

Применение авиационных правил АП25 при создании гидравлических систем управления стационарными и мобильными объектами

11, ноябрь 2014

профессор, д.т.н. Шумилов И. С.

УДК: 629.039.58

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
shumilov-it@yandex.ru

Введение

Анализ гидравлических систем управления (ГСУ) стационарными и мобильными объектами (СМО) представляет собой важнейший этап в создании ГСУ, начиная от решения обликочных задач по ГСУ и кончая конструкторскими решениями по ГСУ и её элементам. Анализ проводится с учётом требований к ГСУ и имеет основной целью обеспечение заданной надёжности ГСУ и безопасности эксплуатации СМО.

В статье рассмотрены требования к конструкции гидравлической системы управления СМО, основные конструктивные требования к гидравлической системе (ГС) СМО, надёжность гидравлической системы управления СМО, конструктивные мероприятия по предупреждению отказов гидроприводов и ГСУ и приведены краткие рекомендации.

В статье показано, что надёжность ГСУ СМО и безопасность ее работы целесообразно приравнять (или быть выше в зависимости от назначения СМО) к надёжности и безопасности современных аэробусов [4,5]. Крайне целесообразно вести проектирование ГСУ СМО в соответствии с Авиационными правилами АП25 [1] и Руководством по предотвращению авиационных происшествий ИКАО [2], что позволит снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций, а в ряде случаев даже избежать появления тяжелых катастроф на СМО в будущем.

1. Конструктивные требования к гидравлической системе управления СМО.

Основные требования, предъявляемые к конструкции гидравлической системы управления (ГСУ) СМО, среди которых целесообразно выделить следующие:

- конструкция СМО и его системы не должна иметь таких особенностей и частей, которые, как показал опыт, создают аварийные условия или являются не надёжными. Пригодность таких вызывающих сомнение частей и деталей должна определяться путём соответствующих испытаний;

- все рычаги и элементы управления должны работать легко, плавно и чётко, обеспечивая правильное выполнение заданных функций;

- каждый элемент ГСУ СМО должен быть так сконструирован и иметь чёткую и постоянную маркировку, чтобы свести к минимуму вероятность неверной сборки, которая может привести к неправильному функционированию данной системы (наличие маркировки, однако, не гарантирует от неправильной сборки. *Целесообразно конструкцию элементов ГСУ выполнять так, чтобы неверная сборка была бы невозможна*);

- путём расчёта, испытании или того и другого должно быть показано, что СМО способен продолжать безопасное движение или работу, выполнять торможение и остановку после любого из ниже следующих отказов или заклинивания в системе в нормальном диапазоне режимов движения или работы, не требуя от оператора исключительного умения или значительных усилий. Вероятные неисправности не должны оказывать значительного влияния на работу системы, и должна быть обеспечена возможность их лёгкого парирования оператором;

- при любом одиночном отказе, исключая заклинивание (например, разъединение или отказ механических элементов или отказы конструкции элементов ГСУ, таких, как силовые приводы, корпуса золотникового устройства и клапаны и т.п.) должно сохраняться управление СМО;

- при любой комбинации отказов, если не показано, что она практически невероятна, исключая заклинивание (например, двойные отказы электрической и гидравлической систем или любой одиночный отказ в сочетании с вероятным отказом гидравлической или электрической системы) не должно приводить к нарушению управления СМО;

- при любом заклинивании при положении элементов управления, обычно имеющем место в процессе работы СМО, если не показано, что заклинивание практически невероятно или его можно ослабить, должно сохраняться управление СМО. Самопроизвольное отклонение системы управления в худшее положение и заклинивание следует учитывать, если подобное самопроизвольное отклонение и последующее заклинивание не являются практически невероятными;

- СМО должен иметь такую конструкцию, чтобы он был управляем до его полной остановки и надёжно заторможен (заблокирован) в случае отказа всех двигателей. Соответствие этому требованию можно показать расчётом, если будет показано, что принятая методика надёжна;

- должна быть предусмотрена отчётливо различимая оператором при ожидаемых условиях эксплуатации, но не требующая его внимания, сигнализация любого отказа в ГСУ, который может повлечь за собой опасные условия, если оператор не

может сам обнаружить отказ. Система сигнализации не должна приводить в действие системы управления и отказ сигнализации не должен вызывать опасной ситуации;

-конструкция ГСУ должна обеспечивать возможность вмешательства оператора в управление в начальной стадии отказов, не требуя от него исключительного умения или значительных усилий, либо путём отключения системы или её поврежденной части, либо путём пересиливания отказа с помощью элементов управления в нормальном направлении;

- следует показать, что после любого одиночного отказа ГСУ СМО безопасно управляется, если отказ или неисправность происходят на любом режиме работы СМО в пределах установленных эксплуатационных ограничений, которые являются критичными для рассматриваемого отказа;

- все элементы ГСУ должны быть снабжены упорами, которые надёжно ограничивают диапазон отклонения всех подвижных элементов ГСУ;

- расположение упоров не должно допускать отрицательного влияния износа, слабину или регулировки натяжных устройств и др. элементов на характеристики ГСУ;

- упоры должны быть в состоянии выдерживать любые нагрузки, соответствующие расчётным условиям для ГСУ;

- все детали ГСУ должны быть сконструированы и установлены таким образом, чтобы исключалось заклинивание, трение и соприкосновение с грузами, операторами, незакрепленными предметами или замерзание влаги в местах, где это может вызвать отказ ГСУ;

- в кабине оператора должны быть предусмотрены меры, предотвращающие попадание посторонних предметов в такие места, где они могут вызвать заклинивание в ГСУ;

- должны быть предусмотрены меры, предотвращающие удары и касание тросов или тяг о другие части СМО;

- должны предусматриваться меры по контролю глубины завинчивания тандеров тросов и регулируемых тяг при сборке;

- должны быть предусмотрены конструктивные меры, предотвращающие разъединение элементов в системе в процессе эксплуатации; в том числе не должны применяться осевые шпильки, которые подвергаются воздействию нагрузок или перемещаются, законтренные только шплинтами;

-не применять короткие крепежные шпильки с корончатой гайкой для контровки шплинтом, т.к. при довороте гайки до совпадения прорези ее короны с отверстием в шпильке под шплинт возникают напряжения в шпильке, превышающие допустимые напряжения, т.е. гайки на коротких шпильках или болтах (при соотношении высоты стягиваемого пакета к диаметру шпильки – болта меньше 2,5) не должны иметь контровку шплинтами, хотя по ГОСТу такого ограничения нет;

- тросовые системы должны быть спроектированы таким образом, чтобы исключалась возможность опасного изменения в натяжении тросов во всем рабочем диапазоне их перемещений при эксплуатационных условиях и изменениях температуры, т.е. должны быть предусмотрены регуляторы натяжения тросов;

- тип и размер роликов должны соответствовать применяемому тросу. Ролики и звёздочки должны быть снабжены установленными вблизи предохранительными устройствами, которые предотвращают смещение и соскакивание тросов и цепей. Каждый ролик должен находиться в плоскости троса, чтобы исключить трение троса о бортик ролика;

- тандеры должны устанавливаться на участках троса, не имеющих угловых перемещений во всем диапазоне хода троса;

-должна быть обеспечена возможность визуального осмотра направляющих тросов, роликов, наконечников и тандеров и самих тросов;

- каждый орган управления в кабине должен быть размещен таким образом, чтобы обеспечить удобное управление им и предотвратить возможность путаницы и его непреднамеренное перемещение;

- органы управления должны быть установлены и расположены относительно сидений операторов таким образом, чтобы обеспечивалось полное и беспрепятственное перемещение каждого органа управления без какого-либо отрицательного влияния на это перемещение конструкции кабины и одежды оператора;

- все снимаемые болты, винты, гайки, шпильки и другие снимаемые крепежные детали должны иметь два независимых конtringящих устройства и головки болтов должны располагаться наверху (гайки внизу) болтового соединения, если выпадение этих крепежных деталей может помешать продолжению работы СМО в пределах эксплуатационных ограничений и при обычной квалификации и силе оператора. Самоконтрящиеся гайки не разрешается использовать на болтах, подверженных вращению во время эксплуатации, если помимо самоконтрящего устройства не будет применено конtringящее устройство не фрикционного типа;

Настоящее требование [1] в части защиты конструкции СМО и его функциональных систем от нелокализованных разлета масс двигателей (НРМД) в основном газотурбинных двигателей, силовых установок или гидроаккумуляторов (если двигатели, силовые установки или гидроаккумуляторы имеются в составе СМО и есть вероятность их разрушения с вылетом осколков). В тех случаях, когда возможность удержания обломков масс двигателей, силовых установок или гидроаккумуляторов (НРМГА) внутри их корпуса не может быть подтверждена, приведенный ниже материал дает основу для проектирования и эксплуатации СМО.

Должны быть приняты все практически возможные конструктивные меры для того, чтобы на основе инженерных решений минимизировать риск катастрофического повреждения нелокализованными обломками двигателя или гидроаккумулятора конструкции СМО и его систем, включая следующие:

- кабину операторов;
- топливную систему (рассматривается возможность потери значительного количества топлива, а также попадания топлива в кабину операторов или пожароопасные отсеки);
- пожарные перегородки и экраны, а также системы пожарной сигнализации и пожаротушения;
- системы и оборудование, необходимые для завершения заданной программы работы СМО;

Конструктивные меры по сведению к минимуму возможности возникновения катастрофического повреждения СМО вследствие нелокализованного разрушения двигателя (НРМД), силовой установки или гидроаккумулятора (НРМГА) могут включать в себя:

- размещение критических элементов или систем вне уязвимых зон;
- применение в корпусах гидроаккумуляторов вязких материалов, не образующих разлетающихся осколков при их разрушении (подтверждается специальными испытаниями при разрушении ГА), а также применение в конструкции гидроаккумуляторов резервированных элементов крепления и контровки крышки ГА от ее срыва с последующим выбросом поршня под действием давления газа, а также присвоения гидроаккумулятору категории взрывоопасного элемента конструкции с необходимостью двойного-тройного контроля всех технологических и эксплуатационных операций (при выполнении указанных здесь положений вероятность события НРМГА становится практически невероятным и может не рассматриваться по согласованию с компетентным органом);
- резервирование и отдельное размещение (в разных удаленных зонах) резервированных элементов систем внутри конструкции СМО;
- защиту элементов систем прочными конструктивными элементами СМО, прочными кожухами или отражающими экранами;
- использование средств выключения и перекрывных кранов, их размещение таким образом, чтобы предотвратить попадание горючих жидкостей в пожароопасные места в случае повреждения системы и/или минимизировать количество вытекающей жидкости;
- применение противопожарных перегородок и других конструктивных мер, направленных на исключение соприкосновения горючих жидкостей с источниками возможного воспламенения.

