

УДК 621.454.2

А.В. Сичевой, С.А. Давыдов

**ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ  
ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАКЕТ  
ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ**

*Анотація. Описано методологічне підґрунтя холодних технологічних випробувань ракет-носіїв та приведено результати впровадження таких випробувань.*

**Введение**

Не ставя задачи изложения общих методов технического контроля качества и не обсуждая здесь все возможные подходы к теоретическому описанию процессов при диагностировании, приведем ряд определений и положений, необходимых для дальнейшего изложения [1].

Любой технический объект после проектирования проходит две основные стадии "жизни" - изготовление и эксплуатацию. Основное назначение диагностики - повышение надежности объектов на этапе их эксплуатации, а также предотвращение производственного брака на этапе изготовления объектов.

**Диагностирование пневмогидравлических систем ракет**

Применительно к задачам, решаемым технической диагностикой на стадии изготовления можно выделить периоды приемки комплектующих изделий (для пневмогидравлической системы подачи (ПГСП) ракеты - это различные автономные испытания агрегатов и систем), а также период сдачи окончательно собранного изделия - приемо-сдаточные испытания. Диагностирование объекта на стадии эксплуатации (телеметрическая информация в полете, проверки при регламентных работах в период хранения и т.д.) не входит в задачи данного рассмотрения.

Объект, удовлетворяющий всем требованиям нормативно-технической документации, является исправным.

Объект является работоспособным, если он может выполнять все заданные функции с сохранением значений заданных параметров в требуемых (допустимых) пределах.

---

© Сичевой А.В., Давыдов С.А., 2010

Неисправное и неработоспособное состояния могут быть детализированы путем указания соответствующих дефектов. Поиск и обнаружение дефектов объединяются общим термином "диагностирование", результатом которого является диагноз.

Диагностирование технического состояния объекта осуществляется средствами диагностирования, которые могут быть аппаратными и программными. Средства и объект диагностирования, взаимодействующие между собой, образуют систему диагностирования.

Различают [2] системы тестового и функционального диагностирования. В ракетной технике примером систем диагностирования, построенных по функциональному принципу, могут быть огневые технологические и контрольно-технологические испытания (ОПИ и КТИ).

В системах тестового диагностирования на объект подаются специально организуемые тестовые воздействия. Следует отметить, что с точки зрения теории управления, системы тестового диагностирования являются системами управления, поскольку в них реализуется выработка и осуществление специально организованных тестовых (т.е. управляющих) воздействий на объект с целью определения технического состояния.

Задачи изучения физических свойств объектов и их возможных дефектов достаточно специфичны и вряд ли поддаются какому-либо обобщению из-за многообразия и различных классов объектов. Так для ПГСР различных классов ракет, например, с различными по кратности срабатывания элементами автоматики, практически невозможен общий подход к формализации объекта диагностирования и унификации средств диагностирования и тестовых воздействий. Подобные факты приводят к выводу о необходимости предусматривать еще на этапе проектирования возможность диагностирования сложного изделия при его производстве. Если предшествующего опыта по диагностированию разрабатываемого объекта нет или он недостаточен, то существенной становится роль разработчика, работающего рядом со специалистом-диагностом либо, что еще лучше, являющегося таковым.

В результате такой работы в процессе проектирования системы должен быть определен (например, явно в виде списка или неявно

через указание свойств) перечень дефектов, подлежащих обнаружению в условиях производства объекта, а также определены признаки проявления дефектов, включаемых в перечень. При формировании перечня учитывается опыт производства и эксплуатации аналогичных объектов, статистические данные по дефектам и т.п. Другим результатом анализа объекта должно быть установление требуемой или желаемой полноты обнаружения дефектов, а также глубины их поиска, т.е. точности, с которой должны указываться при диагностировании места залегания дефектов.

В процессе разработки метода и системы диагностирования создается формализованная модель объекта диагностирования, т.е. его описание в аналитической, графической, табличной или другой форме. Такие модели, в зависимости от свойств объекта могут быть явными и неявными. Явные модели наряду с описанием исправного объекта содержат описание каждой из его неисправных модификаций. Неявная модель объекта диагностирования предполагает наличие только одного описания, например исправного объекта, формализованных моделей дефектов и правил получения по заданному описанию и по моделям дефектов описаний всех неисправных модификаций объекта.

В случае диагностирования ПГСП, в зависимости от типа диагностируемых систем и способов тестового воздействия при диагностировании, могут применяться как первые, так и вторые.

Модели объектов могут быть функциональные и структурные. Первые отражают только выполняемые объектом (исправным или неисправным) функции, определенные относительно рабочих входов и рабочих выходов объекта, вторые, кроме того, содержат информацию о внутренней организации объекта, о его структуре. Функциональные модели вполне позволяют решать задачи проверки работоспособности и правильности функционирования объекта. Однако при диагностировании ПГСП ракеты, особенно с одноразовыми элементами автоматики и тупиковыми трактами, для проверки исправности и поиска дефектов с глубиной, большей, чем объект в целом, требуются структурные модели.

