

УДК 62.192

А.Н. МАЩЕНКО¹, В.А. ТКАЧЕВ¹, А.В. ДЕМЧЕНКО², Ю.Ф. ДАНИЕВ²¹Государственное конструкторское бюро "Южное", Украина²Институт технической механики НАН и НКА Украины, Украина

НАДЕЖНОСТЬ АГРЕГАТОВ АВТОМАТИКИ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОДАЧИ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА

Рассмотрены основные типы агрегатов автоматики пневмогидравлических систем (ПГС) ракет-носителей (РН) и космических аппаратов (КА) многоразового срабатывания. На основе анализа их функционирования в составе систем подачи компонентов топлива определены основные виды отказов. Приведены методы выявления отказов агрегатов автоматики и способы парирования их последствий, направленные на обеспечение надежной эксплуатации агрегатов автоматики в составе ПГС (ЖРС) РН и КА. Сформулированы основные требования по надежности, предъявляемые к типовым агрегатам автоматики ПГС РН и КА. Приведены соотношения для оценки задаваемых показателей надежности на этапе проектирования. Определены контролируемые параметры агрегатов автоматики различных типов.

агрегат автоматики, пневмогидравлическая система, надежность, безотказность, долговечность, вероятность безотказной работы

Введение

Надежность ракетно-космической техники (РКТ) определяется показателями надежности различных по характеру функционирования элементов и систем, входящих в изделие. При выборе того или иного метода оценки соответствия установленным требованиям по надежности необходимо учитывать конструктивные и функциональные особенности элемента или системы. В этом плане рассматриваемые в статье вопросы, связанные с особенностями обеспечения надежности агрегатов автоматики пневмогидравлических систем питания двигательных установок РКТ, являются актуальными.

Вопросы обеспечения надежности агрегатов автоматики ПГС исследовались во многих работах отечественных и зарубежных специалистов [1 – 4]. Однако в них не учитывается специфика функционирования агрегатов автоматики в составе современных изделий РКТ.

1. Постановка задачи

В пневмогидравлических системах двигательных установок ракетно-космической техники применяют

агрегаты автоматики одноразового и многоразового действия.

подавляющее большинство агрегатов автоматики одноразового действия представляют собой устройства, которые срабатывают от газов, получаемых при сгорании пиротехнического состава. При этом они открывают или закрывают расходные магистраль, трубопроводы, емкости с компонентами топлива или сжатыми газами. К таким агрегатам относятся пироклапаны, пиромембраны, мембранные устройства, устройства разделения, детонирующие удлиненные заряды и т.п. Такие агрегаты достаточно герметичны, а их безотказность практически полностью определяется целостностью электрической цепи пиропатрона и стабильностью пиротехнического состава. Их высокое значение вероятности безотказной работы ($P \geq 0,9$) определяется и подтверждается экспериментальной отработкой.

Отказы этого типа агрегатов автоматики, как правило, устраняются при экспериментальной отработке и во время эксплуатации в составе пневмогидравлических систем РН и КА не наблюдаются. Требования по долговечности к этой группе клапанов обычно не задаются.

В настоящей статье агрегаты автоматики данного типа не рассматриваются.

К агрегатам автоматики многоразового действия относятся редукторы давления, пневмоклапаны, обратные, предохранительные и электроклапаны. Основное назначение этих агрегатов автоматики в составе ПГС РН и КА состоит в управлении подачей рабочего тела (газа или жидкости) или поддержания его некоторых параметров (давления, расхода). Принцип работы, конструкция, применяемые материалы и основные требования, предъявляемые к агрегатам автоматики ПГС РН и КА, во многом идентичны.

В то же время специфика задач, выполняемых РН и КА, накладывает целый ряд различий на соответствующие агрегаты автоматики этих изделий. Наиболее общими отличиями, с точки зрения обеспечения надежности агрегатов, функционирующих на КА, от соответствующих на РН, могут считаться: повышенная герметичность при длительном пребывании в условиях космического пространства; повышенные требования по ресурсу. Кроме того, имеются отличия в применяемых материалах и смазках, обусловленные влиянием факторов космического пространства (высокий вакуум, большой диапазон термоциклических нагрузок и др.), а также в ограничениях по энергопотреблению агрегатов, которые функционируют в составе космических аппаратов.

