

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ КОНТУРА АВТОМАТА РАЗГРУЗКИ И СТОЯНОЧНОГО УПЛОТНЕНИЯ ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Гемранова Е.А.

*НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко,  
ул. Бурденко, 1, Химки, 141400, Россия  
e-mail: gemranova@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 01.06.2021

Рассматривается задача диагностирования контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения турбо-насосного агрегата жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Предлагается для корректного замыкания системы уравнений контура интегрировать его частную математическую модель в полную математическую модель ЖРД. Введено определение диагностической модели ЖРД. Определены параметры сопряжения контура с параметрами математической модели двигателя. Приведён пример обнаружения и локализации неисправности, возникшей при огневом испытании. Достоверность принятия решения о нормальном или ненормальном функционировании двигателя и локализации неисправности обеспечивается за счет применения многоэтапного контроля, включающего метод контроля характеристик конструкции и метод структурного исключения.

*Ключевые слова:* жидкостный ракетный двигатель, диагностическая модель, автомат разгрузки, стояночное уплотнение, диагностические признаки.

### Введение

Актуальность данной статьи определяется необходимостью обеспечения надежности функционирования мощных жидкостных ракетных двигателей на всех стадиях их жизненного цикла (проектирование, доводка, испытания, эксплуатация). На стадии доводки двигателя могут возникать аварийные ситуации, приводящие к потерям материальной части самого двигателя и огневого стенда. Многие предприятия развивают системы контроля состояния двигателя, в которых используются принципы технической диагностики [1–5]. В контуре автомата разгрузки (АР) и стояночного уплотнения (СУ) турбо-насосного агрегата (ТНА) ЖРД, как показала практика огневых испытаний (ОИ), возникали и развивались во времени неисправности, приводящие к разрушению элементов конструкции двигателя, таких как радиально-упорные подшипники, стояночные уплотнения, ступицы крыльчатки центробежного насоса [6, 7]. Нередко эти неисправности развиваются в течение нескольких и даже десятков секунд [8]. Такие неисправности могут

быть выявлены на ранних стадиях их развития методами функциональной диагностики [9, 10] с использованием измеряемых при ОИ медленно меняющихся параметров и математической модели рабочих процессов двигателя.

До недавнего времени расчетно-экспериментальный анализ аварийных ситуаций, возникающих в контуре АР и СУ, проводился локально, только с использованием математической модели данного контура [11, 12]. В работе [13] отмечается, что задача создания такой одномерной модели является достаточно сложной с точки зрения корректности применения упрощенных частных математических моделей, когда граничные условия назначаются с помощью эмпирических или аппроксимационных зависимостей [14, 15]. Понятно, что интеграция математической модели контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА в математическую модель рабочих процессов двигателя дает возможность получить более полную диагностическую информацию о рассматриваемом контуре, так как в этом случае для замыкания системы уравнений

нет необходимости привлекать аппроксимационные зависимости.

Следует также отметить, что использование для этого нейронной сети [16, 17] не целесообразно, так как для ее обучения требуется провести большое количество ОИ, на которых возникли бы соответствующие неисправности.

В статье поэтапно представлен процесс диагностирования состояния контура АР и СУ, обеспечивающий достоверное принятие решения, начиная с момента выявления времени возникновения неисправности до ее локализации.

### 1. Диагностическая модель ЖРД

Диагностическая модель ЖРД – это модель, которая включает в себя:

- математическую модель ЖРД,
- данные автономных испытаний отдельных агрегатов,
- параметры телеметрии,
- алгоритмы поиска неисправности и принятия решения.

Под математической моделью процессов ЖРД в самом общем случае подразумевается система уравнений, описывающая взаимосвязь его параметров: давлений, расходов, температур, оборотов турбонасосных агрегатов, перемещений подвижных частей и т.п. в соответствии с фундаментальными физическими законами – законами сохранения энергии, массы и импульса. Математические модели процессов ЖРД представляют собой физико-математические конструкции в виде систем алгебраических и дифференциальных уравнений и, как показывает практика, достаточно адекватно описывают рабочие процессы с сосредоточенными параметрами.

Данные автономных испытаний агрегатов обычно включают в себя напорные, мощностные характеристики и КПД насосов и турбин, рабочие характеристики агрегатов управления по тяге и соотношению компонентов топлива, гидравлические характеристики трактов охлаждения камер и газогенераторов и т.п.

Параметры телеметрии – это медленно меняющиеся параметры, измеряемые в процессе ОИ, связанные с соответствующими переменными системы уравнений математической модели.

Алгоритмы поиска неисправности и принятия решения разрабатываются на основе метода контроля характеристик и метода структурного исключения [18, 19].

