

**В диссертационный совет Д 212.125.07  
Московского авиационного института  
(национального исследовательского университета)**

**ОТЗЫВ**

**официального оппонента  
на диссертационную работу Алексеенкова Артёма Сергеевича  
«Улучшение динамических свойств и исследование рабочих процессов  
авиационного рулевого гидропривода с комбинированным  
регулированием скорости при увеличении внешней нагрузки»,  
представленную на соискание учёной степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.02.02  
«Машиноведение, системы приводов и детали машин»**

**Структура и краткая оценка основного содержания работы**

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и литературы из 55 позиций, содержит 77 рисунков. Общий объём диссертации составляет 150 страниц машинописного текста.

Диссертационная работа посвящена решению ряда задач, входящих в общую проблематику создания эффективного, обладающего высокими динамическими свойствами авиационного рулевого привода с комбинированным (частотно-дрессельным) регулированием скорости движения выходного звена. Такие приводы являются исполнительными модулями систем управления летательных аппаратов (ЛА), соответствующих современной и считающейся перспективной концепции полностью электрического самолёта (ПЭС). По сравнению с приводами только дрессельного, машинного и машинно-дрессельного управления комбинированные модули имеют ряд преимуществ, которые позволяют считать комбинированные рулевые гидростатические приводы (КРГП) перспективным видом исполнительных модулей.

Одним из существенных недостатков КРГП, отмеченных в диссертации, является ухудшение динамики в области малых информационных (управляющих) сигналов при повышении нагрузки. Кроме того, комбинированное управление затрудняет выработку алгоритмов оценки и оптимизационного расчёта КРГП по критерию энергодостаточности, что в ряде случаев приводит к заметной и недопустимой «переразмерности» приводов, и так имеющих повышенные массовые и габаритные показатели (по сравнению с дрессельными гидроприводами как исполнительными модулями при централизованной системе гидропитания).

На решение этих задач направлена диссертационная работа.

**Поэтому тематика диссертационного исследования, является, несомненно, актуальной.**

**В первой главе** соискателем выполнен анализ современных схемотехнических исполнений авиационных рулевых приводов, соответствующих построению силовых систем в рамках концепции ПЭС. Подробно рассмотрены преимущества и недостатки приводов с машинным (насосным) управлением (МРГП), которые по терминологии автора такие приводы называются гидростатическими, КРГП и гибридных рулевых гидроприводов (ГРГП). Отмечается ухудшение динамики и статической жёсткости МРГП в зонах малых управляющих сигналов. Показано, что за счёт рациональных алгоритмов переключения КРГП (с частотного на дроссельный режимы и обратно) такой привод имеет достаточно высокие динамические показатели и жёсткость в области больших и малых сигналов управления (последние соответствуют наиболее типовым режимам полёта современного пассажирского самолёта). Особое внимание уделено ГРГП, который может работать в режиме дроссельного привода с энергопитанием от централизованной гидросистемы самолёта и электрогидростатического привода с частотным управлением приводящего электродвигателя (далее, на стр. 35 диссертации такой режим назван автономным). В качестве одного из выводов по данной главе содержится мнение соискателя о перспективности именно гибридного привода, сочетающего преимущества КРГП и дающего повышенную надёжность системы управления самолёта.

**Вторая глава** посвящена модернизации существующего ГРГП для экспериментальных исследований данного привода. Основной задачей такого исследования было определение взаимосвязей между параметрами настройки блока управления приводом, алгоритмами синхронного управления и характеристиками привода в зависимости от различных уровней (амплитуд) управляющего сигнала и внешних силовых воздействий. С этой целью в схему привода были добавлены датчики давления в полостях гидродвигателя (цилиндра), в напорной гидролинии насоса и линии гидрокомпенсатора, позволяющие помимо очевидного контроля состояния частей привода осуществить коррекцию привода по давлению. Подготовленный таким образом для проведения экспериментальных исследований привод работоспособен в двух активных (частотного и дроссельного), а также двух пассивных (кольцевания полостей гидродвигателя и демпфирования) режимах.

**Третья глава** содержит материал по математическому моделированию привода, работающего в режиме комбинированного регулирования скорости движения выходного звена. В диссертации представлена концептуальная (проблемно-ориентированная) модель, составленная из функционально законченных блоков отдельных частей привода (блока управления, приводящего бесколлекторного электродвигателя, контроллера, насоса, клапана реверса). Подробно рассмотрены особенности моделирования блока управления

(контроллера) частями привода при переходе от одного режима к другому и в пределах режимов.

**В четвёртой главе** диссертации рассмотрены вопросы разработки экспериментального образца гибридного рулевого гидропривода мощностью до 5 кВт, оснащённого «переразмеренным» по мощности приводящим электродвигателем (10 кВт), представлены пространственные компьютерные изображения привода, приведено описание работы и внешний вид экспериментального стенда.

