

Летательные аппараты, авиационные двигатели и методы их эксплуатации/  
Aircraft, Aircraft Engines and Methods of Their Operation

Научная статья

УДК 629.7.062.2

ББК 0565

<https://doi.org/10.51955/2312-1327-2026-2-43>

## АВТОНОМНЫЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РУЛЕВОЙ ПРИВОД

*Владимир Александрович Целищев\**,  
*Уфимский университет науки и технологий,*  
*Уфа, Россия*

*Дмитрий Александрович Кудерко,*  
*АО «Уральский завод гражданской авиации»,*  
*Москва, Россия*

*Дмитрий Владимирович Целищев,*  
*Уфимский университет науки и технологий,*  
*Уфа, Россия*

*Николай Алексеевич Поляков,*  
*АО «Уральский завод гражданской авиации»,*  
*Москва, Россия*

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы компоновки рулевых приводов поверхностей управления полетом магистрального самолета. Приводится классификация рулевых приводов по источникам питания, техническим решениям, виду исполнительного гидродвигателя, способам организации управления и регулирования, типам источников питания. Подробно рассмотрены три типа рулевых приводов самолетов по виду источника питания: с централизованным питанием, с автономным питанием и электрическим питанием. Сформулированы основные преимущества и недостатки разработки и эксплуатации автономных рулевых приводов. Приводятся основные схемные решения перспективных автономных рулевых приводов. Представлена универсальная схема реализации автономного рулевого привода с учетом возможных регулирующих и регулируемых величин системы автоматического управления. На основании анализа выявленных недостатков автономного рулевого привода определены направления совершенствования. Выявлены контролируемые параметры и предложены возможные типы регуляторов автономного привода, компенсирующие внешние воздействия. Представлена возможная трактовка автономного рулевого привода как объекта регулирования. В качестве информационных сигналов предложено использовать гидромеханические устройства коррекции, а именно датчики давления и расхода в полостях гидродвигателя, работающие совместно с регуляторами следующих типов: по давлению (динамическому давлению), скорости, мощности и чувствительности к нагрузке (LS). Представлена математическая модель рулевого привода с регулятором мощности и результаты моделирования.

**Ключевые слова:** самолет; система управления; гидравлическая система; автономный рулевой привод; гидромеханические регуляторы характеристик.

---

\* Ответственный автор за связь с редакцией

**Для цитирования:**

Целищев, В. А. Автономный электрогидравлический рулевой привод/ В. А. Целищев, Д. А. Кудерко, Д. В. Целищев, Н. А. Поляков // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2026. – Том 13. – №02. – С. 43-63. – <https://doi.org/10.51955/2312-1327-2026-2-43>

**Вклад авторов в работу:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Original research article**

**AUTONOMOUS ELECTRO-HYDRAULIC FLIGHT CONTROL  
ACTUATOR**

*Vladimir A. Tselishev\**,  
*Ufa University of Science and Technology,*  
*Ufa, Russia*

*Dmitry A. Kuderko,*  
*Ural Civil Aviation Plant Joint Stock Company,*  
*Moscow, Russia*

*Dmitry V. Tselishev,*  
*Ufa University of Science and Technology,*  
*Ufa, Russia*

*Nikolay A. Polyakov,*  
*Ural Civil Aviation Plant Joint Stock Company,*  
*Moscow, Russia*

**Abstract.** The issues of the layout of flight control actuators on a mainline aircraft are considered. The authors give classification of flight control actuators by power sources, technical solutions, types of executive hydraulic motor, methods of organizing control and regulation, types of power sources. Three types of flight control actuators are considered in detail according to the type of power source: with centralized power supply, with self-contained power supply and electric power supply. The main advantages and disadvantages of development and operation of autonomous flight control actuators are formulated. The basic circuit solutions of promising autonomous flight control actuators are considered. The authors present a universal scheme for the implementation of an autonomous flight control actuator with account for possible regulating and regulated variables of the automatic control system. Based on the analysis of the revealed disadvantages of an autonomous flight control actuator, the priorities for improving are determined. The controlled parameters have been identified and possible types of regulators for an autonomous flight control actuator that compensate for external influence have been proposed. A possible interpretation of an autonomous flight control actuator as an object of regulation is presented. As information signals, the authors propose to use hydro-mechanical compensatory devices, namely pressure and flow sensors in the cavities of the hydraulic motor working in conjunction with regulators of the following types: pressure (dynamic pressure), speed, power and load sensitivity (LS) ones. A mathematical model of a flight control actuator with a power regulator and simulation results are presented.

**Keywords:** aircraft; control system; hydraulic system; autonomous flight control actuator; hydro-mechanical regulators of characteristics.

---

\* Corresponding author

**To cite this article:**

Tselishev, V. A., Kuderko, D. A., Tselishev, D. V., Polyakov, N. A. (2026). Autonomous electro-hydraulic flight control actuator. *Crede Experto: transport, society, education, language*, vol. 13, no. 2, pp. 43-63 DOI: <https://doi.org/10.51955/2312-1327-2026-2-43> (in Russ.).

**Author Contributions:** Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**Введение (Introduction)**

За последние несколько десятилетий требования к эксплуатационным характеристикам систем управления рулевыми поверхностями полета самолета возросли и привели к желанию заменить традиционную централизованную электрогидравлическую систему управления системой электропитания по проводам. Перспективные способы управления рулевыми поверхностями летательного аппарата предполагают использование модульных систем, имеющих меньший вес и требующих только подключения проводов питания, управления и средства механизации рулевых плоскостей.

Термин «автономный рулевой привод» (АРП) существует уже достаточно давно и не всегда однозначно трактуется исследователями. Здесь предлагается рассмотреть рулевой привод поверхностей управления полетом магистрального самолета. Это объемный гидропривод замкнутой циркуляции с электрическим приводным двигателем, автономность которого заключается в отсутствии централизованной системы питания, а компенсация утечек в насосе и гидродвигателе осуществляется за счет работы пневмогидроаккумулятора или вспомогательного насоса. В технической зарубежной литературе зачастую используют понятие «электрогидростатический привод», которое не всегда трактуется как «автономный» без отсутствия подключения к централизованному источнику энергии.

**Материалы и методы (Materials and Methods)**

Гидросистема управления полетом, взлетом и посадкой магистрального самолета содержит три подсистемы, обеспечивающие работу рулевых приводов (не менее 20 единиц) левого и правого борта, гидродвигателей шасси (не менее 3 единиц) и резервирование.

В настоящее время различают три типа рулевых приводов самолетов по виду источника питания: с централизованным питанием, с автономным питанием и электрическим питанием [Свешников и др., 2016; Шумилов, 2014; Frischemeier, 1997].

В качестве альтернативы в последние годы рассматриваются электрогидростатические приводы с автономным питанием. В основу положена идея интегральной компоновки, когда в едином блоке совмещены приводной двигатель, насос и гидродвигатель управления рулевой поверхностью самолета. Конструктивно-компоновочные решения автономного рулевого привода в настоящее время не нашли единого признанного облика. Достаточно много различных аргументов используется при выборе приводного двигателя:

использовать в качестве привода насоса двигатель переменного или постоянного тока, вентильно-индукторных электрических машин.

Следует обратить внимание, что зачастую в электрогидравлических системах рулевых приводов с централизованным и автономным питанием наблюдаются недостатки [Свешников и др., 2016; Селиванов и др., 2011; Шумилов, 2014; Review on electro..., 2016], например, наличие существенных тепловых потерь. В системе с централизованным питанием тепловые потери обусловлены использованием дроссельного способа регулирования рулевых приводов. В приводах с автономным питанием вследствие отсутствия бака при использовании замкнутой циркуляции тепловые потери образуются за счет утечек в корпусе насоса и гидродвигателя, а также при использовании дроссельного регулирования производительностью насоса.

