

МЕТОД КОНТРОЛЯ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА СТАЦИОНАРНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ ИСПЫТАНИЯ

Каменский С.С.¹, Мартиросов Д.С.^{2*}

¹ НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко,
ул. Бурденко, 1, Химки, 141400, Россия

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,
Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993, Россия

* e-mail: mrtrsv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19.04.2021

Предлагается метод контроля текущего состояния жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) на стационарных и переходных режимах стендового огневого испытания. Предполагается, что неисправность ЖРД является одной из возможных причин изменения статистических характеристик телеметрии, полученных до момента возникновения неисправности. В методе использован алгоритм статистического анализа с использованием критерия Стьюдента. Контроль текущего состояния двигателя на основе данного метода осуществляется в режиме непрерывного сканирования телеметрии медленно меняющихся параметров и обеспечивает оперативное принятие решения о прекращении испытания неисправного двигателя. Метод не требует предварительных оценок границ критериев нормальной работы контролируемого ЖРД и адаптивен к режимам его работы в широких диапазонах изменения тяги и соотношения компонентов топлива.

Ключевые слова: ЖРД, контроль состояния двигателя, статистические методы, аномальные погрешности измерений, критерий Стьюдента.

Введение

Большинство методов контроля состояния технических объектов в том или ином виде используют так называемый контроль по нормативу — оценку текущих значений измеряемых параметров с точки зрения их нахождения внутри заранее определенных диапазонов. Обоснованное предварительное определение диапазонов изменения измеряемых параметров, соответствующих нормальной работе объекта контроля, не тривиально, требует экспертного анализа большого объема экспериментальных данных, прогнозного моделирования, а любая модернизация объекта вынуждает начинать эту работу сначала.

Характерным примером таких методов являются алгоритмы, используемые в системах аварийной защиты (САЗ) [1, 2]. Действительно, предварительный анализ возможных аварийных состояний, в том числе моделируемых, позволяет заранее определить соответствующие граничные

значения параметров объекта контроля и в случае приближения к назначенным границам сформировать команду САЗ на прекращение испытания. В системах функциональной диагностики как ЖРД, так и других сложных технических объектов [3—11] возникновение неисправности определяется по уровням невязок значений измеряемых и моделируемых параметров двигателя и допустимые диапазоны невязок также назначаются в результате анализа предыдущих испытаний.

В то же время современной тенденцией развития методов контроля как в России [12, 13], так и за рубежом [14, 15] является переход от контроля состояния объекта контроля по нормативу к контролю по текущему состоянию, который не требует предварительного анализа границ критериев, соответствующих исправной работе контролируемого объекта, т.к. анализируют его состояние в данный момент времени и по результатам

такого анализа принимают решение о его дальнейшей эксплуатации.

Предложенный в настоящей работе метод является методом контроля по текущему состоянию современного мощного ЖРД и предназначен для применения в темпе поступления сигналов телеметрии при огневом испытании на стенде. Метод позволяет оценить текущее состояние двигателя как на стационарных, так и на переходных режимах без использования статистики предшествующих испытаний.

В этом случае каждая конкретная ситуация рассматривается как продолжение предыдущей работы двигателя на рассматриваемом режиме, для чего статистически подтверждается соответствие или несоответствие текущего состояния двигателя предыстории этого состояния, которая, по результатам предыдущего анализа, признана соответствующей исправной работе двигателя.

Формально такая предыстория, как и информация о текущем состоянии двигателя, является совокупностью измерений его параметров, полученных, начиная с начальной точки контроля, до рассматриваемой.

1. Постановка задачи

Задача состоит в разработке метода контроля состояния ЖРД в режиме реального времени испытания без предварительного назначения допусков на значения измеряемых параметров двигателя, соответствующих его нормальному функционированию на стационарных и переходных режимах испытания в широком диапазоне по уровню тяги и соотношению компонентов топлива. В рамках данной работы под квазистационарными переходными режимами понимаются режимы перехода с одного стационарного режима на другой при дросселировании и форсировании двигателя.

Объектом контроля является современный мощный кислородно-керосиновый ЖРД, выполненный по схеме дожигания генераторного газа в камере сгорания.

Состояние двигателя контролируется в темпе поступления результатов измерений медленно меняющихся параметров (ММП) с дискретностью по времени 0,002—0,005 с, что обеспечивает достаточный объем выборки временного ряда для каждого контролируемого параметра на малых интервалах времени 0,02—0,05 с. Этот интервал кадра контроля вполне приемлем при контроле медленно развивающихся неисправностей. При этом быстрое действие современных

аппаратных средств определения времени возникновения неисправности и ее локализации не превышает 0,1 с [16—19].

