуд сигналов управления, см. табл.1.

Таблица 1

Привод ЕВНА спойлеров А-380, <i>А<sub>вых</sub> = 2мм</i>					Привод с комбинированным регулированием скорости, <i>А<sub>вых</sub> = 2мм</i>	
<i>f</i> , Гц	Работа от гидросистемы		Работа от электросистемы		<i>L</i> , дБ	$\Delta\varphi$ , °
	<i>L</i> , дБ	$\Delta\varphi$ , °	<i>L</i> , дБ	$\Delta\varphi$ , °		
0.5	-0.1	-12	-0.4	-16	-0.1	-9
1	-0.2	-21	-0.6	-33	-0.1	-18
2	-0.2	-43	-2.2	-62	-0.1	-40
4	-0.6	-90	-6.1	-135	-1	-75
8	-6	-164	-11	-168	-6	-120

Термин «комбинированное регулирование скорости» был предложен доцентом МАИ А.М. Селивановым для обозначения разработанного им принципа регулирования, который предусматривает трансформацию энергии, создаваемой приводным электродвигателем, в перемещение поршня гидроцилиндра с использованием как электромоторного регулирования скорости, так и дроссельного регулирования с преобладанием каждого из этих способов в зависимости от величины управляющего сигнала. Для регулирования скорости штока гидроцилиндра используется неререверсивный насос, подача которого изменяется за счет изменения скорости вращения вала приводного электродвигателя, и пропорциональный золотниковый клапан реверса. Блок Регулятор привода осуществляет непрерывное параллельное управление клапаном реверса и скоростью вращения электродвигателя.

Стоит отметить, что в известных работах по приводу с *КРС* не уделялось детального внимания влиянию внешних силовых воздействий на выходное звено привода, наличие которых ухудшает его частотные характеристики. Это обстоятельство ограничивает практическое применение полученных результатов. Автор полагает, что решение проблемы ухудшения динамических характеристик привода с *КРС* при возрастании внешних нагрузок следует искать в направлении расширения области преимущественно дроссельного регулирования скорости. Указанный подход к улучшению динамических показателей привода с комбинированным регулированием скорости в известной литературе не рассмотрен и является новой актуальной задачей в области авиационных рулевых приводов. Решение этой во многом

новой задачи позволит, по мнению автора, ускорить внедрение *приводов с комбинированным регулированием скорости* в авиационные системы управления и применять *электрогидравлические приводы с комбинированным регулированием скорости* в качестве приводов основных рулевых поверхностей.

Кроме того, по мнению автора, в настоящее время наибольший практический интерес представляет реализация привода с комбинированным регулированием скорости *в гибридном исполнении*, объединяющем в одной конструкции классический дроссельный привод с питанием от централизованной гидросистемы и привод с комбинированным регулированием скорости, питающейся от электрической энергосистемы. Такие приводы позволят обеспечить высокий уровень динамических характеристик и показателей жесткости позиционирования рулевой поверхности вне зависимости от типа энергетического питания, а на первоначальных этапах электрификации самолета привод с питанием от электрической энергосети будет находиться в резервном канале и включаться после отказа основного гидравлического энергетического канала, что упростит внедрение полученных результатов.

### **Формула диссертации**

В диссертации предлагается новое научно обоснованное техническое решение задачи улучшения динамических характеристик *приводов с комбинированным регулированием скорости (КРС)*. Основой предлагаемого решения является разработанная автором поликоординатная система регулирования привода с *КРС*. Внедрение разработанной системы и предлагаемой методологии настройки ее параметров в практику создания авиационных рулевых приводов с комбинированным регулированием скорости и гибридных рулевых приводов с *КРС*, по мнению автора, обеспечит полноценное управление рулевой поверхностью при работе привода как от централизованной гидросистемы, так и от электросистемы самолета.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является улучшение динамических свойств и исследование рабочих процессов авиационного рулевого гидропривода с комбинированным регулированием скорости. Для достижения указанных целей в работе решаются следующие научно-технические задачи:

- Исследование характеристик и рабочих процессов привода с комбинированным регулированием скорости выходного звена (*КРС*).
- Определение взаимосвязей между параметрами настройки блока управления (включая алгоритмы управления) приводом с *КРС с дополнительным регулированием по перепаду давления на клапане реверса* и его частотными характеристиками. Определение настроек блока управления приводом с комбинированным регулированием скорости выходного звена, обеспечивающих требуемые показатели рабочих процессов в зоне малых (до 5%) амплитуд входных сигналов.

- Улучшение динамических характеристик гидроприводов с комбинированным регулированием скорости при воздействии статических или медленно меняющихся нагрузок на выходное звено привода в диапазоне изменения сигналов управления, соответствующих 0,2-5% от максимума, что является важным фактором при реализации управления самолётов с малоустойчивыми или неустойчивыми компоновками.

- Исследование энергетических свойств гидропривода с КРС при его работе в типовых эксплуатационных режимах.

### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

Основой исследования стали работы научного руководителя к.т.н., доцента МАИ Селиванова А.М. по приводам с комбинированным регулированием скорости, основы теории гидравлических процессов в гидравлических машинах и гидроприводах, имитационное математическое моделирование рабочих процессов в системах приводов, конструкторские разработки агрегатов и устройств приводов ПМЗ «Восход» и ММЗ «Рассвет».

### **Научная новизна**

Научная новизна представленной работы, по мнению автора, заключается в следующем:

- Проведено исследование и определено влияние параметров настройки блока управления приводом, включая алгоритмы управления, на показатели рабочих процессов и частотные характеристики привода с комбинированным регулированием скорости (*КРС*).