Концепция развития авиационных приводных систем в направлении «более электрический самолет» в настоящее время носит неоднозначный, амбициозный характер. В части разработки автономных рулевых приводов следует учитывать, что для привода насоса электродвигателем требуется подвести к нему электроэнергию. Это производится опять же по длинным (порядка 50 м) силовым проводам, обладающим в требуемой оплетке сравнительно большой массой и габаритами. Генераторы, подающие энергию к электроприводам, работают от газотурбинных двигателей и, по сравнению с насосами централизованной системы питания, обладают худшими массогабаритными характеристиками. Кратко можно сформулировать современную ситуацию с электромеханическими приводами для рулевых плоскостей магистральных самолетов так: электромеханические приводы совершенствуются, но гидравлические по-прежнему доминируют.

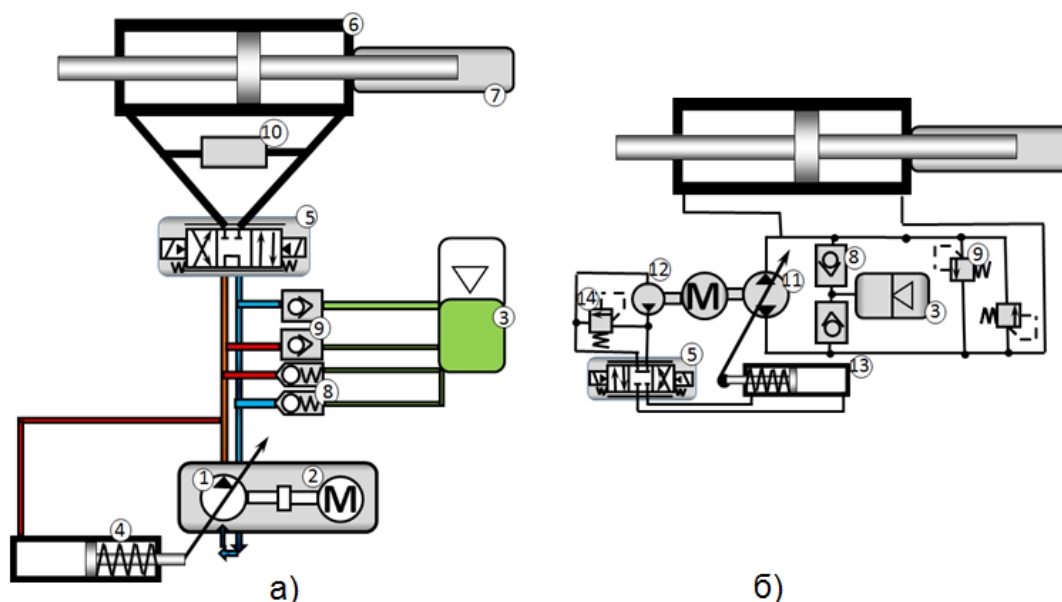
В данной статье рассматривается иная концепция: развитие гидромеханических регуляторов автономных рулевых приводов способствует совершенствованию их характеристик. В основу формирования концепции положены материалы оценки гидромеханических систем и методы их расчета [Петров и др., 2019; Кудерко и др., 2023].

### **Дискуссия (Discussion)**

Можно выделить несколько схемных решений автономных рулевых приводов, доведенных до создания опытных и мелкосерийных изделий [Гуськов и др., 2019; Шумилов, 2014; Dinca et al., 2010; Review on electro..., 2016]. Допустимо назвать схему АРП (рис. 1, а) с регулируемым насосом 1 постоянного давления и многопозиционным электрогидрораспределителем 5 традиционной, поскольку она использует основные преимущества рулевых приводов с централизованным питанием. Автономность работы привода обеспечивается приводным электродвигателем с постоянной частотой вращения 2 насоса 1, замкнутой гидравлической схемой, где компенсация утечек и обеспечение требований к пиковым расходам осуществляется работой гидропневмоаккумулятора 3 с обратными клапанами 9. Дроссельное регулирование скорости гидродвигателя распределителем 5 и постоянное

давление в системе обеспечивают удовлетворительные статические и динамические характеристики привода. Работа автономного рулевого привода может корректироваться за счет использования датчиков положения штока гидроцилиндра 7, датчиков положения золотника распределителя 5 и механизма регулятора 4, датчика перепада давлений 10 в полостях гидроцилиндра 6 и датчика утечек в агрегатах системы.

На рис. 1, б) представлена схема АРП с реверсивным регулируемым насосом 11, приводимым электродвигателем с постоянными оборотами. В режиме ожидания команды насос 11 находится на минимальной производительности, обеспечивающей компенсацию сил, действующих на шток гидроцилиндра в установившемся положении. Изменение подачи насоса 11 осуществляется при управляющей команде на многопозиционный электрогидрораспределитель 5 от давления управления, создаваемого вспомогательным насосом 12. Наличие насоса 12 позволяет отойти от использования гидропневмоаккумулятора, заменив его на бак, но сохранив при этом замкнутую систему циркуляции.

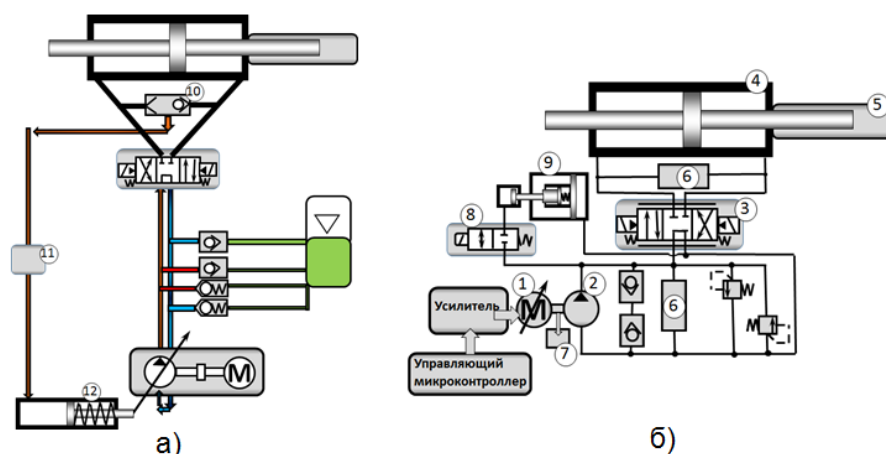


- 1 – регулируемый насос постоянного давления; 2 – приводной электродвигатель;  
3 – пневмогидроаккумулятор; 4 – регулятор насоса (может комплектоваться датчиками положения); 5 – многопозиционный электрогидрораспределитель (используются различные схемы, могут содержать датчики положения); 6 – гидроцилиндр; 7 – датчик линейного перемещения штока гидроцилиндра; 8 – перепускные и демпфирующие клапана;  
9 – антикавитационные клапана; 10 – датчик разности давлений на поршне;  
11 – реверсивный регулируемый насос; 12 – вспомогательный насос; 13 – регулятор производительности насоса; 14 – клапан предохранительный

Рисунок 1 – Автономный рулевой привод: а) с регулируемым насосом, б) с реверсивным основным и вспомогательным малым насосами

Figure 1 – Autonomous flight control actuator: (a) with a variable pump, (b) with a reversible main and auxiliary small pumps

Схема с АРП (рис. 2, а), в основе которого лежит использование информации датчика перепада давлений о нагрузках 10, действующих на исполнительный гидродвигатель, и соответствующей команде на регулируемый насос об адаптации его производительности к величине нагрузки. Приводной двигатель обеспечивает постоянные обороты. Широкодиапазонный регулятор расхода 11 регулирует подачу насоса механизмом изменения характерного рабочего объема насоса 12. Использование подобной обратной связи способствует существенной экономии мощности. Регулятор 11 возможно запрограммировать на работу для экономичного сочетания подачи и давления насоса, обеспечивая рациональное использование мощности на всех режимах эксплуатации.



