

## ПРОБЛЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**П.С. Левочкин, Д.С. Мартиросов, В.Т. Буканов**

ОАО “НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко”, г. Химки, Моск. обл.  
e-mail: vtbukanov@gmail.com

*Изложены основные проблемы функциональной диагностики жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Рассмотрены основные задачи создания системы функциональной диагностики ЖРД, заключающиеся в определении правильности работы двигателя, выявлении неисправности и ее дислокации, оценки устойчивости работы и выработанного ресурса двигателя, прогнозирование его работы при последующих применениях. Рассмотрены математические аспекты теории, на которой базируются способы формирования диагностических признаков по установленным значениям параметров и их производных, а также их связь с возможными аномальными режимами работы ЖРД. Показаны возможные алгоритмы формирования диагностических признаков, обеспечивающих в масштабе реального времени получение достоверной диагностической информации о параметрах рабочих процессов непосредственно в местах расположения первичных измерительных преобразователей; моделирование повреждаемости динамически нагруженных элементов конструкции; выявление неустойчивости рабочих процессов и потери устойчивости элементов конструкции ЖРД в целом. Намечены пути дальнейшего развития функциональной диагностики в обеспечении предотвращения предаварийных ситуаций.*

**Ключевые слова:** ЖРД, функциональная диагностика, математическая модель, диагностические признаки.

## PROBLEMS OF FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINES

**P.S. Levochkin, D.S. Martirosov, V.T. Bukanov**

ОАО NPO Energomash im. akad. V.P. Glushko, Khimki, Moscow region, Russia  
e-mail: vtbukanov@gmail.com

*Main problems of functional diagnostics of a liquid-propellant rocket engine (LPRE) are stated forth. Basic tasks for creating a system of functional diagnostics are discussed, which include: checking the correctness of the engine operation; revealing a failure and its location; estimating the work stability and the spent life of the engine; forecasting its operation in the future applications. Mathematical aspects of the theory are considered, on which the methods are based for forming diagnostic characters according to the steady values of parameters and their derivatives, as well as their connection with the possible anomalous operation modes of LPREs. Possible algorithms for formation of the diagnostic characters are shown, which provide obtaining the real-time reliable diagnostic information on working-process parameters immediately at the points of location of primary measuring converters, simulating the damageability of dynamically loaded structure members, and revealing the working-process unsteadiness and the instability of the LPRE structure members as a whole. Ways are outlined for further development of functional diagnostics to ensure the avoidance of pre-emergency situations.*

**Keywords:** liquid-propellant rocket engine, functional diagnostics, mathematical model, diagnostic characters.

**Жидкостные ракетные двигатели как объект функционально-диагностирования.** Нарушение нормального функционирования ЖРД как сложной системы, содержащей встроенные источники энергии (газогенератор и камеру), может быть вызвано не только изменениями каких-либо параметров элементов конструкции (например, изменением площади проточной части трубопровода, нарушением герметичности, разрушением, прогарами и т.п.), но и возникновением неустойчивости, в частности автоколебаний, вызванных явлениями кавитации, вибрационного горения, особенностями напорных и мощностных характеристик насосных агрегатов и т.п. или потерей механической устойчивости элементов конструкции.

Кроме того, нарушение нормального функционирования ЖРД, в особенности при многократном включении без съема со стенда или многократном полетном применении, может быть вызвано повреждаемостью конструкции в результате накопления деструктивных изменений материалов, вызванных явлениями цикловой усталости. При многократном применении ЖРД в результате динамических нагрузок, особенно при многократных запусках и отключениях, возникают и нарастают во времени явления механического износа подвижных элементов конструкции, изменения прочности стыков трубопроводов, изменение гидросопротивления смесительных головок, трактов охлаждения камеры и газогенератора и т.п., а также явления усталости материала конструкции. Это может вызвать различные неисправности, приводящие к нарушению нормального функционирования двигателя и ограничивающие его последующее использование. Задача системы функциональной диагностики (СФД) в данном случае существенно усложняется, так как кроме определения состояния ЖРД после полета, т.е. на данный момент времени, необходимо дать прогноз на его дальнейшее использование. Если задача определения состояния двигателя на данный момент методами СФД практически решается для ЖРД одноразового применения, то задача прогнозирования в настоящее время мало изучена.

Особенностью ЖРД как механической системы, имеющей вращающиеся активные и пассивные элементы (роторы турбин, шнеки и крыльчатки насосных агрегатов), а также компоненты топлива с переменной плотностью, является вибрационная и пульсационная нагруженность в широком диапазоне частот (до десятков килогерц). Это, как получено из опыта стендовых огневых испытаний, вызывает явление многоциклового усталости материала конструкции, накопление которой приводит к разрушению трубопроводов, корпусов агрегатов, роторов турбин, подшипников ТНА и других элементов.

Важным приемосдаточным параметром ЖРД как интегральным параметром оценки его работоспособности является тяга. В спектре колебаний тяги могут быть выделены частотные характеристики двигателя, изменение которых является признаком нарушения нормального функционирования. Поэтому спектр колебаний тяги имеет самостоятельное значение и должен рассматриваться как необходимый элемент оценки правильности функционирования двигателя.