- Разработана новая структура регулятора электрогидравлического привода с комбинированным регулированием скорости выходного звена и алгоритмы управления, обеспечивающие динамические показатели такого привода на уровне аналогичных показателей типовых рулевых приводов с дроссельным регулированием скорости в области малых амплитуд входных сигналов при его нагружении статической или медленно меняющейся нагрузкой.

- Предложен способ определения и автоматизированного построения областей преимущественного регулирования скорости привода с комбинированным регулированием по выходным (частотным) характеристикам. Этот способ позволяет без дополнительных технических модификаций исследуемых образцов (установки датчиков давления на выходе насоса и в полостях гидроцилиндра) и дополнительных экспериментальных данных формировать оценки режимов работы привода и влияния параметров настройки блока управления на динамику привода.

- Предложен метод оценки динамических свойств привода на основании трехмерных графиков частотных характеристик (зависимости амплитудных и фазочастотных характеристик от амплитуды управляющего сигнала), как наиболее наглядно

отражающий общие особенности приводов с комбинированным регулированием скорости.

### **Практическая значимость работы**

Реализация предложенных автором новых научно-технических решений в области построения перспективных типов электрогидравлических приводов с электрическим энергопитанием позволит:

- улучшить динамические характеристики приводов с *комбинированным регулированием скорости (КРС)* и *гибридных приводов* при работе от бортовой электросистемы, что является важным при управлении самолетов с неустойчивыми или малоустойчивыми компоновками;

- повысить безотказность системы управления за счет применения гибридных приводов с КРС с разнородным резервированием энергетических каналов при сохранении полноценного управления рулевой поверхностью в области малых амплитуд входных сигналов вне зависимости от типа энергопитания.

### **Реализация результатов**

Материалы диссертационной работы использованы в курсе лекций «Методы и средства автоматизированного проектирования» и курсовом проектировании на кафедре «Системы приводов авиакосмической техники» МАИ. Результаты диссертационной работы использовались в научно-исследовательских темах кафедры 702:

- «Разработка демонстраторов рулевых приводов пассажирского самолета с повышенной степенью электрификации энергетических систем».

- «Разработка требований к исполнительной части системы управления самолета с использованием рулевых приводов с электрическим энергопитанием».

На основании новых научных и технических решений, предложенных в диссертационной работе, на кафедре 702 МАИ совместно с ММЗ «Рассвет» и ОАО «ПМЗ Восход» было разработано и изготовлено два опытных образца гибридных рулевых приводов с комбинированным регулированием скорости выходного звена в электрическом энергетическом канале ДРП-1 и ИМД-21. Привод ИМД-21 демонстрировался на авиасалоне МАКС-2014.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры 702 МАИ, II-й Всероссийской научно-технической конференции «Мехатронные системы (теория и проектирование)», ФГБОУ ВПО ТГУ, 2011 г., Российско-Европейском научном проекте «RESEARCH», Compañía Española de Sistemas Aeronáuticos S.A., Мадрид, 2013 г., 29-м Конгрессе Международного совета по аэронавтическим наукам (ICAS-2014), Санкт-Петербург, 2014 г.



## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано пять печатных работ, одна работа в электронном сборнике и одна работа в электронном журнале. Из них четыре работы в изданиях, входящих в перечень ВАК: «Труды МАИ», «Известия Тульского государственного университета» и «Современные проблемы науки и образования».

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Разработка алгоритмов и схемных решений построения комплексного полипараметрического блока управления электрогидравлического привода с комбинированным регулированием скорости, обеспечивающего улучшение частотных характеристик привода в области малых амплитуд входных сигналов. При этом уровень коррекции фазочастотных и амплитудно-частотных характеристик привода при наличии на его выходном звене балансировочных нагрузок, соответствующих типовым режимам нагружения рулей пассажирского самолёта, достигает 40%.

2. Установление взаимосвязей параметров рабочих процессов гидропривода с комбинированным регулированием скорости с его статическими, динамическими и энергетическими характеристиками на основе теоретического исследования рабочих процессов с использованием разработанной проблемно-ориентированной математической модели привода. Разработанная автором структурированная математическая модель привода с комбинированным регулированием использует экспериментальные данные по компонентам системы привода.

3. Методология автоматизированной оценки и графического представления областей преимущественного регулирования скорости привода при обработке им гармонических сигналов на основании разработанного автором программного комплекса построения трехмерных образов частотных характеристик привода.

4. Рекомендации по выбору параметров блока управления гидропривода с комбинированным регулированием скорости, обеспечивающих требуемые динамические характеристики.

### **Достоверность научных результатов**

Достоверность научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, подтверждаются корректным использованием апробированных современных методов расчета и совпадением результатов теоретических исследований, проводимых методом компьютерного моделирования, с экспериментальными данными.

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, семи глав, основных выводов и результатов работы и списка литературы из 55 наименований. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, поставлены цели и задачи исследования, кратко охарактеризовано состояние проблемы, сформулированы научная новизна, поставлена цель, определены основные задачи исследования и показана практическая значимость работы.

**В первой главе** проводится анализ современных авиационных рулевых приводов с электрическим энергопитанием. Проведённый обзор показывает, что в настоящее время перспективными решениями в данной области являются *электрогидростатические, гибридные* и электрогидравлические рулевые приводы с *комбинированным регулированием скорости*. В работе отмечается, что приводы с комбинированным регулированием скорости обладают преимуществами гидростатических приводов по части малого (до 125 Вт для привода мощностью 800Вт) энергопотребления в нейтральной и повышенного до 70-75% КПД в широком диапазоне скоростей, однако имеют улучшенные динамические характеристики в области малых амплитуд управляющих сигналов, хорошее быстродействие и жесткость.