На этапе проектирования к рассматриваемым агрегатам автоматики предъявляют требования по надежности, герметичности, весу, быстродействию, габаритам и другие.

Решение задачи обеспечения надежности на этапе проектирования, кроме выбора конструкции и материалов, определения геометрических размеров агрегата и его узлов, включает в себя: обоснование требований по надежности и оценку заданных показателей, подтверждение требуемых значений экспериментальной отработкой.

Сформулируем основные требования по надежности и рассмотрим зависимости для определения показателей надежности различных типов клапанов многоразового действия.

2. Основные типы агрегатов автоматики и требования, предъявляемые к их надежности

2.1 Показатели надежности агрегатов автоматики ПГС РН и КА

Основными показателями надежности агрегатов автоматики ПГС РН и КА считаются показатели безотказности и долговечности. Безотказность определяется вероятностью безотказной работы в периоды подготовки к пуску и полета

$$P(t) = \Pr\{v_H(t_1) < v(t_1) < v_B(t_1), 0 \leq t_1 \leq t\}, \quad (1)$$

где $\Pr\{\}$ – вероятность события $\{\}$; v_H, v_B – предельные по условиям работоспособности значения параметров.

Если известно распределение наработки до отказа $F(t)$ или его плотность $f(t)$, то выражение (1) имеет следующий вид:

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau = 1 - F(t). \quad (2)$$

В некоторых случаях безотказность определяется средней наработкой до отказа.

Долговечность агрегата в составе пневмогидравлических систем ракетных носителей определяется количеством открытий и закрытий (числом срабатываний) или суммарной наработкой. Ресурсные характеристики рассматриваемых элементов в составе пневмогидравлических систем космических аппаратов определяются суммарной наработкой или календарной продолжительностью эксплуатации агрегата.

Продолжительность эксплуатации рассматриваемых агрегатов может определяться гамма-процентным ресурсом (гамма-процентным сроком

службы) t_γ или средним ресурсом (средним сроком службы) T .

Под гамма-процентным ресурсом понимается наработка, в течение которой агрегат не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ . Он определяется как корень уравнения [5]:

$$F(t_\gamma) = 1 - 0,01\gamma$$

или

$$\int_{t_\gamma}^{\infty} f(t) dt = 0,01\gamma, \quad (3)$$

где $F(t)$, $f(t)$ – соответственно функция и плотность распределения ресурса агрегата автоматики.

Средний ресурс вычисляют по известной формуле

$$T = \int_0^{\infty} tf(t) dt. \quad (4)$$

Обычно в состав требований по надежности проектируемых агрегатов автоматики ПГС РН включают количественные значения вероятности безотказной работы и число срабатываний, а для агрегатов, комплектующих КА длительного функционирования, в дополнение к этим требованиям необходимо задавать значения по гамма-процентному или среднему ресурсу. Кроме того, в эти требования включают критерии отказов агрегатов автоматики при функционировании в составе пневмогидравлических систем ракетных носителей или космических аппаратов.

2.2 Основные виды отказов, требования по надежности и зависимости для определения показателей

На основе анализа результатов эксплуатации агрегатов автоматики многоразового действия в составе ПГС различных изделий РКТ установлено, что наиболее возможными видами отказов могут быть: негерметичность, несоответствие значений давления на выходе на различных режимах, несрабатывание при подаче управляющего давления и т.п. С учетом

этих данных при проектировании ПГС применяют различные схемные решения, направленные на парирование отказов этих видов. Кроме того, на всех этапах жизненного цикла агрегата выполняются работы по выявлению их отказов при проведении пневмо и электроиспытаний, в которых проверяются соответствие значений параметров, определяющих работоспособность установленным требованиям.

В табл. 1 приведены основные виды отказов агрегатов автоматики и указаны методы их парирования в составе ПГС.

Таблица 1

Виды отказов агрегатов автоматики, методы их парирования в составе ПГС

Агрегат автоматики	Вид отказа	Парирование отказа
Редуктор давления	давление на выходе на различных режимах не соответствует заданным пределам	схемные решения
	негерметичность	установка обратного клапана за редуктором
Пневмоклапан	негерметичность	установка сигнализаторов
	несрабатывание при подаче управляющего давления	схемные решения
Обратный клапан	Негерметичность	резервирование
Предохранительный клапан	Несрабатывание при давлении настройки	установка дополнительных агрегатов автоматики
	Негерметичность	схемные решения
Электроклапан	Нарушение функционирования электрических цепей	резервирование
	Негерметичность	установка обратного клапана за электроклапаном

Проведенный анализ позволяет сформулировать основные требования к различным типам агрегатов автоматики.