1 – регулируемый приводной электродвигатель; 2 – насос постоянного давления;  
3 – многопозиционный электрогидрораспределитель (используются различные схемы, могут содержать датчики положения); 4 – гидроцилиндр; 5 – многопозиционный электрогидрораспределитель (используются различные схемы, могут содержать датчики положения); 6 – датчик перепада давлений; 7 – датчик оборотов приводного двигателя; 8 – электрогидрораспределитель; 9 – гидрокомпенсатор; 10 – датчик разности давлений на поршне; 11 – регулятор расхода; 12 – механизм изменения характерного рабочего объема насоса

Рисунок 2 – Автономный рулевой привод: а) с обратной связью по давлению нагрузки, б) с комбинированным регулированием скорости

Figure 2 – Autonomous flight control actuator: (a) with load pressure feedback, (b) with combined speed regulation

АО «Павловский машиностроительный завод «Восход», одно из ведущих предприятий авиакосмической промышленности России, разработал и освоил выпуск различных вариантов АРП, одна из схем которого в виде двухрежимного привода представлена на рис. 2, б. Первый режим работы АРП основан на использовании объемного регулирования скорости гидродвигателя за счет регулирования скорости оборотов приводного двигателя 1, изменяющего подачу

насоса 2 [Шумилов, 2014; Frischemeier, 1997]. Первый режим работы используется при отработке больших и средних сигналов управления и при этом имеет малые энергетические потери. Второй режим работы предполагает отработку малых сигналов рассогласования, основан на дроссельном способе регулирования с использованием многопозиционного электрогидрораспределителя 3. Отмечается, что при этом затраты энергии сравнительно небольшие, так как потребляемая мощность привода на уменьшении статической ошибки положения выходного звена гидродвигателя небольшая. При таком управлении устраняется основной недостаток использования регулируемого электродвигателя, когда не требуется обеспечение стабильной низкой скорости вращения ротора электродвигателя в области малых сигналов. Гидрокомпенсатор 9 с электрогидрораспределителем 8 обеспечивают бескавитационный режим работы АРП.

Для осуществления устойчивой и надежной работы АРП на переходных режимах используются сигналы с датчика перемещения штока гидроцилиндра 5, датчиков перепада давлений 6, датчика оборотов приводного двигателя 7, подаваемые и обрабатываемые управляющим микроконтроллером.

Необходимо отметить, что в системе управления рулями самолёта автономные приводы получили ограниченное применение. Известны лишь отдельные случаи применения таких приводов, например, на самолётах VC-10, Belfast, Vulkan разработки 1950-1960 годов, мощность которых не превышала 0,55 кВт. Известны единичные случаи применения АРП и на современных самолётах, например А-380, т. е. интерес к АРП сохраняется, и работы по совершенствованию АРП продолжают [Шумилов, 2014; van den Bossche, 2006].

Наиболее универсальная схема реализации автономного рулевого привода с учетом возможных регулирующих и регулируемых величин системы автоматического управления представлена на рис. 3. В качестве исполнительного гидродвигателя рассматривается гидроцилиндр с двухсторонним штоком и возможными датчиками на штоке. Агрегаты безопасности и компенсации утечек при анализе работы АРП на первом этапе исследования предполагается не учитывать. В качестве устройства адаптации управляющих команд со стороны пилота/автопилота, сбора информации с датчиков обратной связи, анализа и выработки сигналов компенсации ошибок выступает управляющий микроконтроллер. Помимо подачи команды электрогидрораспределителю на реверс гидродвигателя, микроконтроллер может управлять оборотами приводного электродвигателя через усилитель сигнала и регулировать подачу насоса с помощью электродвигателя управления.

На рис. 4 представлена возможная трактовка автономного рулевого привода как объекта регулирования [Моделирование..., 2024], Управляющие воздействия на автономный электрогидравлический привод для изменения положения рулевой плоскости магистрального самолета поступают со стороны пилота или автопилота, или от элементов пилотажно-навигационных систем автоматического управления автономным приводом, управляющими

микроконтроллером. При этом подаются соответствующие управляющие команды на переходный процесс с одного режима работы АРП на другой. В процессе перемещения исполнительного гидродвигателя на него действуют возмущающие нагрузки различного вида, частично описанные в [Кудерко и др., 2021]. Основная нагрузка – позиционная, вызванная газодинамическим воздействием набегающего на рулевую поверхность самолета при совершении маневра. Инерционная нагрузка рулевой поверхности оказывает существенное влияние на силы трения в узлах крепления механизмов шарнирных опор. Со стороны агрегатов рулевого привода также действуют аналогичные воздействия, включая зависимость утечек в насосе от величины давления (нагрузок) на гидродвигателе.

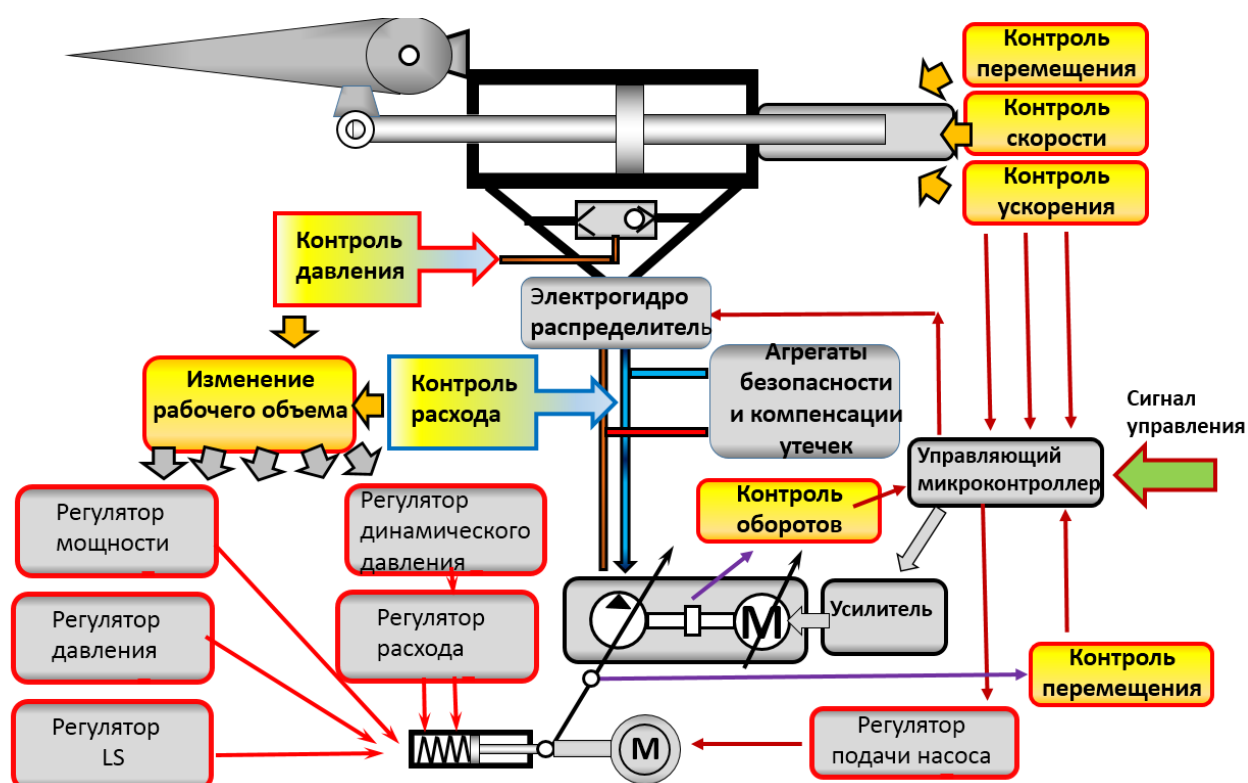


Рисунок 3 – Контролируемые параметры и компенсирующие внешние воздействия регуляторы автономного рулевого привода

Figure 3 – Controllable parameters and regulators of the autonomous flight control actuator compensating for external disturbances