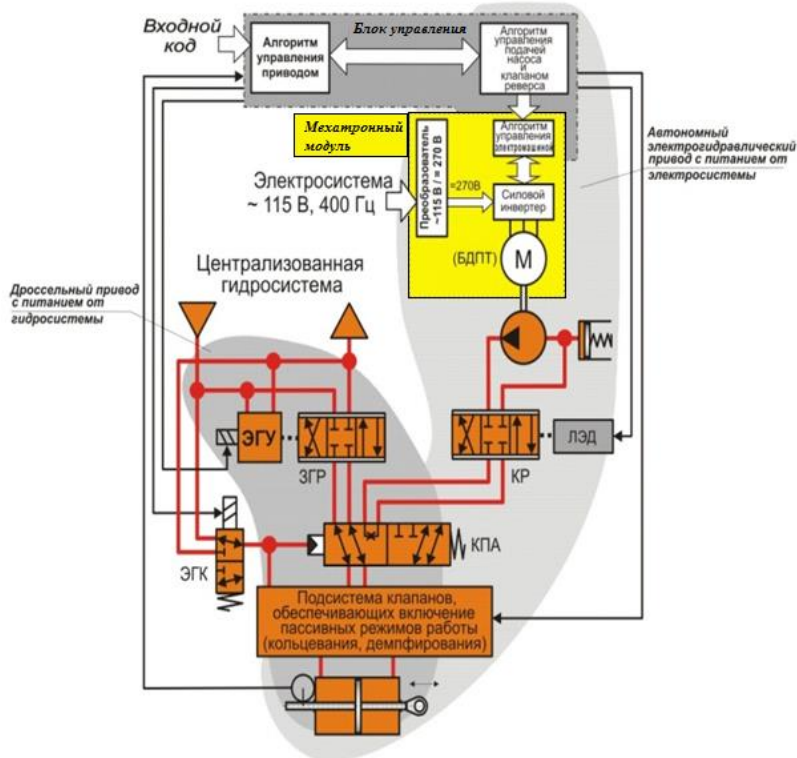
В результате обзора опубликованных работ автором делается вывод, что применение *гибридных приводов с комбинированным регулированием скорости* позволит осуществить разнородное резервирование энергетических каналов, повысив уровень безотказности такого привода, а высокие динамические характеристики приводов с комбинированным регулированием скорости обеспечат полноценное управление рулевой поверхностью в области малых амплитуд входных сигналов вне зависимости от типа энергопитания.

**Во второй главе** диссертационной работы представлена разработка исследовательского образца гибридного (двухрежимного) рулевого привода с комбинированным регулированием скорости выходного звена (*KPC*), сформированы технические требования и описаны режимы его работы. Гибридный привод с *KPC* (см. рис.1), исследуемый в работе, позволяет осуществлять работу привода в следующих режимах:

- в основном режиме - это традиционный привод с дроссельным регулированием скорости и питанием от централизованной гидравлической системы самолета;
- в резервном режиме (после отказа гидравлической энергосистемы или основного дроссельного привода) осуществляется переход на комбинированное регулирование скорости выходного звена с питанием от электрической энергосистемы самолета.

На рис.1 представлены следующие обозначения: ЭГУ - электрогидравлический усилитель, ЗГР - золотниковый гидрораспределитель, КПА - клапан переключения активных режимов, КР - клапан реверса, ЭГК - электрогидравлический клапан, ЛЭД - линейный электродвигатель, БДПТ -

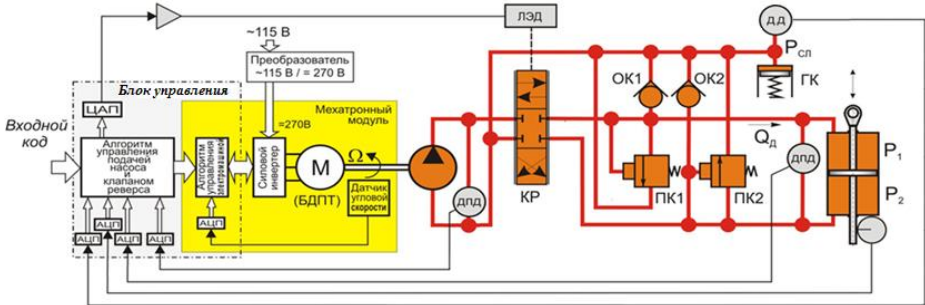
бесколлекторный двигатель постоянного тока. В отличие от известного привода типа *EBHA*, в конструкцию экспериментального привода добавлен клапан реверса, реализующий принцип комбинированного регулирования скорости выходного звена при работе от электрического энергетического канала. Кроме того, в схему добавлены датчики перепада давления в полостях гидроцилиндра, на входе и выходе насоса, а также датчик давления жидкости в гидрокомпенсаторе. Предлагаемые новые схемные решения позволяют реализовать коррекцию *по перепаду давления на клапане реверса Pdkr*, улучшающую динамические характеристик такого привода под действием статической (балансировочной) нагрузки при работе привода от электрической энергосистемы самолета.



**Рис. 1.** Функциональная схема экспериментального образца гибридного рулевого привода с комбинированным регулированием скорости

Функциональная схема электрического энергетического канала экспериментально-исследовательского привода приведена на рисунке 2. На рисунке даны следующие обозначения: КР - клапан реверса, ЛЭД - линейный электродвигатель, БДПТ - бесколлекторный двигатель постоянного тока, ОК1,2 - обратные клапаны, ПК1,2 - предохранительные клапаны, ГК - гидрокомпенсатор, ДПД - датчики перепада давления, ДД - датчик давления.