Редуктор давления служит для понижения давления газа и обеспечения в установленных пределах постоянства давления на выходе при переменном расходе газа и понижении давления на входе. Рассматриваемая функция реализуется благодаря взаимодействию двух конструктивных элементов: упругого узла (пружина, подпружиненный сильфон и т.п.) и пары «седло-затвор».

Анализ данных о результатах эксплуатации, редукционных клапанов показывает, что возможными видами их отказов могут быть:

- несоответствие значений давления на выходе на различных режимах, установленным в техническом задании;
- негерметичность.

Первый вид отказа может считаться критичным. Второй вид отказа в составе эксплуатируемых ПГС выявляется пневмоиспытаниями до этапа подготовки к пуску и может парироваться установкой за редуктором обратного клапана соответствующей настройки.

В соответствии с изложенным, основные требования, предъявляемые к редукторам давления, включают в себя:

- высокую точность настройки и обеспечение требуемого значения выходного давления (поддержание давления газа на выходе в достаточно узком диапазоне);
- высокую герметичность и отсутствие роста статического давления;
- обеспечение необходимого ресурса.

Следовательно, основными контролируемыми параметрами работоспособности редукторов давления, при оценке и подтверждении надежности считаются: давление на выходе из редуктора на разных режимах и герметичность.

Таким образом, если диапазон давления на выходе из редуктора обозначить как

$$x_1 \in [x_{1H}; x_{1B}],$$

а величину негерметичности – x_2 при допустимом значении x_{2B} , то выражение для определения безотказности рассматриваемого агрегата автоматики будет иметь вид

$$P = P_1 \cdot P_2, \quad (5)$$

где

$$P_1 = P\{x_{1H} \leq x_1 \leq x_{1B}\}; \quad (6)$$

$$P_2 = P\{x_2 \leq x_{2B}\}. \quad (7)$$

При известных плотностях распределений $f(x)$ параметров x_1 и x_2 зависимости (6), (7), соответственно будут следующими:

$$P_1 = \int_{x_{1H}}^{x_{1B}} f(x_1) dx_1; \quad (8)$$

$$P_2 = \int_{-\infty}^{x_{2B}} f(x_2) dx_2. \quad (9)$$

Долговечность редуктора давления определяется количеством открытий и закрытий (числом срабатываний) агрегата в составе ПГС РН, длительностью функционирования или суммарной наработкой, календарной продолжительностью эксплуатации агрегата в составе ПГС КА. Следует отметить, что суммарная продолжительность времени работы редукторов, комплектующих двигательные установки современных КА, существенно превосходит аналогичный показатель газовых редукторов ПГС РН. Продолжительность эксплуатации рассматриваемого агрегата автоматики определяется гамма-процентным ресурсом (гамма-процентным сроком службы) t_γ или средним ресурсом (средним сроком службы) T , которые рассчитываются соответственно по формулам (3) или (4).

В ПГС РН и КА применяются агрегаты автоматики, в которых управление открытием и закрытием

производится дистанционно подачей сжатого газа. В общем случае, их называют пневмоклапанами. Пневмоклапаны применяются для управления потоком рабочего тела, когда из-за больших проходных сечений установка электропневмоклапанов нецелесообразна, а также в случаях работы при низких температурах рабочего тела, если оно обладает агрессивными свойствами, когда применение электрогидроклапанов невозможно. В эту группу входят также клапаны, получившие дополнительное название по функциональному признаку – дренажные, перекрывные, заправочно-сливные клапаны, клапаны перелива и клапаны слива.

Пневмоклапаны всех типов должны выполнять следующие функции: открываться (закрываться) при подаче или сбросе управляющего давления за заданное время; быть герметичным в местах уплотнения тарели по седлу по компоненту и по газу; быть герметичным по управляющей полости по газу. В дополнение к этим функциям к некоторым пневмоклапанам предъявляется требование сигнализации об открытии (закрытии) клапана путем срабатывания электрических контактов и по величине времени срабатывания.