Таким образом, ненормальное функционирование ЖРД может возникнуть в результате неисправности (дефекта), неустойчивости рабочего процесса, нарушения несущей способности (устойчивости) элементов конструкции, повреждаемости конструкции из-за накопления усталости материалов.

Представленная классификация является условной и вводится для создания методической базы для разработки методов, алгоритмов и программного обеспечения СФД ЖРД.

Кроме диагностирования состояния двигателя по анализу основных энергетических потоков компонентов, несущих информацию о “макроструктуре” основных агрегатов, в настоящее время возникла необходимость в увеличении глубины диагноза при отработке “инфраструктуры” двигателя, агрегата разгрузки радиально-упорного подшипника, стояночного уплотнения, лабиринтных уплотнений, охлаждения подшипника, разъемных фланцевых соединений и т.п.

Параметры двигателя в соответствии с существующей системой измерения контролируются в двух частотных интервалах:

от 0 до 100 Гц — медленно меняющиеся параметры (ММП), а именно давления, температуры, расходы, положения приводов регулятора и дросселя, перемещения вала ТНА;

от 100 до 30000 Гц – быстро меняющиеся параметры (БМП), а именно виброакустические и тензометрические параметры: пульсации компонентов топлива, вибрации и напряжения корпусных деталей.

Система измерения, установленная на двигателе, традиционно выбирается конструкторами в целях получения данных об основных характеристиках двигателя, обеспечивающих его работоспособность и регламентируемых соответствующей документацией. Число и места установки датчиков выбирают, исходя из особенностей их конструкции и конструкции двигателя, и зачастую они не отвечают требованиям обеспечения необходимой глубины диагностирования.

Спектры вибраций элементов конструкции и спектры пульсаций компонентов топлива относятся к основным видам диагностической информации, так как имеют высокую чувствительность к аномалиям функционирования ЖРД, в частности, нарушению правильности

функционирования ЖРД, связанной с устойчивостью рабочих процессов.

Задача формализации поиска неисправности или определения расположения источника возмущения методами спектрального анализа в настоящее время полностью не решена из-за отсутствия формализованных диагностических моделей, описывающих взаимосвязь измеряемых БМП. В связи с этим напомним, что определенный запрет здесь накладывается теоремой Кирхгофа, из которой следует, что возмущение, вызванное в акустическом поле каким-либо источником (например, неисправностью), может быть смоделировано другим, подходящим образом выбранным, фиктивным источником. По этой же причине, даже зная направление переноса энергии, генерируемого неизвестным источником (по вектору Умова–Пойтинга), нельзя формально определить его положение, тем более в замкнутой акустически системе.

Тем не менее поиск неисправности на основе БМП в настоящее время осуществляется экспертами с помощью эвристических методов, полученных на основе большого опыта отработки ЖРД.

Поэтому одна из основных задач (например, определение состояния ЖРД по измеряемым БМП) — это создание так называемого виброакустического портрета нормально функционирующего двигателя, т.е. определение таких уровней и частот колебаний (спектров) измеряемых параметров, которые соответствуют его исправному состоянию.

Учитывая высокую энергетическую нагруженность ЖРД и широкие диапазоны управления (110...30% режима главной ступени), высокие уровни давлений, температур, оборотов, вибраций элементов конструкции и пульсаций давлений, для повышения достоверности диагноза необходимо отбраковывать аномальные измерения по критерию их достоверности.

Исходя из уникальности конструкции каждого типоразмера двигателя и каждого единичного экземпляра, а также состава системы измерения СФД ЖРД следует проектировать как объектно-ориентированные системы. В то же время их генетическая основа должна оставаться единой, порождая различные модификации в зависимости от назначения и условий применения.

Задачи диагностики относятся к так называемым некорректно поставленным задачам. Это связано с тем, что различные неисправности могут одинаково проявляться в диагностических признаках или отображаться на интервалы допустимых значений признаков или же не фиксироваться из-за того, что измерению доступен ограниченный состав параметров или же вследствие погрешности средств измерения или неудачного расположения датчиков.

Определить множество таких замаскированных неисправностей практически невозможно, и достоверность диагностирования ограничивается указанными факторами. Поэтому, вообще говоря, при анализе аварийных ситуаций в каждом конкретном случае применяются специальные методы решения, мало поддающиеся формализации.

Следует также учесть, что в условиях практически единичного производства мощных ЖРД и больших экономических затрат на изготовление, доводку и эксплуатацию определить состав всех возможных неисправностей (как например, при массовом производстве и эксплуатации в автомобильной или электронной промышленности или для ЖРД малой тяги) не реально. По этой же причине (исходя из требования обеспечения надежности при ограниченном числе доводочных испытаний) получение представительной статистики даже по конкретным неисправностям становится невозможным.