Следует отметить, что применяемые в приводе датчики давления используются как для реализации алгоритмов коррекции характеристик привода, так и для контроля его состояния, что исключает переразмеривание конструкции и, как следствие, увеличение массогабаритных показателей привода.



**Рис. 2.** Функциональная схема электрического энергетического канала экспериментального образца привода

**В третьей главе** описывается разработанная математическая модель привода. Экспериментальный образец, как говорилось ранее, является двухрежимным агрегатом, т.е. он может работать в режиме питания от централизованной гидросистемы и в режиме питания от бортовой силовой электросети. В первом из этих режимов привод, по-существу, является типовым электрогидравлическим дроссельным приводом, поэтому исследование его характеристик методом математического моделирования не представляет особого интереса и не является целью работы. В режиме питания от электросистемы самолета, экспериментальный образец представляет собой электрогидравлический привод с комбинированным регулированием скорости выходного звена. Исследование рабочих процессов и характеристик этого привода, напротив, является наиболее важной целью математического моделирования и диссертационной работы.

В работе автором предлагается концептуальная проблемно-ориентированная математическая модель *электрогидравлического привода с комбинированным регулированием скорости*, состоящая из функционально законченных блоков различной физической природы. Предлагаемая модель ориентирована на исследование рабочих процессов в области малых сигналов управления, смещения регулирующих элементов, и малых изменений потоков рабочей жидкости, соответствующих сигналам управления с амплитудами 0.2-5%, поэтому математические модули описывают рабочие процессы в регулирующих агрегатах привода на элементном уровне с возможностью учета экспериментальных характеристик отдельных компонентов.

Разработанная модель характеризуется следующими особенностями:

- учитывается влияние конструктивно-технологических факторов. При описании золотникового гидрораспределителя учтена микрогеометрия золотниковой пары;

- отдельным встроенным блоком в имитационной модели привода представлен перепускной клапан, ограничивающий давление подачи насоса;
- модель учитывает изменение модуля объемной упругости жидкости в зависимости от давления и содержания в жидкости воздуха;
- с целью моделирования рабочих процессов в области малых сигналов управления, в модели гидродвигателя учитываются трение движения и трение покоя, учитываются утечки в насосном блоке;
- в ряде блоков имитационной модели привода для повышения достоверности оценок процессов используются экспериментальные характеристики отдельных узлов и агрегатов привода;
- математическая модель может учитывать потери давления в соединительных каналах корпуса привода, что позволяет оценивать нелинейность регулировочной характеристики клапана реверса и определять зону нечувствительности привода;
- имитационная модель привода учитывает также особенности функционирования с возможностью настройки и уточнения характеристик независимо друг от друга;
- модульная структура модели позволяет исследовать различные варианты архитектуры построения электрогидравлических приводов с электрическим энергоснабжением.

Разработанная структура блока управления приводом реализует алгоритмы, улучшающие частотные характеристики привода в области малых амплитуд входных сигналов при работе привода под нагрузкой. Математическое описание и принципиальная схема (рис.3) алгоритма коррекции по перепаду давления на клапане реверса  $P_{dkr}$  показаны ниже:

$$U_x = (U_{com} - Y \cdot K_{os}) \cdot K_x \cdot \frac{1}{K_0} \quad (1)$$

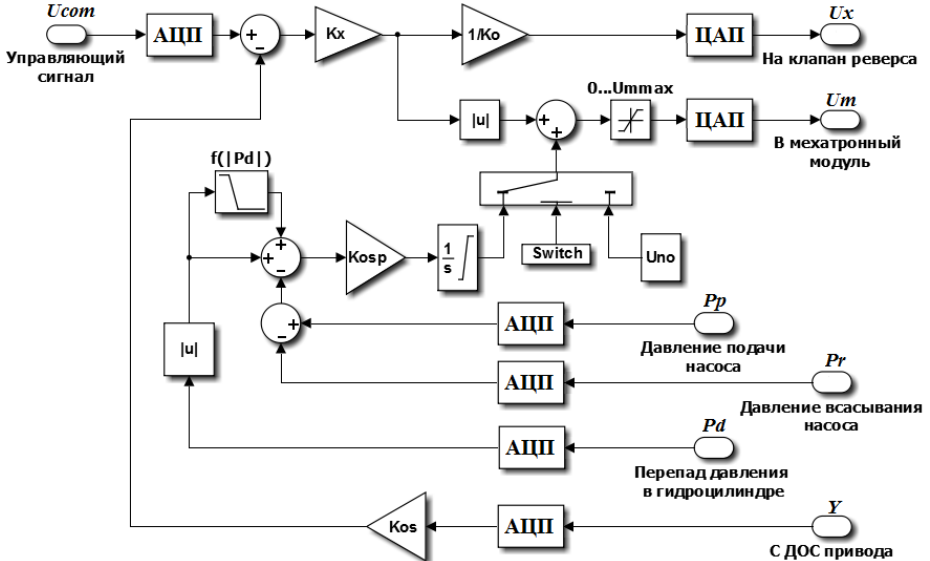
$$U_m = \left| (U_{com} - Y \cdot K_{os}) \cdot K_x \right| + U_{no}, \text{ при этом } U_{no} \leq U_m \leq U_m \max \quad (2)$$