Функция открытия (закрытия) клапана реализуется конструктивными элементами, примыкающими к перемещающемуся поршню. Такими элементами являются: поршень, резиновые кольца, сильфоны, манжеты, шток, затвор, пружина, направляющие поверхности. Входным параметром является давление газа в управляющей полости, выходным параметром является качественно оцениваемая характеристика «открыт» или «закрыт». Эта функция обеспечивается превышением усилий, способствующих перемещению тарели в определенном направлении, над препятствующими усилиями. Как правило, эти усилия и параметры, от которых они зависят, поддаются расчету и определению по технической документации. Для предотвращения возможности образования надиров на трущихся поверхностях, за-

клинивания и разрушения конструктивных элементов применяются конструкторские решения, направленные на повышение надежности пневмоклапанов. К таким решениям относятся: задание диаметрального зазора в трущихся сопрягаемых поверхностях по определенному классу точности; полирование и алмазное выглаживание трущихся сопрягаемых поверхностей; защита управляющих полостей фильтрами от попадания инородных частиц; в парах трения поверхностей материал одной из них выбирают большей твердости; наибольшие касательные напряжения пружин выбирают в соответствии с действующей нормативной документацией; применяются материалы, рекомендованные для использования их в компонентах топлива и их парах; защита фторопластовыми кольцами резиновых колец с целью предотвращения их износа в процессе работы при высоком давлении.

Функция герметичности в местах уплотнения тарели клапана по седлу реализуется парой «затвор-седло». Это обеспечивается высоким качеством уплотняющих поверхностей, выбором удельных давлений и погонных нагрузок в диапазоне значений, которые апробированы на аналогичных конструкциях серийных агрегатов автоматики.

Функция герметичности по управляющей полости реализуется резиновыми кольцами, манжетами и сильфонами и обеспечивается выбором относительного сжатия и посадочного места резиновых колец в соответствии с нормативной документацией, применением материалов, стойких к работе в среде компонентов топлива и их паров.

Функция сигнализации об открытии (закрытии) пневмоклапана реализуется сигнализаторами путем замыкания (размыкания) контактов.

Анализ данных об эксплуатации пневмоклапанов в составе ПГС показывает, что основные виды отказов – негерметичность и несрабатывание при подаче управляющего давления. Оба отказа считаются критичными. Первый из них удается обнару-

жить при проведении пневмоиспытаний до этапа подготовки к пуску. Для его своевременного обнаружения, в том числе и на этапе подготовки к пуску, в состав пневмоклапана вводят электрические сигнализаторы открытия (закрытия). Отказ сигнализаторов, при условии выполнения остальных функций, не приводит к катастрофическим отказам на этапах подготовки к пуску и полета изделий РКТ. Несрабатывание клапана при подаче управляющего давления на этапе подготовки к пуску, как правило, не является критичным, так как возможно аварийное прекращение пуска (АПП) и парирование отказа различными способами. Проявление отказа этого типа клапана во время полета является критичным.

В соответствии с изложенным основные требования, предъявляемое к этим клапанам – обеспечение высокой герметичности, срабатывание при заданном управляющем давлении. В соответствии с этим контролируемые параметрами работоспособности пневмоклапанов, при оценке и подтверждении надежности, считаются: негерметичность мест уплотнения и давление начала открытия (закрытия), а в некоторых случаях, в дополнение к ним – время срабатывания и работа электрических сигнализаторов.

Вероятность безотказной работы P этого типа клапанов определяется структурной $P_{СТР}$ и параметрической составляющими $P_{ПАР}$:

$$P = P_{СТР} \cdot P_{ПАР}. \quad (10)$$

Структурная составляющая надежности пневмоклапана характеризует вероятность его срабатывания при подаче управляющего давления, а также работоспособность входящих в его состав узлов и сборочных единиц. Она определяется безотказной работой сборочных деталей, при разработке которых проводят необходимые расчеты, учитывающие свойства применяемых материалов и разбросы их характеристик, условия работы и др., а также принимают во внимание данные об отработке и

эксплуатации ранее разработанных элементов автоматики [6].

Параметрическая составляющая характеризуется вероятностью выполнения заданных условий работоспособности. Такими условиями, как отмечалось выше, могут быть следующие: величина негерметичности должна быть в допустимых пределах; давление начала открытия (закрытия) не должно превышать требуемого значения; и т.п. Выражения для определения вероятностей выполнения этих условий имеют вид, аналогичный (6), (7) и составляются с учетом специфики каждого агрегата автоматики.

