

УДК 629.7.064

Тенденции развития современных авиационных бортовых гидросистем

Долгушев В.Г.^{1*}, Ионов В.А.^{1}, Кун Н.В.^{2***}, Матвеев А.М.^{1****}**

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

²*Московский филиал по беспилотному направлению «Кронштадт» проспект Андропова, 18, корпус 9, Москва, 115432, Россия*

**e-mail: gidropulsar@yandex.ru*

***e-mail: vawsan@mail.ru*

****e-mail: kunnata@yandex.ru*

*****e-mail: kaf103@mai.ru*

Аннотация

В работе приводится обоснование развития и совершенствования централизованных бортовых гидросистем самолетов. Рассматриваются преимущества и недостатки централизованных и комплексных гидросистем. Приведены результаты расчетных исследований параметров блоков питания гидросистем с различными уровнями давления, использующих стальные и титановые трубопроводы.

Ключевые слова: гидросистема, автономный рулевой привод, адаптивность, форсировка давления, отказобезопасность, шасси, управление, самолет.

Гидросистема скоростного маневренного самолета

В условиях «мирного времени», становится актуальной задача поддержания высокой квалификации пилотов маневренных самолетов (истребителей), которая обеспечивается их высоким уровнем налета в различных условиях с выполнением типовых режимов полетов, в том числе с использованием вооружения. Таким образом, для боевых самолетов ставятся две противоречивые задачи. С одной стороны, надо любой ценой (т.е. используя последние технические достижения) добиться преимущества над предполагаемым противником, а, с другой стороны, надо обеспечить работоспособность этой техники до момента ее боевого применения.

Обоснованность такого анализа систем боевых самолетов аргументируется историческим развитием всей авиатехники: успешность инженерных решений в боевой авиации приводит к их применению в гражданских воздушных судах. Тем более, что условия обработки этих решений в боевой технике производится в жестких условиях эксплуатации.

При этом существенное значение в эксплуатации таких ЛА в течение длительного времени имеет отказобезопасность бортовых систем и всего комплекса в целом.

В современных авиационных гидравлических системах заданный уровень отказобезопасности в процессе проектирования достигается начальным выбором структуры и параметров системы, которые в полете не меняются [5, 8]. Повышение

отказобезопасности при этом можно получить путем увеличения различных коэффициентов запаса, а также резервированием элементов, что приводит к увеличению массы системы. Однако повышение отказобезопасности без утяжеления возможно при помощи подстройки внутренних параметров под меняющиеся режимы работы (например, разгрузка в крейсерском режиме полета и форсирование параметров при повышенных нагрузках или отказах в системе).

В настоящее время в качестве энергетической системы, обеспечивающей работу таких функциональных систем самолета, как система управления, уборка-выпуск шасси и других, получила широкое распространение централизованная гидросистема (рис. 1). Признание обеспечили ей высокие показатели надежности при относительно небольшой массе.

Автономные рулевые приводы (АРП), появившиеся в конце 60-х годов, долгое время оставались скорее исключением из общего правила. Однако в последние годы с появлением электромашин, созданных с использованием новых магнитных материалов на основе сплавов «самарий-кобальт», «неодим-железо» и других, интерес к системам с АРП возродился.

Однако, необходимо отметить, что система с автономными приводами, несмотря на имеющиеся преимущества (удобство в эксплуатации, большая живучесть) имеет и ряд серьезных недостатков:

- большую зависимость в работе от другой энергетической системы самолета (электрической системы);
- трудности в реализации принципа одного отказа без последствий;

- отсутствие статистики по отказам и, как следствие, трудно прогнозируемую надежность автономных приводов;

- трудности в обеспечении герметичности самого привода и сохранении в нем необходимых запасов жидкости для его работы;

- высокую стоимость электромагнитных материалов на основе сплавов редкоземельных металлов (Sm-Co, Nd-Fe и др.),

- трудности обеспечения температурного режима для приводов больших мощностей.