Модели объектов диагностирования нужны для построения алгоритмов диагностирования формализованными методами, а также

для формализованного анализа заданных алгоритмов на полноту поиска дефектов и на предмет построения диагностических словарей.

Построение алгоритмов диагностирования заключается в выборе такой совокупности элементарных проверок, по результатам которых можно отличить исправное или работоспособное состояние, или состояние правильного функционирования объекта от его неисправных состояний, а также находить и различать дефекты и группы дефектов.

В рассматриваемых здесь задачах тестового диагностирования, когда состав контрольных точек почти всегда определен предварительно, построение алгоритма представляет собой выбор входных воздействий элементарных проверок - задачу построения тестов.

Эффективность процессов диагностирования определяется не только адекватностью модели и оптимальностью алгоритмов диагностирования, но и в не меньшей степени качеством средств диагностирования. Последние могут быть аппаратными или программными, внешними или встроенными, отличаться степенью автоматизации и специализации. При диагностировании ПГСП применяют обычно полуавтоматические внешние устройства (стенды) с автоматизированной обработкой результатов контроля и последующей экспертной оценкой исходного технического состояния ПГСП. Выбор и разработка средств тестового диагностирования осуществляются с учетом многих факторов: наличия серийного выпуска требуемых средств, наличия их на заводе-изготовителе, массовости выпуска изделия, его сложности, производительности средств диагностирования и т.п.

#### **Задачи технической диагностики ПГСП**

Правильное функционирование, т.е. выполнение ПГСП задач, определенных проектной документацией, возможно в том случае, когда все системы, входящие в нее, работают с достаточной надежностью. Надежность систем ПГСП закладывается на этапе проектирования при разработке конструкции узлов и агрегатов систем (проектная надежность). Основными документами, определяющими комплекс конструктивных, научно-методических и организационных мероприятий, направленных на достижение

требуемых показателей надежности, является программа обеспечения надежности.

Проектная надежность подтверждается при выполнении комплексной программы экспериментальной отработки, которая, как уже отмечалось, включает этапы: автономной отработки систем, агрегатов и узлов ПГСП ДУ, автономной отработки систем, комплексной отработки систем в составе изделия при огневых испытаниях и этап летных испытаний в составе РН.

В то же время, надежность функционирования ПГСП определяется не только конструкцией и степенью отработанности входящих в нее элементов, но и особенностями технологического процесса изготовления носителя. То есть, рассматривая надежность конкретного образца РН, следует принимать во внимание производственно-технологическую надежность (ПТН) изделия.

ПТН изделия определяется совокупностью его свойств и параметров, полученных в результате изготовления данного образца и характеризующих качество изготовления. Оценка качества производится в процессе контроля технического состояния изделия. Применение диагностирования систем изделия на этом этапе позволяет существенно повысить ПТН, поскольку проведение диагностирования на заключительном этапе контроля технического состояния повышает достоверность результатов контроля.

В общем случае, вероятность выполнения задачи системой может быть определена как функция векторов

$$P_{в.з.} = f(P_n < l >, \sigma < m >, A < k >, \mathcal{E}_{тр.}),$$

где  $P_n < l >$  - вектор вероятностей безотказной работы системы, состоящей из  $l$  элементов;  $\sigma < m >$  - вектор среднеквадратичных отклонений  $m$  параметров системы, характеризующих ее функционирование;  $A < k >$  - вектор характеристик условий применения системы;  $\mathcal{E}_{тр.}$  - требуемый эффект применения технической системы.

Говоря о диагностировании с целью повышения ПТН, мы подразумеваем увеличение вектора  $P_n < l >$ , который, в свою очередь, является функцией вероятности безотказной работы элемента вследствие отработанности его конструкции  $P_{о.к.}$ , вероятности

безотказной работы элемента из-за отсутствия технологического дефекта  $P_T$ , степени охвата диагностированием системы  $O_D$ , т.е.

$$P_n < l > = f_2(P_{o.k.}, P_m, O_D).$$

Или

$$P_n < l > = f_2'(P_{o.k.}) + f_2''(P_m, O_D),$$

так как взаимосвязь вероятности безотказной работы системы  $P_n < l >$  с соответствующими составляющими  $P_{o.k.}$  и  $P_T$ ,  $O_D$  обусловлена различными факторами. Составляющая  $P_{o.k.}$ , определяемая степенью отработанности конструкции и ее совершенством, позволяет оценить проектную надежность системы. Составляющие  $P_T$  и  $O_D$  – определяют ПТН. Достоверность полученной информации о техническом состоянии системы и ее элементов, степень охвата системы операциями контроля в значительной мере обуславливают ПТН, определяемую как вероятность отсутствия технологического дефекта  $P_T$ . Степень охвата диагностированием системы определяется как

$$O_D = \frac{n_k}{n_o},$$

где  $n_k$  – число контролируемых элементов (систем),  $n_o$  – общее число элементов (систем). В этом случае вероятность безотказной работы системы, состоящей из  $n_o$  элементов, может быть определена по формуле:

$$P_T = \frac{n_s}{n_s + n_f},$$

где  $n_s$  – число исправных элементов,  $n_f$  – число элементов с технологическими дефектами. При этом  $n_o = n_s + n_f$ .

