

## АВТОНОМНЫЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РУЛЕВОЙ ПРИВОД С КОМБИНИРОВАННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА

СЕЛИВАНОВ Александр Михайлович, доцент Московского авиационного института (государственного технического университета).  
Тел. моб. 8 903 7728853, e-mail: nselivanova2000@mail.ru

SELIVANOV Alexander Mihajlovich, associate professor of MAI, PhD.  
Mobile phone 8 903 7728853, nselivanova2000@mail.ru

*Предлагается новая схема автономного электрогидравлического привода для системы управления самолетом, отличающаяся использованием дроссельного или объемного регулирования скорости в зависимости от величины сигнала управления. Рассматриваются его схема и работа, а также достоинства и недостатки в сравнении с электрогидравлическим приводом.*

*The new scheme of electricity supplied electrohydraulic drive for flight control system is advanced. It is notable for using throttle or volumetric control of speed subject to control signal value. His scheme, operation as well as merits and demerits are considered in comparison with Electrical Hydraulic Actuator.*

**Ключевые слова:** привод автономный, привод электрогидравлический, дроссельное, объемное, комбинированное регулирование, скорость.

**Key words:** driver, electricity supplied, electrohydraulic, throttle, volumetric, combined, control, speed.

В настоящее время за рубежом в авиации идет процесс постепенного внедрения автономных электрогидравлических рулевых приводов, получающих питание от централизованной силовой электросети самолета. Например, такие приводы используются на новейших аэробусе А-380 и истребителе F-35, предполагается установка таких приводов на проектируемом транспортном самолете А-400. Этот процесс является частью общих усилий по постепенному созданию полностью электрофицированных самолетов. По оценкам специалистов, комплексная электрофикация самолетных систем позволит получить значительный экономический эффект. Наибольший вклад в улучшение топливной эффективности самолета и снижение его эксплуатационных расходов обещают дать такие наиболее энергоемкие системы, как система кондиционирования воздуха в кабине, противообледенительная система и система запуска двигателей. Система управления самолетом также должна вписываться в эту концепцию. Применение приводов с электропитанием позволяет частично (а в перспективе полностью) отказаться от применения централизованных гидросистем, снизить за счет этого эксплуата-

ционные расходы на обслуживание системы управления полетом, а также, в ряде случаев, уменьшить общую массу и повысить ее надежность.

В качестве приводов полностью электрофицированной системы управления самолетом могут выступать электромеханические или автономные электрогидравлические приводы. Оба этих типа привода включают встроенный электродвигатель, что значительно увеличивает массу и габариты исполнительного механизма по сравнению с широко распространенными в настоящее время гидравлическими приводами с дроссельным регулированием скорости выходного звена. Использование механического редуктора в электромеханическом приводе в настоящее время не позволяет обеспечить требуемый уровень его надежности и отказобезопасности, необходимый для управления основными рулевыми поверхностями самолета, поэтому сейчас использование электромеханических приводов рассматривается только для управления вспомогательными аэродинамическими поверхностями, такими, как предкрылки, интерцепторы, воздушные тормоза и т.д. Надежность авиационных гидроцилиндров, напротив, доведена сейчас до очень высокого уровня

(подтвержденная величина интенсивности отказов гидроцилиндра составляет около  $0,75 \cdot 10^{-6}$  1/час), их использование позволяет достаточно просто обеспечить требуемую отказобезопасность привода. Поэтому для управления основными рулевыми поверхностями самолета — рулями направления, высоты и элеронами — используются электрогидравлические приводы. Гидросистема автономного электрогидравлического привода полностью интегрирована в его корпус, у современных конструкций она не требует текущего обслуживания, поэтому с точки зрения эксплуатационников такие приводы можно считать практически «электромеханическими» [1].

В качестве основного типа автономного электрогидравлического привода сейчас используются так называемые электрогидростатические рулевые приводы (ЭГСтП). Схема такого привода показана на рис. 1. Скорость и направление движения выходного звена привода задается за счет регулирования подачи насоса. Такой способ регулирования скорости называется объемным, его основным достоинством является возможность достижения хороших энергетических характеристик (например, максимальный КПД гидравлической части практически достигает значений  $0,8-0,85$ ). В гидростатическом приводе регулирование подачи насоса обеспечивается за счет управления скоростью и направлением вращения вала нерегулируемого насоса. Для этого используется бесколлекторный электродвигатель постоянного тока (БДПТ), регулирование скорости вращения которого осуществляется его электронным блоком управления. БДПТ вместе с блоком управления образуют так называемый мехатронный модуль.