Традиционно при анализе испытаний эксперты на интуитивно-инженерном уровне опираются на знание взаимосвязей между параметрами рабочих процессов. При этом приводятся рассуждения типа: “Расход через регулятор расхода горючего увеличивается, значит должны увеличиться обороты ТНА. А если это не происходит, возможна утечка в тракте подвода горючего в газогенератор и т.д. и т.п.”. Таким образом анализируются различные версии локализации неисправности. Не умаляя ценности таких рассуждений, следует принять во внимание, что объем телеметрии и при стендовых, и при летных испытаниях достаточно велик и такой анализ не может в ряде случаев охватить всего многообразия вариантов локализации неисправности и ее видов. Поэтому для получения объективных оценок о состоянии ЖРД последние 20 лет развиваются формализованные компьютерные методы, основанные на математических моделях, описывающих взаимосвязи параметров процессов в нормально функционирующем двигателе. К этим параметрам относятся так называемые ММП: давление, расход, температуры компонентов, обороты роторов бустерных и основных ТНА, положения дросселей органов управления. Такой подход обеспечивает развитие методов поиска неисправности для автоматизации процедур диагностирования в целях использования их в темпе проведения испытаний и эксплуатации двигателя.

**Основные задачи функциональной диагностики ЖРД. Задача 1.** Определение в автоматическом и (или) интерактивном режимах правильности функционирования двигателя на всех режимах его работы, заданных профилем огневого испытания или эксплуатации.

**Задача 2.** Выявление в автоматическом и (или) интерактивном режимах неисправности, нарушающей правильное функционирование, с

указанием места и возможной причины ее возникновения без разборки двигателя, а также отбраковка недостоверно измеренных значений параметров функционирования.

*Задача 3.* Оценка устойчивости рабочих процессов.

*Задача 4.* Оценка выработанного ресурса двигателя и прогнозирование правильности его функционирования при последующем применении.

При доводке двигателя СФД определяет нормальное функционирование или выявляет слабые места в двигателе — элементы или контуры, склонные к конструкционным или производственным отказам.

При товарных поставках (контрольно-технологических испытаниях (КТИ)) СФД определяет нормальное функционирование в целях подтверждения надежности двигателя перед использованием в составе ракеты-носителя (РН).

При летных испытаниях СФД определяет правильность функционирования двигателя в составе РН при выполнении полетной задачи и при необходимости проводит поиск неисправных элементов конструкции в условиях ограниченного по сравнению с КТИ состава измеряемых параметров, а также увеличенных погрешностей телеметрии и ограниченного времени на принятие решение. Цель — выявление эксплуатационных отказов.

При многоразовом применении двигателя в составе РН СФД определяет правильность его функционирования при выполнении предшествующей полетной задачи в целях принятия решения о последующем использовании. Такие СФД относятся к наземным системам и используются в условиях полигона.

Бортовые СФД должны определять правильность функционирования ЖРД во время полета на борту РН. В настоящее время для мощных ЖРД это направление в прикладном аспекте практически не исследовано. Первым этапом практического подхода к созданию бортовой СФД может быть обеспечение предварительной обработки измерений и формирования диагностических признаков на борту РН с последующей передачей на наземную СФД, что позволит существенно снизить погрешности прямой телеметрии.

**Штатная СФД ЖРД.** В настоящее время в ОАО “НПО Энергомаш” разработана СФД ЖРД, применяемая на разных этапах создания двигателей РД 170, РД 123, РД 180, РД 191.

Система функциональной диагностики применяется после проведения стендового огневого испытания или после эксплуатации двигателя в составе РН и обеспечивает (в автоматическом или интерактивном режиме):

1) контроль технического состояния двигателя с глубиной диагноза до контура, выделенного с помощью системы измерения ММП и математической модели, а также выявляет недостоверные значения измерений параметров;

2) контроль характеристик виброакустических параметров в заданных диапазонах частот.

В СФД используются статические и динамические модели рабочих процессов с сосредоточенными и распределенными параметрами в одномерной постановке задачи. Эти модели дополняются данными автономных (модельных) испытаний основных агрегатов испытуемого экземпляра двигателя и корректируются по результатам его предшествующих испытаний или серии испытаний двигателей данного типоразмера.

Процедура диагностирования осуществляется с использованием методов, алгоритмов и программного обеспечения, разработанных в ОАО “НПО Энергомаш” с применением диагностических признаков аварийного состояния.

Основные показатели достоверности диагностирования — правильность принятия решения или ложная тревога и пропуск дефекта — определяются: достоверностью описания физических процессов; погрешностями характеристик, определяемых при автономных испытаниях агрегатов; погрешностями телеметрии огневых испытаний.

**Способы формирования диагностических признаков предаварийного состояния.** В этом разделе рассмотрены в основном математические аспекты теории, на которой базируются способы формирования диагностических признаков. Для наглядности изложения предполагается, что погрешности моделирования и измерения отсутствуют.

Диагностические признаки формируются на основе принятых в области диагностики ограничений и способов описания неисправности:

1) неисправность зарождается и развивается в одном и только одном элементе конструкции;

2) неисправность порождает такие изменения параметров рабочей среды, которые могут быть измерены;

3) малые отклонения в параметрах конструкции вызывают малые отклонения в параметрах рабочих процессов;

4) неисправности развиваются достаточно медленно — от 0,1 с до десятков секунд;

5) управляющие воздействия на объект или какие-либо внешние возмущения известны либо отсутствуют.

