

УДК621.45:519.87

Д.С. МАРТИРОСОВ<sup>1</sup>, А.И. КОЛОМЕНЦЕВ<sup>2</sup><sup>1</sup>ОАО «НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко», Химки, Россия<sup>2</sup>Московский авиационный институт

(Национальный исследовательский университет), Россия

## ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ЖРД В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

*Показана необходимость применения систем функциональной диагностики для выявления предаварийных состояний ЖРД при медленно развивающихся неисправностях. Представлено теоретическое и расчетно-экспериментальное обоснование метода функциональной диагностики ЖРД по отклонениям характеристик основных агрегатов и элементов конструкции в процессе огневого испытания. Метод основан на оценке чувствительности измеряемых параметров к неисправности и разрешающей способности системы «модель – измеряемый параметр» и может быть использован для проведения диагностических процедур в режиме реального времени.*

**Ключевые слова:** функциональная диагностика, математическая модель, рабочие процессы, измеряемые параметры, чувствительность, разрешающая способность, диагностические признаки, реальное время.

### Введение

В настоящее время для анализа состояния ЖРД, прошедшего стендовые огневые и летные испытания, используется система функциональной диагностики (СФД), обеспечивающая поиск неисправности на основе математической модели (далее модели) рабочих процессов, измеряемых медленно-меняющихся параметров и сформированных с их помощью системы диагностических признаков. Значения измеряемых параметров вводятся в СФД из протокола испытания как осредненные на соответствующих циклограмме интервалах времени (от двух до нескольких десятков секунд). Как показала практика, такая информация вполне представительна для определения исправного состояния двигателя. Однако при возникновении неисправности при такой дискретности измерительной информации трудно рассчитывать на то, что момент возникновения и темп развития неисправности может быть выявлен в автоматическом режиме с приемлемой точностью. В этом случае приходится вручную вводить в СФД измерения на интервале времени, содержащем подинтервалы от момента возникновения неисправности до аварийного выключения двигателя (АВД). Эти отрезки времени обычно определяются специалистами при визуальном анализе графиков измеряемых параметров.

В случае возникновения нештатных ситуаций при стендовых огневых испытаниях для спасения материальной части (двигателя и стенда) АВД осу-

ществляется с помощью системы аварийной защиты (САЗ). Решение об АВД принимается автоматически при превышении заданных для конкретного экземпляра двигателя пороговых значений температуры генераторного газа, оборотов и осевого перемещения вала турбины основного ТНА. Пороговые значения для измерений указанных параметров определяются, исходя из таких температурных и силовых нагрузок, действующих на двигатель, которые могут привести к разрушению элементов его конструкции. Поэтому такие пороговые значения достаточно велики. Они не учитывают изменения конкретных характеристик двигателя, возникающих на ранних стадиях развития неисправности, т.е. практически не обеспечивают предаварийное выключение двигателя.

Как правило, САЗ формирует команду на закрытие клапана горючего на входе в газогенератор при превышении пороговых значений одного из параметров:

- оборотов ТНА,
- осевого перемещения вала турбины ТНА,
- температуры газа на входе в газопровод,
- соотношения компонентов на входе в двигатель.

В существующих вариантах САЗ с целью уменьшения времени формирования сигнала на выключение двигателя заложены упрощенные алгоритмы принятия решения об АВД по указанному ограниченному набору параметров. Поэтому, совершенствование САЗ в рамках этих алгоритмов невозможно.

Как показано в [1], применение алгоритмов СФД в режиме имитации реального времени при медленно развивающихся неисправностях обеспечивает формирование сигнала на АВД существенно раньше САЗ, т.е. до начала необратимых изменений (например, горения) приводящим к катастрофическим последствиям.

Известно, что процессы горения развиваются лавинообразно в течение миллисекунд, а постоянная времени мощных ЖРД (время реакции на возмущение, вызванное срабатыванием агрегатов автоматики) составляет, примерно 0,1..0,2 с. В этом случае, безаварийное выключение двигателя (за более короткий промежуток времени) принципиально невозможно.