В ЭГСтП чувствительность привода и его динамические характеристики напрямую зависят от чувствительности и динамических характеристик мехатронного модуля, нагруженного насосом. Такое положение приводит к тому, что требуемое для рулевого привода качество статических и динамических характеристик в области малых сигналов рассогласования обеспечить значительно труднее по сравнению с традиционными приводами с дроссельным регулированием скорости. Между тем современный рулевой привод обеспечивает не только траекторное управление самолетом, но и является исполнительным агрегатом системы его стабилизации. Для выполнения этой функции рулевой привод должен обеспечивать обработку гармонических сигналов очень малой амплитуды в рабочей полосе частот системы стабилизации. Например, для аэродинамически неустойчивых самолетов требуется обработка сигналов с амплитудой около  $0,2\%$  от максимального сигнала. Кроме того, ЭГСтП обладает пониженной динамической жесткостью по сравнению с дроссельным приводом, что также негативно сказывается на работе системы стабилизации самолета.

Как правило, эти трудности пытаются преодолеть или за счет использования вместо БДПТ так называемых SR-машин (шаговых электродвигателей), или за счет технологического совершенствования конструкции, что сопровождается усложнением технологий и ростом стоимости основных компонентов привода: насоса и мехатронного модуля. Поэтому поиск других, альтернативных путей улучшения характеристик электрогидростатических приводов в области малых сигналов является актуальной научно-технической задачей.

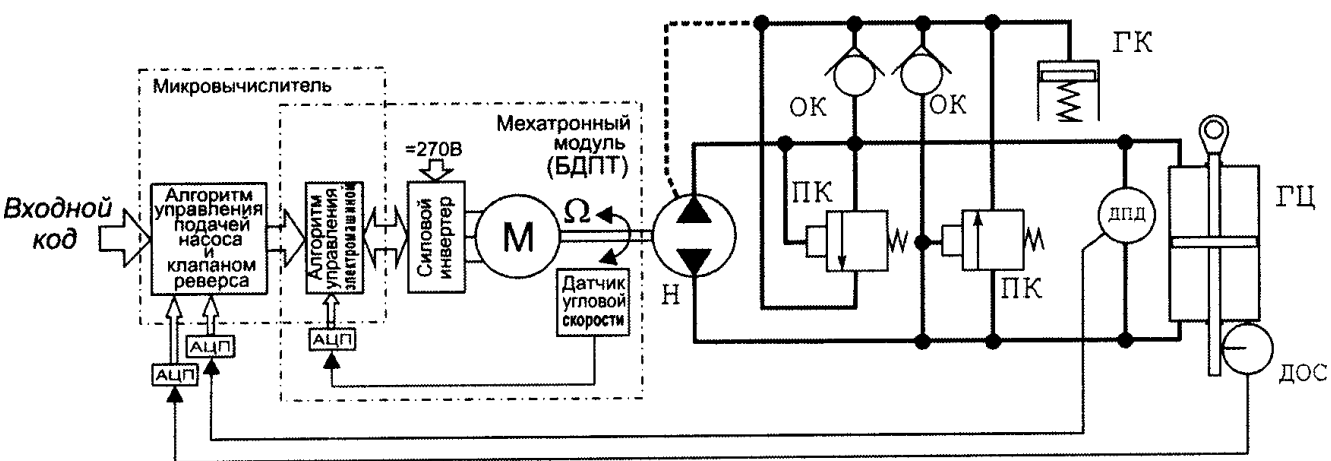


Рис. 1. Принципиальная схема электрогидростатического привода:

- АЦП — аналого-цифровой преобразователь; БДПТ — бесколлекторный двигатель постоянного тока;
- ГК — гидрокомпенсатор; ГЦ — гидроцилиндр; ДОС — датчик обратной связи;
- ДПД — датчик перепада давления; Н — реверсивный нерегулируемый насос; ОК — обратный клапан;
- ПК — предохранительный клапан

По мнению автора, эффективным методом решения этой задачи является дополнение объемного способа регулирования скорости выходного звена привода, используемого в ЭГСтП, дроссельным способом ее регулирования, обеспечивающим высокое качество обработки сигналов в традиционном дроссельном приводе. При этом по мере увеличения сигнала рассогласования привода необходимо обеспечить плавный переход от дроссельного регулирования к объемному. Тогда при малых сигналах рассогласования, в области работы системы стабилизации, привод будет обладать требуемой чувствительностью, динамикой и жесткостью, а при больших сигналах рассогласования, в области траекторного управления самолета, будут обеспечиваться наилучшие энергетические характеристики, свойственные объемному регулированию.