**Способы формирования и виды диагностических признаков.** С помощью моделей и измерений можно сформировать разнообразные

диагностические признаки состояния объекта контроля. Эти признаки используются в алгоритмах поиска неисправности, которые включаются СФД при изменении параметров функционирования двигателя. Изменения параметров могут быть вызваны в основном следующими причинами: переходом на регламентируемый режим работы под воздействием системы управления; возникновением неисправности.

В первом случае изменение параметров не связано с нарушением нормального функционирования двигателя. Во втором — происходит нарушение нормальной взаимосвязи параметров. Причем нарушение может быть вызвано изменением какого-либо параметра конструкции агрегата, описываемым соответствующим коэффициентом уравнения (например, изменение площади проточной части трубопровода), или установлением новых взаимосвязей, изменяющих структуру исходной системы уравнений (например, при нарушении герметичности).

*Диагностические признаки первого вида.* Если в каком-либо уравнении математической модели двигателя

$$f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_j, \dots, x_n^*) = 0$$

подставить в левую часть все измеряемые и все расчетные параметры, то в правой части при возникновении неисправности может возникнуть отличная от нуля невязка  $\delta f$ :

$$f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_j, \dots, x_n^*) = \delta f \neq 0.$$

В этом случае признак

$$\delta f \neq 0 \quad (1)$$

следует рассматривать как достаточный признак наличия неисправности в контуре, а признак  $\delta f = 0$  как необходимый (но не достаточный!) признак отсутствия неисправности. Признак (1) в целях классификации будем называть диагностическим признаком первого вида.

Этот признак является поверочным при принятии решения по другим признакам.

*Диагностические признаки второго вида.* Если  $\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \neq 0$ , где частная производная вычислена при заданных значениях  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ , то невязка вида (1) в силу непрерывности  $f$  отображается на невязку измеренного или регламентируемого значения  $x_j^*$  и расчетного значения параметра  $x_j^0$ , т.е. может быть сформирована абсолютная невязка вида

$$\delta x_j = x_j^0 - x_j^*, \quad (2)$$

где  $x_j^0$  определяется из решения уравнения  $f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_j, \dots, x_n^*) = 0$ ; а  $x_j^*$  принимается как решение уравнения  $f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_j, \dots, x_n^*) = \delta f$ .

Такие невязки (2) будем называть диагностическими признаками второго вида.

1. Если все признаки  $\delta x_j$  удовлетворяют условию  $\delta x_j = 0$ , то принимается решение о нормальном функционировании двигателя и кондиционности измерений и процедура диагностирования заканчивается.

2. Если только один признак  $\delta x_j$  не равен нулю, принимается решение о некондиционном измерении параметра.

3. Если два и более  $\delta x_j$  не равны нулю, возможна неисправность, и процедура контроля продолжается в целях локализации неисправности. Для этого используется метод структурного исключения [1].

*Диагностические признаки третьего вида.* Эти признаки используются для локализации неисправности по методу структурного исключения.

Схематически идею диагностирования методом структурного исключения можно представить следующим образом. Предположим, что неисправность вызвала изменение связи между параметрами, описываемой уравнением  $f_m$  в исходной системе уравнений  $A$ . Если исключить это “нарушенное” уравнение из уравнений системы  $A$ , то оставшаяся, укороченная часть системы уравнений  $A_m$  будет по-прежнему описывать связи в нормально функционирующей, исправной части двигателя. Для того чтобы решить систему уравнений  $A_m$ , ее нужно замкнуть (дополнить) тривиальными уравнениями  $x_i = x_i^*$ . Измеряемый параметр  $x_i^*$  назовем исключаяющим параметром. Решив систему  $A_m$ , найдем расчетное значение  $x_j^m$  какого-либо другого измеряемого параметра  $x_j^*$ , который назовем контрольным параметром. Рассогласование

$$\delta x_i^m = x_i^m - x_j^m \quad (3)$$

является признаком состояния связи  $f_m$ , а именно если  $\delta x_i^m = 0$ , то неисправность нарушает связь (уравнение)  $f_m$ . Если  $\delta x_i^m = 0$  при исключении связей  $m, m_1, m_2, \dots, m_k$ , то объединение этих связей образует контур.

Признаки (3) назовем диагностическими признаками третьего вида. Для их формирования необходимо не менее двух датчиков.

Если связь нарушена, то после ее исключения все признаки первого и второго вида (при отсутствии некондиционных измерений) должны быть в норме.

*Диагностические признаки четвертого вида.* Эти признаки используются для определения параметра конструкции, значение которого регламентировано документацией и который изменился в результате неисправности. Для его формирования в локализованную по методу

структурного исключения связь подставляем измеренные и расчетные значения параметров, а искомый параметр конструкции (обозначим его, например,  $A$ ) рассматриваем как неизвестный. Решая уравнение  $f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_j, \dots, x_n^*) = \delta f$  относительно  $A$ , найдем расчетное значение  $A^0$  и сформируем диагностический признак четвертого вида

$$\delta A = A_0 - A_{\text{рег}},$$

где  $A_{\text{рег}}$  — регламентируемое значение параметра  $A$ .

Аналогичный признак можно сформировать, если принять параметр  $A$  как неизвестный в исходной системе уравнений модели. Однако принцип перебора всех параметров без предварительной локализации соответствующей связи неприемлем для систем уравнений большой размерности и большого массива входящих в нее коэффициентов.