Если заявляется защита прочными элементами конструкции СМО, отражающими экранами или защитной обшивкой, эффективность защиты должна быть продемонстрирована с помощью специальных испытаний и/или анализа, базирующегося на данных испытаний.

Если приняты все практически возможные меры и анализ безопасности, выполненный с использованием модели разрушения двигателя или гидроаккумулятора, показывает, что риск катастрофического повреждения по-прежнему существует для некоторых элементов или систем СМО, то должна быть определена величина риска катастрофических повреждений. Вероятности возникновения катастрофических повреждений не должны

превышать следующих величин (могут быть изменены по согласованию с компетентным органом в зависимости от назначения СМО):

- крупный обломок двигателя или гидроаккумулятора — 1/20;
- более мелкий обломок двигателя или гидроаккумулятора — 1/40.

Указанные вероятности возникновения катастрофических повреждений, обусловленных выбросом обломков роторов двигателей или гидроаккумулятора, для каждого вида обломков являются средними значениями, полученными для всех обломков на всех двигателях или гидроаккумуляторах СМО. Вероятность катастрофического повреждения СМО отдельными обломками может быть превышена на отдельных этапах работы СМО, если при этом вероятность возникновения катастрофического повреждения, осредненная по всему времени работы СМО, ни для какого обломка не превышает вышеуказанных значений более чем в два раза.

Перечисленные требования обеспечиваются рядом конструктивных мероприятий при НРМД или НРМГА:

- компоновкой элементов ГС (рис.1.), исключающей поражение элементов жизненно важных всех гидравлических подсистем;

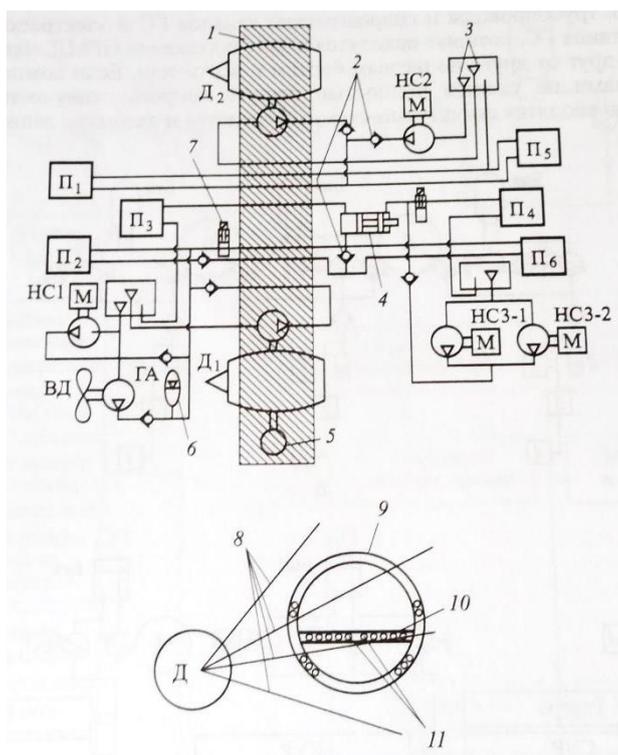


Рис. 1. Пример по обеспечению требований к ГСУ при НРМД П - потребители гидравлической энергии; М - электрический мотор; ГА - гидроаккумулятор; ВД – аварийный двигатель насоса; Д-газотурбинный двигатель 1 - зона поражения НРМД; 2 – расположение обратных клапанов вне зоны поражения; 3 - выполнение гидробака с различными уровнями забора жидкости для основного и резервного источников питания; 4 - установка разделительного цилиндра вне зоны поражения; 5 - генератор; 6 - установка гидроаккумулятора в ГС, где находится ветродвигатель; 7 - установка перекрывных устройств вне зоны поражения; 8 - траектория разлёта НРМД; 9 – корпус СМО; 10 - пол в СМО; 11 - трубопроводы ГС

- установкой вне зоны поражения обратных клапанов для исключения потери жидкости из ГС при повреждении линии слива;
- выполнением гидробака с различными уровнями забора жидкости для основных и резервных источников питания в целях сохранения работоспособности ГС при поражении основных источников гидравлической энергии;
- размещением перекрывных устройств в линиях нагнетания перед второстепенными (не жизненно важными) потребителями гидравлической энергии;
- установкой разделительного цилиндра вне зоны поражения для сохранения работоспособности ГС при повреждении её элементов;
- установкой гидроаккумуляторов для сохранения работоспособности ГСУ при переходе с одного источника гидропитания на другой.

Управляемость и работоспособность СМО обеспечивается при сохранении гидропитания минимально допустимого количества потребителей энергии в аварийном случае типа НРМД или НРМГА. В этом случае по нормативным требованиям допускается катастрофа с заданной вероятностью, которую конструктор стремится избежать даже в случае НРМД или НРМГА. Эта задача решается компоновочными и структурно-схемными средствами. Компоновочно это решается так: один элемент НРМД или НРМГА размером, заданным в нормативных документах, не мог бы повредить все каналы ГСУ (ГС) и электросистемы, а один канал продолжал бы работать от основного или аварийного источника энергии, т. е. трубопроводы и гидроагрегаты каналов ГС и электроцепи управления и питания ГСУ, которые находятся в зоне поражения НРМД или НРМГА, максимально разносятся друг от друга по разным бортам и вертикали. Если компоновочными средствами не удастся полностью решить вопросы живучести ГСУ, дополнительно вводятся структурно-схемные средства и автоматы защиты.

2. Основные конструктивные требования [1,4] к энергетической гидравлической системе (ГС) СМО:

-каждый элемент гидравлической системы должен быть сконструирован так, чтобы выдерживать контрольное давление без возникновения утечки рабочей жидкости или остаточной деформации, препятствующей выполнению предназначенных функций, и предельное давление без разрушения.

-выдерживать без возникновения деформаций, которые могли бы воспрепятствовать выполнению предназначенных функций расчётное рабочее давление в сочетании с максимальными эксплуатационными нагрузками, которые могут быть [6];

-выдерживать усталостные воздействия от всех циклических давлений [6], включая случайные, и соответствующих экстремальных нагрузок, принимая во внимание последствия отказов элементов;

-гидравлическая система не должна вызывать взрыва на СМО;

-гидропитание ГСУ должно обеспечивать сохранение работоспособности и обеспечение безопасного продолжения и завершения работы СМО при возникновении одного и двух последовательных отказов ГС;

- в резервированных каналах ГС должны быть исключены так называемые «общие точки», т.е. такие места в конструкции, отказ (один отказ) которых может быть причиной выхода из строя двух и более каналов ГС;

-элементы гидравлической системы должны быть выполнены, установлены или/и защищены таким образом, чтобы гидрожидкость или её пары в случае утечки не могли проникнуть в кабину операторов в концентрации, превышающей заданную [4];

-обеспечение высокой степени чистоты рабочей жидкости [4, 7]. Для этой цели используется тщательная многократная промывка элементов ГС и гидросистемы в целом турбулентным потоком после ее сборки, закрытая заправка жидкости, исключая попадание загрязнений и посторонних частиц, а также тонкая фильтрация жидкости (5—10мк) в ГС в линиях нагнетания и слива с индикацией загрязнения фильтров и обязательная защита от монтажных загрязнений гидроагрегатов с прецензионными элементами путем установки фильтров грубой очистки (~25÷30мк и менее) на их входе. *Не рекомендуется применение байпасных каналов с предохранительным клапаном у фильтров в линиях нагнетания и слива*, т.к. клапан всегда срабатывает при низких температурах, не обеспечивая задержания загрязнений на фильтре и существенно снижая надежность ГС и ГСУ;

-поддержание стабильного давления в каждой подсистеме, что весьма важно особенно при питании каналов резервированных гидроприводов и сервоприводов. В противном случае возможно снижение запасов по тяге приводов и появление рассогласования между каналами резервированных приводов;

-исключение чрезмерных пульсаций давления, влияющих на устойчивость приводов и снижающих ресурс системы. В случае необходимости применять гасители пульсации;

-обеспечение работоспособности ГС при воздействии внешних отрицательных и положительных перегрузок в заданных пределах в течение заданного времени;

-сведение к минимуму паразитных утечек внутри гидравлических агрегатов и исключение перетекания жидкости из одной подсистемы в другую (т.е. исключение общих точек для резервных каналов ГС), а также минимизация внешних утечек через уплотнения выходных штоков и других подвижных элементов;

-обеспечить устойчивость элементов ГС к воздействию вибрации с заданными параметрами;

-выдерживание определенного диапазона положительных температур рабочей жидкости, например $+50\div 80^{\circ}\text{C}$, при температуре окружающей среды, например $-60\div +50^{\circ}\text{C}$. Температура существенно влияет на вязкость жидкости, от которой зависит скорость перемещения выходных звеньев каналов гидропривода и, следовательно, в случае различия скоростей отклонения каналов возможно увеличение рассогласования между ними. В связи с этим при отрицательных внешних температурах перед началом работы СМО должен про-

изводиться разогрев рабочей жидкости. При необходимости должно предусматриваться охлаждение рабочей жидкости в ГС;

-целесообразно применение пожаровзрывобезопасной жидкости, которая не должна вызывать пожара или взрыва на СМО в случае разрушения трубопроводов и агрегатов ГС или применение необходимых противопожарных конструктивных мероприятий, обеспечивающих противопожарную защиту СМО при разгерметизации ГС. Эффективность указанных мероприятий подтверждается специальными огневыми испытаниями;