**В пятой главе** приведены материалы экспериментальных исследований разработанного привода, работающего в автономном режиме (дрессельное управление с гидропитанием от внешней насосной установки не рассматривается). Показано, что графики скоростных, нагрузочных характеристик привода и регулировочной характеристики клапана реверса имеют симметричный и близкий к линейному вид, что упрощает настройку и построение алгоритмов управления привода.

**Шестая глава** посвящена сопоставлению результатов численного моделирования и экспериментальных исследований. Показано вполне удовлетворительное совпадение характеристик и выполнено уточнение параметров модели привода, позволяющее в дальнейших и расширенных исследованиях использовать математическую модель.

**Седьмая глава** содержит результаты исследования динамических и статических характеристик ГРПП, а также оценку энергетических свойств привода. Основное внимание уделено определению взаимосвязи между параметрами настройки блока управления привода и его характеристиками в области малых амплитуд входных сигналов (0,2...5% от максимального значения). Для оценки режимов регулирования соискатель ввёл показатель динамического качества привода как отношения частоты гармонического сигнала к фазовому запаздыванию выходного сигнала, и определил области предпочтительного регулирования скорости (частотного, дрессельного и комбинированного).

Частотные характеристики привода в режиме комбинированного регулирования при различных амплитудах входного сигнала вполне физичны и достаточно традиционны – сравнительно низкая полоса пропускания по амплитуде и фазе (5 – 6 Гц), ниспадающий характер характеристик, типичное ухудшение динамики привода с ростом нагрузки.

Для улучшения динамики привода в области малых управляющих сигналов при повышении нагрузки с одновременным улучшением экономичности (энергопотребления) привода диссертантом предложено использовать повышение начального давления на клапане реверса, реализуемое с помощью разработанного соискателем алгоритма, в виде дополнительной отрицательной обратной связи, сигнал которой пропорционален нагрузке привода. Данное решение позволило существенно улучшить динамические показатели привода.

С целью большей наглядности соискатель представил влияние параметров настройки блока управления на характеристики привода в виде трёхмерных диаграмм «чувствительность – энергопотребление – полоса пропускания».

**Научную новизну работы подтверждают наиболее существенные научные результаты, полученные соискателем:**

1. Выполнен анализ различных структур приводов для силовых систем самолётов, соответствующих перспективной концепции ПЭС, показана перспективность использования гибридного рулевого гидравлического привода.
2. Исследовано влияние параметров блока управления гибридным приводом.
3. Предложен способ улучшения динамических и энергетических показателей ГРГП, основанный на введении дополнительной отрицательной обратной связи по перепаду давления на клапане реверса привода.
4. Сформирован новый алгоритм и существенно модернизирована структура регулятора привода, реализующая коррекцию по перепаду давлений на клапане реверса.
5. Разработан способ определения и автоматизированного построения зон предпочтительного регулирования скорости ГРГП.
6. Предложен метод оценки динамических и, частично, энергетических показателей привода по трёхмерным графикам его показателей.

Выполненные теоретические исследования и оптимизационные расчёты базируются на классических соотношениях гидравлических приводов с насосным, дроссельным управлением потоками гидроэнергии, электрических машин, положениях теории управления и реализовано с помощью апробированных программных комплексов компьютерного моделирования. Подтверждение же результатов исследований выполнено путём сравнения результатов теоретических исследований с экспериментальными данными и результатами численных экспериментов.

**Таким образом, обоснована достоверность полученных результатов.**

Применение рассмотренных в диссертации решений для гибридного рулевого гидропривода позволяет существенно улучшить динамические показатели нагруженного рулевого привода в наиболее востребованной зоне работы – малых амплитуд входного сигнала. Данные методы достаточно универсальны, а подобные приводы представляют собой исполнительную базу для силовых систем многих других объектов из разных отраслей промышленности, где реализована концепция электрических силовых систем.

Поэтому **практическая значимость результатов диссертационного исследования не вызывает сомнений.**