К основным характеристикам диагностической модели, которые определяют глубину и достоверность диагноза, относятся:

- размерность – количество переменных параметров модели, определяющих подробность описания процессов;
- количество параметров модели, доступных для измерения при работе двигателя;
- чувствительность измеряемых параметров к возникновению и развитию неисправностей;
- погрешности характеристик агрегатов, определенные при автономных испытаниях;
- погрешности измерений.

При разработке диагностических моделей и методов диагностирования принимаются следующие допущения и ограничения [19]:

- 1) неисправность зарождается и развивается в одном и только в одном элементе конструкции;
- 2) неисправность порождает такие изменения параметров характеристик конструкции и рабочей среды, которые могут быть измерены;
- 3) малые отклонения в параметрах конструкции вызывают малые отклонения в параметрах рабочих процессов;
- 4) неисправности развиваются со скоростью, не превышающей скорость звука в рабочей среде;
- 5) управляющие воздействия на двигатель или какие-либо внешние возмущения или известны, или отсутствуют;
- 6) неисправность конструкции приводит к нарушению функциональной связи между параметрами, описываемой каким-либо уравнением или уравнениями математической модели, и проявляется в изменении измеряемых параметров.

Диагностические модели используются для проведения разнообразных диагностических процедур, выявляющих такие виды неисправностей, которые вызывают нарушение взаимосвязей между параметрами, определяющими нормальное функционирование двигателя

### 2. Математическая модель контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения

Контур АР и СУ включает в себя: уплотнение между полостями с жидким окислителем и полостью окислительного газа в зазоре между статором и ротором турбины, лабиринтное уплотнение АР, полость перед радиально-упорным подшипником (РУП) и СУ, полость за СУ, лабиринтное уплотнение переднего диска центробежного колеса насоса окислителя, лабиринтное уплотне-

ние СУ, тракт охлаждения РУП, тракт перепуска окислителя на вход в насос [20].

В математическую модель контура АР и СУ входят уравнения, описывающие балансы расходов и давлений в жидкостных трактах, сил, действующих на элементы конструкции насоса окислителя и турбины. Важными параметрами данного тракта также являются величина зазора СУ, величина зазора АР и баланс сил, действующих на РУП. Система уравнений контура АР и СУ замыкается параметрами, по которым этот контур сопрягается с параметрами двигателя. К этим параметрам относятся:

- давление окислителя на входе в насос;
- давление окислителя на выходе из насоса;
- давление газа на входе в турбину;
- статическое давление газа на выходе из турбины;
- давление газа на входе в ротор турбины корневое;
- обороты ТНА;
- расход окислителя через насос;
- расход окислителя на входе в смесительную головку газогенератора;
- расход газа через турбину ТНА;
- отношение окружной скорости турбины к адиабатной.

Математическая модель контура АР и СУ интегрирована в основную математическую модель ЖРД. По данной модели проведен анализ испытания двигателя, которое завершилось аварийным отключением.

### 3. Диагностирование контура АР и СУ в процессе ОИ

Процедура диагностирования состоит из четырех этапов. На первом этапе определяется момент времени возникновения неисправности, выявляемый средствами диагностирования.

Для этого в начале каждого стационарного режима в момент времени  $t_0$  выбирается интервал времени (окно)  $\tau$ , в котором определяют средние значения измеряемых параметров  $\bar{x}_0^*$ . Затем в скользящем окне «шириной»  $\tau$ , смещающемся на каждом шаге  $k$  по времени на величину дискретности измерений  $\Delta t$ , определяют средние значения измеряемых параметров  $\bar{x}^*(t_k)$  и вычисляют диагностические признаки:

$$\delta_1(t_k) = \frac{(\bar{x}^*(t_k) - \bar{x}_0^*)}{\max(|\bar{x}_k^*|, |\bar{x}_0^*|)}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Если в момент времени  $t_m$  три и более диагностических признака вида (1) одновременно или поочередно выходят за границы своих допусков, то этот момент времени принимается за момент времени обнаружения неисправности средствами контроля.

Поясним это на следующем примере. На рис. 1, а и, для наглядности, выделено на рис. 1, б видно, что отклонения трех параметров: давление окислителя до радиально-упорного подшипника, перемещение вала ТНА и давление окислителя в коллекторе перепуска последовательно вышли за границы допустимого диапазона, принятого для оценки нормального функционирования двигателя. Следовательно, момент времени выхода третьего параметра — перемещение вала ТНА — за границы допуска можно рассматривать как момент времени обнаружения неисправности, фиксируемый средствами контроля. Как видно из данных, приведенных на рис. 1, этот момент времени определяется спустя 1,5 с после момента начала тренда измеряемых параметров. Следует особо отметить, что измеряемые и расчетные параметры двигателя, не входящие в контур АР и СУ, практически не среагировали на возникновение неисправности.