Требования к долговечности пневмоклапанов и соответствующие показатели определяются так же, как и для редукторов давления.

Обратные клапаны служат для предотвращения обратного потока газа или жидкости в магистрали и обеспечения герметичности системы после закрытия клапана. В соответствии с этим в составе ПГС подачи компонентов топлива к двигательным установкам РН и КА они выполняют следующие функции: открываются (закрываются) при подаче (сбросе) давления рабочей среды на входе клапана; обеспечивают герметичность мест уплотнения затвора по седлу, не допуская обратного перетекания рабочей среды.

Функция открытия (закрытия) реализуется подвижными конструктивными элементами: затвором, пружиной, штоком. Эта функция обеспечивается так же, как и в конструкции пневмоклапана, превышением усилий, способствующих открытию (закрытию) клапана над противодействующими усилиями. Для предотвращения заклинивания трущихся поверхностей и повышения надежности обратных клапанов предусматриваются методы, аналогичные рассмотренным выше.

Функция герметичность мест уплотнения затвора по седлу реализуется конструктивной парой «затвор-седло» и обеспечивается усилием пружины, выбранной таким образом, чтобы развиваемое

удельное давление в месте уплотнения затвора по седлу находилось в допустимом диапазоне, который определяется из аналогичных конструкций серийных клапанов.

Анализ данных о результатах эксплуатации обратных клапанов показывает, что основной вид отказа – негерметичность. Этот отказ считается критичным, однако, его удается обнаружить при пневмоиспытаниях до этапа подготовки к пуску. Для парирования отказа в ПГС применяется резервирование, то есть дополнительная установка обратных клапанов.

Требования по надежности, предъявляемые к этим клапанам, аналогичны соответствующим требованиям, которые задаются к пневмоклапанам.

Для защиты различных емкостей РН и КА от действия давлений, превышающих по величине допустимые значения на топливных баках, в системах наддува и пневмосистемах устанавливаются предохранительные клапаны.

Функции этих клапанов состоят в следующем. Они должны предохранять емкости от разрушения внутренним избыточным давлением, открываясь и закрываясь при достижении в емкости давления настройки. Кроме того, они должны обеспечивать герметичность в местах уплотнения затворов по седлам в закрытом положении.

Первая функция реализуется перемещением подвижных элементов конструкции: затворов главного и управляющего клапанов, штоков, регулировочных и запорных пружин, деформацией сильфонов, мембран. Получающаяся в результате перемещения дросселирующая щель позволяет сбросить из емкостей избыточное давление паров продукта с необходимым секундным расходом, предупреждая возможное разрушение емкостей. Обеспечение этой функции достигается соответствующим выбором давления настройки предохранительного клапана, проведением всесторонних расчетов конструктивных элементов в соответствии с действующей нор-

мативной документацией, применением материалов, смазок, стойких к рабочим средам и др. Процесс открытия и закрытия затворов происходит в состоянии силовых воздействий, близких к состоянию равновесия. Поэтому структурную составляющую надежности предохранительных клапанов обычно предполагают близкой к единице ($P_{СТР} \approx 1$).

Функция герметичности реализуется конструктивной парой «затвор-седло» и достигается прижатием затвора к седлу запорной пружины, выбранной таким образом, чтобы обеспечивалась погонная нагрузка в уплотнительных поверхностях в установленном диапазоне, который определяется по результатам эксплуатации аналогичных узлов серийных агрегатов автоматики.

Анализ данных о результатах эксплуатации предохранительных клапанов показывает, что основными видами их отказов могут быть несрабатывание при давлении настройки и негерметичность. Оба отказа предохранительных клапанов в составе ПГС считаются критичными, однако их удается обнаружить при пневмоиспытаниях до этапа подготовки к пуску. Частично парировать первый вид отказов можно установкой резервных клапанов. Парирование второго вида отказа в составе ПГС проблематично.

Таким образом, требования по надежности, предъявляемые к этим клапанам, и соответствующие расчетные соотношения аналогичны соответствующим требованиям, которые приведены для редукторов давления, обратных и пневмоклапанов.