-исключение в жидкости свойств, вызывающих электрокинетическую эрозию клапанов и золотников. Эрозия вызывает изменение характеристик указанных устройств. В частности, размываются рабочие кромки золотников, в результате чего повышаются утечки, ухудшается точность привода и в дальнейшем полный его отказ;

-иметь высокий объемный модуль упругости, который характеризует сжимаемость применяемой жидкости. Сжимаемость является важной характеристикой, которая учитывается при оценке динамических характеристик привода.;

-целесообразно применение в системе подавливания гидробаков нейтрального газа (например, азота);

-целесообразно (точнее необходимо) применение эффективного устройства для дегазации жидкости, которое удобно (обычно) размещается в баке открытого типа, где жидкость контактирует с газом;

- для сохранения работоспособности ГСУ в случае остановки всех двигателей ГС должна обеспечивать необходимые давление и расход рабочей жидкости, обеспечивающий выполнение операций для повторного запуска двигателей и необходимой управляемости СМО для продолжения его работы или остановки;

-целесообразна установка вспомогательной силовой установки (ВСУ), приводящей гидронасосы и генераторы в аварийных ситуациях и длительной остановки СМО. Целесообразно, чтобы питание топливом ВСУ производилось из отдельного топливного бака, а не из общего расходного бака. Это позволит сохранить работоспособность ВСУ в случае отсутствия топлива в топливной системе СМО (напр., при ошибках в заправке СМО и др);

- каждая ГС должна иметь средства, расположенные в кабине экипажа, для индикации соответствующих параметров системы, если она выполняет функцию, необходимую для продолжения движения и торможения СМО, или в случае неисправности в гидравлической системе необходимы парирующие действия оператора для обеспечения продолжения выполнения задания.

3. Надёжность гидравлической системы управления СМО

Поскольку СМО является достаточно сложным и высоко ответственным объектом, отказ которого может привести к тяжёлым последствиям, необходимо, чтобы все системы СМО, включая и ГСУ, имели высокую надёжность. Известно, что рейтинг механических систем в отношении надёжности очень высок, то было принято, что все другие системы такой же функциональной значимости должны иметь вероятность отказа, по крайней мере, выше ука-

занной. Резервированные электрические, электронные и гидравлические системы не могли обеспечить такой показатель надёжности, поэтому необходимо было их резервировать.

Как показала практика, применение резервирования явилось наиболее эффективной мерой повышения надёжности управления и безопасности работы объектов при отказах в функционально значимых системах. Резервирование позволяет сохранить работоспособность системы управления при определённом числе и видах отказов. Однако, ввиду того, что каждый вид отказа (электрический, гидравлический, механический) оказывает определённое воздействие на работоспособность системы, то для его компенсации и изоляции требуется применение соответствующих конструктивных мер, например, секционирование элементов СМО, рулевых устройств, регулировки клиренса, дублирования механических элементов, использование определенных методов резервирования, при которых рассматриваемый отказ не является критичным для системы.

Далее необходимо обратить внимание на два принципиальных положения требований, которые имеют существенное значение для выбора структуры ГСУ:

- структура ГСУ должна рассчитываться на один отказ (за исключением заклинивания), без учёта вероятности его возникновения. При этом требовании рассматривается также механический отказ типа рассоединения (несмотря на его достаточно малую вероятность) как отказ, по которому необходимо принятие структурных мер, например, дублирования, для сохранения работоспособности системы независимо от вероятности его возникновения. Поэтому все системы управления должны быть дублированы или иметь средство альтернативного управления (например, управление через другой канал);

-практическая невероятность возникновения комбинации двух последовательных отказов (в которую включается также отказ типа рассоединения) или единичного отказа типа заклинивания согласно требованиям может быть подтверждена расчётными методами.

Однако использование расчётных методов даёт в лучшем случае диапазон значений вероятностей отказа (надёжности) системы, в котором следует ожидать значение фактической вероятности отказа (надёжности) системы. Проведение таких расчётов целесообразно прежде всего для установления «слабых» в отношении надёжности элементов, надёжность которых необходимо повышать (например, используя для этого их резервирование).

ГСУ является одной из наиболее ответственных систем СМО, так как определяет возможность выполнения задания и безопасность работы СМО. Утрата управления СМО создает особую ситуацию, при которой предотвращение разрушения СМО и гибели людей, оказывается практически невозможным. Поэтому отказ ГСУ, в результате которого создается катастрофическая ситуация, должен быть событием практически невероятным (вероятность отказа не более 10^{-9} за час работы СМО).

Надёжность ГСУ обеспечивается структурой системы, надёжностью и резервированием входящих в систему структурных звеньев и взаимодействующих с ними систем, а также специальными конструктивными мерами, предотвращающими возможность непредусмотренных внешних воздействий на систему в эксплуатации. Целесообразно сохранять

без изменения функционирования и характеристики ГСУ при единичном отказе (вероятность отказа 10^{-3} за час работы СМО).

Целесообразно принять для ГСУ и СМО следующие ситуации [1,4]:

- при умеренно-вероятном отказе или комбинации отказов (вероятность события $10^{-3} \dots 10^{-5}$ за час работы СМО) изменение функционирования или характеристик ГСУ не создает на СМО особой ситуации более сложной, чем усложнение условий работы СМО, при которой психофизиологическая нагрузка на операторов увеличивается незначительно или незначительно ухудшаются характеристики управляемости СМО;
- при маловероятном отказе или комбинации отказов (вероятность события $10^{-5} \dots 10^{-7}$ за час работы) изменение функционирования или характеристик ГСУ не создает на СМО особой ситуации более трудной для операторов, чем сложная ситуация, при которой заметно повышается психофизиологическая нагрузка на операторов, или заметно ухудшаются характеристики СМО, или выходят за эксплуатационные ограничения один или несколько параметров СМО, не достигая при этом установленных для СМО предельных значений этого (этих) параметров;
- при крайне маловероятной комбинации двух и более независимых отказов (вероятность события не более $10^{-7} \dots 10^{-9}$ за час работы) на СМО может создаваться аварийная ситуация, при которой значительно повышается психофизиологическая нагрузка на операторов, или ухудшаются характеристики СМО или характеристики управляемости СМО, или достигаются предельные ограничения СМО, при этом предотвращение перехода аварийной ситуации в катастрофическую требует высокого профессионального мастерства операторов.

Возможна допустимость функционального отказа ГСУ только при одном из следующих условий при согласовании перечня отказов и их последствий с государственным органом, отвечающим за надёжность и безопасность эксплуатации СМО:

- сочетание двух и более независимых последовательных отказов, включая механический отказ (заклинивание или рассоединение, разрушение механических элементов системы).

Каждое из этих условий для СМО должно являться событием практически невероятным, механический отказ может быть отнесён к событию практически невероятному на основании анализа конструкции, статистических материалов эксплуатации подобных конструкций, испытаний ГСУ или входящих в неё элементов на прочность, выносливость и живучесть.

В качестве примера следует отметить, что *несмотря на это с начала 1970-х годов на большинстве гражданских самолётов структура систем управления обеспечивает сохранение функционирования системы в условиях воздействия любого единичного механического отказа и сочетания (2-х, 3-х и более отказов) расчетных отказов (Боинг-747, Боинг-757, Боинг-777, А-310, ИЛ-96, Ту-204 и др.), а надёжность ГСУ СМО и безопасность его работы должны приравняться (или быть выше в зависимости от назначения*

СМО) к надёжности и безопасности современных аэробусов. Крайне целесообразно вести проектирование ГСУ СМО в соответствии с хорошо отработанными и проверенными на практике Авиационными правилами АП25 [1] и Руководством по предотвращению авиационных происшествий ИКАО [2], что позволит снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций, а в ряде случаев даже избежать появления тяжелых катастроф на СМО в будущем.

Для обеспечения безопасного продолжения работы СМО при возникновении отказов в ГСУ её структурные звенья должны обладать свойством отказобезопасности: результаты отказа или комбинации отказов в структурном звене, вероятность которых ниже требований по надёжности, предъявляемых к ГСУ в целом, не приводят к опасному изменению статических и динамических характеристик СМО, даже в случае утраты этим звеном всех или некоторых выполняемых им функций или ухудшения характеристик ГСУ, связанного с отказом. В ГСУ формирование структурных звеньев, надёжность которых ниже требований по надёжности, предъявляемых к ГСУ в целом, и распределение между ними выполняемых функций осуществляются, исходя из следующих условий:

- структурные звенья обладают свойством отказобезопасности, в том числе при их полном отказе;
- вероятность отказа структурного звена не выше допустимой вероятности особой ситуации, возникающее в результате его отказа;

Требуемая надёжность [4] структурных звеньев ГСУ достигается надёжностью входящих в их состав элементов и резервированием и обеспечивается:

- применением конструктивных решений, проверенных в эксплуатации и имеющих высокие статистические показатели надёжности;
- выбором напряжений в конструкции, удельных нагрузок по трущимся поверхностям и т.п. с запасами большими, чем в резервируемых элементах;
- простотой монтажа на СМО, полностью исключаящей ошибки при производстве работ;
- обеспечением удобного подхода при эксплуатации, дающего возможность проведения качественного обслуживания и контроля состояния.

Применяемое в ГСУ резервирование предусматривает поэлементное резервирование в агрегатах, блоках и узлах, общее резервирование структурных звеньев, общее резервирование ГСУ.

Поэлементное резервирование в агрегатах, блоках и узлах повышает их надёжность и отказобезопасность за счёт сохранения их работоспособности при отказе отдельных резервированных элементов или за счёт выявления и отказобезопасной компенсации этих отказов.

Общее резервирование структурных звеньев и управления осуществляется по методам “горячего резерва” с параллельно действующими подсистемами, выполняющими одинаковые функции, или методом “замещения”.