Можно предположить, не нарушая физичности поставленной задачи, что причиной аномальных изменений в измерениях сразу нескольких ММП является неисправность [20—22]. Причем неисправность проявляется в таком тренде параметров, который может быть определен на основании предыстории измерений, т.е. измерений, предшествующих началу тренда. Такая постановка задачи дает возможность использовать для её решения статистический анализ на основе алгоритмов, разработанных для выявления результатов измерений с аномальными погрешностями. При этом полагается, что неисправность вызывает такое изменение измеряемых параметров, что статистические характеристики законов распределения временных рядов, формируемых в процессе измерения и не зависящих от абсолютного значения измерения, начинают превышать допустимые (пороговые) значения.

Именно такая постановка задачи контроля решает задачу определения нормального и аномального функционирования двигателя без предварительного определения допусков на измеряемые параметры.

2. Алгоритмы выявления результатов измерений с аномальными погрешностями

В задачах метрологии для корректной оценки истинного значения измеряемого параметра необходимо, в частности, отбраковать результаты, классифицируемые как результаты с грубыми, аномальными погрешностями (промахи), существенно превышающими ожидаемые при данных условиях измерения [23—25]. Аномальными признаются результаты измерений, отклонение которых от среднего значения временного ряда существенно превышает допустимое.

Тогда основанием для принятия решения о том, что «подозрительный» результат не принадлежит данной группе измерений или аномален, служит соотношение

$$|x_n - \bar{x}(n)| > \tau \sigma(n), \quad (1)$$

где x_n — результат измерения n , проверяемый на наличие грубой погрешности; $\bar{x}(n)$ — значение принятого центра распределения выборки n измерений; $\sigma(n)$ — среднее квадратическое отклонение, определенное по полученным n значениям

временного ряда результатов измерения; τ — коэффициент, зависящий от вида и закона распределения, доверительной вероятности и количества измерений, определяющий границу «критической» области (пороговое значение).

Иными словами, нахождение значений случайной погрешности измерений в пределах заданного доверительного интервала подтверждает сохранение закона ее распределения (т.е. нормального поведения), а выход за пределы доверительного интервала свидетельствует о том, что по отношению к центру распределения временного ряда погрешность измерения аномальная (неслучайная).

Классическим примером такого алгоритма является широко известное инженерное «правило трех сигм»: если случайная величина распределена нормально, то абсолютная величина ее отклонения от математического ожидания совокупности измерений не должна превосходить утроенного среднеквадратического отклонения. При этом вероятность выхода измерения за пределы этого допуска не превышает 0,003.

Существуют различные способы решения задачи выявления промахов, например критерии Ирвина, Романовского, вариационного размаха, Диксона, Райта, Смирнова, Шовене [26—26]. Общее для этих способов — использование оценки отклонения от центра распределения, отличия — в вычислении текущих и граничных (критических) значений коэффициентов τ .

3. Контроль текущего состояния ЖРД в реальном масштабе времени испытания на основе алгоритма выявления измерений с аномальными погрешностями

3.1. Стационарный режим

Использование алгоритма выявления результатов измерений с аномальными погрешностями позволяет предложить метод контроля текущего состояния, в котором каждое новое измерение оценивается с точки зрения отклонения его значения от текущего центра распределения временного ряда, являющегося предысторией появления анализируемого измерения и состоящего из измерений этого ММП от некоторой начальной точки данного режима до рассматриваемой.

Очевидно, что исправной работе двигателя на стационарном режиме, при постоянных значениях управления и условий на входе, должны соответствовать стабильные по времени значения измеряемых ММП.

Анализ экспериментальных данных показывает, что при возникновении неисправности появляются результаты измерений, значения которых не соответствуют поддерживаемым в этот момент условиям испытания, сходные по характеру с описанными выше «промахами».

Следовательно, для стационарных режимов работы ЖРД момент возникновения неисправности можно определить как момент отчетливого изменения стабильности значений измеряемых параметров.

Подразумевается, что анализируемые результаты измерений ММП ЖРД получены метрологически корректно — систематические погрешности измерений исключены, а случайные погрешности распределены по нормальному распределению.