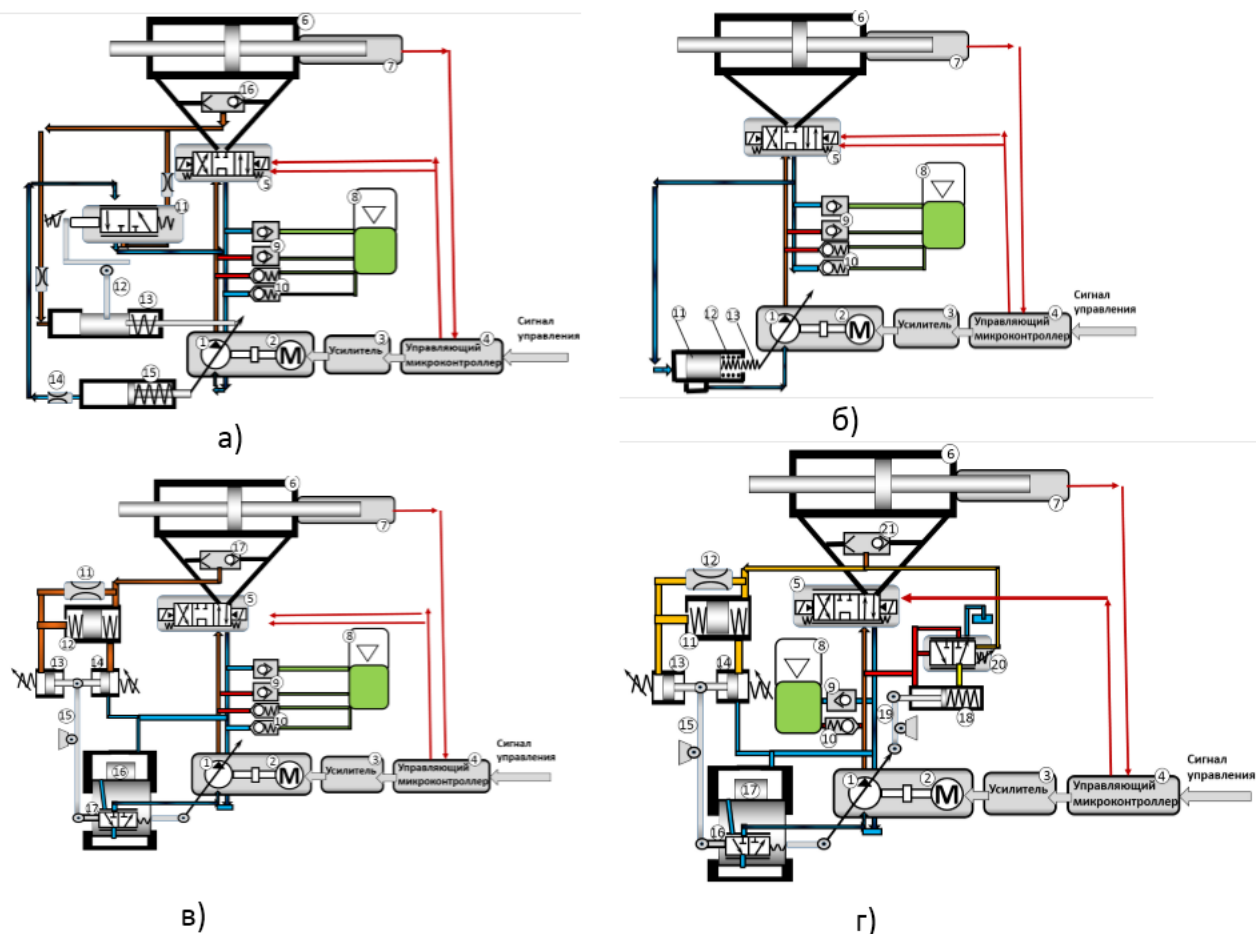
Рисунок 4 – Автономный рулевой привод как объект регулирования  
Figure 4 – Autonomous flight control actuator as an object of regulation

Энергетическая мощность автономного рулевого привода, комплекс и величина возмущающих воздействий определяют управляемость и устойчивость системы на переходных режимах. При больших и средних сигналах управления со стороны пилота/автопилота АРП можно рассматривать как исполнительный элемент системы автоматического управления полетом самолета с присущими в этом случае требованиями обеспечения управляемости и устойчивости [Близнова и др., 2012; Коева и др., 2012; Кудерко и др., 2021; Формирование..., 2014].

Работа систем автоматического регулирования АРП при достижении рулевой поверхностью нового положения заключается в обеспечении точности исполнения управляющей команды и контроле ее положения при внешних возмущающих воздействиях, вызванных окружающей средой. Контроль положения осуществляется с помощью датчиков. Электромеханические датчики способны контролировать перемещение, скорость и ускорение штока гидроцилиндра, золотника электрогидрораспределителя, утечек, перемещение механизма подачи насоса (положение угла наклонной шайбы или блока цилиндров аксиально-поршневого насоса), оборотов приводного двигателя. Сигнал с датчиков поступает на управляющий микроконтроллер, анализируется и попадает в виде корректирующего сигнала непосредственно на приводной электродвигатель насоса или на электродвигатель управления регулятора производительности насоса, обеспечивая дополнительную подачу рабочей жидкости от насоса к гидродвигателю. Для корректирующего сигнала на электродвигатель могут быть применены электронные регуляторы оборотов, скорости и ускорения.

## **Результаты (Results)**

Опыт эксплуатации гидравлических следящих приводов показывает, что с задачами отработки точности положения штока гидроцилиндра достаточно хорошо справляются гидромеханические устройства коррекции. В данном случае в качестве информационных сигналов предлагается использовать гидромеханические датчики давления и расхода в полостях гидродвигателя. При соответствующей обработке информационного сигнала могут быть реализованы различные регуляторы: мощности [Патент №2820916 С1..., 2024] (рис. 5, а); скорости [Патент №2826275 С1..., 2024] (рис. 5, б); по динамическому давлению [Патент №2826237 С1..., 2024] (рис. 5, в); по давлению и динамическому давлению (комбинированная схема) [Патент №2820916 С1..., 2024] (рис. 5, г) и, конечно, чувствительности к нагрузке, так называемые регуляторы LS-регулируемые. Регулятор мощности обеспечивает оптимальное потребление мощности насоса в зависимости от требуемых действительных нагрузок на исполнительных гидродвигателях; регулятор скорости обеспечивает согласование выходных характеристик рулевого привода при действующих на гидродвигатель нагрузках постоянного или позиционного характера; регулятор динамического давления решает задачу повышения надежности работы рулевого привода, увеличение точности и устойчивости при работе на резонансных частотах при воздействии позиционных и инерционных нагрузок случайного характера; регулятор комбинированной схемы обеспечивает повышение точности работы при изменении статической нагрузки и нежесткой связи гидродвигателя с нагрузкой, а также динамической нагрузки инерционного или случайного характера. Гидромеханический регулятор с LS-регулируемым позволяет улучшить устойчивость хода и энергетическую эффективность управления исполнительным гидроцилиндром путем использования в гидроприводе чувствительной к нагрузке системы регулирования



- а) 1 – насос; 2 – приводной двигатель; 3 – усилитель; 4 – управляющий микроконтроллер; 5 – электрогидравлический усилитель; 6 – гидроцилиндр; 7 – датчик обратной связи; 8 – бак; 9 – клапан обратный; 10 – клапан предохранительный; 11 – золотник; 12 – коромысло; 13, 15 – гидроцилиндры; 14 – дроссель;
- б) 11 – поршень; 12, 13 – пружины;
- в) 11 – дроссель; 12 – подпружиненный поршень; 13, 14 – толкатели; 15 – коромысло; 16 – поршень; 17 – гидрораспределитель многопозиционный;
- г) 11 – подпружиненный поршень; 12 – дроссель; 13, 14 – толкатели; 15 – коромысло; 16 – гидрораспределитель многопозиционный; 17 – поршень; 18 – гидроцилиндр; 19 – коромысло; 20 – гидрораспределитель многопозиционный.