Резервирование по методу “горячего резерва” с параллельно действующими подсистемами имеет ряд преимуществ, основными из которых являются:

- возможность постоянного контроля исправности всех подсистем, в том числе за счёт их взаимного контроля;
- отказ каждой подсистемы вызывает минимальное возмущение ГСУ, так как исправные подсистемы участвуют в силовом подавлении и компенсации возмущения, создаваемого отказавшей подсистемой (так называемый мажоритарный метод резервирования);
- уменьшение вероятности накопления отказов, так как пассивные отказы, выявление которых при длительной работе СМО при минимальном уровне управляющих сигналов достаточно сложно, могут быть искусственно сведены к активным отказам, выявление которых не представляет сложности, а вызываемое ими возмущение системы не представляет опасности при таком методе резервирования. К пассивным относятся отказы, с возникновением которых не связано возмущение на работу СМО, например, отказы энергоснабжения, заклинивание в сбалансированном положении, отсутствие отработки управляющих сигналов. С активными отказами связаны воздействия, стремящиеся отклонить орган управления независимо от вводимых в ГСУ управляющих сигналов, например, заклинивание гидравлических распределителей в гидроприводах и сервоприводах, электрическая “помеха” в виде ложного потенциала, обрыв электрических обратных связей и др.

Вместе с тем при резервировании по методу “горячего резерва” с параллельно действующими подсистемами увеличивается масса, габариты и потребление энергии.

Резервирование по методу “замещения” позволяет устранить ряд указанных выше, недостатков, однако создает трудности по обеспечению точного и своевременного переключения подсистем, одна из которых находится в рабочем состоянии, а другие в “холодном резерве” или “горячем резерве” без рабочего выхода в систему.

Требуемая надёжность рычагов управления достигается их прочностью и конструктивной защитой от заклинивания посторонними предметами, а также при необходимости их резервированием (рычаги управления двух операторов). В ряде случаев рычаги управления снабжаются датчиками, замеряющими приложенные к рычагам усилия и выдающими электрические сигналы, по которым может осуществляться отклонение органов управления при аварийном управлении СМО в случае заклинивания рычага управления.

Отказобезопасность резервированных рычагов управления обеспечивается их конструктивным соединением с дистанционной передачей и между собой, позволяющим сохранить возможность управления СМО одним рычагом при заклинивании другого, а также исключить самопроизвольное отклонение органов управления при отсоединении одного из рычагов управления. На рис.2. приведены характерные схемы соединения рычагов управления.

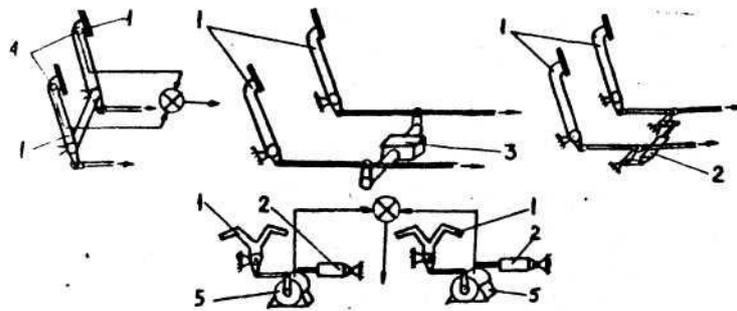


Рис.2. Примеры схем соединения рычагов управления СМО: 1 – рычаг управления; 2 - пружинная тяга; 3 - механизм расцепа; 4 – датчик усилий; 5- датчик положения

Требуемая надёжность дистанционной передачи достигается её прочностью, специальной конструкцией, предотвращающей рассоединение механических элементов, защитой от заклинивания посторонними предметами, а также резервированием, благодаря которому можно передавать управляющие сигналы несколькими путями и сохранять работоспособность передачи в случае любого отказа одного или нескольких из указанных путей передачи сигналов.

На рис. 3. приведены три типовые схемы резервирования дистанционной передачи. В одной из них (рис.3а.) два механических троса дистанционной передачи соединены между собой устройствами связи, выполненными в виде пружинных тяг или механизмов (муфт) расцепа, при этом каждый механический канал соединяет один из рычагов управления с одной частью секционированного органа управления. При нормальной работе отклонение каждого рычага управления вызывает отклонение другого рычага управления и всех частей органа управления.

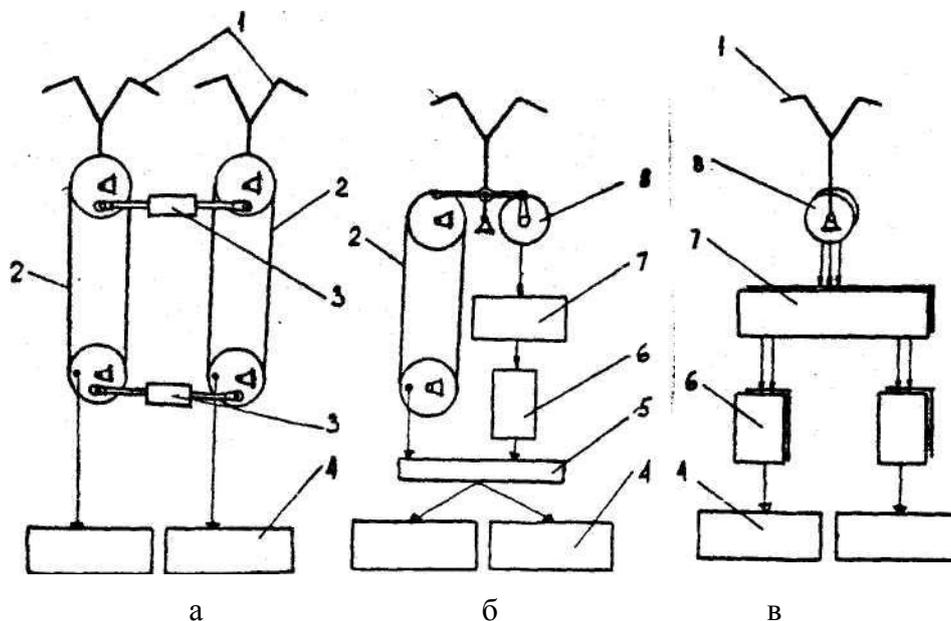


Рис. 3. Пример резервирования дистанционной передачи СМО 1 – рычаг управления; 2 - механическая дистанционная передача; 3 - устройство связи; 4- орган управления; 5 - переключатель или сумматор; 6 - сервопривод; 7- блок системы дистанционного управления (СДУ); 6 - датчик положения

В случае отказа одного из каналов дистанционной передачи другой канал обеспечивает управление всеми частями органа управления, если отказ в канале вызван механическим рассоединением его элементов. В другой схеме (рис.3б.) дистанционную передачу составляют резервированный электродистанционный канал управления и механический канал управления, при этом известны три варианта использования этих каналов:

- основным каналом управления является резервированный электродистанционный канал, а механический канал используется как аварийный только при отказе основного канала, при этом отказ механического канала при исправном основном канале не оказывает влияния на работоспособность системы управления;
- электродистанционный и механический каналы работают одновременно и совместно, суммируя свое действие;
- механический канал является основным, а электродистанционный канал используется как аварийный только при отказе основного канала.

И, наконец, в третьей схеме (рис.3в.) дистанционная передача выполнена в виде многоканальной электродистанционной передачи, которая сохраняет работоспособность при отказе отдельных составляющих её резервных каналов и вероятность отказа которой после отказа критического числа её резервных каналов соответствует требованиям, предъявляемым к надёжности системы управления СМО.

Отказобезопасность дистанционной передачи обеспечивается сохранением за счёт резервирования её функционирования, пассивностью механических отказов (отсутствие возмущения органа управления при отказе) и встроенной системой контроля электродистанционных каналов, которая осуществляет своевременное обнаружение отказа и безопасное для движения отключение отказавшего канала. Полезно применение так называемого принципа разнородного резервирования, т.е. резервные каналы выполняются на разнородных принципах передачи управляющих сигналов, например, механических, электрических, гидравлических, пневматических, волоконных и др. Принцип разнородного резервирования существенно повышает надёжность и безопасность эксплуатации СМО, повышает его стоимость.

Требуемая надёжность гидроприводов достигается надёжностью их конструкции и резервированием. Резервирование гидроприводов обеспечивается как общим резервированием, при котором гидропривод выполняется в виде многоканального привода с независимыми каналами управления, так и поэлементным резервированием, при котором резервируются отдельные узлы каналов привода.

При общем резервировании два и более независимых друг от друга канала привода соединяется между собой элементами связи, позволяющими обеспечить один из следующих типов связи каналов: суммирование усилий; суммирование положений; суммирование скоростей; замещение каналов.

При резервировании привода с суммированием усилий его каналов (рис.4а) с одним органом управления параллельно соединяются все каналы привода. Мажоритарный принцип резервирования, реализуемый при таком соединении каналов, обеспечивает при отка-

зе отдельного канала привода преодоление его действия исправно работавшими каналами. При отказе отдельных каналов гидропривода или источников их энергоснабжения уменьшается развиваемое усилие на органе управления, который привод может преодолеть. Поэтому для достижения необходимого отклонения органа управления СМО при отказе отдельных каналов каждый канал привода увеличивается по мощности. При трёхкратном резервировании гидромеханического рулевого привода с суммированием усилий каналов достигается практически безотказность привода. В этом случае отпадает необходимость в каких-либо специальных конструктивных мерах по приведению органа управления в нейтральное положение.