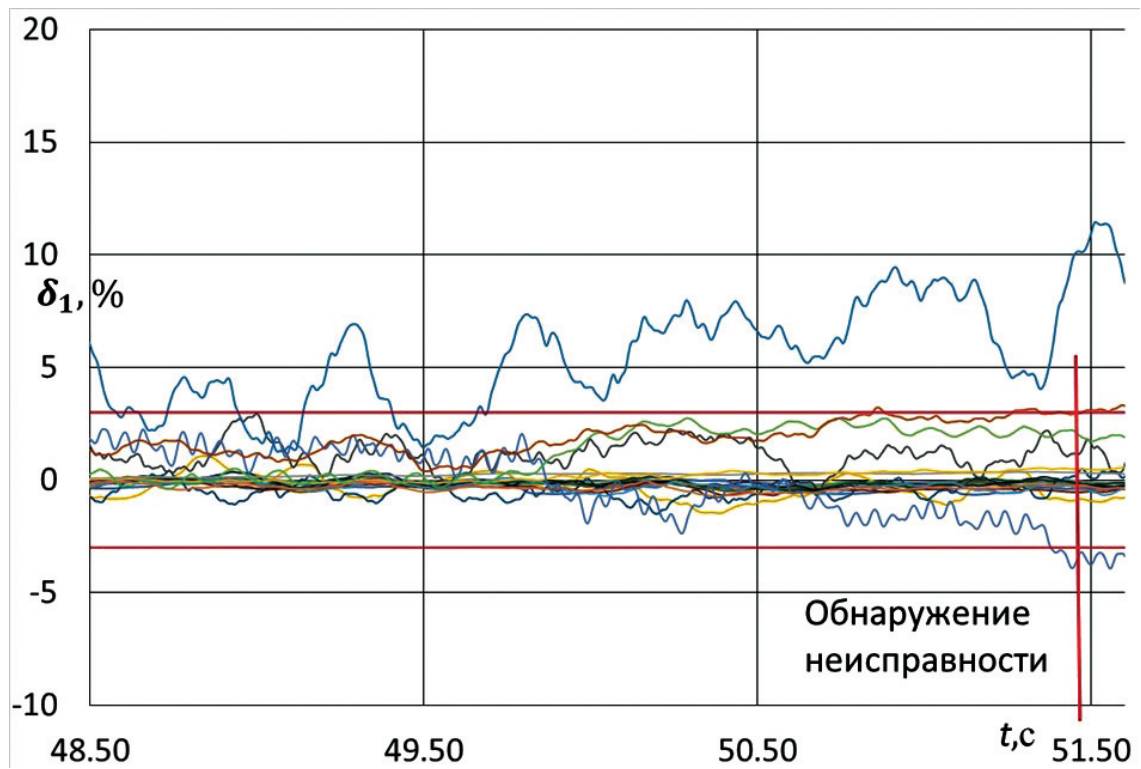
Очевидно, что после обнаружения неисправности математическая модель нормального функционирования двигателя адекватна лишь на ограниченном отрезке времени.

С момента времени обнаружения неисправности начинается второй этап процедуры диагностирования, необходимый для подтверждения достоверности принятия решения на первом этапе. Для этого контролируются отклонения  $\delta_2(t_m)$  измеренных параметров  $x^*(t_m)$  от параметров, рассчитываемых по математической модели  $x_0(t_m)$ :