В ряде случаев неисправности развивались в течение времен от нескольких десятых долей секунды до десятка секунд, и могут быть классифицированы как медленно развивающиеся. Задача раннего обнаружения такого класса неисправностей может быть решена СФД при работе в режиме реального времени при существующем уровне вычислительной техники. Например, при поступлении измеряемых значений параметров в СФД с частотой 125 Гц для проведения диагностических процедур достаточно осреднение измеряемых параметров по 10 точкам. В этом случае предварительная оценка общего время срабатывания СФД, с учетом процедур принятия решения, составляет не более 0,15 с.

Таким образом, применение СФД в режиме реального времени может обеспечить выявление медленно развивающихся неисправностей на ранних стадиях и управление двигателем до срабатывания САЗ.

## 1. Постановка задачи

На ранней стадии создания СФД, работающей в режиме реального времени, необходимо ограничить количество диагностических признаков, характеризующих состояние двигателя, не снижая их информативности. С этой точки зрения, можно в качестве таких признаков принять отклонения характеристик двигателя, реализовавшихся на огневом испытании, от среднестатистических.

Пусть нарушена исходная связь между параметрами, описываемая в модели до момента времени  $t = t_n$  уравнением  $f_i$ :

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad t < t_n. \quad (1)$$

Такое нарушение можно выявить, например, по методу структурного исключения [1], если после подстановки всех измеренных значений параметров  $x_j^*, \dots, x_k^*$  и всех расчетных значений  $x_{k+1}^0, \dots, x_n^0$  правая часть в (1) будет отлична от нуля:

$$f_i = \delta f_i \neq 0, \dots, t \geq t_n. \quad (2)$$

В [1] для оценки малых отклонений параметров конструкции при неисправности, «содержащейся» в уравнении  $i$ , введено соотношение, связывающее отклонение  $\delta f_i$  с отклонением  $\delta x_j$  измеренного значения параметра  $x_j^*$  от расчетного  $x_j^0$  (соответствующего нормальному функционированию):

$$\delta x_j = x_j^* - x_j^0 = r_{ij} \delta f_i, \quad (3)$$

где

$$r_{ij} = (-1)^{i+j} \frac{J_{ij}}{J}, \quad (4)$$

$J$  – якобиан исходной системы уравнений;  $J_{ij}$  – якобиан подматрицы матрицы Якоби, полученный вычеркиванием строки  $i$  и столбца  $j$ .

Понятно, что коэффициент  $r_{ij}$  характеризует чувствительность параметра  $x_j$  к нарушению связи  $f_i$ .

Отклонение (3) можно рассматривать как диагностические признаки и назначить на них допуски  $\delta x_{j\text{доп}}$ , выход за границы которых сигнализирует о наличии неисправности.

Тогда с учетом (3) соотношение:

$$R_{ij} = \frac{r_{ij}}{\delta x_{j\text{доп}}} = \frac{1}{\delta f_{i\text{доп}}} \quad (5)$$

может рассматриваться как разрешающая способность системы «модель – система измерения». А именно, чем больше по абсолютной величине  $R_{ij}$ , тем меньше отклонение  $\delta f_i$ , вызванное неисправностью, выявляет диагностический признак (3). Понятно, что (5) может также использоваться для оценки таких отклонений параметров конструкции, в пределах которых неисправное и исправное состояния не различимы.

Признаки (3) являются интегральными оценками нарушения соответствующей связи параметров, вызванного неисправностью. Более детальная оценка исправного или неисправного состояния двигателя может быть сделана непосредственно по отклонениям характеристик (например, коэффициентов гидросопротивления магистралей, смесительных головок газогенератора и камеры, тракта охлаждения камер и т.п.), а также мощностных, напорных характеристик турбокомпрессорных агрегатов, расходных характеристик регулятора и дросселя. Далее, все эти характеристики конструкции и рабочих процессов будем называть просто характеристиками.