Повышение номинального уровня рабочего давления в авиационных гидросистемах стало традиционным путем повышения энергонапряженности системы и, стало быть, снижения массы и объема ее агрегатов. Кроме того, трубопроводы нагнетания, изготовленные из титановых сплавов, помимо прямого уменьшения массы системы, влияют и на повышение уровня оптимального давления, которое в гидросистемах существующих самолетов уже составляет 28 и 35 МПа (Су-27, «Рафаль», А-380).

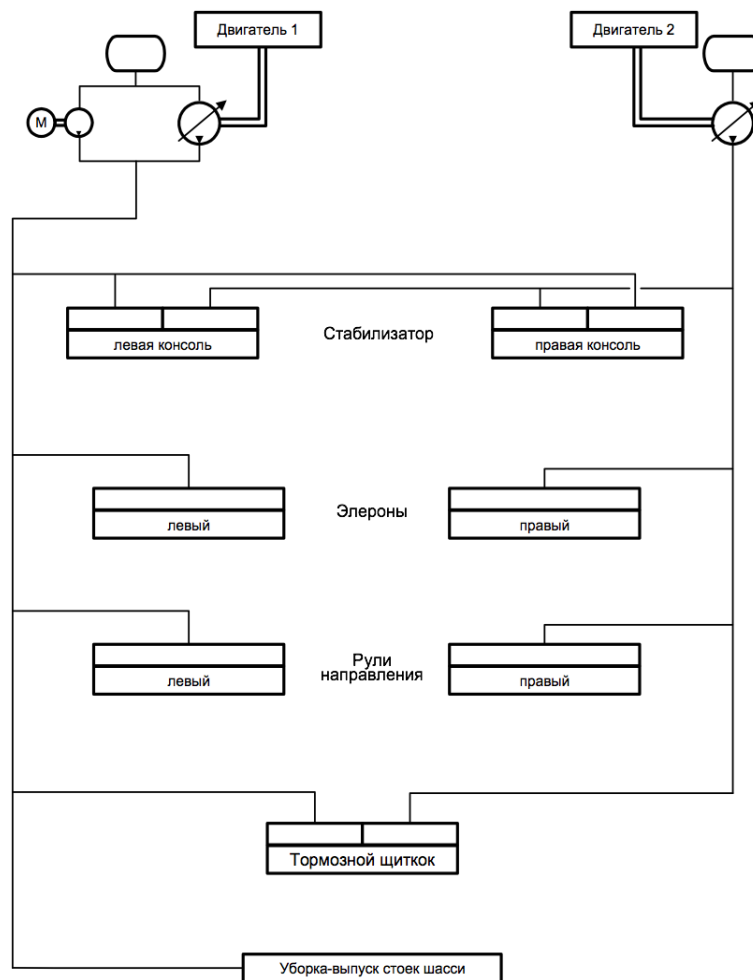


Рис. 1

Таким образом, масса и объем гидросистемы являются весьма значимыми компонентами в формировании массово-габаритной модели самолета на начальной стадии проектирования.

Важно отметить, что возможности централизованных систем далеко не исчерпаны, поскольку применение принципа адаптивности давления к меняющимся режимам полета, а также применение высокого уровня номинального давления и титановых сплавов для напорных трубопроводов потенциально могут привести к заметному снижению массы гидросистемы при прежнем уровне надежности или повышению надежности при прежней массе системы.

Сравнивая два возможных подхода к выбору структурной схемы гидросистемы применительно к маневренному ЛА, заметим следующее. Предполагаемая большая живучесть системы с автономными приводами вряд ли оправдана, поскольку для небольшого самолета вероятность поражения с необратимыми последствиями (например, при попадании ракеты) весьма велика. Поэтому, на наш взгляд, решающим фактором является меньшая масса системы, дающая возможность повысить боевую эффективность ЛА, за счет или меньшей массы и, следовательно, большей маневренности ЛА или большей массы боекомплекта.

В результате предлагается следующая структурная схема гидросистемы, представленная на рис. 1.