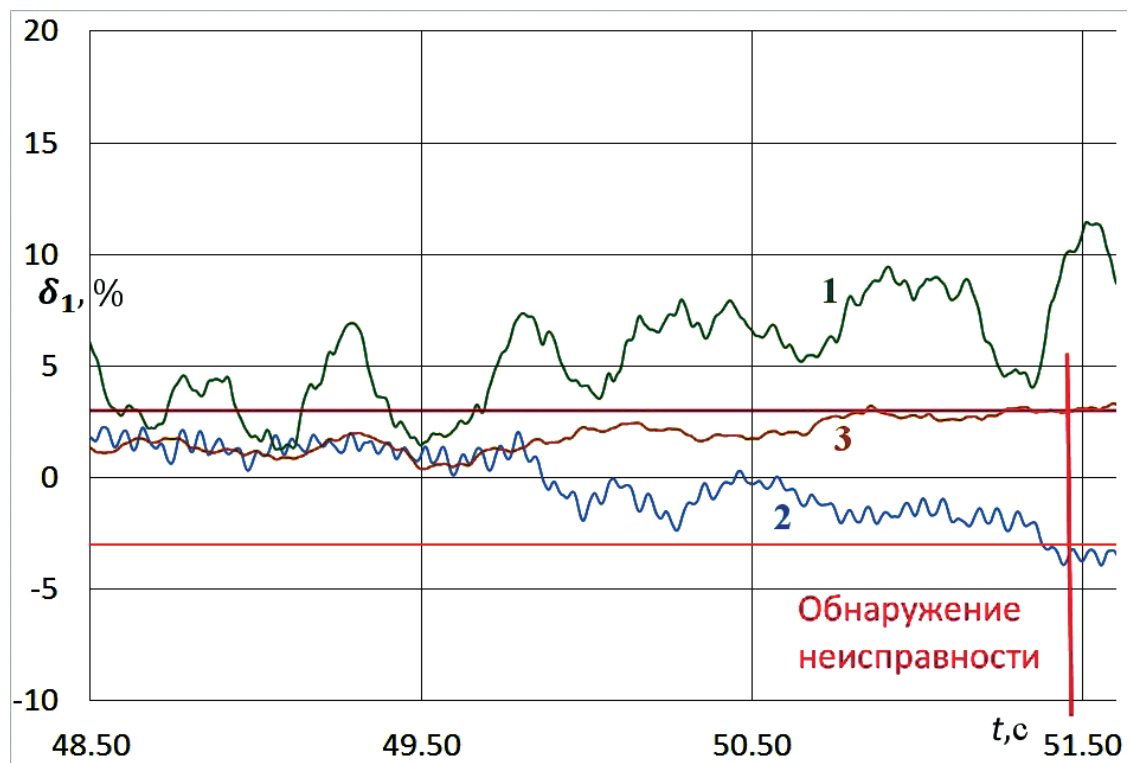
$$\delta_2(t_m) = \frac{(x^*(t_m) - x_0(t_m))}{\max(|x_0|, |x^*|)} \quad (2)$$

На рис. 2 видно, что в момент времени  $t_m$  три невязки вида (2) измеренных и расчетных значений тех же параметров, что и на первом этапе, вышли за пределы допуска. Это подтверждает достоверность определения момента времени обнаружения неисправности.

На третьем этапе производится локализация неисправности путем контроля характеристик



a)



б)

Рис. 1. Отклонения текущих средних значений параметров двигателя от среднего измеренного значения в начале режима: а — при возникновении неисправности; б — отклонения трех параметров, по которым принимается решение о возникновении неисправности; 1 — отклонение давления окислителя на входе в радиально-упорный подшипник; 2 — отклонение перемещения вала ТНА; 3 — отклонение давления окислителя в коллекторе перепуска