Перечисленными выше свойствами обладает автономный привод, принципиальная схема которого приведена на рис. 2. Для регулирования скорости штока гидроцилиндра в этом приводе используется неререверсивный насос, подача которого изменяется за счет управления скоростью вращения вала приводного электродвигателя, и золотниковый клапан реверса, работающий в пропорциональном режиме. Плунжер клапана реверса перемещается линейным электродвигателем. Встроенный микровычислитель осуществляет непрерывное и параллельное управление клапаном реверса и скоростью электродвигателя. Законы их регулирования выбраны таким образом, что при состоянии привода, близком к нейтральному, насос развивает небольшое давление (порядка 5 МПа), обеспечивающее дроссельное регулирование выходной скорости

привода при малых открытиях рабочих окон клапана реверса. При увеличении сигнала рассогласования привода рабочие окна клапана реверса открываются настолько сильно, что изменение их проводимости постепенно перестает влиять на скорость штока гидроцилиндра. Размеры окон клапана выбираются таким образом, что при значительных сигналах рассогласования потери давления на них настолько малы, что на этих режимах скорость выходного звена привода регулируется практически только за счет управления подачей насоса. Таким образом, переход от дроссельного регулирования скорости привода к объемному осуществляется постепенно и плавно. Привод, в котором используются описанные выше принципы работы, называется приводом с комбинированным регулированием скорости выходного звена [2].

Важно отметить, что в процессе управления следящим приводом электродвигатель никогда не останавливается, и минимальная скорость вращения его вала составляет около 0,5–3% от максимальной.

Показанные на принципиальной схеме датчики перепада давления на поршне гидроцилиндра и насосе не являются обязательными, однако их использование позволяет улучшить характеристики привода, в частности увеличить их стабильность при изменении температуры и износе насоса и обеспечить гибкое регулирование предельной механической характеристики привода по режимам его работы.

В процессе теоретических исследований привода с комбинированным регулированием скорости выходного звена в МАИ была разработана математическая

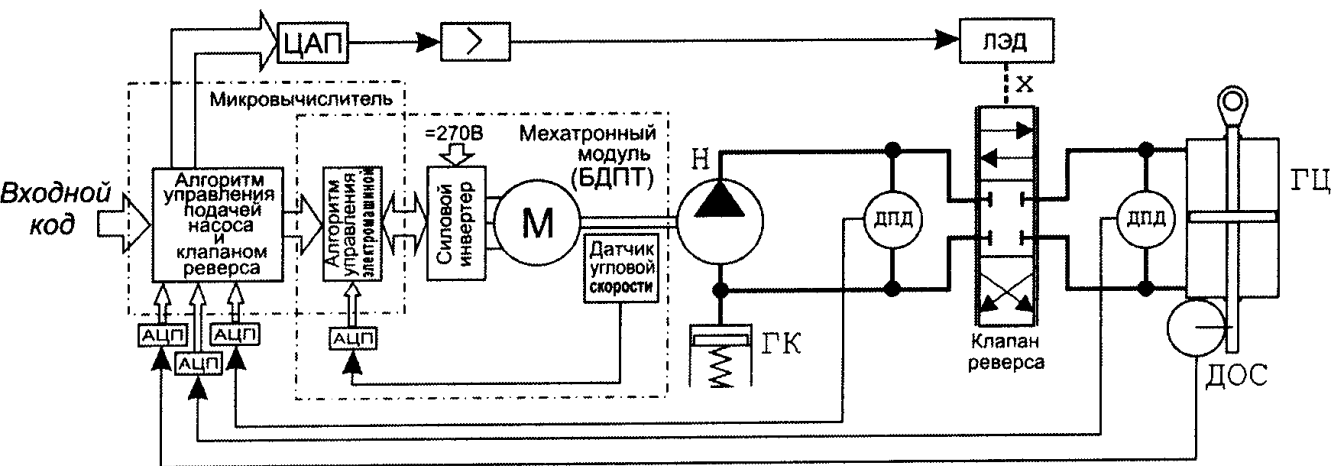


Рис. 2. Принципиальная схема автономного электрогидравлического привода с комбинированным регулированием скорости выходного звена:

АЦП — аналого-цифровой преобразователь; БДПТ — бесколлекторный двигатель постоянного тока;

ГК — гидрокомпенсатор; ГЦ — гидроцилиндр; ДОС — датчик обратной связи;

ДПД — датчик перепада давления; ЛЭД — линейный электродвигатель; Н — неререверсивный нерегулируемый насос; ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь

Техническая модель привода, учитывающая основные нелинейности, влияющие на его характеристики во всем диапазоне изменения сигнала рассогласования. На базе этой модели были найдены алгоритмы управления, обеспечивающие как перечисленные выше основные свойства, так и дополнительные возможности, например увеличение стабильности настроек агрегатов привода [3]. Путем моделирования работы привода исследованы его статические и динамические характеристики. Исследования показали, что чувствительность привода с комбинированным регулированием скорости может быть повышена по отношению к гидростатическому приводу в 2—6 раз (рис. 3) и достигать значений, характерных для дроссельных приводов. В области малых сигналов рассогласования нагружение привода с комбинированным регулированием вызывает изменение давления в обеих полостях гидроцилиндра, что обеспечивает увеличение динамической жесткости привода вдвое по отношению к гидростатическому приводу с теми же параметрами. Частотные характеристики привода с комбинированным управлением скоростью в области малых амплитуд сигнала (порядка нескольких процентов от максимального) существенно лучше, чем в области больших сигналов.

Моделирование работы привода показало, что ширина области амплитуд сигналов рассогласования, в которой привод работает в режиме преимущественно дроссельного регулирования, может задаваться путем выбора соответствующих параметров, однако расширение этой области сопровождается некоторым увеличением потребляемой приводом энергии в его нейтральном состоянии.

Экспериментальные исследования привода с комбинированным регулированием скорости включали следующие работы: В ОАО «ПМЗ «Восход»» (г. Павлово, Горьковская область) совместно с МАИ и ОАО «Электропривод» (г. Киров) был разработан и построен полноразмерный макет привода мощностью около 1,5 кВт. На предприятии проведены экспериментальные исследования особенностей характеристик основных использованных агрегатов макета привода — мехатронного модуля, насоса и клапана реверса, а также привода в целом, которые подтвердили результаты теоретических исследований, а также эффективность предложенных технических решений. В дальнейшем ЦАГИ совместно с «ПМЗ «Восход»» провел расширенные экспериментальные исследования статических и динамических характеристик макета привода с имитацией типовых нагрузок рулевого привода, которые также дали положительные результаты. На рис. 4 в качестве примера приведено сравнение значений экспериментальных частотных характеристик макета привода с комбинированным регулированием скорости с частотными характеристиками электрогидростатического привода аэробуса А-380.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили эффективность предложенных технических решений. Чувствительность привода с комбинированным регулированием не зависит от зоны нечувствительности системы регулирования скорости вращения вала электродвигателя, что позволяет существенно снизить требования к качеству последнего. В то же время предложенное схемное решение позволяет поднять чувствительность автономного привода и его частотные характеристики

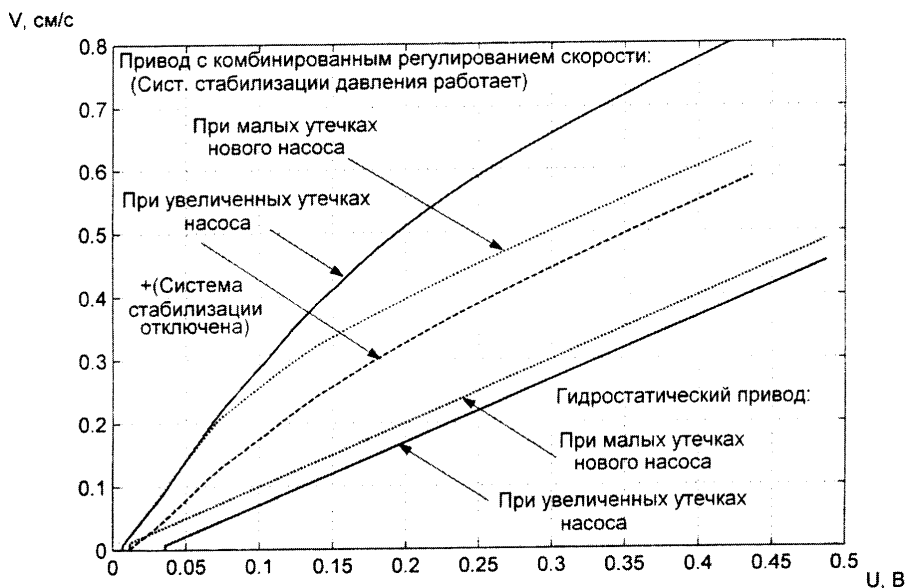


Рис. 3. Начальный участок скоростных характеристик гидростатического привода и привода с комбинированным регулированием скорости