Рассмотрим задачу диагностирования ЖРД при условии, что неисправность возникает и развивается при заданных положениях органов управления. В

этом случае, признаком зарождения неисправности является изменение измеряемых параметров, чувствительных к этому виду неисправности. То есть, если неисправность возникает в момент времени  $t_n$ , то через отрезок времени  $\delta t$  появляется отклонение измеряемого параметра  $x^*(t)$ :

$$\delta x^* = x^*(t_n + \delta t) - x^*(t_n) \neq 0. \quad (6)$$

Изменение характеристики двигателя также может быть зафиксировано в виде отклонения, рассчитываемого с использованием модели и измеряемых параметров:

$$\delta A = A(t_n + \delta t) - A(t_n) \neq 0. \quad (7)$$

Возникновение неисправности может быть обнаружено в момент времени  $t_n + \delta t_n$  тогда, когда

$$\delta A > \delta A_{\text{доп}}, \quad (8)$$

где  $\delta A_{\text{доп}}$  – допустимое отклонение характеристики, в пределах которого неисправность не оказывает существенного влияния на работу двигателя.

Если в системе уравнений модели измеряемому параметру  $x_j^*$  соответствует переменная  $x_j$ , а характеристике  $A$  – переменная  $x_k$ , то чувствительность отклонения  $\delta x^*$  к изменению характеристики  $\delta A$ , содержащейся в уравнении  $f_i$ , определяется в малых отклонениях по формуле:

$$\frac{\delta x_j^*}{\delta A} = \frac{\delta x_j^*}{\delta x_k} = (-1)^{j-k} \frac{J_{ij}}{J_{ik}}, \quad (9)$$

которая вытекает из соотношения (5), а именно:

$$\delta f_i = \frac{\delta x_j}{f_{ij}} = \frac{\delta x_k}{f_{ik}}. \quad (10)$$

Важно отметить, что, исходя из допуска на отклонение характеристики, можно определить допуск на отклонение измеряемого параметра, см. рис. 1. Тангенс угла  $\alpha$  определяется из (9).

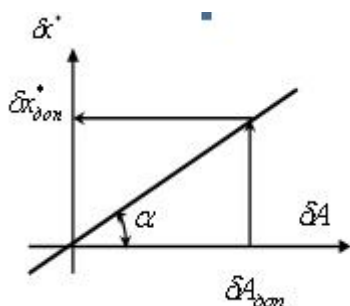


Рис. 1. Связь между допустимым изменением характеристики с допуском на изменение измеряемого параметра

Интересно, также отметить, что величина в правой части (5) является константой для конкрет-

ного режима испытания (положения регулирующих органов) и может быть рассчитана до начала испытания.

## 2. Алгоритм принятия решения

Принятие решения в процедурах диагностирования осуществляется иерархически с последовательным переходом с одного уровня на другой в зависимости от решения на предыдущем. Этим повышается достоверность принятия решения в случае выявления неисправности.

На первом уровне контролю подвергаются диагностические признаки 1-вида – рассогласования расчетных и измеренных значений ММП.

В случае превышения допуска единичным признаком принимается решение о продолжении процедуры на следующем отрезке времени.

В случае превышения допуска двумя или несколькими признаками принимается решение о переводе диагностирования на второй уровень.

На втором уровне контролю подвергаются диагностические признаки 2-го вида – характеристики двигателя, реализовавшихся на огневом испытании.

Если какая-либо характеристика, соответствует определённому сочетанию измеренных параметров и она превысила допустимое значения, то принимается решение о наличии неисправности, приводящей к нарушению соответствующей характеристики двигателя, и диагностирование переходит на третий уровень.

На третьем уровне в соответствии с методом структурного исключения производится исключение этой характеристики из модели, и контролю подвергаются диагностические признаки 3-го вида – рассогласования расчетных на этом уровне и измеренных ММП.