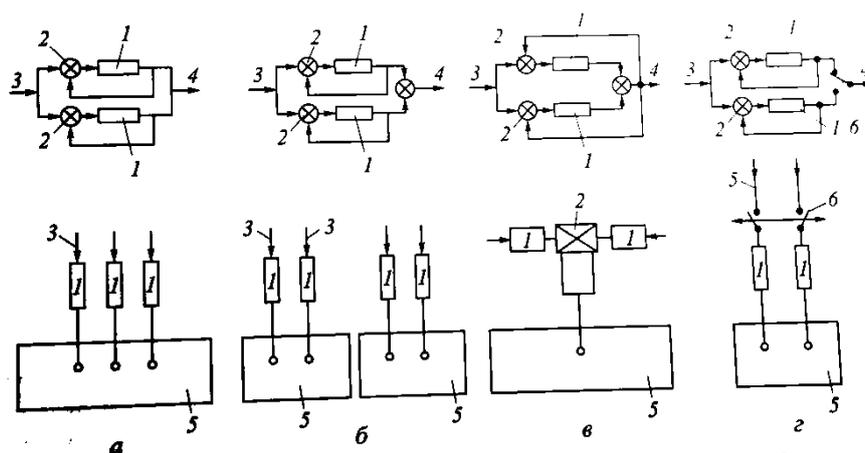


Рис.4. Резервирование гидроприводов в ГСУ СМО 1 - канал привода; 2 - суммирующий элемент; 3 - входной сигнал; 4 – выходной сигнал; 5 - орган управления; 6 - переключатель

При резервировании привода с суммированием положений его каналов к каждой секции органа управления подсоединены отдельные каналы многоканального гидропривода (рис.4б). При таком резервировании действие отказавшего канала и соединённого с ним органа управления компенсируется действием других исправно работающих каналов. При отказе отдельных каналов такого привода сокращается эффективность органа управления.

Поэтому для обеспечения необходимой эффективности органа управления суммарная эффективность всех её секций должна превышать требуемую, или при отказе каналов привода должно быть допустимо ухудшение характеристик. При таком резервировании гидропривода предусматриваются специальные меры по приведению секций с отказавшими каналами привода в нейтральное положение, например использование цангового замка, или переключением отказавших гидроприводов в режим демпфера.

Возможно применение гидроприводов с суммированием скоростей перемещения его резервных каналов (рис.4в). При отказе отдельных каналов привода или источников их энергоснабжения ограничивается скорость отклонения органа управления без изменения преодолеваемого приводом внешнего усилия, действующего на орган управления, т.е. без изменения углов (ходов) отклонения органов управления. В таком приводе его каналы со-

единены между собой дифференциально. Поэтому для сохранения работоспособности привода при отказе его каналов каждый канал снабжается специальным тормозом, который должен срабатывать в случае отказа канала.

Замещение каналов в гидроприводе используется с жёстко соединёнными каналами с одним органом управления с обязательным контролем работы каналов (рис.4г). При отказе работающего канала привода, который обнаруживается встроенной системой контроля, отказавший канал по сигналу этой системы отключается, а канал, находящийся в резерве, - подключается. Такой метод резервирования нашёл широкое применение на практике. При отказе двух каналов гидропривода они переводятся в режим демпфирования секции органа управления. При этом эти два канала гидропривода могут запитываться от двух независимых централизованных гидросистем; или один постоянно работающий канал гидропривода подключается к централизованной ГС, а второй резервный выполняется автономным (с дроссельным или объёмным регулированием) и подключается к электросистеме СМО. Здесь выполняется принцип: одна секция органа управления – один активный канал гидропривода, позволяющий существенно повысить ресурс силовых элементов многоканальной ГСУ. Здесь имеется так же возможность существенно повысить надёжность ГСУ методом применения секционирования рулей (рабочих органов), что широко используется на практике.

Отказобезопасность гидроприводов достигается одним из указанных выше методов резервирования, а также поэлементным резервированием, исключаящим или снижающим вероятность активного или неконтролируемого отказа канала, например за счёт резервирования распределительных золотниковых устройств.

Требуемая надёжность других структурных звеньев (устройств загрузки рычагов управления, регулирования передачи, блоков связи и др.) обеспечивается их конструкцией и резервированием. Отказобезопасность этих структурных звеньев достигается:

- конструктивным ограничением скорости или диапазона отклонения органа управления или обеспечением пересиливания действия этих звеньев при отказе;
- распределением функций между отдельными структурными звеньями так, чтобы при отказе отдельного структурного звена или его связей происходила бы частичная или полная утрата отдельных функций, не приводящая к опасному изменению свойств СМО;
- обязательное выделение особо опасных структурных звеньев (например, переключаемых стрелок на железнодорожных путях, гидроаккумуляторов и т.п.), отказ которых приводит к тяжелым последствиям, присвоения им категории особо опасных звеньев с необходимостью полного или поэлементного резервирования элементов этих звеньев и двойного-тройного контроля независимыми службами или системами всех конструкторских, технологических и эксплуатационных операций, касающихся этих звеньев.
- Конечно все перечисленные мероприятия повышают стоимость ГСУ, однако это оправдывается высокой надёжностью и безопасностью ГСУ и СМО в целом.

Отказобезопасность устройств загрузки достигается конструктивно ограниченной и приемлемой для безопасного управления величиной усилий, создаваемой устройством в случае отказа, а также характерной пассивностью отказа этого устройства, т.е. отказа, не вызывающего самопроизвольного отклонения органа управления.

Отказобезопасность блоков связей (сервоприводов, рулевых машин), в том числе при отказе (помехе) поступающих к ним управляющих сигналов обеспечивается:

- конструктивным ограничением по режимам отклонения органов управления от этих блоков связей, электрическим ограничением по режимам работы СМО максимального значения управляющих сигналов, поступающих к этим блокам связи;
- ограничением усилия, развиваемого сервоприводом, до значения, приемлемого для пересиливания его усилием оператора, в том числе за счёт связи сервопривода с дистанционной передачей через специальную муфту или пружинное устройство пересиливания;
- принудительным отключением автоматического управления с помощью специальной кнопки быстрого отключения (КБО) или отклонением рычага управления, с которым соединён специальный датчик усилия или перемещения для формирования сигнала отключения автоматического управления, а также с помощью специальной муфты отключения, через которую сервопривод соединён с дистанционной передачей.

Конструктивное ограничение отклонения органов управления от блоков связи достигается ограничением хода сервопривода или изменением по режимам работы СМО коэффициента передачи от сервопривода к органу управления или конструктивным ограничением усилия по режимам работы СМО, развиваемого сервоприводом, до значения, ограничивающего отклонение органа управления из-за невозможности преодоления сервоприводом усилий, создаваемых устройством загрузки рычага управления.

Для обеспечения требуемой надёжности ГСУ её энергоснабжение многократно резервируется. Гидравлическое питание ГСУ осуществляется, как правило, от двух или трёх независимых централизованных гидравлических систем (ГС). В числе этих ГС имеется гидросистема или гидросистемы, которые обеспечивают гидропитание ГСУ при отказе силовых установок СМО.

Электрическое снабжение ГСУ осуществляется не менее чем от двух (или трех) независимых сетей электроснабжения, каждая из которых имеет резервированные источники энергии, при этом обеспечивается электропитание ГСУ и в аварийном режиме работы системы электроснабжения (например, от аварийных источников электроснабжения).

Применение резервирования систем во многих случаях связано с невозможностью демонстрации заданной надёжности. Проверка надёжности системы с вероятностью отказа 10^{-7} на час работы СМО потребовала бы многолетней непрерывной работы системы. Поэтому количественное значение надёжности нельзя с уверенностью подтвердить стендовыми и натурными испытаниями. Для этого потребуется информация по всему парку СМО с новыми системами.

В этом отношении показательна тенденция, которая имеет место при применении ответственных механических систем, ранее традиционно считавшихся высоконадёжными. Несмотря на это, была признана необходимость резервирования механических систем и других ответственных механических элементов. По вполне понятным причинам резервирование механических систем было осуществлено позже других систем. Основная причина, сдерживающая применение резервирования механических систем, это значительное увеличение массы, занимаемого объёма и сил трения системы, ее стоимости.

Механические системы выполняют также силовые функции, т.е. служат для непосредственного отклонения органов управления, на которые воздействуют большие внешние нагрузки. Резервирование силовых связей требует существенного увеличения массы. Поэтому там, где возможно применение секционирования органов управления, можно избежать значительного увеличения веса от применения такого резервирования, поскольку потеря секции из-за механического отказа в этом случае может не рассматриваться как критическое, с точки зрения безопасности работы СМО, событие.

3. Резервирование - универсальное средство повышения надёжности и живучести ГСУ СМО

В общем случае резервирование является универсальным средством повышения надёжности и живучести ГСУ. Однако, это не означает, что резервированная система не должна изменять свои характеристики при возникновении в ней отказов или повреждении функциональных элементов. Важно, чтобы эти изменения характеристик не выходили за пределы, определяемые условиями безопасности работы СМО.

Для СМО могут рассматриваться четыре вида ситуаций, которые различаются тяжестью последствий, вызванных отказными состояниями. К таким особым ситуациям относятся: усложнение условий движения (УУД), сложная ситуация (СС), аварийная ситуация (АС), катастрофическая ситуация (КС). Так как эти особые ситуации непосредственно влияют на безопасность работы СМО, то частота их возникновения должна нормироваться.

Акцент делается на функциональную значимость систем для безопасности работы СМО. В связи с этим целесообразно всю совокупность систем, участвующих в той или иной мере в управлении СМО, разделить на группы функциональной значимости, а затем изложить требования к безопасности каждой группы систем в соответствии с их функциональной значимостью.

Таким образом, значимость функций для систем безопасности работы СМО должна служить критерием для градации систем по группам функциональной значимости. Например, есть функциональные системы, потеря функции которой в любом случае недопустима по условиям обеспечения безопасности СМО. Основная задача при создании таких систем — это обеспечение их работоспособности в течение всего времени работы СМО или, если смотреть более широко, в течение всего жизненного цикла СМО. В то же время есть системы, функция которых может быть потеряна, но при её потере не должны создаваться критические для безопасности СМО условия. Для такой группы систем меры обеспечения безопасности должны быть направлены на создание условий отказобезопасности. И, наконец, последняя

группа систем предназначена для повышения комфорта экипажа, - эти системы не оказывают существенного влияния на безопасность работы как с точки зрения потери самой функции, так и возможного влияния отказа.

Ниже перечисляются требования к надёжности систем с учётом их функциональной значимости.