Принятие решения такое же, как по признакам третьего вида.

*Диагностические признаки пятого вида.* Эти признаки аналогичны тем, которые рассмотрены в рамках метода локализации неисправностей в динамических системах в частотной области [2], и являются распространением на временную область.

Представим исходную систему уравнений модели в малых приращениях при условии отсутствия управляющих воздействий и нарушения только связи  $f_m$ , описываемого отклонением  $\delta f_m$  в правой части  $m$ -го уравнения (строка  $m$ ) следующей системы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_i} \delta x_i + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_j} \delta x_j + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \delta x_n &= 0; \\ \dots & \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} \delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_m}{\partial x_i} \delta x_i + \dots + \frac{\partial f_m}{\partial x_j} \delta x_j + \dots + \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \delta x_n &= \delta f_m; \quad (4) \\ \dots & \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_i} \delta x_i + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_j} \delta x_j + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \delta x_n &= 0. \end{aligned}$$

Решив систему (4), найдем коэффициенты пропорциональности  $K_{ij}^m$  отклонений параметров  $\delta x_i^m$  и  $\delta x_j^m$ , возникших в результате нарушения связи  $f_m$ :

$$K_{ij}^m = \frac{\delta x_i^m}{\delta x_j^m} = (-1)^{i-j} \frac{\Delta_{im}}{\Delta_{jm}}. \quad (5)$$

Коэффициент  $K_{ij}^m$  — комплексный коэффициент связи параметров  $\delta x_i^m$  и  $\delta x_j^m$  при нарушении связи  $f_m$ ;  $\Delta_{im}$ ,  $\Delta_{jm}$  — определители подматриц матрицы коэффициентов системы (4), полученные при вычеркивании из нее строки  $m$  и столбцов  $i$  и  $j$ , при этом  $\Delta_{im} \neq 0$ ,  $\Delta_{jm} \neq 0$ .

Если структура модели такова, что  $K_{ij}^m = K_{ij}^{m1} = K_{ij}^{m2} = \dots = K_{ij}^{mk}$ , то связи с номерами  $m, m_1, m_2, \dots, m_k$  образуют контур и полагается, что неисправность локализована в пределах этого контура.

Понятно, что при определении численных значений коэффициентов пропорциональности по (5) следует избегать появления близких к нулю значений в знаменателе. Если  $K_{ij}^m = 0$ , то  $\delta x_i = 0$  и параметр  $x_i$  не чувствителен к нарушению связи  $m$ . Сформируем диагностический признак, локально чувствительный к нарушению в контуре  $f_m$ , когда возникают вызванные неисправностью отклонения измеренных параметров  $\delta x_i^*$  и  $\delta x_j^*$ :

$$\delta x_{ij}^m = \delta x_i^* - K_{ij}^m \delta x_j^*. \quad (6)$$

Если число измеряемых параметров равно  $k$ , то для контроля каждого контура формально существует  $C_k^2$  признаков вида (6), т.е. признаки  $\delta x_{ji}^m$  не рассматриваются из соображений симметрии как не дающие дополнительной информации. Поясним это на следующем примере.

Пусть для контроля используются три датчика  $x_1^*, x_2^*, x_3^*$ . Тогда могут быть сформированы такие признаки, как

$$\delta x_{12}^m = \delta x_1^* - K_{12}^m \delta x_2^*;$$

$$\delta x_{13}^m = \delta x_1^* - K_{13}^m \delta x_3^*;$$

$$\delta x_{23}^m = \delta x_2^* - K_{23}^m \delta x_3^*;$$

а признаки  $\delta x_{21}^m, \delta x_{31}^m, \delta x_{32}^m$  не рассматриваются из соображений симметрии.

При условии кондиционности измерений  $x_1^*, x_2^*, x_3^*$ , если все признаки  $\delta x_{ij}^m = 0$ , то принимается решение о наличии неисправности в связи  $m$ .

Признак (6) обладает следующими свойствами:

- 1) независимостью от систематической погрешности измерения параметров. Действительно, если рассматриваются отклонения измеренных параметров, то систематическая ошибка измерения уничтожается;
- 2) эталонные значения  $K_{ij}^m, m = 1, 2, \dots, n$  для всех связей (контуров) можно рассчитать с помощью модели до эксперимента для каждого режима испытаний.

Естественно, что расчет коэффициентов пропорциональности непосредственно по формуле (5) для систем уравнений большой размерности представляет значительные затруднения. Поэтому предлагается следующая вычислительная процедура, в которой используется модель (4).

1. Исходная система уравнений модели линеаризуется вблизи расчетного режима работы двигателя по циклограмме.

2. В правой части  $m$ -го уравнения линеаризованной системы (4) ноль заменяется на значение  $b_m$ . Эти значения можно назначать конкретно для каждого уравнения. Для типоразмеров двигателей ОАО “НПО Энергомаш” приемлемо  $b_m = 1$ .

3. На каждом шаге  $m$ ,  $m = 1, 2, \dots, n$ , из решения линеаризованной системы уравнений определяются расчетные значения измеряемых параметров  $\delta x_j^m$ .