Гидросистема состоит из двух независимых гидросистем. Каждая имеет по одному основному насосу с механическим приводом от двигателя и, кроме того, в первой системе имеется аварийная насосная станция.

Ниже приведены результаты расчетов следующих вариантов системы (в качестве исходных данных при расчете были взяты ЛТХ 2-х двигательного маневренного самолета с взлетным весом 15 000 кг):

- традиционный вариант централизованной системы с номинальным давлением 21 МПа, избыточностью в каналах системы управления, достаточной для компенсации одного отказа и трубопроводами нагнетания из нержавеющей стали;

- вариант централизованной системы с номинальным давлением 21 МПа, трубопроводами нагнетания из нержавеющей стали, однако требование «один отказ без последствий» обеспечивается форсированием давления;

- вариант централизованной системы с номинальным давлением 28 МПа, трубопроводами нагнетания из нержавеющей стали и обеспечением требования «один отказ без последствий» форсированием давления;

- вариант централизованной системы с номинальным давлением 28 МПа, трубопроводами нагнетания из титанового сплава и обеспечением требования «один отказ без последствий» форсированием давления.

Традиционная система

Система трубопроводов условно разделена на три участка: от насосов до фюзеляжа, по борту фюзеляжа до крыла и оперения, соответственно, и от магистральных трубопроводов до исполнительных приводов.

Диаметры трубопроводов рассчитываются исходя из условия равенства скоростей во всех трубопроводах, а также при условии соответствия значению коэффициента относительных потерь $a=0,3$.

Результаты расчета приведены ниже в сводной табл. 1.

Использование форсированного давления для компенсации отказов

Нормы требуют обеспечения одного отказа без последствий для системы управления (а она обслуживается гидравликой). Однако это требование может быть обеспечено форсированием давления [6]. Необходимо отметить, что в случае использования форсированного давления для компенсации отказов, полностью реализовать тот выигрыш в массе, который будет получен в этом расчете, невозможно. Во-первых, определенную массу должны будут иметь устройства, обеспечивающие форсированные режимы работы системы и, во-вторых, определенная доля массы должна быть вложена в конструкцию для компенсации последствий работы системы на форсированном давлении (для сохранения ресурса). Правда, последнее положение может быть устранено использованием разгрузочных по давлению режимов работы системы.

Результаты расчета приведены ниже в сводной табл. 1.

Применение форсированного давления для компенсации отказов, более высокого уровня номинального давления и титанового сплава для трубопроводов

Титановые сплавы для напорных трубопроводов сначала появились в гидросистемах сверхзвуковых маневренных самолетов. При этом уровень оптимального давления в гидросистеме является более высоким. В настоящее время в гидросистемах зарубежных пассажирских самолетов также применяют напорные трубопроводы из титана. У нас внедрение напорных трубопроводов из титановых сплавов сдерживается недостаточной надежностью соединений таких трубопроводов.

Результаты расчета приведены ниже в сводной табл. 1.

Таким образом, параметрические исследования установили (табл.1), что традиционную централизованную систему можно существенно улучшить, используя возможность форсирования давления для компенсации отказов. Это позволит отказаться от избыточности установочной мощности, поскольку требование «одного отказа без последствий» будет обеспечиваться форсированием давления. Расчеты показали, что существенное снижение массы в пределе может составить до 40% (с 463 до 278 кг) именно благодаря применению форсирования давления. Дополнительного снижения массы можно добиться за счет увеличения уровня номинального давления до 28 МПа (с 21 МПа) и за счет применения для напорных трубопроводов титановых сплавов [2, 3]. Однако, для небольшого самолета, где протяженность сети трубопроводов невелика, и выигрыш этот малозаметен.