Если все признаки в норме – то принимается решение о наличии неисправности. В противном случае, процедура диагностирования продолжается, начиная с первого уровня.

## 3. Взаимосвязь отклонений характеристик и измеряемых параметров

По результатам расчета чувствительности измеряемых параметров к нарушению основных характеристик двигателя получена таблица неисправностей. В ней для каждой неисправности выделены совокупности диагностические признаки в порядке убывания чувствительности к неисправности.

По совокупностям этих признаков можно локализовать соответствующую неисправность. Например, для контроля изменения расходной характеристики дросселя горючего на входе в камеру можно

использовать критерий превышения границ допусков следующей совокупности параметров:

- расход горючего на входе в двигатель;
- давление горючего на выходе дросселя;
- давление горючего на входе в смесительную головку камеры.

На рис. 2 представлено изменение напорных, мощностных характеристик насосов, характеристик турбины, регулятора и др. при неисправности, вызвавшей нарушение перепада на дросселе горючего на входе в камеру dP др.

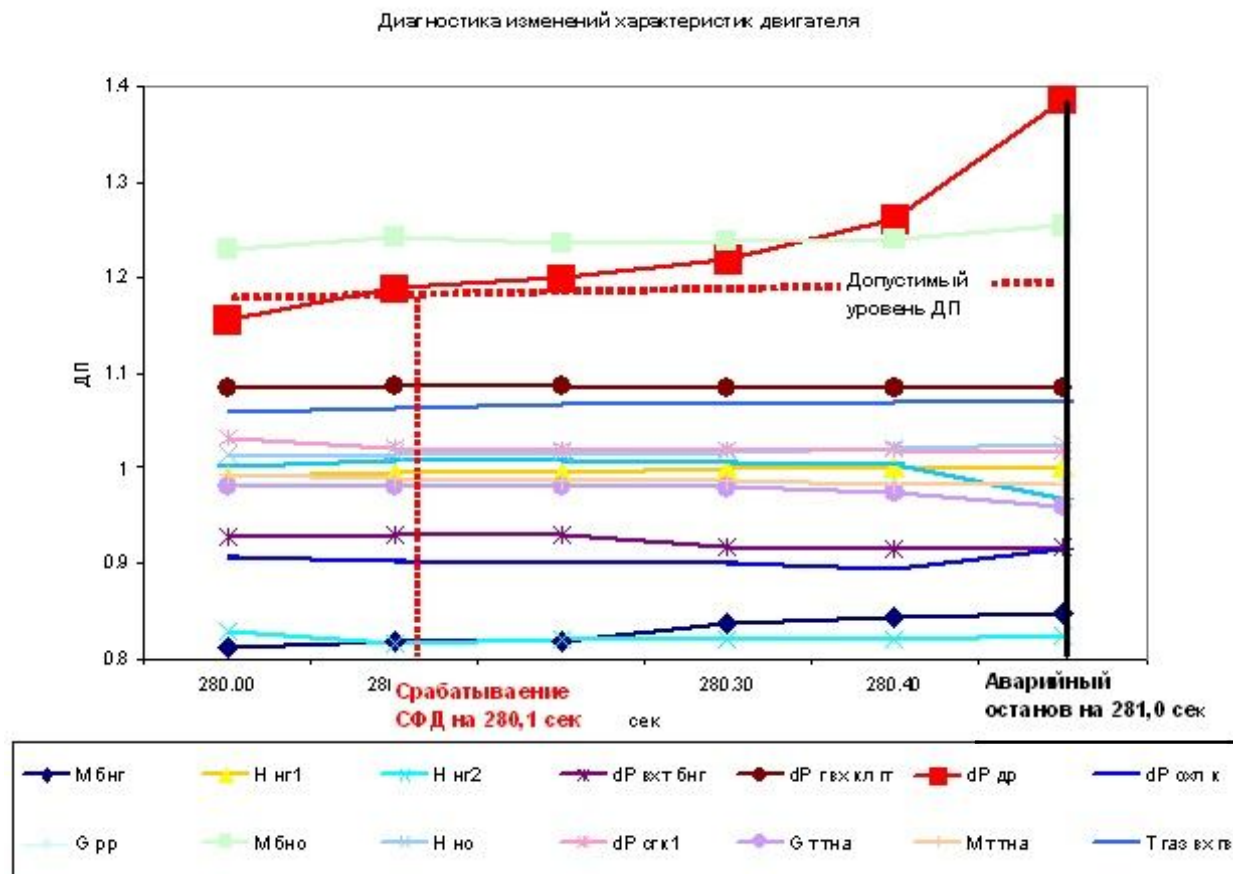


Рис. 2. Изменение характеристик двигателя при нарушении характеристики дросселя горючего

Как видно, другие контролируемые характеристики двигателя при этом практически не изменяются или находятся в пределах допуска.

### Заключение

1. Расчетно-экспериментальным исследованием установлено, что локальное изменение характеристик основных агрегатов и элементов конструкции ЖРД (напорных и мощностных агрегатов, расходных характеристик регулятора и дросселя, гидросопротивлений магистралей, смесительных головок газогенератора и камеры, тракта охлаждения камеры и т.д.) при медленно развивающихся неисправностях (до 0,1 сек и выше) в процессе огневого испытания может быть выявлено СФД в режиме реального времени.

2. Достоверность принятия решения при неисправности или нарушении нормального функционирования обеспечивается трехуровневой процедурой принятия решения.

3. Для назначения пороговых значений диагностических признаков необходимо провести исследования по определению допустимых значений отклонений.

### Литература

1. Мартыросов, Д.С. Диагностирование сложных технических систем на основе математических моделей физических процессов и измеряемых параметров методом структурного исключения [Текст]/ Д.С. Мартыросов. — М.: МАИ, 1998. — 56 с.