Здесь  $U_m$  - управляющий сигнал на входе мехатронного модуля,  $U_x$  - управляющий сигнал на входе клапана реверса;  $U_{com}$  - командный сигнал на вход привода;  $Y$  - положение выходного звена;  $K_{os}$  - коэффициент обратной связи;  $K_x$  - коэффициент контурного усиления;  $U_{no}$  - начальное напряжение на мехатронном модуле (при отсутствии коррекции по перепаду давления на клапане реверса  $U_{no} = \text{const}$ );  $K_0$  - величина относительного диапазона регулирования клапана реверса (ОДРК). При использовании коррекции по перепаду давления на клапане реверса  $P_{dkr}$ , управляющий сигнал на мехатронный модуль имеет вид:

$$U_m = \left| (U_{com} - Y \cdot K_{os}) \cdot K_x \right| + U(P_{dkr}), \text{ при этом } 0 \leq U_m \leq U_m \max \quad (3)$$

$$\frac{dU(P_{dkr})}{dt} = \left( \left| P_d \right| + f \left( \left| P_d \right| \right) - \left( P_p - P_r \right) \right) \cdot K_{osp}, \text{ где } U1_{no} \leq U(P_{dkr}) \leq U2_{no} \quad (4)$$

В представленном выражении  $Pd$ - перепад давления в гидроцилиндре;  $Pp$  - давление подачи насоса;  $Pr$  - давление всасывания насоса (давление в гидрокомпенсаторе);  $K_{OSP}$  - коэффициент обратной связи по давлению;  $f(|Pd|)$  – табличная функция настройки коррекции по перепаду давления в зависимости от величины нагрузки;  $U1_{no}$  и  $U2_{no}$  – ограничители на добавочную величину напряжения мехатронного модуля.



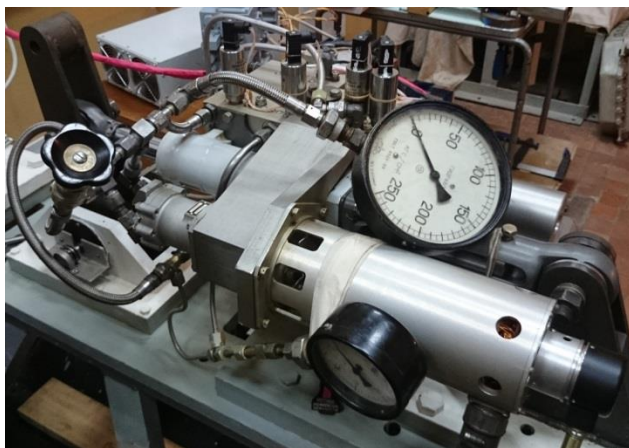
**Рис. 3** Принципиальная схема модифицированного алгоритма управления приводом с использованием коррекции по перепаду давления на клапане реверса  $Pdkr$

Разработанная имитационная модель позволяет исследовать рабочие процессы и характеристики узлов и агрегатов привода с комбинированным регулированием скорости в том числе при изменении условий эксплуатации, например, при параметрических отказах регулирующих гидроэлементов.

**В четвертой главе** дается описание практической реализации гибридного рулевого привода с комбинированным регулированием скорости выходного звена. Исследовательский образец привода спроектирован при участии автора, с учетом предлагаемых в диссертационной работе инноваций, и изготовлен ОАО «ММЗ «Рассвет» в соответствии с техническим заданием, выданным кафедрой 702 МАИ. Разработанный экспериментальный образец привода (рис.4) и лабораторный стендовый комплекс позволяют проводить экспериментальные исследования рабочих процессов и характеристик привода, включая характеристики его базовых компонентов.

На разработанном стендовом комплексе возможно получение характеристик отдельных узлов и агрегатов привода, снятие статических и

динамических характеристик привода при режиме питания как от централизованной гидросистемы, так и от встроенного источника энергии.



**Рис. 4.** Лабораторный стенд с экспериментальным образцом привода *ДРП-1*

Стоит отметить, что экспериментальный образец привода содержит в своей конструкции ряд серийных узлов и агрегатов что удешевляет его конструкцию и сокращает сроки изготовления. Кроме того, данные компоненты имеют известное и отработанное математическое описание, что в дальнейшем упрощает адаптацию разработанной математической модели, повышая достоверность исследований.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментальных исследований привода с комбинированным регулированием скорости. Экспериментальные исследования проводились с целью определения основных характеристик привода и его агрегатов, проверки соответствия расчетных данных экспериментальным результатам и уточнения параметров разработанной математической модели. Исследовательским образцом являлся гибридный электрогидравлический рулевой привод с комбинированным регулированием скорости *ДРП-1*. Для задач, обозначенных в целях диссертационной работы, исследовалась работа гибридного привода в режиме питания от электрического источника энергии.

**В шестой главе** представлены результаты отработки математических моделей компонентов привода и сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными. При сравнении экспериментальных и теоретических характеристик агрегатов исследуемого привода следует отметить их удовлетворительную сходимость - расхождения не превышают 2-11%. Эффективность принципа комбинированного регулирования скорости и теоретические оценки влияния давления подачи насоса на характеристики привода подтверждены экспериментальными исследованиями, проведенными в