Для нормального распределения выборочное среднее арифметическое $\bar{x}(n)$ соответствует центру распределения и возникновение аномальных (неслучайных) погрешностей (возникновение неисправности) соответствует условию отклонения текущего измерения от \bar{x} за текущую границу критической области (1) в виде:

$$|x_n - \bar{x}(n)| \geq \tau_{(p,n)} \sigma(n). \quad (2)$$

Так как количество рассматриваемых измерений достаточно велико, закон распределения и величина среднего отклонения известны, в настоящей работе используется алгоритм, основанный на критерии Романовского в реализации, предложенной в [27], и текущее значение границы критической области $\tau_{(p,n)}$ выражается через критическое значение распределения Стьюдента $t_{(p, n-2)}$ для объема выборки n и выбранной доверительной вероятности p :

$$\tau_{(p,n)} = \frac{t_{(p, n-2)} \sqrt{n-1}}{\sqrt{(n-2) + [t_{(p, n-2)}]^2}}. \quad (3)$$

Практика показывает, что удобнее и нагляднее сравнивать значение относительного отклонения текущего измерения от центра распределения его временного ряда

$$\tau_r = \frac{|x_n - \bar{x}|}{\sigma}$$

и его «критического» значения из (3). Оба этих значения определяются при испытании в процессе поступления измерений параметров двигателя. Момент возникновения неисправности в этом случае фиксируется выходом текущего критерия τ_T за границу критической области $\tau_{(p,n)}$:

$$\tau_m \geq \tau_{(p,n)}. \tag{4}$$

В этом случае делается предположение о том, что в контуре агрегатов ЖРД, связанных с измерениями, принадлежащими критической области, произошло изменение нормального функционирования и фиксируется локальный момент нарушения исправности контура.

На рис. 1 представлена характерная картина изменения во времени текущих значений τ (сплошная линия) и текущей границы критической области $\tau_{(p,n)}$ (пунктир) при измерения давления горючего на выходе 1-й ступени насоса на одном из стационарных режимов ОИ двигателя, которое закончилось возникновением неисправности – закрытием дросселя горючего из-за потери управляемости приводами агрегатов управления. Критическое отклонение измеряемого параметра от центра распределения предыдущих измерений произошло на 279,82 с. Стендовая система управления выключила двигатель на 1,1 с позже, т.е. на 280,98 с, по команде, сформированной САЗ, алгоритм работы которой основывается на методах контроля по нормативу, когда предельные значения параметров регламентированы до проведения испытания.

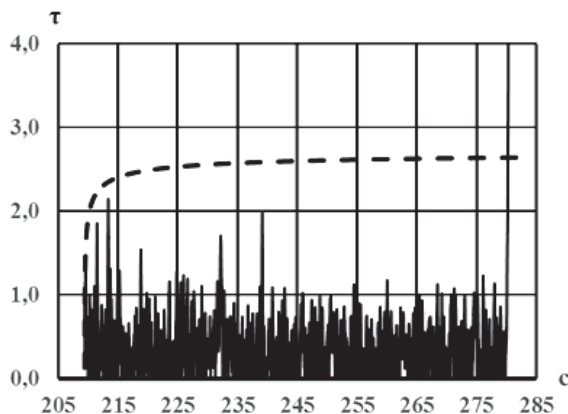


Рис. 1. Стационарный режим – изменение по времени испытания текущих значений относительного отклонения текущего измерения от центра распределения его временного ряда τ_T (—) и границы критической области $\tau_{(p,n)}$ (- -), неисправность на 279,82 с

Для обоснованности окончательных выводов о возникновении неисправности и во избежание ложного выключения двигателя требуется наличие нарушения стационарности, т.е. выполнение условия (4) для не менее трех измеряемых параметров, последовательно вышедших за пороговое значение. В этом случае делается предположение о том, что в контурах агрегатов, связанных с измерениями, принадлежащими критической области, произошло изменение исправного функционирования какого-то агрегата и фиксируется локальный момент нарушения его исправной работы.

Очередность параметров, теряющих стабильный характер, и их номенклатура могут дать информацию для локализации неисправности – определения контура с неисправным агрегатом, т.к. очевидно, что неисправность агрегата или контура агрегатов отражается в первую очередь в тех измерениях, которые так или иначе связаны с функционированием именно неисправного агрегата.

Заметно основное преимущество предлагаемого метода – для каждого момента времени оценка происходящего определяется только статистическим анализом текущего состояния объекта по отношению к предыстории его измерений и сравнением текущих и критических значений соответствующих критериев.