Системы группы I. Вероятность отказа систем группы I должна быть менее 10^{-9} на час работы СМО, т.е. отказ системы должен рассматриваться как событие практически невероятное. Такие высокие требования по надёжности (или вероятности отказа) могут быть обеспечены многократным резервированием функциональных систем, при котором функциональная система сохраняет работоспособность, по крайней мере, после одного, двух или более последовательных отказов её каналов. Для обеспечения такой надёжности необходимо 2-3-4 кратное резервирование системы. При этом после перехода системы (в результате возникновения неисправностей) в состояние «нет резерва» экипаж должен прекратить выполнение плана работы или принять другое решение в соответствии с обстановкой.

Системы группы II. Вероятность отказа систем группы II должна быть менее 10^{-5} на час работы СМО. Надёжность систем этой группы должна обеспечиваться 2-3-4-х кратным резервированием, при котором функциональная система сохраняет работоспособность, по крайней мере, после отказа одного и более каналов. Система должна обладать свойством отказобезопасности, т.е. прекращение функционирования системы не должно сопровождаться недопустимыми возмущениями в работе СМО и отказавшая система не должна препятствовать безопасному завершению работы СМО. Для обеспечения отказобезопасности системы этой группы должны быть самоконтролируемыми до возникновения последней неисправности, после которой система прекращает функционировать. После отказа системы должны накладываться ограничения на область режимов работы и действия экипажа при управлении СМО.

Системы группы III. Вероятность отказа таких систем должна быть менее 10^{-3} на час работы СМО. При отказе не должно возникать проблем с обеспечением безопасности работы СМО. Системы этой группы должны быть отказобезопасными. Работа может быть продолжена в соответствии с принятым заданием. В качестве основной меры обеспечения отказобезопасности рассматривается ограничение эффективности системы или ограничение (чаще механическое) хода её исполнительного устройства.

4. Гидравлические уплотнения в гидравлических системах управления СМО.

Гидроприводы СМО постоянно находятся под давлением, поэтому утечка рабочей жидкости является как проблемой безопасности работы СМО, так и досадной проблемой эксплуатационного обслуживания. При разрушении только одного уплотнения может быстро вытечь вся жидкость из отдельной гидросистемы. Уплотнения в приводе и элементах гидросистемы являются одним из самых ранимых узлов системы. К тому же их число ог-

ромно. Основной срок службы ГСУ зависит от СМО, на котором ГСУ установлена. На современных СМО он был увеличен до 60000 моточасов на весь 20-25-летний период эксплуатации и более.

Уплотнения, обычно выполняемые из эластомерных материалов, должны выдерживать весь срок службы ГСУ. Периодическая замена уплотнения в ГСУ, в общем, разрешается. Желательно, чтобы срок службы ГСУ был не меньше, чем самих СМО или по крайней мере был бы равен или больше межремонтному периоду СМО. Снятие и замена изношенных деталей и всех уплотнений допускается (но нежелательно) каждые 15000 мото часов. В некоторых случаях такая разборка ГСУ может планироваться, но обычно проводится техническое обслуживание по состоянию оборудования, т.е. его не снимают и не заменяют до тех пор, пока не выявятся сбои какие-либо неисправности или утечка жидкости больше нормы (обязательны периодические осмотры и проверки на регламентных работах).

В идеале не должно быть внешних утечек рабочей жидкости из приводов или любых других компонентов гидросистемы, за исключением утечек через уплотнения вращающегося вала насоса и гидромотора. Поскольку уплотнения неподвижных и подвижных соединений (УНС и УПС) функционально несовершенны, обычно имеет место некоторое просачивание из-за одной или нескольких причин:

- когда плёнка рабочей жидкости, удерживаемая полированной поверхностью трения штока или поршня и необходимая для смазки, собирается за уплотнением;
- если на уплотнение воздействуют колебания давления и температуры рабочей жидкости;
- в результате приработки уплотнения после некоторого периода эксплуатации;
- удержания жидкости войлочными смазочными кольцами и деталями уплотнения, имеющими пустоты.

Утечки жидкости условно классифицируются на допустимые и чрезмерные. Утечка считается допустимой, если жидкость вытекает из гидроагрегата в незначительном количестве, не оказывая влияния на работу систем СМО, или если её ликвидация не требует много времени. Утечка будет чрезмерной, если при нормальной эксплуатации гидробак опорожняется с опасным понижением уровня, увеличивая возможность пожара или сомнения в пригодности СМО к работе.

Допустимая утечка, существующая даже в новых гидроагрегатах, проявляется как просачивание, создающее окрашенный жидкостью след или мокрое пятно на фильтровальной бумаге. *Чем больше допустимая утечка жидкости, тем больше ресурс уплотнений и привода (агрегата) в целом.*

Общие технические условия на гидроприводы и компоненты других систем содержат определённые ограничения на внешнюю утечку:

- например, технические условия на общие гидравлические компоненты MIL-H-8775 и MIL-H-8890 определяют внешнюю утечку "как небольшую влагу, недостаточную для образования капли через уплотнение неподвижного соединения (УНС), чтобы требовать

организацию её отвода. Допустимая утечка жидкости за уплотнением подвижных соединений (УПС) не должна превышать величины, оговоренной техническими условиями на деталь или узел;

-согласно техническим условиям на гидроприводы поступательного движения общего назначения MIL-A-5503 "утечка через внешнее уплотнение штока привода за 25 циклов его перекадки не должна превышать одной капли. Никакой внешней утечки более одной капли не допускается".

-при низкотемпературных испытаниях привода до температуры -50°C на каждой внешней уплотнительной втулке штока привода допускается утечка жидкости в две капли за пять перекадок штока, а при высокотемпературных испытаниях приводов для различного типа систем при температуре не более заданной утечка должна быть не больше окрашенного следа (оставленного на смоченной рабочей жидкостью уплотняемой поверхности);

Руководящие материалы SAE ARP-1281A для авиационно-космических аппаратов, распространяющиеся также и на рулевые приводы самолётов, устанавливают следующие требования к утечкам и целесообразно применить к СМО:

-внутренняя утечка: "Допустимая утечка жидкости в каналах от входа к сливу и связанные с ней требования устанавливаются техническими условиями на корпус привода. Эта утечка является суммой утечек через все компоненты привода (агрегата), включая управляющий золотник и уплотнения".

-внешняя утечка: "Технические условия на агрегат определяют допустимую внешнюю утечку, как утечку жидкости за уплотнением подвижных соединений (УПС) привода (агрегата), например, за уплотнениями торцевых букс штока в исполнительном гидроцилиндре";

-утечка между гидросистемами: "Для приводов с многоканальным подводом гидросистемы устанавливается допустимая утечка жидкости между гидросистемами при заданной температуре и максимальной разности давлении между напорной и сливной гидролиниями в каждой гидросистеме."

Поскольку любая утечка через уплотнение штока является потерей рабочей жидкости из гидросистемы, допустимая утечка должна быть практически возможно малой и обычно оговаривается величина общей утечки по всей гидросистеме в сумме. Эти внешние утечки необходимо учитывать при расчёте объёмов гидробаков и времени межрегламентных дозаправок жидкостью гидросистем, а также при анализе возможного попадания жидкости на ближайшие агрегаты (особенно электронные), которое может повлечь за собой их отказ.

В качестве примера приведём ограничения на утечки, установленные компанией на самолётах В-727 и В-737:

- 1 капля за 5 циклов перекадки штока привода для новых самолётов;
- 1 капля за 1 цикл для самолётов, нормально эксплуатируемых на воздушных авиалиниях.

Кроме того, допустимые утечки через уплотнения штока при статическом давлении могут быть приняты до величин, оговоренных в таблице 1.

Таблица 1. Пример допустимых утечек через уплотнения штока при статическом давлении на самолётах В-727 и В-737

Новый самолет	Нормальное эксплуатационное обслуживание
Видимой утечки нет на 90% уплотнений	1 капля за 10мин при подаче номинального или меньшего давления
1 капля за 10мин при подаче номинального или меньшего давления на 10% уплотнений	1 капля за 10мин – ремонта не требуется; от 1 капли за 10мин до 1 капли в минуту – проверка уплотнений при контрольном обслуживании

Допустимые нормы по внешним и внутренним утечкам обычно устанавливается компанией-производителем на основании своего опыта, обеспечения требований по надёжности ГСУ и необходимого ресурса.

Известно, что люфт существенно ухудшает динамическую чувствительность гидроприводов (ГП) и, в частности, люфт резинового кольца в уплотнении головки поршня гидродвигателя привода имеет место на большинстве конструкций ГП. Этот люфт неизбежен в уплотнении, т.к. объем канавки под кольцо с учетом допусков на изготовление канавки и кольца, набухания резины и ее термического расширения должен быть больше объема резинового кольца. Люфт минимизируется с помощью специальной конструкции уплотнительного узла (рис.5.).

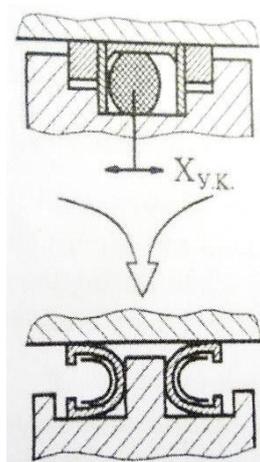


Рис.5.Пример конструкции уплотнительного узла головки поршня с люфтом (верхний рисунок) и без люфта (нижний рисунок) $X_{y,k}$ – перемещение уплотнительного кольца

5. Внутренние каналы (канализация) в корпусах элементов ГСУ.

Все каналы, выполняемые в корпусах элементов ГСУ, должны быть рассчитаны на высокое давление систем гидропитания. Если при установке агрегата на испытательном стенде или наземном техническом обслуживании в сливные каналы случайно будет пода-

но высокое давление, это может привести к разрушению канала или его уплотнений. Неправильное подключение напорного и сливного каналов может случиться даже, несмотря на разные штуцеры в гидроагрегате.