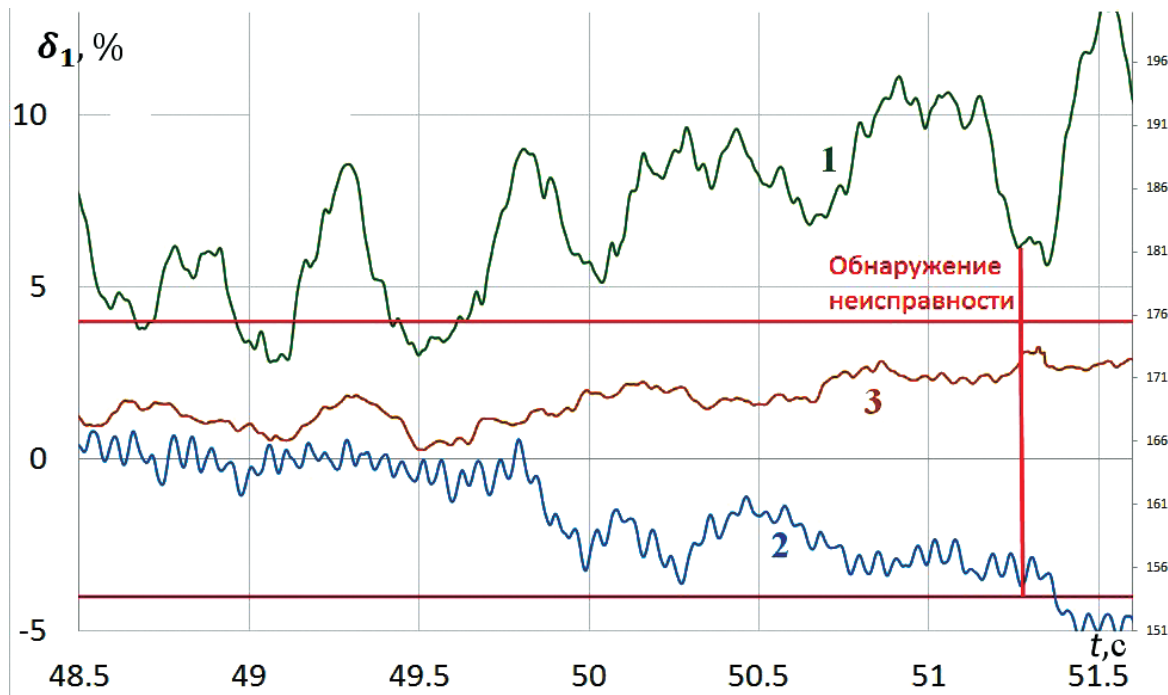


Рис. 2. Отклонения измеренных значений параметров контура от моделируемых: 1 — отклонение давления окислителя на входе в радиально-упорный подшипник; 2 — отклонение перемещения вала ТНА; 3 — отклонение давления окислителя в коллекторе перепуска

конструкции двигателя с использованием всех измеряемых параметров. Метод контроля характеристик конструкции заключается в следующем. В  $N$  характеристик конструкции двигателя (обычно это характеристики автономных испытаний) мультипликативно вводятся коэффициенты  $K_{ch}$  как неизвестные в системе уравнений диагностической модели; затем, помимо параметров на входе в двигатель, в систему уравнений подстав-

ляют значения  $N$  измеряемых параметров и, решая полученную систему, определяют значения неизвестных коэффициентов. Диагностические признаки состояния двигателя определяются по формуле:

$$\delta_3(t_m) = \frac{(K_{ch} - 1)}{\max(1, |K_{ch}|)} \tag{3}$$



Рис. 3. Локализация неисправности. Отклонение силы, действующей на передний диск центробежного колеса насоса окислителя

Если какой-либо из диагностических признаков (3) вышел за пределы допуска, то соответствующая ему характеристика двигателя признается нарушенной. На рис. 3 показано, что вызванное неисправностью отклонение силы, действующей на передний диск центробежного колеса насоса окислителя при ОИ, от её значения, определенного при автономных испытаниях, превысило установленное пороговое значение. Отклонения остальных характеристик автономных испытаний находятся в пределах допусков.

Для повышения достоверности принятия решения о локализации неисправности можно перейти на четвертый этап диагностирования. На этом этапе определяют функциональные связи, нарушенные в результате неисправности. При этом используется метод структурного исключения [19, 21], который заключается в следующем:

$N$  измеряемых параметров подставляют в систему уравнений как известные, исключают из нее  $N$  уравнений, решают укороченную систему уравнений, затем подставляют в исключенные уравнения расчетные и измеренные значения параметров и, если в одном или нескольких из этих уравнений нарушается допустимое равенство, то принимается, что неисправность локализована в

контуре двигателя, описываемом «нарушенными» уравнениями.

Результаты диагностирования на четвертом этапе представлены на рис. 4.

### Выводы

1. Применение диагностической модели ЖРД, включающей контур АР и СУ, обеспечивает получение полной информации о функционировании двигателя.

2. На примере контроля состояния ЖРД при стендовом огневом испытании представлена последовательность процедур диагностирования, в результате которых обнаружена и локализована неисправность, вызвавшая дисбаланс сил на радиально-упорном подшипнике насоса окислителя и увеличение давления в полости СУ насоса окислителя.

3. Достоверность принятия решения на каждом предыдущем этапе диагностирования подтверждается контролем на последующем этапе с использованием метода контроля характеристик и метода структурного исключения.

4. Изложенные процедуры диагностирования могут быть использованы при анализе функционирования широкого класса сложных технических систем.