4. Значения коэффициентов пропорциональности определяются по формуле  $K_{pq}^m = \frac{\delta x_p^m}{\delta x_q^m}$ .

**Модельная задача.** Рассмотрим процедуру формирования коэффициентов пропорциональности, алгоритм разбиения на локально диагностируемые контуры и локализации неисправности на примере решения модельной задачи — диагностики системы гидромагистралей, схема которой приведена на рисунке.

Полагая управляющие воздействия  $p_1, p_2, p_3$  константами, получаем следующую систему уравнений в приращениях (исходные уравнения не приводим в силу их общеизвестности):

$$\begin{aligned} f_1 &= \delta p_4 + a_1 \delta G_1 = 0; \\ f_2 &= \delta p_4 + a_2 \delta G_2 = 0; \\ f_3 &= \delta p_4 - a_3 \delta G_3 = 0; \\ f_4 &= \delta G_1 + \delta G_2 - \delta G_3 = 0. \end{aligned}$$

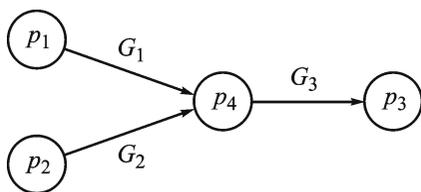
Этой системе уравнений соответствует матрица коэффициентов

$$\begin{pmatrix} 1 & a_1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & a_2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -a_3 \\ 0 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Положим также, что измерены приращения параметров  $p_4, G_1, G_2$ , и обозначим их соответственно  $\delta x_1, \delta x_2, \delta x_3$ . Используя матрицу (7) и соотношение (5), получаем коэффициенты пропорциональности отклонений для пар параметров  $\delta x_1, \delta x_2, \delta x_3$ .

В табл. 1 приведены коэффициенты пропорциональности параметров при нарушении связей.

Нижние индексы при коэффициентах пропорциональности  $K$  указывают на индексы пар параметров, верхние — на номера нарушенных связей. Из табл. 1 следует, что  $K_{12}^2 = K_{12}^3 = K_{12}^4$ ;  $K_{13}^1 = K_{13}^3 = K_{13}^4$ ;



Система гидромагистралей

**Коэффициенты пропорциональности отклонений параметров  
при нарушении связей**

Номер связи (уравнения)	Диагностические признаки		
	$\delta x_{12}^i$	$\delta x_{13}^i$	$\delta x_{23}^i$
1	$K_{12}^1 = -\frac{a_2 a_3}{a_2 - a_3}$	$K_{13}^1 = a_2$	$K_{23}^1 = \frac{a_1 a_3}{a_1 - a_3}$
2	$K_{12}^2 = -a_1$	$K_{13}^2 = \frac{a_3 - a_2}{a_3}$	$K_{23}^2 = \frac{a_3}{a_2 - a_1}$
3	$K_{12}^3 = -a_1$	$K_{13}^3 = a_2$	$K_{23}^3 = -\frac{a_2}{a_1}$
4	$K_{12}^4 = -a_1$	$K_{13}^4 = a_2$	$K_{23}^4 = -\frac{a_2}{a_1}$

Таблица 2

**Таблица неисправностей**

Номер контура	Обозначение связи	Диагностические признаки $\delta G_1$					
		$\delta x_{12}^1$	$\delta x_{12}^2$	$\delta x_{13}^1$	$\delta x_{13}^2$	$\delta x_{23}^1$	$\delta x_{23}^3$
1	$f_1$	+		+		+	
2	$f_2$		+		+		+
3	$f_3 \cup f_4$		+	+			+

$K_{23}^3 = K_{23}^4$ . Исходя из этого формируется следующая таблица неисправностей (табл. 2).

Символом “+” отмечены признаки, которые находятся “в норме” при неисправности соответствующего контура. Например, если признаки  $\delta x_{12}^2$ ,  $\delta x_{13}^1$  и  $\delta x_{23}^3$  “в норме”, то неисправность содержится в контуре  $F$ , представляющем объединение связей  $f_3$  и  $f_4$ .

Анализ табл. 2 дает возможность выявить наиболее информативные измерения. Например, диагностические признаки, сформированные по измерениям параметров  $\delta G_1$  и  $\delta G_2$  — соответственно  $\delta x_{23}^1$ ,  $\delta x_{23}^2$ ,  $\delta x_{23}^3$  обеспечивают локальный диагноз каждого из трех контуров. Остальные признаки можно рассматривать как подтверждающие эти диагнозы и использовать их для проверки кондиционности измерений. Понятно, что могут совпадать не только аналитические выражения, но и числовые значения еще каких-либо коэффициентов пропорциональности, Тогда и число контуров, и число признаков изменяется, что приводит к изменению структуры табл. 2.

Если при отсутствии возмущения со стороны системы управления на контур  $m$  возникают отклонения параметров функционирования, то могут быть приняты следующие решения:

1) если все признаки, соответствующие строке  $m$  табл. 1, “в норме”, то принимается решение о том, что нарушено нормальное функционирование контура  $m$ .

2) если какие-либо признаки в строке  $m$  не в норме, а остальные в этой же строке “в норме”, то принимается решение, что нарушено

нормальное функционирование контура  $m$  и (одновременно) недостоверно измерение каких-либо параметров, образующих признаки не “в норме”.