Рисунок 5 – Автономный рулевой привод с регулятором мощности; а) с регулятором мощности; б) с регулятором скорости; в) с регулятором динамического давления; г) с комбинированным регулятором

Figure 5 – Autonomous flight control actuator with a power regulator; (a) with a power regulator; (b) with a speed regulator; (c) with a dynamic pressure regulator; (d) with a combined regulator

В качестве примера реализации возможностей рулевого привода с гидромеханическим регулятором мощности разработана математическая модель.

Систему уравнений с использованием подхода [Petrov et al., 2024], описывающую электрогидравлический следящий привод (ЭГСП) как автономный рулевой привод и включающую уравнения: электрической цепи, электромеханического преобразователя (ЭМП) с гидроусилителем «соплю-заслонка-золотник», баланса расходов двухкаскадного гидроусилителя, баланса сил на золотниковом гидрораспределителе, баланса расходов на гидроцилиндре, движения приведенных масс нагрузки и поршня гидроцилиндра, можно представить в виде:

$$U_n - K_{oc} \cdot y(t) = L_l \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_y(t) + R \cdot I_y(t) + K_v \cdot \frac{d}{dt} \cdot \alpha_l(t), \quad (1)$$

$$J_l \cdot \frac{d^2}{dt^2} \cdot \alpha_l(t) = K_{mi} \cdot I_y(t) - K_{ma} \cdot \alpha_l(t) - K_{pel} \cdot \alpha_l(t) - R_g \cdot L_{zi} - C_{oc} \cdot L_{zi} \cdot (h(t) + x_l(t)) - b_e \cdot \frac{d}{dt} \cdot \alpha_l(t), \quad (2)$$

$$K_{Qh} \cdot h(t) - K_{qp} \cdot P_z(t) = A_{zol} \cdot \frac{d}{dt} x_l(t) + \frac{V_k \cdot \frac{d}{dt} \cdot P_z(t)}{2 \cdot E_1}, \quad (3)$$

$$P_z(t) = \frac{C_{zol} \cdot x_l(t) + C_{oc} \cdot h(t)}{A_{zol}}, \quad (4)$$

$$\mu \cdot B \cdot x_l(t) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{P_p - P_d(t) - P_{cl}}{2r}} = A \cdot \frac{d}{dt} \cdot y(t) + W \cdot \frac{d}{dt} \cdot \frac{P_d(t)}{2 \cdot E_1}. \quad (5)$$

$$M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} y(t) = A \cdot P_d(t) - b \cdot \frac{d}{dt} y(t) - C_{sv} \cdot (y(t) - y_n(t)), \quad (6)$$

$$m_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} y_n(t) = C_{sv} \cdot (y(t) - y_n(t)) - b_2 \cdot \frac{d}{dt} y_n(t) - F_{tr} - Rn, \quad (7)$$

где  $J_l$  – момент инерции якоря ЭМП, Н·м<sup>2</sup>;  $K_{mi}$  и  $K_{ma}$  – коэффициенты моментной характеристик ЭМП;  $K_{oc}$  – коэффициент главной обратной связи, В/м;  $R$  – суммарное активное сопротивление контура усилителя и обмоток управления, Ом;  $L_l$  – индуктивное сопротивление катушек ЭМП, Гн;  $I_y$  – ток управления, А;  $K_v$  – коэффициент вязкого демпфирования якоря ЭМП, Н·м·с/рад;  $C_{oc}$  – коэффициент жесткости пружины обратной связи, Н/м;  $\mu$  – коэффициент расхода;  $B$  – ширина окна золотника, м;  $P_p, P_d, P_{cl}$  – соответственно давление питания, слива и перепада давлений на поршне гидроцилиндра, Па;  $V_k$  – присоединенный объем жидкости в золотнике, м<sup>3</sup>;  $W$  – объем камер гидроцилиндра, м<sup>3</sup>;  $x_l(t)$ ,  $y(t)$  и  $y_n(t)$  – соответственно смещение золотника, штока гидроцилиндра и нагрузки, м;  $\alpha_l(t)$  – угол поворота якоря ЭМП, рад;  $M_1$  и  $m_2$  – массы поршня гидроцилиндра и нагрузки, кг;  $C_{sv}$  – жесткость связи между поршнем гидроцилиндра и нагрузкой, Н/м;  $b$  и  $b_2$  – коэффициенты вязкого трения поршня гидроцилиндра и нагрузки;  $A$  – эффективная площадь поршня гидроцилиндра, м<sup>2</sup>.

Система уравнений, описывающих работу регулятора мощности по разработанному авторами статьи патенту [Патент №2820916 С1..., 2024], может быть представлена в виде:

$$\frac{d}{dt} P_{n1}(t) = \frac{2E_{n1}}{V_{n1}} \left( \mu \cdot \frac{\pi \cdot d_{dr}^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot |P_{dcl}(t) - P_{dr2}(t)| - A_{n1} \cdot \frac{d}{dt} z_1(t) \right), \quad (8)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} z_1(t) = \frac{1}{m_1} \left( A_{n1} \cdot P_{n1}(t) - F_{comp} - c_1 \cdot z_1(t) - b_1 \cdot \frac{d}{dt} z_1(t) \right), \quad (9)$$

$$F_{comp} = \frac{A_{пн} \cdot (P_H(t) + P_{cl}(t)) \cdot \cos \gamma(t)}{r_{т.д.}}, \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} P_{n2}(t) = \frac{2E_{n2}}{V_{n2}} \left( \mu \cdot \frac{\pi \cdot d_{dr}^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot |P_{n2}(t) - P_{dr3}(t)| + A_{n2} \cdot \frac{d}{dt} z_2(t) \right), \quad (11)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} z_2(t) = \frac{1}{m_2} \left( -A_{n2} \cdot P_{n2}(t) - F_{comp} + c_2 \cdot z_2(t) - b_2 \cdot \frac{d}{dt} z_2(t) \right), \quad (12)$$

$$\mu \cdot b_r \cdot z_3(t) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot |P_{dr3}(t) - P_{rel}(t)| = Q_{ncl}, \quad (13)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} z_3(t) = \frac{1}{m_3} \left( A_{n3} \cdot P_{dr3}(t) - F_{kor} - c_3 \cdot z_3(t) - b_3 \cdot \frac{d}{dt} z_3(t) + c_r \cdot z_3(t) \right), \quad (14)$$

$$F_{kor} = c_r \cdot \left( \frac{l_{kor.pr} \cdot z_3(t)}{l_{k.max} - z_{max}} \right), \quad (15)$$

где  $P_{n1}(t)$  – перепад давления на гидроцилиндре 13 регулятора мощности (рис. 5, а), Па;  $E_{n1}$  – модуль объемной упругости на гидроцилиндре 13, Па;  $V_{n1}$  – рабочий объем гидроцилиндра 13, м<sup>3</sup>;  $d_{dr}$  – диаметр отверстия дросселя, м;  $P_{dcl}(t)$  – давление, поступающее из полости гидроцилиндра, Па;  $P_{dr2}(t)$  – перепад давления на дросселе, Па;  $A_{n1}$  – эффективная площадь гидроцилиндра 13, м<sup>2</sup>;  $z_1(t)$  – смещение штока гидроцилиндра 13, м;  $m_1$  – масса гидроцилиндра 13, кг;  $c_1$  – коэффициент жесткости пружины гидроцилиндра 1, Н/м;  $b_1$  – коэффициент вязкого демпфирования, Н·м·с/рад;  $F_{comp}$  – сила сопротивления смещению гидроцилиндра 13, Н;  $A_{пн}$  – площадь поршня гидроцилиндра 15, м<sup>2</sup>;  $P_H(t)$  – давление нагнетания в гидросистеме, Па;  $P_{cl}(t)$  – давление, поступающее в насос из сливной полости золотника, Па;  $\gamma(t)$  – угол поворота наклонного диска насоса по времени;  $r_{т.д.}$  – радиус точки соприкосновения регулятора мощности и наклонного диска насоса, м;  $P_{n2}(t)$  – перепад давления на гидроцилиндре 2 регулятора мощности, Па;  $E_{n2}$  – модуль объемной упругости на гидроцилиндре, Па;  $V_{n2}$  – рабочий объем гидроцилиндра 2, м<sup>3</sup>;  $d_{dr}$  – диаметр отверстия дросселя, м;  $P_{dr3}(t)$  – перепад давления на дросселе, Па;  $A_{n2}$  – эффективная площадь гидроцилиндра 15, м<sup>2</sup>;  $z_2(t)$  – смещение штока гидроцилиндра 15, м;  $b_r$  – ширина окна открытия гидрораспределителя, м;  $z_3(t)$  – смещение распределителя по