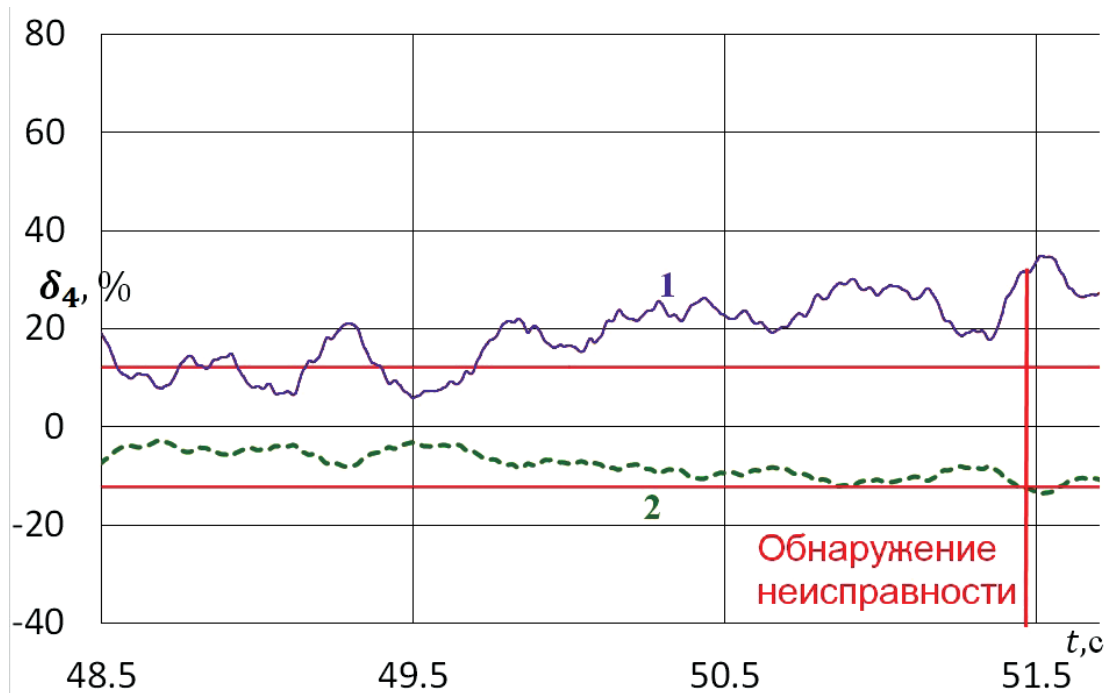


Рис. 4. Нарушение характеристик агрегатов: 1 — нарушение уравнения перепада давления в тракте подвода окислителя в стояночное уплотнение; 2 — нарушение уравнения баланса сил на насосе окислителя и рабочем колесе турбине

## Библиографический список

1. Васин А.С., Венгерский Э.В. Автоматизированный контроль и диагностика сложных пневмогидравлических объектов // Новые наукоемкие технологии в технике: Энциклопедия. — М.: МЦ «Аспект», 1994. Т.1. — 280 с.
2. Буканов В.Т., Колбасенков А.И., Мартиросов Д.С. Анализ связи между процедурами диагностирования, управления и регулирования ЖРД // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. 2012. № 29. С.174-187.
3. Каменский С.С., Мартиросов Д.С., Коломенцев А.И. Применение методов теории подобия для анализа стационарных рабочих процессов жидкостных ракетных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С.32-37.
4. Тирский А.А. Разработка и исследование автоматизированной системы функционального контроля и диагностирования ЖРД: Дисс. ... канд. техн. наук. — М.: МАТИ, 2001. — 200 с.
5. Meyer C.M., Zakrajsek J.F. Rocket engine failure detection using system identification techniques // NASA Contractor Report 185259. AIAA-90-1993, 18 p. DOI: 10.2514/6.1990-1993
6. Чебаевский В.Ф., Петров В.И. Кавитационные характеристики высокооборотных шнеко — центробежных насосов. — М.: Машиностроение, 1973. — 152 с.
7. Чебаевский В.Ф., Петров В.И. Кавитация в высокооборотных лопастных насосах. — М.: Машиностроение, 1982. — 192 с.
8. Галеев А.Г., Иванов В.Н., Катенин А.В. и др. Методология экспериментальной отработки ЖРД и ДУ, основы проведения испытаний и устройства испытательных стендов: монография. — Киров: Международный центр научно-исследовательских проектов, 2015. — 435 с.
9. Беляев Е.Н., Чванов В.К., Черваков В.В. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей: Учебник. — М.: Изд-во МАИ, 1999. -226 с.
10. Коломенцев А.И., Мартиросов Д.С. Методы функциональной диагностики двигателей летательных аппаратов. — М.: Изд-во МАИ, 2002. — 112 с.
11. Гребенюк А.Т., Каналин Ю.И., Полетаев Н.П. Расчетно-методическое обеспечение проектирования стояночного уплотнения кислородного насоса ЖРД // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П.Глушко. 2014. № 31. С. 131-145.
12. Видишев В.И., Каналин Ю.И., Кухарев В.Н., Маликова С.А., Полетаев Н.П. Уравновешивание и контроль осевой нагрузки радиально-упорных подшипников агрегатов подачи ЖРД РД-170 // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. 2000. № 18. С. 100-114.
13. Demiyanko Yu.V., Dmitrenko A.I., Pershin V.K. Boost Turbopump Assemblies for Hydrogen-oxygen Liquid Propellant Rocket Engines // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit (11-14 July 2004; Fort Lauderdale, Florida). AIAA 2004-3685. DOI: 10.2514/6.2004-3685
14. Дмитренко А.И., Першин В.К. Устройство для осевой разгрузки ротора турбонасосного агрегата. Патент RU 2099567 C1, 20.12.1997.
15. Demiyanko Yu.V., Dmitrenko A.I., Pershin V.K., Grebennikov D.Yu. Investigation of the Performance of a Thrust Balance Device for a Centrifugal Pump Rotor // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit (11-14 July 2004; Fort Lauderdale, Florida). AIAA 2004-3689. DOI: 10.2514/6.2004-3689
16. Moshiri B., Jazbi S.A. Fault Detection and Isolation with RBF Neural Network // IFAC Proceedings Volumes. 1997. Vol. 30. No. 25, pp. 91-96. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)41306-1
17. Koppen-Seliger B., Frank P.M. Fault detection and isolation in technical processes with neural network // 34th IEEE Conference on Decision and Control (13-15 December 1995; New Orleans, LA, USA). DOI: 10.1109/CDC.1995.480701
18. Левочкин П.С., Мартиросов Д.С., Буканов В.Т. Проблемы функциональной диагностики жидкостных ракетных двигателей // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2013. № 1(90). С. 72-78.
19. Мартиросов Д.С. Диагностирование сложных технических систем на основе математических моделей физических процессов и измеряемых параметров методом структурного исключения. — М.: Изд-во МАИ, 1998. — 53 с.
20. Марцинковский В.А., Ворона П.Н. Насосы атомных электростанций. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 256 с.
21. Gear C.W. Differential-algebraic equation index transformations // SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing. 1988. Vol. 9. No. 1, pp. 39-47. DOI: 10.1137/0909004