Поступила в редакцию 31.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Ракетные двигатели» Д.А. Ягодников, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

### ФУНКЦІОНАЛЬНА ДІАГНОСТИКА РРД В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

*Д.С. Мартиросов, О. І. Коломенцев*

Показана необхідність застосування систем функціональної діагностики для виявлення передавальних станів РРД при несправностях, що поволі розвиваються. Представлено теоретичне і розрахунково-експериментальне обґрунтування методу функціональної діагностики РРД по відхиленнях характеристик основних агрегатів і елементів конструкції в процесі вогняного випробування. Метод заснований на оцінці чутливості вимірюваних параметрів до несправності і роздільної здатності системи «модель – вимірюваний параметр» і може бути використаний для проведення діагностичних процедур в режимі реального часу.

**Ключові слова:** функціональна діагностика, математична модель, робочі процеси, вимірювані параметри, чутливість, вирішуюча здатність, діагностичні ознаки, реальний час.

### THE REAL TIME MODE LPRE FUNCTIONAL DIAGNOSTICS

*D.S. Martirosov, A.I. Kolomentsev*

It is shown the need to apply the systems of functional diagnostics for the prebreakdown states LPRE with slowly developing malfunctions. The theoretical and experimental-design substantiation of the method of functional diagnostics LPRE (liquid propellant rocket engine) according to basic aggregates and construction elements characteristics deviations during hot tests. Method is based on the evaluation of the measured parameters sensitivity to the malfunction and the resolution of system “model - the measured parameter” and can be used for diagnostic procedures in the real time mode

**Key words:** functional diagnostics, mathematical model, working processes, the measured parameters, the sensitivity, resolution, diagnostic signs, real time.

**Мартиросов Давид Суренович** – д-р техн. наук, зам. начальника расчетно-аналитического отдела, ОАО «НПО Энергомаш», e-mail: mrtrsv@mail.ru.

**Коломенцев Александр Иванович** – канд. техн. наук, профессор, зам. зав. кафедрой «Ракетные двигатели», Московский авиационный институт, e-mail: a.i.kolomentsev@yandex.ru.