Заметим, что все признаки, относящиеся к первой строке табл. 2 будут “в норме” и при нарушении связи  $f_1$ , и при подаче управляющих воздействий, например, на изменение сопротивления контура 1. В этом случае гипотеза о наличии неисправности, в том числе и несанкционированного управляющего воздействия, может быть проверена с помощью диагностических признаков второго вида, т.е. по отклонениям расчетных значений параметров от измеренных. Эти признаки должны быть “в норме” и в случае отсутствия неисправности, и в случае санкционированного управления связью  $f_1$ .

**Основные направления развития СФД на основе междисциплинарных 3D-моделей рабочих процессов.** Эксплуатация СФД на базе штатного диагностирования двигателей, разработанных в ОАО “НПО Энергомаш”, поиск новых подходов к решению задач диагностики сложных технических систем, выявление возможностей применения современного междисциплинарного инженерного подхода к расчетно-экспериментальному анализу рабочих процессов и напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции на базе программных комплексов NASTRAN и ANSYS дает возможность сформулировать новый подход к проблеме диагностирования ЖРД, основой которого являются междисциплинарные 3D-модели рабочих процессов.

Междисциплинарная 3D-модель рабочих процессов – это объектно-ориентированная система взаимосвязанных моделей, обеспечивающая с заданной точностью численное моделирование параметров процессов гидрогазодинамики и теплообмена, а также НДС конструкции в трехмерной постановке задачи и с учетом экспериментальных данных.

Анализ особенностей рабочих процессов ЖРД как объекта функциональной диагностики, возможности современных программных продуктов, обеспечивающие детальное моделирование гидрогазодинамики и теплообмена, а также моделирование НДС конструкции в трехмерной постановке существенно расширяют использование функциональной диагностики ЖРД для оценки его технического состояния.

Использование междисциплинарных 3D-моделей обеспечит:

1. Совершенствование одномерных моделей рабочих процессов с сосредоточенными и распределенными параметрами, используемых в настоящее время для проведения процедур разбиения двигателя на локально диагностируемые контуры, поиска неисправного контура и отбраковки аномальных измерений. Это достигается за счет детального описания параметров рабочих в том месте по пространству конструкции, в котором непосредственно проводится измерение. А именно, определяются параметры рабочих тел и нагрузок, приходящих непо-

средственно в точку расположения чувствительного элемента датчика. Понятно, что такая информация не может быть получена средствами одномерного моделирования. Поэтому, для повышения достоверности одномерной модели поставлена и может быть решена новая задача — коррекция одномерной диагностической модели с помощью результатов 3D-моделирования.

2. Детальный анализ рабочих процессов с точки зрения их устойчивости, а следовательно, выработку диагностических признаков устойчивости ЖРД.

3. Создание моделей НДС для выработки достоверных критериев оценки выработанного и прогнозируемого ресурса ЖРД на основе виброакустических и тензоизмерений за счет более детального описания процессов в точке измерений.

Кроме этого направления, которое выведет решение проблемы диагностики ЖРД на принципиально новый уровень, важное значение для проведения процедур защиты двигателя от развивающихся неисправностей имеет решение задачи диагностирования в темпе проведения стендового огневого испытания.

В настоящее время в ОАО “НПО Энергомаш” создана методическая и алгоритмическая база для решения этой важной задачи. На существующей компьютерной технике можно реализовать диагностирование в темпе проведения испытания достаточно медленно (в течение 0,1 и более секунд) развивающихся неисправностей ЖРД. Поэтому диагностирование быстротекущих процессов, таких как горение, требует применения новых, супербыстродействующих ЭВМ.

### **Основные требования, предъявляемые к новым СФД ЖРД.**

1. Система функциональной диагностики должна создаваться совместно с разработкой двигателя и сопровождать двигатель на всех этапах его жизненного цикла — проектирования, изготовления, доводки, товарных поставок и эксплуатации в составе РН.

2. На этапе проектирования двигателя должна быть решена задача по созданию расчетно-экспериментальной базы СФД, обеспечивающей процесс доводки двигателя.

3. На этапе доводки двигателя должна быть решена задача по верификации расчетно-экспериментальной базы СФД по результатам модельных испытаний агрегатов двигателя и огневых стендовых испытаний.

4. На этапе эксплуатации помимо указанных задач должна быть решена задача оценки выработанного ресурса двигателя (для ЖРД многоразового использования).

5. При товарных поставках двигателя должна быть решена задача оценки правильности функционирования двигателя, прошедшего контрольно-технологические испытания.

**Основные требования к расчетно-экспериментальной базе СФД.** *Расчетная база СФД включает в себя:*

1) математические модели рабочих процессов с учетом динамических характеристик конструкции двигателя во временной и частотной областях, в одномерной и трехмерной постановке задачи, с подробным описанием, определяемым требуемой глубиной диагноза;

2) математическую модель процессов, определяющих ресурс двигателя в трехмерной постановке задачи;

3) методы, алгоритмы и программное обеспечение определения нормального функционирования двигателя и поиска неисправности с глубиной диагноза, задаваемой разработчиком двигателя и определяемой разрешающей способностью математической модели и точностью системы измерения;

4) методы, алгоритмы и программное обеспечение определения выработанного ресурса двигателя;

5) методы, алгоритмы и программное обеспечение выбора информативной в рамках математических моделей системы измерения параметров рабочих процессов;

6) методы, алгоритмы и программное обеспечение для верификации математических моделей по результатам модельных испытаний агрегатов двигателя и огневых стендовых испытаний двигателя;

7) методы, алгоритмы и программное обеспечение оценки устойчивости рабочих процессов.