времени  $l_1$ , м;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $P_{rel}(t)$  – давление слива из распределителя 11, Па;  $Q_{нел}$  – расход, поступающий в насос, м<sup>3</sup>/с;  $m_3$  – масса гидрораспределителя 11;  $A_{н3}$  – эффективная площадь гидрораспределителя, м<sup>2</sup>;  $c_3$  – коэффициент жесткости пружины гидрораспределителя 11, Н/м;  $c_r$  – коэффициент жесткости настраиваемой пружины гидрораспределителя 11, Н/м;  $b_3$  – коэффициент вязкого демпфирования, Н·м·с/рад;  $F_{kor}$  – сила смещения коромысла 12, Н;  $l_{kor.pr}$  – смещение коромысла 12 относительно пружины, м;  $l_{k.max}$  – максимальное смещение коромысла 12, м;  $z_{max}$  – максимальное смещение гидрораспределителя 11.

На рис. 6 представлены результаты моделирования автономного рулевого привода (ЭГСП) с регулятором мощности электрогидравлического следящего привода с регулятором мощности.

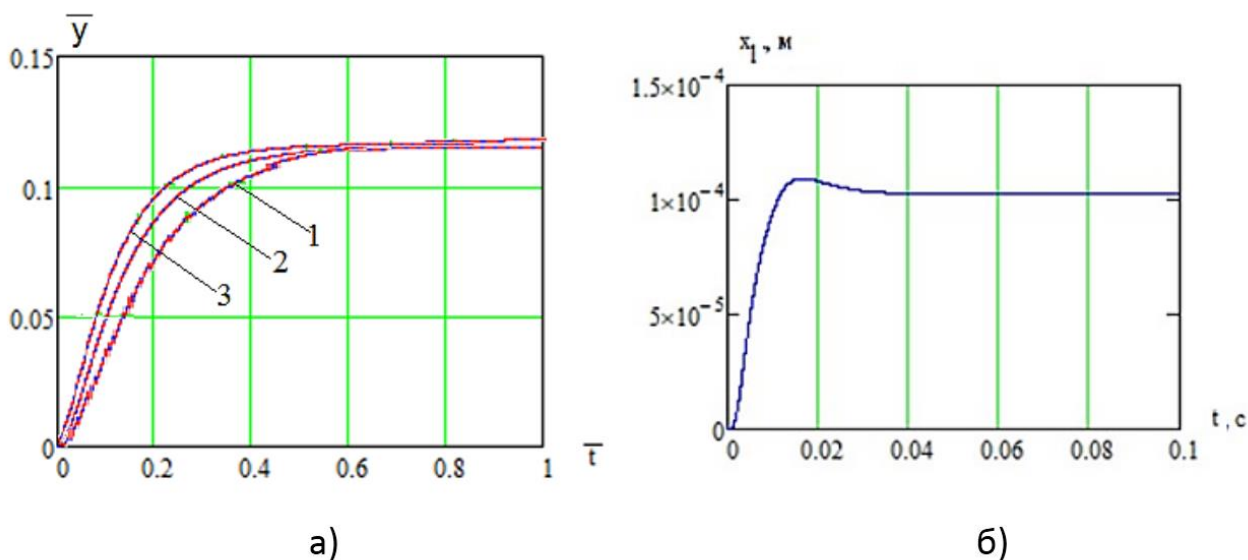


Рисунок 6 – Автономный рулевой привод с регулятором мощности:  
а) переходные процессы относительного перемещения поршня гидроцилиндра 6: 1 – базовая схема ЭГСП; 2, 3 – с регулятором мощности при различной настройке пружины 11 золотника (рис. 5, а); б) перемещение золотника электрогидравлического усилителя 5 (рис. 5, а).

Figure 6 – Autonomous flight control actuator with a power regulator:  
(a) transient processes of relative displacement of the hydraulic cylinder piston 6: 1 – baseline electrohydraulic servo system scheme; 2, 3 – with power regulator under different spring 11 settings of the spool valve (Fig. 5, a); (b) displacement of the spool of the electrohydraulic amplifier 5 (Fig. 5, a).

Анализ результатов расчета показывает влияние на показатели качества регулирования наличия гидромеханического регулятора мощности: кривые 2 и 3 (рис. 6, а) в сравнении с базовой схемой рулевого привода (кривая 1). При подаче командного управляющего сигнала на электрогидравлический распределитель 5

(рис. 5, а) его золотник перемещается за 0.04 с (рис. 6, б), регулированием настройки пружины многопозиционного гидрораспределителя 11 (рис. 5, а) достигается уменьшение времени переходного процесса штока гидроцилиндра рулевого привода на 10-15%.

На рис. 7 представлены результаты моделирования характеристик с регулятора мощности при изменении конструктивных параметров при наличии управляющего воздействия на электрогидрораспределитель и возмущающих воздействий на рулевой привод в виде скачка нагрузки. Наличие регулятора мощности не позволяет изменить выходные характеристики рулевого привода при действии скачков нагрузки. Моделирование влияния конструктивных параметров золотников и пружин регулятора мощности позволяет оптимизировать характеристики регулятора под конкретные параметры автономного рулевого привода.