В ПГС двигательных установок РН и КА широко применяются электроклапаны. Электроклапаны – устройства, состоящие из электромагнитов и механических исполнительных органов, объединенных для совместного выполнения определенной задачи. Они предназначены для управления потоками жидкости или газа по электрическим сигналам, которые преобразуются в механическую работу по переме-

щению запирающего устройства. В зависимости от рода рабочего тела различают электропневмоклапаны и электрогидроклапаны.

Электропневмоклапаны должны выполнять следующие функции: открываться (закрываться) при подаче (снятии) напряжения на электромагнит при поданном давлении сжатого газа на вход клапана; обеспечивать герметичность в местах уплотнения клапанов по седлам; быть герметичными по корпусу.

Функция открытия (закрытия) реализуется конструктивными элементами: якорь-электромагнит, шток-электромагнит, затвор-седло, пружинами, манжетами. Эта функция обеспечивается превышением усилия, способствующего движению подвижных элементов в определенную сторону над препятствующими усилиями.

Функции герметичности мест уплотнения клапанов по седлам и корпусу обеспечиваются конструктивными решениями, перечисленными выше по другим агрегатам автоматики.

Анализ данных об эксплуатации электроклапанов в составе ПГС, показывают, что основными видами их отказов могут быть нарушения функционирования электрических цепей, негерметичность, превышение времени срабатывания (открытия, закрытия) заданного значения. Отказы, связанные с нарушениями функционирования электрических сетей при работе в составе ПГС считаются критичными, однако их удается выявить во время электроиспытаний до этапа подготовки к пуску. Негерметичность также считается критичным отказом. Частично отказы этого вида можно выявить при пневмоиспытаниях до этапа подготовки к пуску, однако при последующих срабатываниях клапанов во время подготовки к пуску и полета они могут наступить. Вероятность наступления отказа увеличивается при воздействии паров агрессивных компонентов топлива на уплотняющие элементы, например при отложенном пуске, когда заправленное изделие продолжительное время находится на старте или при

многократном включении двигательной установки последней ступени РН или КА. С целью уменьшения воздействия паров компонентов топлива и парирования этого вида отказа в ПГС за электропневмоклапанами со стороны топливных отсеков устанавливаются обратный клапан. Отказы, связанные с превышением времени срабатывания в ряде случаев не считаются критичными.

Таким образом, основные требования, которые предъявляют к электроклапанам, включают: обеспечение герметичности в подвижных и неподвижных соединениях; обеспечение заданного ресурса; обеспечение заданного времени срабатывания; обеспечение минимального энергопотребления. В соответствии с этим контролируемые параметрами работоспособности электроклапанов, при оценке и подтверждении надежности, считаются: негерметичность мест уплотнения, время срабатывания, а в некоторых случаях, в дополнение к ним – напряжение в момент начала движения подвижных элементов клапана.

Под временем срабатывания электроклапана понимают время от момента подачи или снятия напряжения с обмотки электромагнита до момента совершения клапаном полного хода. Основными составляющими времени срабатывания в общем случае являются: время срабатывания электромагнита τ_1 на открытие (закрытие); время τ_2 заполнения (опорожнения) полости управляющего давления до момента начала движения; время движения клапана τ_3 при открытии (закрытии). Таким образом, время на открытие (закрытие) можно записать в виде следующей суммы:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3.$$

Вероятность безотказной работы электроклапана, так же как и рассмотренных выше, определяется структурной и параметрической составляющими из соотношения (10). Структурная составляющая характеризует вероятность выполнения функции от-

крытия (закрытия) клапана. Параметрическая составляющая надежности определяет вероятность нахождения контролируемых параметров работоспособности в установленных пределах выражением вида

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3, \quad (11)$$

где P_1 (P_2) – вероятность того, что время открытия (закрытия) клапана при подаче (снятии) напряжения на электромагнит не превысит требуемого; P_3 – вероятность того, что негерметичность клапана не превысит заданной величины.

Зависимости для вычисления вероятностей P_1, P_2, P_3 могут быть записаны в виде, аналогичном (6), (7).

На этапе проектирования отказы агрегатов автоматики выявляются проведением автономных испытаний, в которых проверяются соответствие значений контролируемых параметров установленным требованиям. По данным о фактических значениях параметров и их допустимым пределам можно оценить параметрическую составляющую вероятности безотказной работы агрегатов автоматики и другие показатели надежности.