Таблица 1

Параметры блоков питания ГС самолета	Обычная централизов. система $P_{\text{НОМ}}=21$ МПа $N_{\text{обп}}=1$	Система с возможностью форсиров. давл. $P_{\text{НОМ}}=21$ МПа $N_{\text{обп}}=0$	Система с возможностью форсиров. давл. и $P_{\text{НОМ}}=28$ МПа	Система с возможностью форсиров. давл., $P_{\text{НОМ}}=28$ МПа и титан. труб.
Потребная подача насоса 1-й ГС, л/мин	166	90	67	67
Потребная подача насоса 2-й ГС, л/мин	166	90	67	67
Макс. подача основного насоса., л/мин	166	90	67	67
Макс. подача аварийного насоса., л/мин	116	63	47	47
Масса основного насоса, кгс	16	12	11	11
Масса аварийного насоса, кгс	23	18	17	17
Масса блока питания с магистр. трубопроводами, кгс	115	90	84	79
Масса подсистем управления, кгс	338	176	174	170
Масса цилиндров уб-вып шасси, кгс	11	11	10	10
Масса гидросистемы, включая блок питания, трубопроводы и подсистемы управления, кгс	452	267	258	248
Суммарная масса гидросистемы, включая блок питания, трубопроводы, подсистемы управления и подсистемы уборки-выпуска шасси, кгс	463	278	268	258

Гидросистема пассажирского самолета

На последнем самолете фирмы Эрбас А-380 была применена смешанная система силового привода, включающая две централизованные гидросистемы (в отличие от предыдущего трехсистемного варианта, использующегося на всех предыдущих самолетах фирмы, включая четырехдвигательный А-340), автономные (электрогидроситатические) приводы и смешанные, т.е. имеющие возможность получать питание как от централизованных систем, так и имеющие возможность работать автономно (рис. 2 и 3). В связи с появлением этого самолета и такой системы, а также с очевидными достижениями в области проектирования автономных приводов, начались попытки распространить это решение на проекты будущих самолетов, причем и самолетов с совершенно отличными от А-380 ЛТХ. Однако проект системы силового привода, реализованный на А-380, вряд ли является оптимальным и принят таковым, скорее всего, как компромиссное решение в данных конкретных условиях. Поэтому задача выбора наиболее приемлемого решения для будущих проектов является актуальной. В данном разделе приведен результат сравнительного анализа вариантов системы силового привода для самолета с ЛТХ, аналогичными ЛТХ самолета А-380: с четырьмя централизованными системами (рис. 4) и вариант А-380. Анализ проводился по показателям мощности и массы.

Что касается надежности (вероятностей возникновения особых ситуаций), то эти показатели в данной работе не рассматривались, поскольку с одной стороны это является отдельной сложной задачей, а с другой – в связи с отсутствием

статистических данных по надежности электрогидростатических и смешанных приводов. Однако, поскольку для сравнения была выбрана централизованная система из *четырёх* независимых систем, а не из трех, то очевидно, что такая система не уступит по надежности системе силового привода А-380.