## STATE DIAGNOSING OF AUTOMATIC RELIEF VALVE CIRCUIT AND PARKING SEAL OF LIQUID ROCKET ENGINE TURBO PUMP

Gemranova E.A.

*NPO Energomash named after academician V.P. Glushko,  
1, Burdenko str., Khimki, 141400, Russia  
e-mail: gemranova@yandex.ru*

### Abstract

As fire tests (FT) practice revealed, defects leading to destruction of engine structure elements, such as radial-thrust bearings, parking seal and blade wheel hub of the centrifugal pump occurred and developed with time in the automatic relief valve (ARV) circuit and parking seal (PS). Very often, such defects were developing in the course of several and even tens of seconds. These defects may be detected at the early stages of their development by the functional diagnostics methods employing slowly changing parameters being measured while the FT and mathematical model of the engine workflow processes.

Until recently, the computational-experimental analysis of accidents occurring in the ARV circuit and PS was performed locally, using only a mathematical model of this circuit, where the boundary conditions were assigned by empirical or approximation dependences. It is clear that integration of the ARV circuit and PS mathematical model into the math model of the engine workflow processes gives an opportunity of obtaining more complete diagnostic information about the circuit being considered. It is worth noting the inexpediency of neural network involving for this purpose due to the necessity of its training on a large number of FTs.

To increase the depth of engine diagnosing and confident control of the ARV and SS circuit state, the system of ARV and SS equations is closed by the parameters, by which this circuit is being conjugated with the engine parameters. By the model obtained in this way, a step-by-step process of the ARV and SS circuit state diagnosing is presented, starting from the moment of identifying the time of a fault occurrence and up to its localization. At each stage, special algorithms are being used to confirm the decisions made at the previous stage. The control begins with determining the moment of malfunction occurrence by measured parameters of the malfunction occurrence time instant. After this, deviations of measured parameters from the ones

computed with the model are being controlled. Then it is necessary to proceed to the control of the engine characteristics deviation from those obtained while autonomous tests of units. Finally, if necessary, the control of functional relations violation by the structural exclusion method is being performed. On the example of liquid rocket engine state control during test bench fire test, the sequence of diagnostic procedures resulted in the malfunction, which caused forces unbalance on the radial-thrust bearing of the oxidizer pump and pressure increase in the cavity of the oxidizer pump control system, was detected and localized, was presented.

The stated diagnostic procedures may be employed in the analysis of a wide class of complex technical systems functioning.