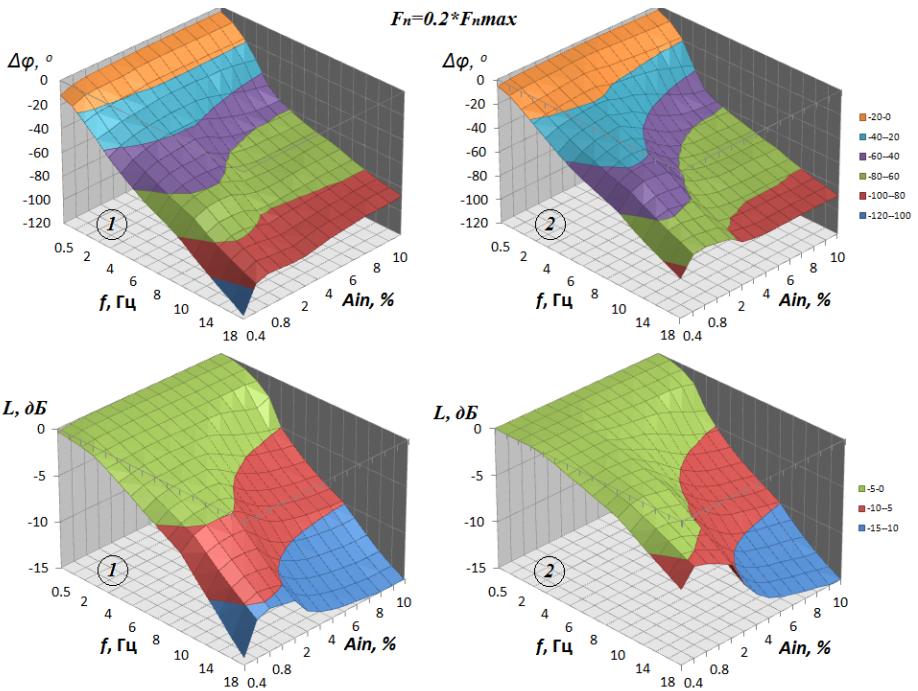
ЦАГИ на специализированных стендах с силовозбудителями. Исследование эффективности нового алгоритма регулирования и коррекции характеристик проводилось на основании разработанной проблемно-ориентированной математической модели привода, характеристики элементов которой подтверждены экспериментальными исследованиями.

**В главе 7** приводятся результаты теоретического исследования характеристик и рабочих процессов электрогидравлического рулевого привода с комбинированным регулированием скорости с применением новых управляющих алгоритмов и приводятся оценки влияния настройки параметров блока управления на частотные характеристики привода. Учитывая особенности работы приводов с комбинированным регулированием скорости, автором предложена методика оценки способов преимущественного регулирования скорости выходного звена с использованием его частотных характеристик. Данная оценка полезна при настройке приводов подобного типа и позволяет определять диапазоны влияния параметров настройки привода на его выходные характеристики. При комплексной оценке влияния параметров настройки привода на его динамические характеристики, были определены ключевые параметры и диапазоны их значений, обеспечивающие уменьшение фазочастотных и амплитудно-частотных искажений.

Для построения и анализа частотных характеристик привода с новой системой регулирования, автором разработан специальный программный комплекс по представлению трехмерных образов фазочастотных характеристик привода. Использование трехмерных графиков частотных характеристик для анализа динамических свойств привода наглядно показывает общую особенность рабочих процессов в приводах с комбинированным регулированием скорости, а также степень улучшения частотных характеристик привода в области малых амплитуд входных сигналов (рис. 5).

Проведенное исследование выявило дополнительные причины ухудшения частотных характеристик привода в области малых (до 5%) амплитуд управляющего сигнала при увеличении внешней нагрузки на выходном звене. Этот эффект вызван сокращением области преимущественно дроссельного регулирования скорости за счет уменьшения величины перепада давления на клапане реверса, вызванного этой нагрузкой. Предлагаемое автором схемное решение построения системы регулирования скорости выходного звена привода позволяет уменьшить деградацию частотных характеристик привода при появлении нагрузки за счёт расширения диапазона преимущественно дроссельного регулирования скорости выходного звена. Положительный эффект достигается за счёт введения в алгоритм регулирования дополнительного сигнала по перепаду давления на клапане реверса  $P_{dkr}$ , который с увеличением нагрузки расширяет диапазон преимущественно дроссельного регулирования скорости за счёт увеличения давления подачи насоса. Предлагаемое схемное решение позволяет при соответствующей настройке блока управления получить до 40% улучшение фазочастотных характеристик привода в области малых амплитуд входных сигналов (рис.6).





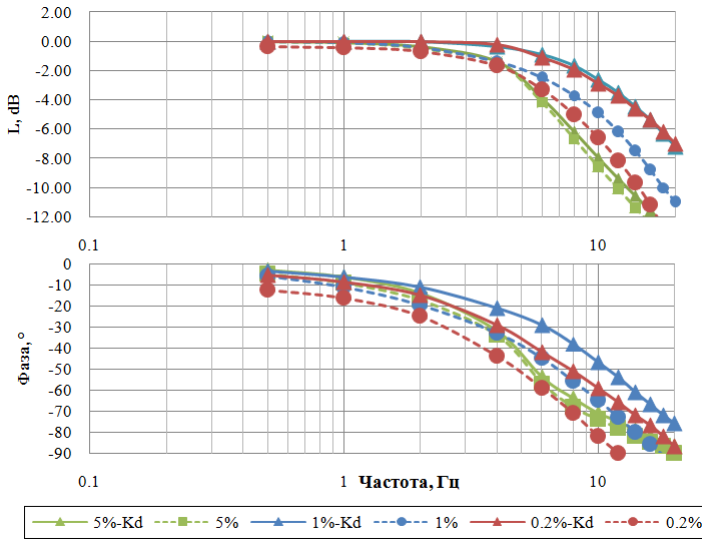
**Рис. 5.** Трёхмерные графики частотных характеристик привода с комбинированным регулированием скорости при работе под нагрузкой: 1 - известный алгоритм управления, 2 - характеристики привода с применением разработанных автором алгоритмов. На графиках:  $A_{in}$  – амплитуда входного сигнала,  $F_n$  - величина постоянной нагрузки.