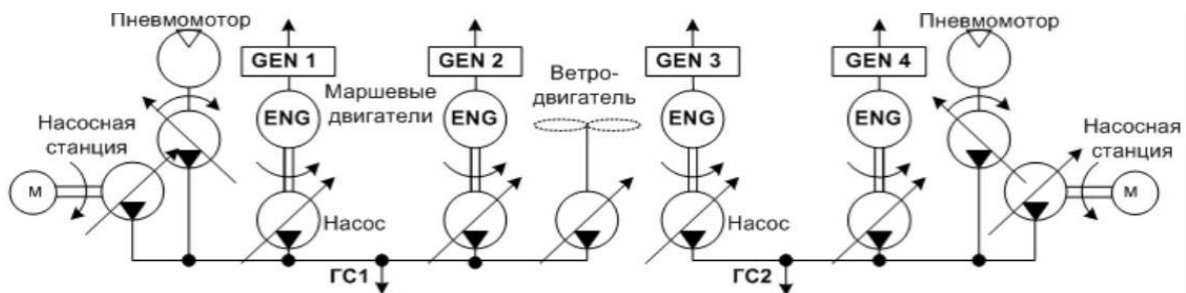


Рис. 2

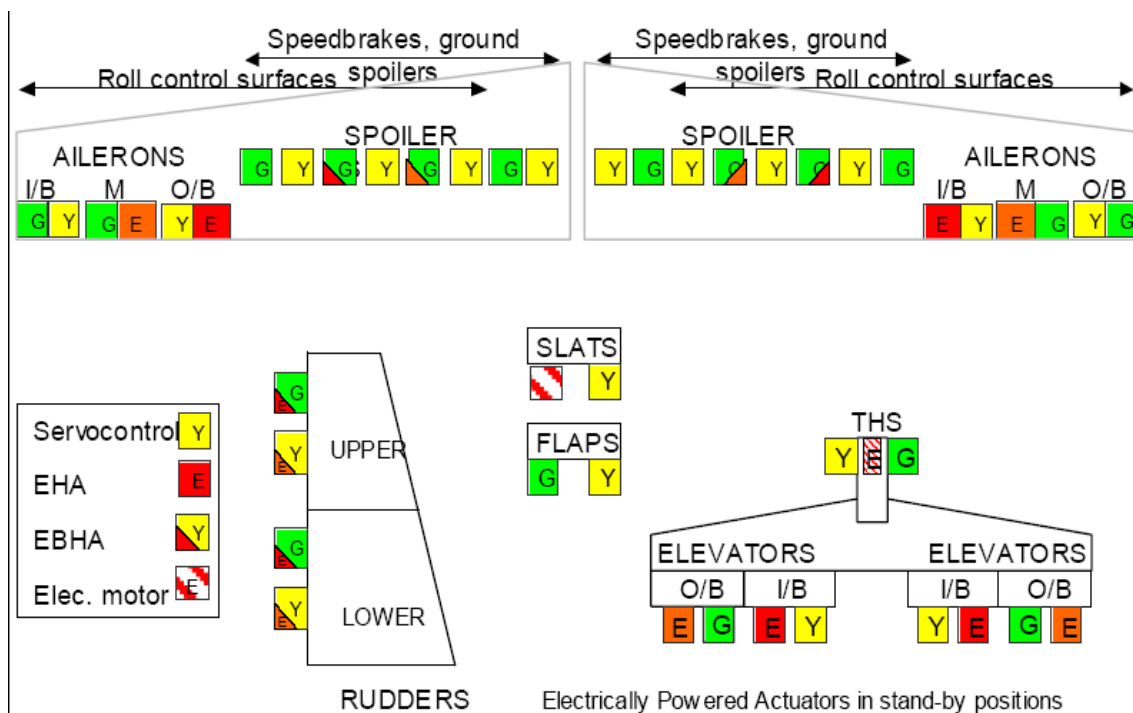


Рис. 3

Поскольку на самолете А-380 применено давление 35 МПа, то и для четырехсистемного централизованного варианта было принято такое же значение, кроме того для обоих вариантов считалось, что трубопроводы нагнетания выполнены из титановых сплавов. В четырехсистемном варианте учитывалось также, что система строится с учетом возможности ее работы на форсированных режимах работы, т.е. без избыточной мощности.