Все пересекающиеся гидравлические каналы, входящие в такие полости под давлением как гидроцилиндр или фильтр, должны быть наклонены под углом не менее 75° , чтобы избежать зон концентраций напряжений в местах пересечения. Там, где целесообразно, гидравлические связи внутри каналов должны быть выполнены через приёмные отверстия корпуса, путём сверления под углом, электроискровым прожигом гребешковым электродом и другими подобными методами. В этом случае количество втулок для прохода жидкости, служащих потенциальным источником утечек, которые нужно отводить в систему дренажа привода, сводится к минимуму.

При сложной канализации в корпусе гидропривода обработать все полости и коммуникационные каналы точно по чертежу иногда невозможно. По современной технологии изготовление корпусной детали привода начинается с создания её пластмассового макета (рис.6.), например, из оргстекла или другого прозрачного материала с тем, чтобы обрабатываемые места в корпусе были доступны для обследования. Целью последнего является нахождение слишком тонких стенок между каналами, чтобы выдержать нагрузку от давления рабочей жидкости, или каналов, которые могут разрушиться в случае нежелательных перетечек жидкости между дублированными гидросистемами и гидравлическими контурами.



Рис.6. Пример макета прозрачного пластикового корпуса золотникового устройства гидропривода с выполненными внутренними каналами (канализацией).

Острые кромки, возникающие в местах пересечения каналов или коллекторах, должны быть закруглены. В местах корпуса, где это невозможно выполнить, возникает концентрация напряжений. Сверлёные проходы должны контролироваться калибровоч-

ными пробками, а резьбовые каналы - от увода сверла. Если отклонения в размерах каналов выходят за пределы допусков, каналы подвергаются переделке.

Если резьба глубокая и с заусенцами, которую невозможно вычистить, компоновка каналов переделывается. Пересекающиеся сверления должны гарантировать пропускную способность, а глубина каналов - тщательно контролироваться, чтобы точки концов сверлений не выходили за пределы пересекающихся осей. В противном случае образуются глухие пазухи, служащие карманами для сбора загрязнений. Удалить из них металлическую крошку, стружку и заусенцы трудно даже ультразвуковой очисткой.

Конструирование канализации в корпусе должно проводиться с учётом размещения таких компонентов привода, как управляющие сервозолотники, электромагнитные и обратные клапаны, фильтры и термостаты, электрические разъёмы, трубопроводы и электрическая проводка.

Часть этих компонентов обычно располагают таким образом, чтобы облегчить сверление гидравлических проходов, но если привод, например, сдвоенный тандемный, подсоединён к нескольким гидросистемам, то для парирования отказов, связанных с односторонним нагружением давлением, требуется дополнительная изоляция гидросистем. Такого рода отказы возникают из-за распространения трещин в канализации корпуса гидроагрегата, что обычно классифицируется как «общая точка» в многоканальной ГСУ.

Основной золотник располагался над исполнительным гидроцилиндром для лучшего стравливания воздуха из последнего. На расположение золотникового гидрораспределителя в корпусе влияет также компоновка проводки управления привода. Отверстия для входа и выхода жидкости в гидроприводе должны выполняться недалеко друг от друга и отличаться по диаметру, чтобы исключить ошибку при подключении напорной и сливной гидромагистралей. В общем, сливное отверстие предпочтительнее выполнять в самой верхней части рассверленного каналами корпуса для самоотравливания воздуха при нормальной работе привода.

Такие компоненты привода как электромагнитные клапаны и электрогидравлические сервозолотники должны быть установлены в защищенных местах корпуса, где ответвления канализации будут препятствовать внешнему разрушению привода, когда привод или его подсоединительные элементы выходят за пределы рабочей зоны. Прокладка электропроводки между этими компонентами и штепсельными разъёмами должна исключать её повреждение. Прокладка электропроводки во внутренних каналах корпуса, пересекающихся под острыми углами, приводит к разрушению её изоляции острыми кромками в местах пересечения каналов. Каналы для электропроводки в корпусе привода должны быть достаточно большого поперечного сечения, чтобы пропустить все электропроводы и заполнить закрепителем, типа твердеющей эпоксидной смолы. Чем длиннее просверленные в корпусе проходы для электропроводки, тем большего диаметра они выполняются, чтобы текучий закрепитель смог достичь самой глубокой полости.

Внешняя электропроводка должна выходить из компонентов привода таким образом, чтобы при выводе на одну сторону агрегата предотвратить её сгибание и истирание.

Пучки электропроводки привода запрещается использовать в качестве ручки при подъёме агрегата. Кабель или электропроводка, выполненные из нескольких типов проводов, должны иметь общее экранирование. При размещении на приводе электрических разъёмов определяющим фактором является их доступность при эксплуатации и обслуживании. Гидравлический дренаж вблизи электрических разъёмов не допускается.

Перед окончательным завершением канализации корпуса и установкой туда компонентов привода, необходимо проверить габариты, чтобы гарантировать установку привода на СМО. Часто габариты привода с подсоединительными трубопроводами, шлангами и кабелями оказываются больше, чем размеры люка, через который привод устанавливается на место. Решение комплексных проблем монтажа и установки привода на СМО обычно проводится на макете в натуральную величину.

Корпус с системой просверленных и расточенных каналов и гнёзд, отверстиями входа и выхода жидкости, размещением внутренней жёсткой проводки и электропроводки, а также установочными приливами и отверстиями является наиболее сложно обрабатываемой частью всего привода. Корпус имеет больше полостей, резьбовых гнёзд, угловых проходов и других обрабатываемых мест, которые могут иметь неточности изготовления, чем любая другая деталь привода. Часто каналы выполняют в корпусе из алюминиевого сплава (если допускает прочность), наиболее лёгкого для обработки и, таким образом, самого экономичного. Допустимое отношение напряжений штампованной и литой деталей почти два к одному. Поэтому литые детали не предпочтительны.

Все соединяемые детали должны закрепляться так, чтобы не было люфтов под воздействием внутренних и внешних нагрузок или вибраций привода. Детали соединяются через резьбу, пайку с твердым припоем или другими методами при условии, что напряжения в соединении будут необходимого уровня. Резьбовые соединения деталей, несущих основные конструкционные нагрузки, должны иметь надёжную контровку в собранном положении. Контровка резьбовых соединений производится контровочной проволокой и другими утверждёнными способами. Контровочная проволока не должна применяться для резьбовых деталей, требующих сохранения точного положения или поворота, и в качестве стопорных устройств во внутренних полостях корпуса привода (агрегата). Отгибные и звездообразные стопорные шайбы, шайбы гровера также не рекомендуются к применению.

Головки устанавливаемых болтов и винтов должны смотреть вперед, вверх и вовнутрь места на СМО, где расположен гидроагрегат. Болты и винты, устанавливаемые головками вниз, должны контриться проволокой или другими средствами и удерживаться в положении установки независимо от гайки. Корончатые гайки со шплинтами имеют ограничения по применению, точнее не рекомендуются к применению. Конические штифты и штифты, удерживаемые трением, пазовые штифты и т.п. не должны применяться без дополнительных средств крепежа. Пружинные штифты нежелательны для применения в приводах. Гайки с диаметральными сверлёными каналами под шплинты не должны применяться.

6. Конструктивные мероприятия по предупреждению отказов гидроприводов, ГСУ и СМО в целом

Конструктивные мероприятия по предупреждению отказов гидроприводов, ГСУ и СМО в целом в первую очередь можно выделить следующие:

- многократное дублирование путей передачи нагрузки (Рис.7.), электрических цепей управления (резервирование механизмов и цепей управления) и систем энергопитания ГСУ, обеспечивающих сохранение управление СМО в случае возникновения расчетных единичных отказов и их сочетаний, включая взрыв гидроаккумуляторов (при их наличии на СМО) и нелокализованный разлёт масс силовой установки или двигателя (при их наличии на СМО), широкое применение секционирования органом управления СМО (Рис.8.)

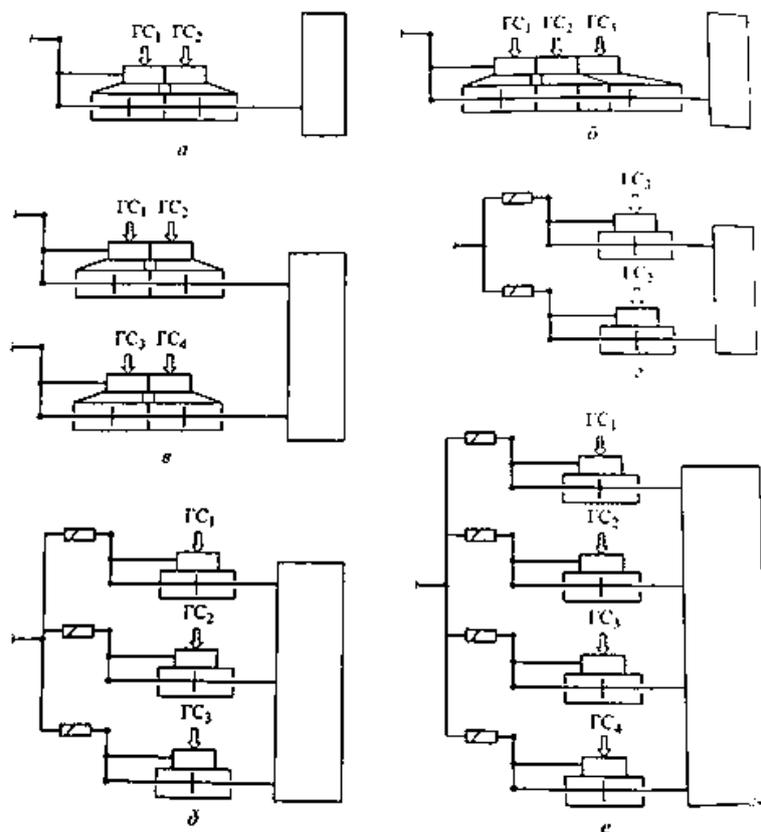


Рис.7. Пример выполнения резервированных гидроприводов

а-сдвоенный тандемный привод; б-строенный тандемный привод; в-двухрядная установка тандемных приводов; г-двухрядная установка одноканальных приводов; д-трехрядная установка одноканальных приводов; е-четырёхрядная установка одноканальных приводов