*Экспериментальная база СФД включает в себя:*

1) экспериментальный модальный анализ агрегатов и двигателя в целом для обеспечения коррекции моделей;

2) малоцикловые испытания образцов материалов конструкции при высоких и криогенных температурах для верификации модели, используемой при оценке ресурса двигателя;

3) вибропрочностные усталостные испытания элементов конструкции при высоких и криогенных температурах для верификации модели, используемой при оценке ресурса двигателя;

4) штатное диагностирование состояния двигателя в темпе огневых стендовых испытаний.

**Выводы.** 1. Создание новых, прорывных технологий функциональной диагностики ЖРД невозможно без разработки междисциплинарных моделей рабочих процессов ЖРД — систем взаимосвязанных моделей, обеспечивающих с заданной точностью численное моделирование параметров процессов гидрогазодинамики и теплообмена, а также НДС конструкции в трехмерной постановке задачи и с учетом экспериментальных данных в широком диапазоне функционирования ЖРД. Такие модели обеспечат в масштабе реального времени получение достоверной диагностической информации о параметрах рабочих процессов непосредственно в местах расположения чувствительных элементов датчиков; моделирование повреждаемости динамически нагруженных элементов конструкции двигателя, определяющих его ресурс; выявление диагностических признаков неустойчивости рабочих

процессов и потери устойчивости элементов конструкции и конструкции двигателя в целом; уточнение одномерных моделей двигателя, используемых для проведения диагностических процедур поиска и локализации неисправностей в темпе проведения испытаний.

2. Для проведения диагностических процедур в масштабе реального времени в целях парирования предаварийных ситуаций при стендовых испытаниях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Мартыросов Д. С.* Диагностирование сложных технических систем на основе математической модели и измеренных параметров методом структурного исключения. М.: Изд-во МАИ. 1998. 56 с.
2. *Коломенцев А. И., Мартыросов Д. С.* Методы функциональной диагностики ДЛА. М.: Изд-во МАИ. 2000. 112 с.

## REFERENCES

1. *Martirosov D. S.* Diagnostirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem na osnove matematicheskoy modeli i izmerennykh parametrov metodom strukturnogo isklyucheniya [Diagnosis of complex engineering systems by the structural exception method based on mathematical models and measured parameters]. Moscow, MAI Publ., 1998, 56 p.
2. *Kolomentsev A. I., Martirosov D. S.* Metody funktsional'noy diagnostiki dvigateley letatel'nykh apparatov [Methods of functional diagnostics of flying vehicle engines]. Moscow, MAI Publ., 2002, 112 p.

Статья поступила в редакцию 13.08.2012

Владислав Тимофеевич Буканов — канд. техн. наук, ведущий инженер-конструктор ОАО “НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко”. Автор более 50 научных работ по проектированию и отработке жидкостных ракетных двигателей.

ОАО “НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко”, 141400, Моск. обл., г. Химки, ул. Бурденко, д. 1.

V.T. Bukanov — Cand. Sci. (Eng.), leading engineer-designer of OAO “NPO Energomash im. akad. V.P. Glushko”. Author of more than 50 publications in the field of designing and testing of liquid-propellant rocket engines. OAO “NPO Energomash im. akad. V.P. Glushko”, ul. Burdenko 1, Khimki, Moscow region, 141400 Russia.

Давид Суренович Мартыросов — д-р техн. наук, заместитель начальника отдела ОАО “НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко”. Автор более 70 научных работ по проектированию и отработке жидкостных ракетных двигателей.

ОАО “НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко”, 141400, Моск. обл., г. Химки, ул. Бурденко, д. 1.

D.S. Martirosov — Dr. Sci. (Eng.), deputy head of department of OAO “NPO Energomash im. akad. V.P. Glushko”. Author of more than 70 publications in the field of designing and testing of liquid-propellant rocket engines. OAO “NPO Energomash im. akad. V.P. Glushko”, ul. Burdenko 1, Khimki, Moscow region, 141400 Russia.

Петр Сергеевич Левочкин — канд. техн. наук, заместитель главного конструктора по науке ОАО “НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко”. Автор более 10 научных работ по проектированию и отработке жидкостных ракетных двигателей.

ОАО “НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко”, 141400, Моск. обл., г. Химки, ул. Бурденко, д. 1.

P.S. Levochkin — Cand. Sci. (Eng.), deputy chief designer on science of OAO “NPO Energomash im. akad. V.P. Glushko”. Author of more than 10 publications in the field of designing and testing of liquid-propellant rocket engines. OAO “NPO Energomash im. akad. V.P. Glushko”, ul. Burdenko 1, Khimki, Moscow region, 141400 Russia.