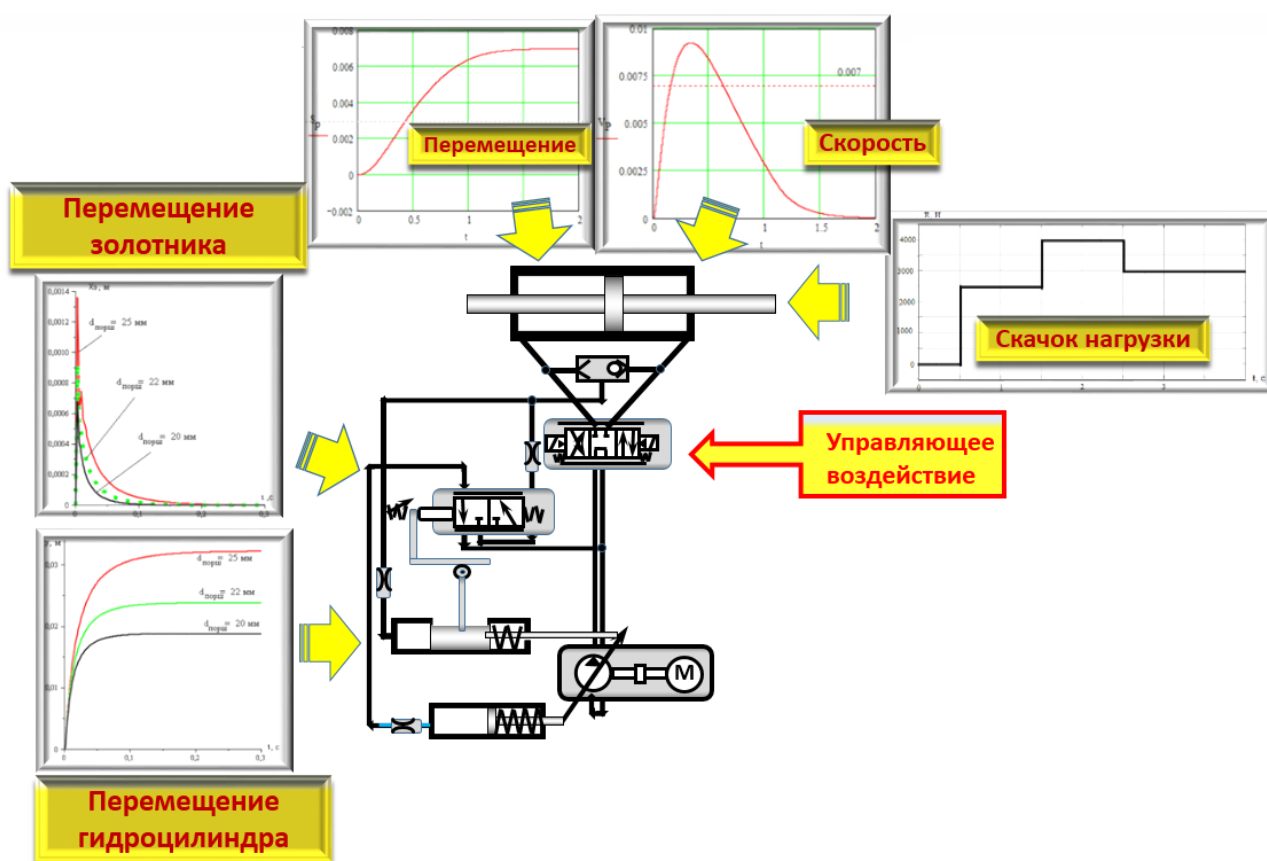


Рисунок 7 – Автономный рулевой привод как объект регулирования  
Figure 7 – Autonomous flight control actuator as an object of regulation

### Заключение (Conclusion)

Анализ направлений развития рулевых приводов в области улучшения массогабаритных характеристик, совершенствования конструктивно-компоновочных схем, систем управления и повышения эксплуатационных характеристик показывает, что создание автономных рулевых приводов

потребуется разработки регуляторов для адаптации к внешним и внутренним нагрузкам.

Объект регулирования, автономный рулевой привод, может содержать датчики давления, расхода, скорости различных элементов и их производные. Регуляторы подачи насоса в гидромеханическом исполнении позволят улучшить динамические характеристики автономного рулевого привода при отработке коррекции точности исполнения управляющих команд. В качестве гидромеханических регуляторов, обладающих высокой надежностью и полностью автоматизированной работой, можно предложить регулятор давления, регулятор динамического давления, регулятор скорости, регулятор мощности и LS-регулятор. Конкретная схема использования гидромеханического регулятора определяется назначением и задачами работы автономного рулевого привода, планируемыми внешними воздействиями.

Разработанная новая математическая модель рулевого привода с гидромеханическим регулятором мощности позволяет оценить влияние работы регулятора на качество переходного процесса привода и прогнозировать требуемые конструктивные параметры регулятора.

### Список литературы

- Близнова Т. Б.* Определение предельных динамических характеристик рулевого привода на основе предельных режимов полета самолета / Т. Б. Близнова, Ю. Г. Оболенский, В. А. Полковников. // Труды МАИ. 2012. №61. С. 10. EDN PTZSFR.
- Гуськов А. А.* Имитационная модель электромеханического рулевого привода малогабаритного высокоманевренного летательного аппарата / А. А. Гуськов, А. А. Спиринов, И. В. Норинская. // Труды МАИ. 2020. №111. С. 14. DOI 10.34759/trd-2020-111-14. EDN VTUMLT.
- Коева А. А.* Концепция исследований устройств гидроавтоматики сложных энергетических систем / А. А. Коева, П. В. Петров // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16, №5(50). С. 103-108. EDN PWZTFD.
- Кудерко Д. А.* Перспективы развития приводов рулевых поверхностей гражданского самолета / Д. А. Кудерко, В. А. Целищев, Д. В. Целищев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2021. №67. С. 70-84. DOI 10.15593/2224-9982/2021.67.07. EDN XWJRLJ.
- Кудерко, Д. А.* Численный анализ и параметрический синтез электрогидромеханических агрегатов газотурбинных двигателей и систем управления летательного аппарата: монография / Д. А. Кудерко, П. В. Петров, В. А. Целищев ; Министерство науки и высшего образования РФ, Уфимский университет науки и технологий. - Уфа : РИЦ УУНиТ, 2023. - 196 с. : ил. - Библиогр.: с. 188-196 (90 назв.). - 500 экз. - ISBN 978-5-7477-5775-2
- Моделирование автономного гидростатического привода / Д. А. Кудерко, П. В. Потеряхина, В. А. Целищев, Д. В. Целищев // Справочник. Инженерный журнал. 2024. №8(329). С. 17-24. DOI 10.14489/hb.2024.08.pp.017-024. EDN DJDANB.
- Новые методические подходы для формирования требований к базовым параметрам систем рулевых приводов перспективного маневренного самолета / С. В. Константинов, В. Е. Кузнецов, И. П. Кузнецов, А. А. Паршин // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2014. – №10. – С. 17-30. – EDN TBUUKJ.
- Патент №2820916 С1 Российская Федерация, МПК F15B 9/09. Автономный электрогидравлический рулевой привод с регулятором мощности: №2024100798: заявл. 15.01.2024: опубл. 11.06.2024 / Д. А. Кудерко, П. В. Потеряхина, В. А. Целищев,

Д. В. Целищев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий». EDN DIQQVJ.

Патент №2826237 С1 Российская Федерация, МПК F15В 9/09. Автономный электрогидравлический рулевой привод с дополнительной обратной связью по динамическому давлению: №2024104747: заявл. 27.02.2024: опубл. 06.09.2024 / Д. А. Кудерко, П. В. Потеряхина, В. А. Целищев, Д. В. Целищев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий». EDN ELSOQZ.

Патент №2826275 С1 Российская Федерация, МПК F15В 9/09. Автономный электрогидравлический рулевой привод с дополнительной обратной связью по скорости гидродвигателя: №2024104755: заявл. 27.02.2024: опубл. 09.09.2024 / Д. А. Кудерко, П. В. Потеряхина, В. А. Целищев, Д. В. Целищев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий». EDN DHJCKF.

*Петров П. В.* Основы автоматизированного проектирования гидромеханических устройств / П. В. Петров, Д. А. Кудерко, В. А. Целищев. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2019. 241 с.

*Свешников В. К.* Автономные электрогидростатические приводы / В. К. Свешников, М. В. Сонных // Конструктор. Машиностроитель. №4. 2016. С. 42-49.

*Селиванов А. М.* Перспективы развития автономных электрогидроприводов / А. М. Селиванов, А. С. Алексеенков, А. В. Найденов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. №5-1 С. 359-364. EDN PWNZWR.

Формирование требований к динамическим характеристикам и базовым параметрам контуров управления рулевого привода перспективного маневренного самолета / И. П. Кузнецов, А. А. Паршин, Л. В. Халецкий, В. Ю. Шитов // Труды МАИ. 2014. №73. С. 9. EDN RZLROF.

*Шумилов И. С.* Рулевые приводы с автономным гидропитанием (АРП) для магистральных самолётов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. №8. С. 139-161. DOI 10.7463/0814.0724446. EDN SUFDJT.

*Dinca L.* Electro-Hydrostatic servo-Actuators with Unilateral Rod Cylinder / L. Dinca, J. I. Corcau, T. L. Grigorie // Proceedings of the 6th WSEAS International conference on Dynamical systems and control. 2010. Pp. 174-178.

*Frischemeier S.* Electrohydrostatic Actuators for Aircraft Primary Flight Control - types, modelling and evaluation // 5th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP '97. Linköping, Sweden. 1997. Pp. 1-16. DOI 10.15480/882.236.

*Petrov, P. V.* Numerical Study of Nonlinear Hydromechanical Aircraft Systems / P. V. Petrov, V. A. Tselishchev, D. A. Kuderko // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2024. Vol. 58, №3. P. 917-922. DOI 10.1134/S0040579524601778. EDN PWCNEA.