**К отдельным недостаткам диссертационной работы можно отнести следующие:**

1. В работе имеет место достаточно произвольное толкование общепринятых терминов. Так, во введении и последующих главах автор широко использует понятие электрогидравлического привода (стр.7), затем применяет термин «электрогидростатический привод», который почему-то рассматривается только как привод с машинным (насосным) управлением потоками гидравлической энергии и, следовательно, скоростью движения выходного звена. Вместо общепринятого термина «поворотный гидродвигатель» на стр.37 применено считающееся устаревшим понятие «неполповоротный гидродвигатель», вместо терминов «напорная» гидролинии – линия нагнетания, на стр. 37 насос привода называется аксиально-плунжерным, а на стр. 52 и в оглавлении – поршневым, а в и т.д.
2. Чтение текста затрудняет «сбитая» нумерация формул в гл.3 и отсутствие словесной расшифровки вводимых автором обозначений физических величин. Так, например, все уравнения в третьей главе должны были бы иметь нумерацию (3.3) – (3.44) вместо (4.3) – (4.44), что, по-видимому, объясняется невнимательностью автора. Искать входящие в уравнения этой главы обозначения, начиная с (4.3) и далее, приходится по тексту, иногда угадывая значения аббревиатур, что затрудняет чтение. Некоторые расшифровки просто отсутствуют ( $\Omega$ ,  $R_{em}$ ,  $C_e$  и многие другие).
3. Во введении указывается, что важным показателем рулевого привода является его жёсткость. Однако автор ограничивается рассмотрением только статической жёсткости привода, причём, в упрощённой постановке, не затрагивая вопросов определения динамической жёсткости как отдельного привода, так и силовой системы с исполнительным модулем. В то же время известно, что авиационные рулевые приводы испытывают существенные знакопеременные нагрузки, обусловленные срывными режимами обтекания рулевых поверхностей, что ставит вопросы анализа динамической жёсткости приводов на одно из первых мест.
4. В качестве преимуществ гибридного (частотно-дрессельного) рулевого привода диссертант отмечает все положительные свойства гидростатического привода, т.е. привода с насосным управлением, а также дрессельного гидропривода. Однако в диссертации отсутствует доказательство предпочтительности частотного способа регулирования перед известным машинным (насосным), который также вполне реализуем в силовых системах самолётов концепции ПЭС.

5. Требуется разъяснение положения на стр. 43, 44 о том, что ввиду использования математической модели привода «...в области малых сигналов управления, смещения регулирующих элементов, и малых изменений потоков рабочей жидкости, соответствующим сигналам управления с амплитудами 0,2...5%,...математические модели описывают рабочие процессы в регулирующих агрегатах привода на элементном уровне с использованием экспериментальных характеристик отдельных элементов». Как правило, малые амплитуды внешних воздействий из-за известных особенностей линеаризации уравнений методами разложения функций в степенные ряды допускают возможности применения наиболее простых – линейных моделей. Здесь же речь идёт об экспериментальных данных, получение которых обычно не связано с уровнями иницирующих сигналов.
6. В модели формирования давления жидкости на входе клапана реверса (стр. 53) учтён модуль упругости жидкости. В то же время при составлении модели аксиально-плунжерного насоса (стр. 52, 53) влияние условных так называемых деформационных) утечек не учтено, хотя известно, что этот фактор может составить от 30 до 40% общих объёмных потерь насоса.
7. В седьмой главе диссертации приведено сопоставление энергопотребления гибридного привода с неизменными значениями давлений на клапане реверса и ГРПП с коррекцией по давлению. Логично было бы привести хотя бы укрупнённый алгоритм решения задачи по обеспечению энергодостаточности такого привода, т.е. полного охвата механической характеристикой привода совокупности диаграмма нагрузки.

Тем не менее, отмеченные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы. За исключением очевидных оформительских недостатков, они характеризуют, скорее, сложность тематики, к которой обратился автор диссертации, и определяют перспективные направления дальнейших исследований.

### **Заключение**


Диссертация работа Алексеенкова Артёма Сергеевича является самостоятельным, цельным и законченным научно-исследовательским исследованием, имеет безусловную актуальность, практическую ценность и научную новизну. Диссертационная работа оформлена в полном соответствии с требованиями, предъявляемыми к кандидатским диссертациям. Стиль изложения материала соответствует современным научно-техническим тестам, использованная терминология – общепринятым понятиям.

Автореферат и публикации отражают основное содержание диссертации.

Работа выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне с широким использованием современных средств управления экспериментом, обработки экспериментальных данных, пакетов численного моделирования. В работе получены практически значимые результаты, которые могут быть использованы для создания быстродействующих гибридных комбинированных гидравлических приводов с комбинированным регулированием, имеющих улучшенные динамические и энергетические показатели, как исполнительных модулей систем управления современными и перспективными летательными аппаратами концепции ПЭО, а также другими объектами, где реализована данная концепция.


Представленный в диссертации материал соответствует специальности 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин», а автор работы – Алексеенков Артём Сергеевич – заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент:  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Паровые и газовые турбины»,  
подразделение «Гидромеханики и гидравлических машин»  
ФБГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет  
«МЭИ»

  
Зуев Ю.Ю.  
«12» ноября 2014 г.

Подпись к.т.н., доцента кафедры  
Паровых и газовых турбин НИУ «МЭИ»

Зуева Ю.Ю. заверяю:

*Магистрант кафедры гидравлики*  
*12.11.2014*  
  
*Зуев Ю.Ю.*