В табл. 2 приведены основные контролируемые параметры агрегатов автоматики ПГС РН и КА, определяющие параметрическую составляющую вероятности их безотказной работы.

После выявления отказов проводятся мероприятия по их устранению.

На последующих этапах разработки и экспериментальной отработки, а также при изготовлении и эксплуатации отказы агрегатов автоматики выявляются проведением различных испытаний ПГС, топливных систем РН или жидкостных реактивных систем (ЖРС) КА и всего изделия в целом.

При выявлении отказа проводится доработка агрегата автоматики, и принимаются решения о парировании его последствий различными способами.

Как отмечалось выше, такими способами могут быть резервирование, различные схемные решения, позволяющие дублировать одну или несколько функций агрегата автоматики и т.п.

Таблица 2

Контролируемые параметры агрегатов автоматики ПГС РН и КА, определяющие вероятность их безотказной работы

Агрегат автоматики	Параметры
Редуктор давления	Давление на выходе из редуктора на разных режимах; негерметичность.
Пневмоклапан	Негерметичность мест уплотнения; давление начала открытия (закрытия); время открытия (закрытия); срабатывание электрических контактов.
Обратный клапан	Негерметичность по седлу; давление открытия (закрытия).
Предохранительный клапан	Давление настройки; негерметичность.
Электроклапан	Негерметичность мест уплотнения; время открытия (закрытия); напряжение начала открытия (закрытия).

Следует отметить, что основная задача проводимых испытаний состоит не в выявлении отказов, а в экспериментальном подтверждении выполнения требований технического задания. Кроме того, подтверждение заданных значений надежности экспериментальной отработкой наряду с необходимостью решения многих вопросов методического характера [7], требует значительных материальных и временных затрат. Наметившиеся тенденции развития ракетно-космической техники, в частности, существенное увеличение сроков активного существования КА, создание новых ракет-носителей путем глубокой модернизации их аналогов, а также

уменьшение сроков разработки и объемов его финансирования, в ряде случаев не позволяют применить известные методы подтверждения надежности агрегатов автоматики с достаточной достоверностью.

Все это определяет практическую важность работ по обоснованию требований по надежности агрегатов автоматики, разработке новых и развитию известных методов оценки и подтверждения показателей безотказности и долговечности этих изделий.

Заключение

Таким образом, в статье рассмотрены основные типы агрегатов автоматики пневмогидравлических систем ракет-носителей и космических аппаратов многоразового применения. На основе анализа требований к их функционированию в составе пневмогидравлических систем подачи компонентов топлива определены основные виды отказов. Приведены методы выявления отказов агрегатов автоматики и способы парирования их последствий, направленные на обеспечение надежной эксплуатации агрегатов автоматики в составе ПГС (ЖРС) РН и КА.

Сформулированы основные требования по надежности, предъявляемые к типовым агрегатам автоматики пневмогидравлических систем ракет-носителей и космических аппаратов. Приведены соотношения для оценки задаваемых показателей надежности на этапе проектирования. Определены контролируемые параметры агрегатов автоматики различных типов.

Литература

1. Сырицын Т.А. Эксплуатация и надежность гидро- и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1990. – 248 с.
2. Хильчевский В.В., Ситников А.Е., Ананьевский В.А. Надежность трубопроводной пневмогидроарматуры. – М.: Машиностроение, 1989. – 208 с.
3. Волков Е.Б., Судаков Р.С., Сырицын Т.А. Основы теории надежности ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1974. – 400 с.
4. Беляев Н.М., Белик Н.П., Уваров Е.И. Реактивные системы управления космических летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1979. – 232 с.
5. Труханов В.М. Надежность в технике. – М.: Машиностроение, 1999. – 598 с.
6. Галась М.И., Даниев Ю.Ф., Демченко А.В. Оценка надежности элементов автоматики с учетом априорной информации об отработке аналогов // Техническая механика. – 2002. – № 1. – С. 105 – 110.
7. Галась М.И., Демченко А.В. Обоснование объема ускоренных испытаний на надежность комплектующих систем космических аппаратов с длительным сроком активного функционирования // Космическая техника и ракетное вооружение. – 1999. – Вып. 1. – С. 97 – 107.

Поступила в редакцию 11.10.2004

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. В.С. Проценко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.