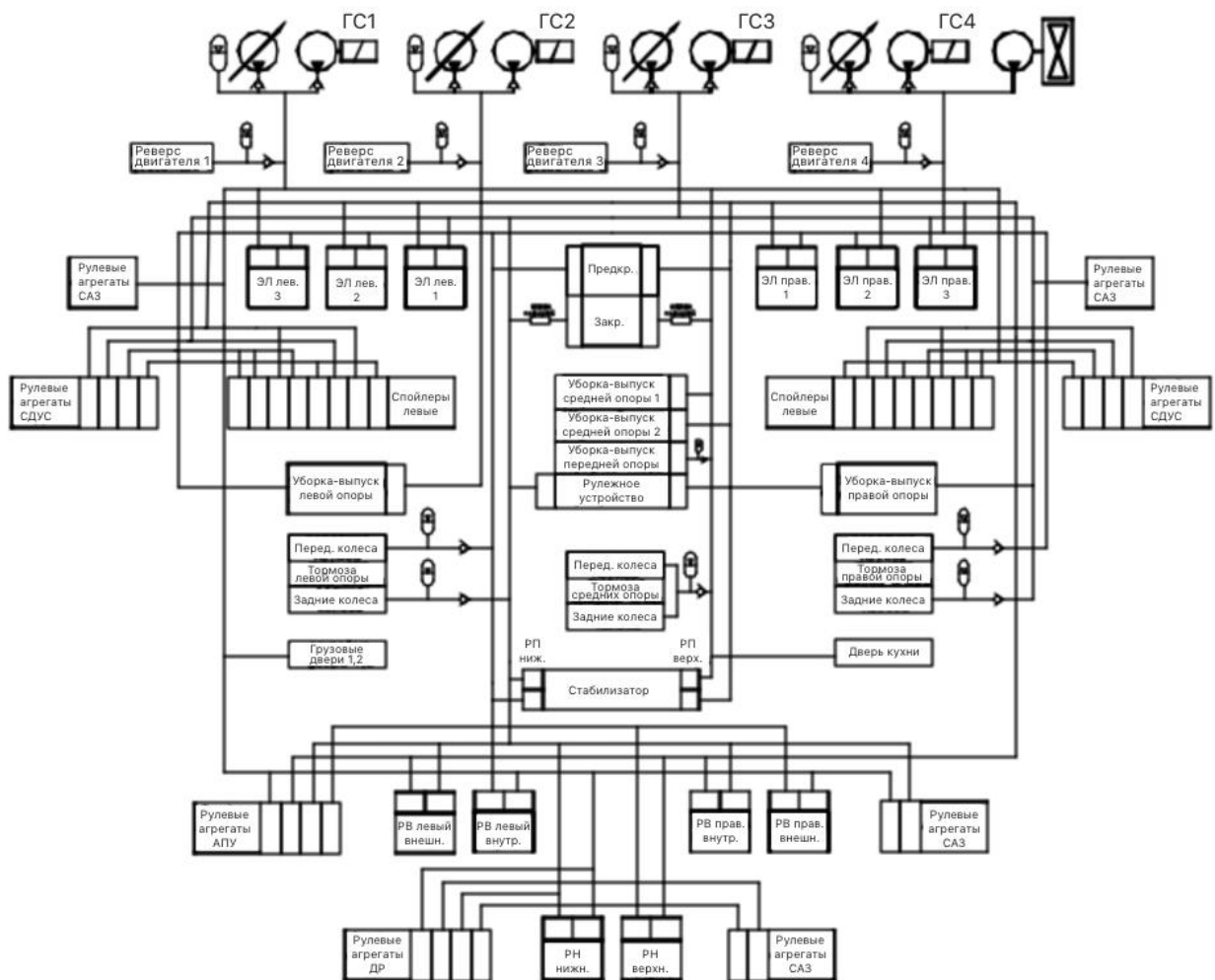


Рис. 4

Для расчета массы систем силового привода централизованных систем обоих вариантов использовалась разработанная на кафедре «Системы оборудования летательных аппаратов» МАИ методика расчета, базирующаяся на третьей теории

прочности (теории наибольших касательных напряжений). Масса электрогидростатических (автономных) и комбинированных приводов приводятся в табл. 2.

Таблица 2. Массовые характеристики различных типов приводов

Поверхность	Тип привода (Liebherr, Goodrich)	Масса, кг
Руль направления	Комбинированный	31,2
Руль высоты	ЭГРП	11,3
Элерон	ЭГРП	11,8
Спойлеры	ЭГРП	24,5

Перспективный четырехсистемный централизованный вариант гидросистемы оказался *заметно* легче варианта смешанной системы (как на А-380) – 1054 кг и 1216 кг, несмотря на то, что в смешанном присутствует только две централизованные системы и не учитывается масса электропроводки к энергоемким приводам электрогидростатического и комбинированного типа, как и увеличение мощности прочих агрегатов электросистемы. С учетом этих составляющих разница масс централизованной и системы смешанного типа [5] будет уже не заметной, а *значительной*.