Частотные характеристики	Привод спойлеров аэробуса А-380 фирмы LIEBHERR		Привод с комбинированным регулированием скорости разработки МАИ и ПМЗ "Восход"
	Режим дроссельного управления	Режим с электрогидростатическим управлением	
Частота колебаний			
1 Гц	0,2 дБ, 21 гр.	0,6 дБ, 33 гр.	0,1 дБ, 18 гр.
2 Гц	0,2 дБ, 43 гр.	2,2 дБ, 62 гр.	0,1 дБ, 40 гр.
4 Гц	0,6 дБ, 90 гр.	6,1 дБ, 135 гр.	1,0 дБ, 75 гр.
8 Гц	6,0 дБ, 164 гр.	11,0 дБ, 168 гр.	6,0 дБ, 120 гр.

Рис. 4. Значения экспериментальных частотных характеристик привода с комбинированным регулированием скорости в сравнении с характеристиками электрогидростатического привода

в области малых сигналов рассогласования до уровня современных высококачественных электрогидравлических дроссельных приводов с централизованным гидроснабжением.

В приводе с комбинированным регулированием требования к насосу также снижены по сравнению с гидростатическим приводом, поскольку уровень трения во вращающемся блоке насоса не влияет на чувствительность привода и могут использоваться типы насосов, не обладающие реверсивностью.

Продолжая сравнение с гидростатическим приводом, нужно отметить увеличенную жесткость привода с комбинированным регулированием и практически те же значения максимального КПД. В нейтральном состоянии привод с комбинированным регулированием сохраняет небольшую скорость вращения своего электродвигателя, однако потребление энергии приводом в этом состоянии остается на низком уровне (порядка нескольких десятков ватт) и не требует дополнительной системы охлаждения.

В целом можно сказать, что если в гидростатическом приводе его гидравлическая система выполняет только функцию надежной передачи энергии с редуцированной скоростью, то в приводе с комбинированным регулированием гидросистема использует весь свой потенциал для помощи мехатронному модулю в быстрой и точной отработке управляющего сигнала.

К недостаткам привода с комбинированным регулированием нужно отнести несколько большую сложность из-за использования дополнительных элементов — клапана реверса и управляющего линейного электродвигателя.

Принципиальная схема привода с комбинированным регулированием напоминает схему централизованной гидросистемы с единственным дрос-

сельным исполнительным приводом. Однако работа предлагаемого привода в корне отличается от работы последней, поскольку не только позволяет отойти от постоянного использования энергетически менее совершенного чисто дроссельного или объемно-дроссельного регулирования, но и оптимальным образом располагает области преимущественно дроссельного и преимущественно объемного способа регулирования по величине сигнала рассогласования следящего привода.

## Выводы

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что сформировано новое схемотехническое решение автономного электрогидравлического рулевого привода, обеспечивающее улучшение ряда его важных показателей за счет использования комбинированного способа регулирования скорости выходного звена.

В приводе этого типа используются уже освоенные гидравлические агрегаты, включая линейный электродвигатель для управления золотниковым клапаном реверса. За рубежом уже освоены и мехатронные модули в авиационном исполнении, что облегчает быстрое внедрение привода с комбинированным регулированием в авиационную технику.

## Библиографический список

1. Ермаков С.А., Живов Ю.Г., Константинов С.В., Г.С., Кувшинов В.М., Митриченко А.Н., Редько П.Г., Петров В.Н., Селиванов А.М. Концепция развития систем рулевых приводов перспективных самолетов // Вопросы авиационной науки и техники: Научно-технический сборник НИИСУ. Сер. Стандартизация и унификация авиационной техники. 2007. Вып. 2. С. 32—47.

2. Автономный электрогидравлический привод с комбинированным управлением скорости выходного звена. Патент на изобретение № 2305210, РФ, заявка №2005122981 от 19 июля 2005, 27 января 2007, Бюл. №24, стр.8.

3. Селиванов А.М., Хомутов В.С. Разработка адаптивного электрогидравлического привода // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2008. №5. С. 923—924.