Review on electro hydrostatic actuator for flight control / N. Alle, K. Subramaniam, A. Talukdar [et al.] // International Journal of Fluid Power. 2016. Vol. 17, №2. P. 125-145. DOI 10.1080/14399776.2016.1169743. EDN ANVVYX.

*van den Bossche D.* The a380 flight control electrohydrostatic actuators, achievements and lessons learnt // 25th International Congress of the Aeronautical Sciences. 2006. Pp. 1-8.

## References

*Alle N., Subramaniam K., Talukdar A. [et al.]* (2016). Review on electro hydrostatic actuator for flight control. *International Journal of Fluid Power*. 17(2): 125-145. DOI 10.1080/14399776.2016.1169743.

*Bliznova T. B., Obolensky Yu. G., Polkovnikov V. A.* (2012). Determination of the maximum dynamic characteristics of the steering drive based on the maximum flight modes of the aircraft. *Proceedings of MAI*. 61: 10.

- Dinca L., Corcau J. I., Grigorie T. L.* (2010). Electro-Hydrostatic Servo-Actuators with Unilateral Rod Cylinder. *Proceedings of the 6th WSEAS International conference on Dynamical systems and control*. 174-178.
- Frischemeier S.* (1997). Electrohydrostatic Actuators for Aircraft Primary Flight Control - types, modelling and evaluation. *5th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP '97*. 1-16. DOI 10.15480/882.236.
- Guskov A. A., Spirin A. A., Norinskaya I. V.* (2020). Simulation model of an electromechanical steering drive of a small-sized highly maneuverable aircraft. *Proceedings of the MAI*. (111): 14. DOI 10.34759/trd-2020-111-14.
- Koeva A. A., Petrov P. V.* (2012). The concept of research of hydraulic automation devices of complex energy systems. *Bulletin of UGATU*. 16(5(50)): 103-108.
- Kuderko D. A., Poteriakhina P. V., Tselishchev V. A., Tselishchev D. V.* (2024). Modeling of an autonomous hydrostatic drive. *Guide. Engineering Journal*. 8(329): 17-24. DOI 10.14489/hb.2024.08. pp.017-024.
- Kuderko D. A., Tselishchev D. V., Tselishchev V. A.* (2021). Prospects for the development of steering surface drives for civil aircraft. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering*. (67): 70-84. DOI 10.15593/2224-9982/2021.67.07.
- Kuderko D. A., Petrov P. V., Tselishchev V. A.* (2023) Numerical analysis and parametric synthesis of electrohydraulic units of gas turbine engines and aircraft control systems: monograph. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ufa University of Science and Technology. Ufa: RIC UUNiT, 2023.196 p.: ill. Bibliography: pp. 188-196 (90 titles). 500 copies. ISBN 978-5-7477-5775-2
- Kuznetsov I. P., Parshin A. A., Khaletsky L. V., Shitov V. Yu.* (2014). Formation of requirements for dynamic characteristics and basic parameters of steering control circuits of a promising maneuverable aircraft. *Proceedings of MAI*. (73): 9.
- New methodological approaches for forming requirements for basic parameters of control actuators of a promising maneuverable aircraft / S. V. Konstantinov, V. E. Kuznetsov, I. P. Kuznetsov, A. A. Parshin // *Flight*. All-Russian scientific and technical journal. 2014. No. 10. P. 17-30.
- Patent №2820916 C1 Russian Federation, IPC F15B 9/09 Autonomous electric hydraulic steering drive with power regulator: №2024100798; application №15.01.2024; published 11.06.2024 / Kuderko D. A., Poteryakhina P. V., Tselishchev V. A., Tselishchev D. V.; applicant and patent holder: Ufa University of Science and Technology, a state educational institution of higher professional education.
- Patent №2826237 C1 Russian Federation, IPC F15B 9/09. Autonomous electric hydraulic steering drive with additional dynamic pressure feedback: №2024104747; application №02.27.2024; published 09.06.2024 / Kuderko D. A., Poteryakhina P. V., Tselishchev V. A., Tselishchev D. V.; applicant and patent holder: Ufa University of Science and Technology, a state educational institution of higher professional education.
- Patent №2826275 C1 Russian Federation, IPC F15B 9/09 Autonomous electric hydraulic steering drive with additional feedback on hydraulic motor speed: №2024104755; application №27.02.2024; published 09.09.2024 / Kuderko D. A., Poteryakhina P. V., Tselishchev V. A., Tselishchev D. V.; applicant and patent holder: Ufa University of Science and Technology is a state educational institution of higher professional education.
- Petrov P. V., Kuderko D. A., Tselishchev V. A.* (2019). Fundamentals of computer-aided design of hydromechanical devices. Ufa: *Ufa State Aviation Technical University*, 2019. 241 p.
- Petrov P. V., Tselishchev V. A., Kuderko D. A.* (2024). Numerical study of nonlinear hydromechanical aircraft systems. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 58(3): 917-922.
- Selivanov A. M., Alekseenkov A. S., Naydenov A. V.* (2011). Prospects for the development of autonomous electric hydraulic drives. *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 5-1: 359-364.

- Shumilov I. S.* (2014). Steering drives with autonomous hydraulic power (ARP) for mainline aircraft. *Scientific Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, Science and Education*. (8). 139-161. DOI 10.7463/0814.0724446.
- Sveshnikov V. K., Sonnykh M. V.* (2016). Autonomous electrohydrostatic drives. *Constructor. Mashinostroitel.* (4): 42-49.
- van den Bossche D.* (2006). The a380 flight control electrohydrostatic actuators, achievements and lessons learnt. *25th International Congress of the Aeronautical Sciences*. 1-8.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Александрович Целищев – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной гидромеханики, Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди, д. 32, Уфа, 450076, Россия;  
orcid.org/0009-0002-1329-0732; e-mail: pgl.ugatu@mail.ru

Дмитрий Александрович Кудерко – кандидат технических наук, заместитель директора по НИОКР, АО «Уральский завод гражданской авиации», проспект Маршала Жукова, 1с1, Москва, 123308, Россия;  
orcid.org/0009-0006-4385-071X; e-mail: KuderkoDA@uwca.ru

Дмитрий Владимирович Целищев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной гидромеханики, Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди, д. 32, Уфа, 450076, Россия;  
orcid.org/0000-0001-5141-7904; e-mail: nuked@mail.ru

Николай Алексеевич Поляков – директор по НИОКР, АО «Уральский завод гражданской авиации», проспект Маршала Жукова, 1с1, Москва, 123308, Россия;  
orcid.org/0009-0008-3702-4563; e-mail: nicsalut@yandex.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir A. Tselishev, Dr. Sci. (Technology), Professor, Professor at the Department of Applied Hydromechanics, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St., Ufa, 450076, Russia;  
orcid.org/0009-0002-1329-0732; e-mail: pgl.ugatu@mail.ru

Dmitry A. Kuderko, Cand. of Sci. (Technology), Deputy Director for R&D, Joint-Stock Company “Ural Works of Civil Aviation”, 1, building 1 Marshal Zhukov Avenue, Moscow, 123308, Russia;  
orcid.org/0009-0006-4385-071X; e-mail KuderkoDA@uwca.ru

Dmitry V. Tselishev, Cand. of Sci. (Technology), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Hydromechanics, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St., Ufa, 450076, Russia;  
orcid.org/0000-0001-5141-7904; e-mail: nuked@mail.ru

Nikolay A. Polyakov, Director for R&D, Joint-Stock Company “Ural Works of Civil Aviation”, 1, building 1, Marshal Zhukov Avenue Moscow, 123308, Russia;  
orcid.org/0009-0008-3702-4563; e-mail: nicsalut@yandex.ru

Поступила в редакцию  
Принята в печать  
Опубликована

15.01.2026  
27.03.2026  
16.06.2026

Received  
Accepted for publication  
Published

15 January 2026  
27 March 2026  
16 June 2026