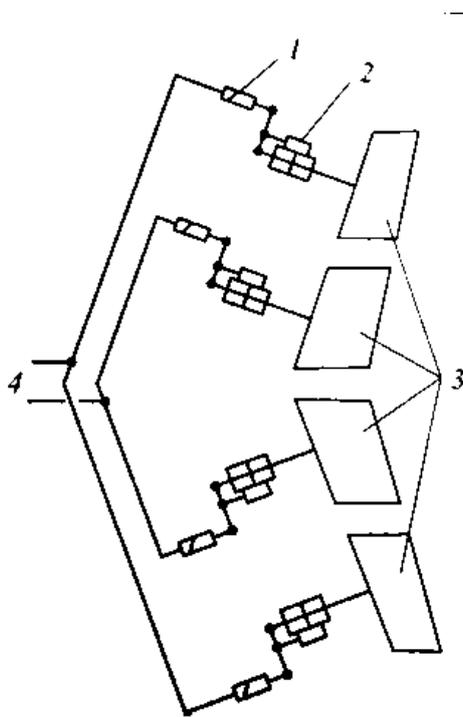


Рис.8. Пример применения метода секционирования рабочего органа СМО 1 – пружинная тяга ограничителя усилий; 2 – гидропривод; 3 – секции органа управления СМО; 4 – механическая проводка

Применение резервированных местных ГС в дополнение к централизованным может существенно упростить выполнение требований по сохранению управляемости СМО при заданных отказах;

- учёт факторов перенапряжения и перегрева конструкции привода и ГСУ [6];
- применение апробированных крепежных элементов (самоконтрищихся гаек, стопорных болтов и т.п.), дублирования крепежных элементов и их контровки;
- правильный выбор материалов и методов обработки поверхностей (особенно внутренних) привода и ГСУ;
- надежная смазка нагруженных подшипников. Применение защитных крышек (экранов);
- установка очистительных колец на штоках приводов для снятия грязи и ледяного покрытия.
- контроль загрязненности рабочей жидкости и применение надлежащих гидравлических фильтров, а также установка в конструкцию гидроприводов и ГСУ гидравлических фильтров от монтажных загрязнений, которые в эксплуатации не обслуживаются;
- синхронизация движений многоканальных приводов и механизмов для минимизации взаимонагрузений;
- конструирование элементов привода и ГСУ, исключающих неправильную сборку и монтаж;

- минимизировать количество соединений в гидравлических линиях ГС, шире применяя комплексирование элементов ГСУ в моноблочной компоновке;
- минимизировать количество шарнирных соединений в механических элементах привода.
- для достижения необходимой точности и чувствительности управления целесообразно во внутренней проводке управления золотником гидропривода применять шаровые шарниры и пружины, под действием которых выбираются люфты;
- регулировочные устройства должны быть хорошо спрятаны и уплотнены внутри привода и не иметь доступа для обслуживающего персонала;
- конструкция привода не должна требовать каких-либо действий обслуживающего персонала (регулировок, замены фильтров, доливки масла и т.п.) на протяжении межремонтного срока службы, но должна обеспечивать лёгкий доступ для проведения регламентных осмотров в соответствии с инструкцией по эксплуатации СМО;
- каждый гидропривод и связанная с ним механическая проводка управления должны располагаться так, чтобы предотвратить их применение в качестве ручек или ступенек. Все компоненты привода, включая механическую проводку, должны быть ориентированы и защищены так, чтобы предотвратить их загрязнение;
- должны быть приняты меры предосторожности, чтобы избежать заклинивания проводки и гидроприводов при обледенении, загрязнении, засорении инородными предметами, оставленными (забытыми инструментами или появившимися при разрушении, а также не допускать заполнения водой полых труб и конструкций водой из атмосферных осадков, замерзание которой обычно приводит к разрушению этих элементов;
- резервирование механизмов и систем управления, дистанционной передачи сигналов, электронных блоков и систем энергоснабжения;
- исключение внутренних подрезов при механической обработке деталей и их жёсткий контроль;
- исключение недопустимо тонких перемычек (перегородок) между внутренними каналами (каналами канализации) в моноблоках при механической обработке деталей и их жёсткий контроль;
- дублирование крепёжных элементов и их контролки;
- правильный выбор материалов и методов обработки привода и ГСУ;
- синхронизация движений приводов и механизмов для минимизации противодействующих сил и взаимонагружения резервированных приводов;
- конструирование частей привода, исключая неправильную сборку.

7. Краткие рекомендации

Обеспечение выше перечисленных требований при проектировании ГС и ГСУ СМО возможно только путём поэлементного и общего резервирования, т.е. выполнение ГС и ГСУ многоканальными при этом так называемые «общие точки» для резервных каналов должны отсутствовать. Поэтому необходимо ввести резервирование с целью обеспечения

заданной безопасности СМО с учётом возникновения одиночных отказов и сочетаний расчетных отказов (механических, электрических, гидравлических):

- целесообразно, например, по ГСУ мобильных объектов (МО) обеспечить её резервирование путём обеспечения безопасной работы МО при полном отказе системы подвески одной из тележек, возложив задачу подвески МО на оставшиеся системы подвески других тележек, обеспечив при этом необходимую центровку и балансировку МО в целом;

- по системе руления колёс МО обеспечить полное и независимое резервирование системы руления колёс;

- применить резервирование гидропитания ГСУ, разделив источники гидравлической энергии по независимым каналам ГС, которые поканально подключить к соответствующим каналам ГСУ.

- для крупных СМО целесообразнее применить принцип местных ГС для каждой отсека СМО и обеспечивающих гидропитанием все системы, расположенные в данном отсеке СМО. Целесообразно также каждую местную ГС выполнить как минимум 2-х канальной. Установочная мощность должна соответствовать потребляемой суммарной мощности потребителей, подключённых к местной ГС. При использовании местных ГС установочная мощность, объём гидробаков, длина трубопроводных магистралей местных ГС будут меньше, чем для одной централизованной ГС, при этом повышение надёжности и безопасности СМО будет существенно;

- использовать пассивную систему контроля ГС и ГСУ с выводом необходимой информации в кабину операторов, включая необходимые подсказки операторам при возникновении не штатных ситуаций.

Заключение

1. Обеспечение требований по надёжности и безопасности при проектировании, изготовлении, эксплуатации ГС и ГСУ СМО:

- возможно только путём поэлементного и общего резервирования, т.е. выполнение ГС и ГСУ многоканальными при этом так называемые «общие точки» для резервных каналов должны отсутствовать. Поэтому необходимо ввести резервирование с целью обеспечения заданной безопасности СМО с учётом возникновения одиночных отказов и сочетаний расчетных отказов (механических, электрических, гидравлических);

- возможно только путём многократного дублирования путей передачи нагрузки, электрических цепей управления (резервирование механизмов и цепей управления) и систем энергопитания ГСУ, обеспечивающих сохранение управления СМО в случае возникновения расчетных единичных отказов и их сочетаний, включая взрыв гидроаккумуляторов (при их наличии на СМО) и нелокализованный разлёт масс силовой установки или двигателя (при их наличии на СМО). Применение резервированных местных ГС [8,9] в дополнение к централизованным может существенно упростить выполнение требований по сохранению управляемости и работоспособности СМО при заданных отказах;

- возможно только путём применения апробированных конструкторских решений при четком выполнении всех технологических и эксплуатационных указаний, а также выполнения конструкции ГСУ, минимизирующей влияние (мало или нечувствительной к влиянию) «человеческого фактора» на всех этапах создания и эксплуатации СМО;

2. Обязательно выделение особо опасных структурных звеньев (например, переключаемых стрелок на железнодорожных путях, гидроаккумуляторов и т.п.), отказ которых приводит к тяжелым последствиям, присвоения им категории особо опасных звеньев с необходимостью полного или поэлементного резервирования элементов этих звеньев и двойного-тройного контроля независимыми службами или системами всех конструкторских, технологических и эксплуатационных операций, касающихся этих звеньев.

3. Надёжность ГСУ СМО и безопасность ее работы целесообразно приравнять (или быть выше в зависимости от назначения СМО) к надёжности и безопасности современных аэробусов [1,2,4,5]. Крайне целесообразно вести проектирование, изготовление, эксплуатацию ГСУ СМО в соответствии с хорошо отработанными и прошедшими длительную проверку на огромном парке воздушных судов Авиационными правилами АП25 [1] и Руководством по предотвращению авиационных происшествий ИКАО [2]. Это позволит снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций, а в ряде случаев даже избежать появления тяжелых катастроф на СМО в будущем.

Список литературы

1. Авиационные правила АП-25. Нормы лётной годности транспортной категории. Л.: ЛИИ им. М.М. Громова, 1994. 235 с.
2. Руководство по предотвращению авиационных происшествий ИКАО, 1984. 150 с.
3. Единые нормы лётной годности гражданских транспортных самолётов стран членов СЭВ. М.: издательство ЦАГИ, 1985. 470 с.
4. Шумилов И.С. Системы управления рулями самолётов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 469 с.
5. Шумилов И.С. Авиационные происшествия. Причины возникновения и возможности предотвращения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 383 с.
6. Шумилов И.С. Прочность гидравлических систем управления самолетом// Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. вып . №4(16). С.24. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hydro/690.html>
7. Шумилов И. С., Чурсова Л. В., Седова Л. С. Рабочие жидкости авиационных гидросистем, их свойства//Наука и образование. Электронный журнал. 04, апрель 2014. С. 160-199.
8. DOI: [10.7463/0414.0705577](https://doi.org/10.7463/0414.0705577)

9. Шумилов И. С. Рулевые приводы с автономным гидроснабжением (АРП) для магистральных самолётов//Наука и образование. Электронный журнал. 08 август 2014. С. 139-161.
10. DOI: [10.7463/0814.0724446](https://doi.org/10.7463/0814.0724446)
11. Шумилов И. С. Возможные пути снижения массы системы управления рулями самолёта//Наука и образование. Электронный журнал. 02 февраля 2013. С. 111-150.
12. DOI: [10.7463/0213.0531715](https://doi.org/10.7463/0213.0531715)