Соотношение масс перспективной централизованной системы и традиционной (с номинальным давлением 21 МПа и трубопроводами нагнетания из нержавеющей стали) еще больше: 1054 кг и 2397 кг.

Главный вывод из проведенного анализа заключается в том, что централизованные системы еще далеко не исчерпали своих возможностей и вполне могут применяться даже на таких больших самолетах, как А-380.

Стоит отметить, что для обеспечения повышенной безаварийности на А-380 в качестве аварийных источников питания гидросистем широко используются аварийные насосные станции с электроприводом, гидроаккумуляторы, воздушная турбина, пневмомоторы для привода аварийных насосов (рис. 2). При этом сохранены две централизованные системы, хотя, казалось бы, самолет А-380 является самолетом, на котором потенциально в большей степени возможно ожидать эффекта от применения автономных приводов за счет сокращения трубопроводной сети.

Результат анализа двух наиболее перспективных, на наш взгляд, альтернативных вариантов гидросистемы для большого самолета, системы с автономными рулевыми приводами и централизованной адаптивной гидросистемы, позволяет отнестись с сомнением к тем результатам, которые приводятся в некоторых источниках и в которых говорится о преимуществах систем с автономными приводами перед централизованными системами в весовом отношении.

В заключении еще раз отметим, что применение смешанной системы на самолете А-380 было вынужденным решением, которое вряд ли стоит тиражировать при проектировании новых пассажирских самолетов. Применение таких смешанных

систем, на наш взгляд, целесообразно на военно-транспортных самолетах, для которых за счет лишней массы можно добиться повышенной живучести.

Выводы

Для перспективного маневренного самолета целесообразно рекомендовать централизованную структуру гидросистемы. Она может быть существенно улучшена по весовым показателям, поскольку требование «одного отказа без последствий» будет обеспечиваться форсированием давления.

Для больших пассажирских самолетов повышенной пассажировместимости целесообразно рекомендовать гидросистемы с централизованной структурой, которые далеко не исчерпали своих возможностей по показателям весовых параметров и отказобезопасности. Использование форсированных режимов работы для компенсации отказов, трубопроводов нагнетания из титановых сплавов и высокого уровня номинального давления позволит создать гидросистему с существенно меньшей массой.

Смешанную систему, включающую централизованные гидросистемы и автономные приводы, на наш взгляд, целесообразно применять на военно-транспортных самолетах, для которых за счет лишней массы можно добиться повышенной живучести.

Библиографический список

1. Акопов М.Г., Ружицкая В.В., Евсеев А.С. и др. Системы оборудования летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 2005. – 520 с.
2. Бибииков С.Ю., Долгов О.С. и др. Компоновка самолета. – М.: Изд-во МАИ, 2012. – 294 с.
3. Акопов М.Г., Волков А.А., Долгушев В.Г. и др. Методы проектирования перспективных систем силового привода ЛА. – М.: Изд-во МАИ «ПРИНТ», 2010. – 312 с.
4. Матвеевко А.М. Системы оборудования летательных аппаратов – М.: Машиностроение, 2005. – 558 с.
5. Константинов С.В., Редько П.Г., Ермаков С.А. Электрогидравлические рулевые приводы. – М.: Янус-К, 2006. – 314 с.
6. Матвеевко А.М. Методы проектирования энергосистем силового привода летательных аппаратов – М.: Изд-во МАИ «ПРИНТ», 2010. – 308 с.
7. Смагин Д.И., Пугачев Ю.Н., Долгов О.С. К вопросу испытаний бортовых гидравлических систем и их значение при разработке современных видов воздушных судов // Труды МАИ. 2011. № 44. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=24969>