Следует отметить, что модифицированный алгоритм управления позволяет регулировать и настраивать требуемые эксплуатационные параметры привода. Например, величину избыточного давления на входе клапана реверса, диапазон рабочих нагрузок для которых требуется улучшение частотных характеристик, степень увеличения чувствительности привода в области малых амплитуд входных сигналов, диапазон амплитуд входных сигналов, для которых осуществляется преимущественно дроссельное регулирование скорости и область преимущественно электромоторного регулирования скорости. Гибкость настроек параметров управления позволяет осуществлять подстройку работы привода при изменении режимов полёта самолёта.

Важными обобщёнными параметрами разработанной системы регулирования являются следующие параметры:

- давление на входе клапана реверса  $P_0$ ;
- коэффициента настройки относительного диапазона регулирования клапана реверса (ОДРК)  $K_0$ ;
- табличная функция настройки коррекции по перепаду давления в зависимости от величины нагрузки  $f(|Pd|)$ ;

- ограничители на добавочную величину сигнала на мехатронный модуль  $U1_{по}$  и  $U2_{по}$ ;
- начальное (добавочное) напряжение мехатронном модуле  $U_{но}$ ;
- коэффициент обратной связи по давлению  $K_{OSP}$ .



**Рис. 6.** ЛАФЧХ двух вариантов настройки электрогидравлического рулевого привода с комбинированным регулированием скорости: с применением разработанной коррекции по перепаду давления на клапане реверса  $Pdkr$  (индекс  $Kd$   $\blacktriangle$ ) и известной ранее схемы ( $\bullet$ ) при  $F_n=0.2*F_n(\max)$  для амплитуд входных сигналов 5%, 1% и 0.2%

Качественное влияние основных параметров настройки блока управления приводом можно оценить по графическим портретам - критериям, представленным на рисунке 8. Настройка, соответствующая приводу с комбинированным регулированием без дополнительной подстройки по перепаду давления на клапане реверса  $Pdkr$ , показана в центре и соответствует  $P_o=50$  атм.,  $ОДРК=0.6$ . При уменьшении, например, коэффициента  $ОДРК$  по сравнению с базовой настройкой, увеличивается чувствительность привода в области малых амплитуд входных сигналов, незначительно уменьшается общее энергопотребления при прежней полосе пропускания.

В результате исследования режимов работы привода с разработанной системой управления было установлено, что в приводе с комбинированным регулированием скорости выходного звена, но без дополнительного регулятора при появлении нагрузки происходит сокращение области преимущественно дроссельного регулирования скорости и, как следствие, ухудшение его частотных характеристик при малых амплитудах управляющего сигнала. В этом

режиме динамика привода, в основном, определяется контуром регулирования подачи насоса.

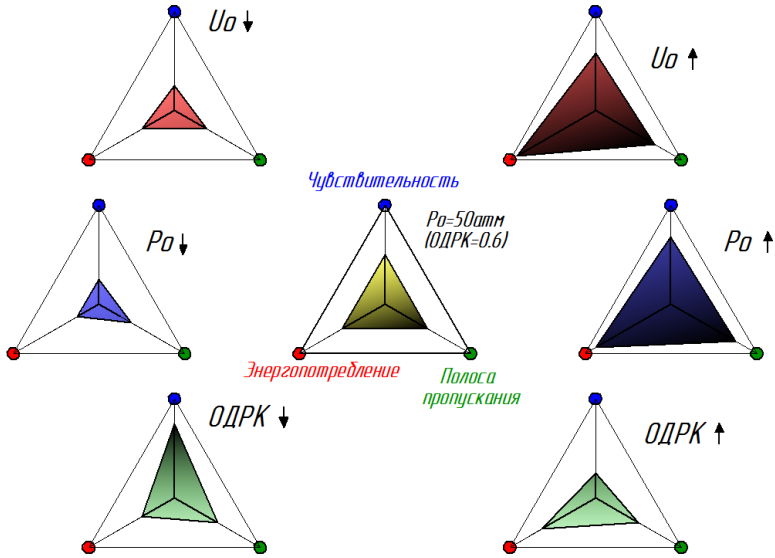


Рис. 7. Качественное влияние основных параметров настройки привода

Как было сказано ранее, предлагаемое автором решение обеспечивает расширение области преимущественно дроссельного регулирования скорости выходного звена за счет управления перепадом давления на клапане реверса  $Pdkr$  вместо установки фиксированного начального давления на входе клапана реверса  $Po$ , применяемого ранее при настройке привода. Данный способ позволяет улучшить динамические характеристики привода, на которые оказывает влияние контур управления клапаном реверса.

Стоит отметить, что при использовании нового алгоритма управления приводом сохраняется его умеренное энергопотребление. Например, при увеличении начального давления  $Po$  с 50 атм., применяемого в базовом варианте настройки до 100 атм., с целью расширения области преимущественно дроссельного регулирования скорости, привод сохраняет высокие динамические характеристики вплоть до 40%-ной величины нагрузки на выходном звене. Однако потребляемая таким приводом мощность (без учета потерь в блоке управления мехатронным модулем) в режиме удержания нагруженного выходного звена, возрастает в 1.2-3.3 раза, особенно при малых величинах нагрузки, что негативно сказывается на энергетических свойствах привода в целом. Применение новых алгоритмов управления и коррекции по перепаду давления на клапане реверса  $Pdkr$  увеличивает потребляемую мощность в указанных областях лишь в 1.2-2 раза по сравнению со схемой без дополнительной подстройки по перепаду давления на клапане реверса.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для решения проблемы обеспечения высококачественных (на уровне типовых рулевых приводов с дроссельным регулированием скорости) динамических характеристик привода с электрическим энергетическим каналом в зоне малых амплитуд сигналов управления целесообразно, по мнению автора, использовать приводы с комбинированным регулированием скорости.