Повышение качества и достоверности информации о наличии дефекта в системе и охват диагностированием максимального числа элементов системы в идеальном случае означают  $n_f = 0$  и, как следствие,  $P_T = 1$ .

Совершенствование средств и методов контроля ПГСР ракеты-носителя (РН), повышение степени охвата диагностированием системы приводят к повышению ПТН системы и, следовательно, к повышению надежности всей РН, как вероятности выполнения поставленной задачи  $P_{в.з.}$ .

Таким образом, потребность повышения надежности систем ракеты с целью удовлетворения требований, предъявляемых к космическим ракетным комплексам, продиктовала необходимость создания комплексной системы методологического обеспечения диагностики ПГСР РН, которая реализуется от этапа проектирования до изготовления изделия.

При этом было необходимо:

- провести анализ современных способов определения исходного технического состояния пневмогидравлических систем РН;
- определить перечень возможных основных неисправностей ПГСР и характеристики трактов системы, определяющие ее состояние;
- разработать требования к способам испытаний ПГСР и общую систему подготовки и проведения диагностирования;
- предложить сами способы испытаний с учетом специфики ПГС ракет различного класса, учитывая при этом, что риск привнесения неисправностей во время самих испытаний и после их окончания должен быть исключен или сведен к минимуму.

Одновременно нужно было четко определить место таких испытаний в технологическом процессе изготовления РН, поскольку ясно, что чем выше степень готовности изделия к моменту проведения испытаний, тем выше охват систем диагностированием и достовернее результаты. Эта работа была проведена совместно ГКБ «Южное» и Днепропетровским национальным университетом. В результате была разработана система холодных технологических испытаний ПГСР и ее стендовое обеспечение, внедренные в практику производства РН «Зенит» и РН «Энергия» [3, 4].

#### **Выводы**

Введение холодных технологических испытаний ПГСР обеспечило контроль, во-первых, отсутствия в магистралях засорения и контроль правильности расстановки расходных сопел и шайб. Эта методика, основана на закономерности перетекания газов по тракту из различных полостей, с замером отклонений от этих законов; во-вторых, функционирования электропневмоаппаратуры и агрегатов автоматики, правильности адресации магистралей и электрических цепей; в-третьих, точности настройки регулирования агрегатов и сигнализаторов; в-четвертых, герметичности отдельных

пневмогидравлических систем и систем питания и управления пневмогидравликой в целом.

Эффективность конструкторских мер по обеспечению надежности блока Ц РН «Энергия» проверена при холодных технологических испытаниях пневмогидравлической системы блока Ц экспериментальных ракет 4М, 5С [5]. При этом на заключительном этапе было выявлено и устранено 11 дефектов, которые могли бы привести к возникновению нештатной ситуации в ходе дальнейших работ. Кроме того, с помощью отработанной методики на основе экспериментальных данных по гидравлическим характеристикам стало возможно дать оценку состояния магистралей систем ракеты 5С и в том числе принять оперативное решение по отклонению этих характеристик магистралей термостатирования.

Холодные технологические испытания блока А проводились с подачей газов высокого давления со срабатыванием всей электропневмоавтоматики и проверкой функционирования концевых контактов и сигнализаторов давления. При этом полученные характеристики сравниваются с эталонными. Непосредственно в ходе огневых технологических испытаний проверялась прямым или косвенным путем работа 64 элементов автоматики, не проверялось 16 элементов. При холодных технологических испытаниях не проверялось только 4 – это пироклапаны, которые проверяются электрическим методом «обтекания». Проведение холодных технологических испытаний позволило проверить точность настройки сигнализаторов давления и редуктора, правильность адресации, состояние магистралей и электрических цепей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Ключев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др.; Под общ. ред. В.В. Ключева.– М.: Машиностроение, 1989.– 672 с.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика.– М.: Машиностроение, 1978.– 240 с.
3. А.с. 258447 СССР. Способ испытания жидкостных ракетных двигательных установок / В.С. Соколов, Л.Д. Кучма, Ю.В. Сичевой, И.Г. Писарев, Н.Н. Межуев.
4. А.с. 281026 СССР. Стенд для испытания бортовой пневмогидравлической системы жидкостной ракеты на функционирование / О.В. Баклюков, Л.Л. Украинец, А.В. Сичевой, Ю.В. Сичевой, Н.Н. Межуев.
5. Губанов Б.И. . Триумф и трагедия «Энергии». Размышления главного конструктора: В 4-х томах.– Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского ин-та Экон. развития, 1988. Т.3: «Энергия» – «Буран».– 432с.