**Keywords:** liquid rocket engine, diagnostic model, automatic relief valve, parking seal, diagnostic signs.

### References

1. Vasin A.S., Vengerskii E.V. *Novye naukoemkie tekhnologii v tekhnike. Entsiklopediya*, Moscow, Aspekt, 1994, vol. 1, 280 p.
2. Bukanov V.T., Kolbasenkov A.I., Martirosov D.S. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko*, 2012, no. 29, pp. 174-187.
3. Kamenskii S.S., Martirosov D.S., Kolomentsev A.I. Similarity theory methods application for lpre steady-flow working procedures analysis. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 32-37.
4. Tirskii A.A. *Razrabotka i issledovanie avtomatizirovannoi sistemy funktsional'nogo kontrolya i diagnostirovaniya ZhRD* (Development and study of LRE automated functional control and diagnostics system). Doctor's thesis, Moscow, MATI, 2001, 200 p.
5. Meyer C.M., Zakrajsek J.F. *Rocket engine failure detection using system identification techniques*. NASA Contractor Report 185259. AIAA-90-1993, 18 p. DOI: 10.2514/6.1990-1993
6. Chebaevskii V.F., Petrov V.I. *Kavitatsionnye kharakteristiki vysokooborotnykh shnekotsentrobezhnykh nasosov* (Cavitation characteristics of high-speed screw-centrifugal pumps), Moscow, Mashinostroenie, 1973, 152 p.



7. Chebaevskii V.F., Petrov V.I. *Kavitatsiya v vysokooborotnykh lopastnykh nasosakh* (Cavitation in high-speed vane pumps), Moscow, Mashinostroenie, 1982, 192 p.
8. Galeev A.G., Ivanov V.N., Katenin A.V. et al. *Metodologiya eksperimental'noi otrabotki ZhRD i DU, osnovy provedeniya ispytaniy i ustroystva ispytatel'nykh stendov* (Experimental testing methodology of LRE and propulsion systems, testing and of test benches devices basics), Kirov, Mezhdunarodnyi tsentr nauchno-issledovatel'skikh proektov, 2015, 435 p.
9. Belyaev E.N., Chvanov V.K., Chervakov V.V. *Matematicheskoe modelirovanie rabocheho protsessa zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* (Mathematical modeling of Liquid Rocket Engine workflow), Moscow, MAI, 1999, 226 p.
10. Kolomentsev A.I., Martirosov D.S. *Metody funktsional'noi diagnostiki dvigatelei letatel'nykh apparatov* (Functional diagnostics methods of flying vehicles engines), Moscow, MAI, 2002, 112 p.
11. Grebenyuk A.T., Kanalin Yu.I., Poletaev N.P. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P.Glushko*, 2014, no. 31, pp. 131-145.
12. Vidishev V.I., Kanalin Yu.I., Kukharev V.N., Malikova S.A., Poletaev N.P. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P.Glushko*, 2000, no. 18, pp. 100-114.
13. Demiyantenko Yu.V., Dmitrenko A.I., Pershin V.K. Boost Turbopump Assemblies for Hydrogen-oxygen Liquid Propellant Rocket Engines. *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit (11-14 July 2004; Fort Lauderdale, Florida)*. AIAA 2004-3685. DOI: 10.2514/6.2004-3685
14. Dmitrenko A.I., Pershin V.K. *Patent RU 2099567 C1*, 20.12.1997.
15. Demiyantenko Yu.V., Dmitrenko A.I., Pershin V.K., Grebennikov D.Yu. Investigation of the Performance of a Thrust Balance Device for a Centrifugal Pump Rotor. *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit (11-14 July 2004; Fort Lauderdale, Florida)*. AIAA 2004-3689. DOI: 10.2514/6.2004-3689
16. Moshiri B., Jazbi S.A. Fault Detection and Isolation with RBF Neural Network. *IFAC Proceedings Volumes*, 1997, vol. 30, no. 25, pp. 91-96. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)41306-1
17. Koppen-Seliger B., Frank P.M. Fault detection and isolation in technical processes with neural network. *34th IEEE Conference on Decision and Control (13-15 December 1995; New Orleans, LA, USA)*. DOI: 10.1109/CDC.1995.480701
18. Levochkin P.S., Martirosov D.S., Bukanov V.T. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie*, 2013, no. 1(90), pp. 72-78.
19. Martirosov D.S. *Diagnostirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem na osnove matematicheskikh modelei fizicheskikh protsessov i izmeryaemykh parametrov metodom strukturnogo isklyucheniya* (Complex technical systems diagnosing based on mathematical models of physical processes and measured parameters by the structural exclusion method), Moscow, MAI, 1998, 53 p.
20. Martsinkovskii V.A., Vorona P.N. *Nasosy atomnykh elektrostantsii* (Nuclear Power Plant Pumps), Moscow, Energoatomizdat, 1987, 256 p.
21. Gear CW. Differential-algebraic equation index transformations. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 1988, vol. 9, no. 1, pp. 39-47. DOI: 10.1137/0909004