Для улучшения частотных характеристик такого привода при нагружении его выходного звена постоянной или медленно меняющейся нагрузкой, предлагается осуществлять дополнительное управление приводным электродвигателем по перепаду давления на клапане реверса  $Pdkr$  в зависимости от величины нагрузки. Указанная система обеспечивает управление рулевыми поверхностями при малых (до 5%) амплитудах входных сигналов с фазочастотными и амплитудно-частотными искажениями, не превышающими аналогичные показатели типовых рулевых гидроприводов с дроссельным регулированием скорости. Проведенное в работе исследование указанного нового схемного решения показывает его эффективность.

2. Решение, предлагаемое автором, позволяет обеспечивать требуемые показатели динамики привода с комбинированным регулированием скорости в различных диапазонах изменения балансировочных и медленно меняющихся нагрузок на рулевых поверхностях и повышать чувствительность привода в области малых амплитуд входных сигналов. Гибкость настроек параметров предлагаемой системы регулирования дает возможность управлять рабочими процессами привода, изменяя их под конкретные требования системы управления самолета вплоть до динамической подстройки по фактическому режиму полета.

3. Для оценки влияния параметров управления привода с комбинированным регулированием скорости на его динамические характеристики рекомендуется одновременно оценивать несколько координат состояния, таких как начальное давление на клапане реверса  $Po$ , минимальное напряжение на входе мехатронного модуля  $Uno$ , значение коэффициента настройки относительного диапазона регулирования клапана реверса  $ODPK$ , величину нагрузки  $Fn$  и др. С этой точки зрения для решения задачи выбора параметров настройки рекомендуется использовать разработанную автором методологию трёхмерного графического представления зависимости частотных характеристик привода с комбинированным регулированием скорости от амплитуды управляющего сигнала. Предлагаемое трехмерное графическое представление областей преимущественного способа регулирования скорости выходного звена, получаемое на основании фазочастотных и амплитудно-частотных характеристик привода, позволяет упростить настройку блока управления приводом в соответствии с требованиями к диапазону амплитуд и полосе частот управляющего сигнала.

4. В результате исследования определено влияние параметров настройки блока управления электрогидравлическим рулевым приводом с комбинированным регулированием скорости ( $KPC$ ) на его динамические и

энергетические характеристики и получены рекомендации по настройке разработанной автором системы регулирования скорости выходного звена, улучшающей характеристики привода с КРС при увеличении внешней нагрузки.

Проведенные в работе исследования показали, что:

- высококачественные (на уровне типовых рулевых приводов с дроссельным регулированием скорости) частотные характеристики приводов с комбинированным регулированием скорости наблюдаются в областях, составляющих 0.25-6% от максимальной амплитуды входного сигнала. Расширение диапазона амплитуд возможно за создания дополнительного перепада давления на клапане реверса, что ухудшает энергетические свойства привода;
- величина перепада давления в 50 атм. на клапане реверса достаточна для обеспечения требуемых динамических показателей привода в области малых (0.25-6%) амплитуд входных сигналов при сохранении хороших энергетических показателей;
- улучшение частотных характеристик привода в области малых входных сигналов целесообразно производить настройкой коэффициента относительного диапазона регулирования клапана реверса (ОДРК). Рекомендуемые значения коэффициента ОДРК=0.4...0.7.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Алексеенков А.С., Найденов Н.В., Селиванов А.М. Перспективы развития автономных электрогидравлических приводов // Известия Тульского государственного университета, Технические науки, вып. 5, ч. 1, Тула: изд-во ТугГУ, 2011 г. -С. 359-364.
2. Алексеенков А.С., Найденов Н.В., Селиванов А.М. Оценка области дроссельного регулирования в приводе с комбинированным регулированием скорости выходного звена // Известия Тульского государственного университета, Технические науки, вып. 5, ч. 1, Тула: изд-во ТугГУ, 2011 г. -С. 299-303.
3. Алексеенков А.С., Найденов Н.В., Селиванов А.М. Развитие авиационных автономных электрогидравлических приводов // Вестник Московского авиационного института, № 1, 2012 г., т. 19. -С. 43-48.
4. Алексеенков А.С. Исследование характеристик и рабочих процессов автономного электрогидравлического рулевого привода с комбинированным регулированием скорости // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/116-12896>

### **Публикации в других изданиях**

1. Алексеенков А.С., Молодяков Д.С. Разработка программного обеспечения для гидравлических стендов на основе технологии LabView // 11-я

Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012».13–15 ноября 2012 года. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2012. – 385 с. МАИ, 2012 г.-С. 40-41.

2. Алексеенков А.С. Разработка демонстрационного стенда для двухрежимного электрогидравлического привода // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013», Сборник тезисов докладов. Москва, МАИ, 16–18 апреля 2013 г. -С. 9-10.

3. I. Ogoltsov, S. Samsonovich, A. Selivanov, A. Alekseenkov New developments of powered electrohydraulic and electromechanical actuators for the more electrical aircraft / ICAS 2014 PROCEEDINGS