3.2. Переходной режим

Для выявления неисправностей ЖРД на режимах перехода с одного стационарного режима циклограммы испытания на другой статистической оценке на основе критерия Стьюдента подвергаются не ряды значений прямых измерений ММП двигателя, а ряды значений градиентов изменения этих параметров. При этом учитывается, что на режимах дросселирования или форсирования ЖРД градиенты изменения измеряемых параметров с достаточной точностью обладают свойством стационарности в окрестности точки анализа, так как на таких режимах управление двигателем осуществляется изменением угла привода агрегата управления $\alpha(t)$ по линейному закону:

$$\alpha(t) = \alpha_1 + k_\alpha t, \quad t_1 \leq t \leq t_2,$$

где k_α – градиент угла привода; t_1, t_2 – моменты времени начала и окончания режима соответственно.

При этом изменение параметра двигателя $x(t)$ с учетом условия линейности процессов при малых возмущениях будет линейным на отрезках времени Δt , меньших постоянной времени двигателя, и представляется также в виде линейной функции

$$x(t + \Delta t) = x(t) + K_x \Delta t,$$

где K_x — градиент изменения параметра переходном режиме на интервале времени Δt должен обладать свойством стационарности и рассматриваться как косвенное измерение, случайная погрешность которого, в случае исправной работы двигателя, распределена также по нормальному закону.

Аналогично изложенному в разделе 3.1 момент времени резкого и значительного изменения стационарного характера градиента K_x , выраженного в нарушении распределения случайной погрешности измерения, рассматривается как возникновение неисправности, и этот момент времени можно определить по тому же алгоритму, который был предложен для контроля состояния ЖРД на стационарном режиме.

Результат статистического анализа с использованием предлагаемого алгоритма иллюстрируется на следующем примере. На одном из режи-

мов дросселирования двигателя на 43,85 с испытания произошла неисправность, вызвавшая несанкционированное срабатывание клапана, установленного в магистрали подвода горючего в газогенератор. На рис. 2 показано изменение по времени испытания текущих значений τ (сплошная линия) и текущей границы критической области $\tau_{(p,n)}$ (пунктир) для градиентов изменения значений оборотов вала ТНА. Как видно, алгоритм контроля фиксирует действительное время возникновения неисправности именно на 43,85 с испытания как момент нарушения стационарности градиента изменения этого параметра.

Выводы

Разработан метод контроля текущего состояния ЖРД на стационарных и переходных режимах огневого стендового испытания, адаптивный к изменениям режимов работы и внешних условий и позволяющий физически и методически обоснованно подтвердить исправную работу двигателя или определить момент времени возникновения медленно развивающейся неисправности и локализовать ее.

Метод осуществляет контроль состояния двигателя в режиме непрерывного сканирования телеметрии медленно меняющихся параметров и, при необходимости, может обеспечить оперативное принятие решения о прекращении испытания неисправного двигателя в реальном масштабе времени.

Метод не требует предварительного определения диапазонов изменения параметров двигателя, соответствующих его исправной работе, т.к. граница безопасного функционирования двигателя определяется индивидуально для каждой анализируемой ситуации с помощью статистического анализа с использованием критерия Стьюдента.

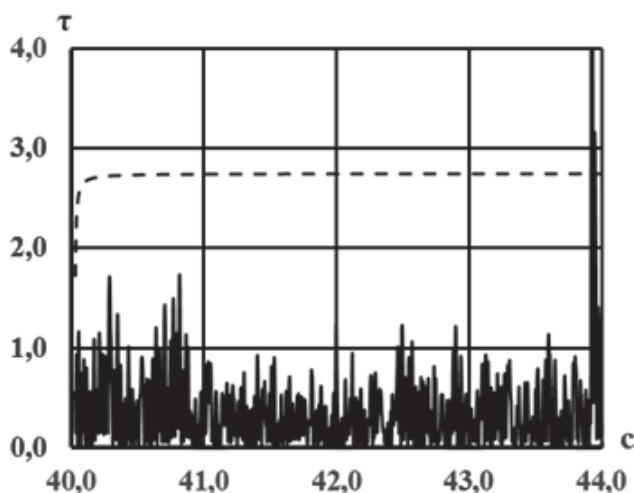


Рис. 2. Определение момента времени возникновения неисправности на 43,85 с нестационарного режима — превышение текущих значений относительного отклонения текущего измерения от центра распределения его временного ряда τ_t (—) границы критической области $\tau_{(p,n)}$ (- -)

Библиографический список

1. Антипов Ю.С., Давыдов И.Б., Ильин О.В. и др. Стендовая система аварийной защиты ЖРД // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. 2002. № 20. С. 173-183.
2. Давыдов И.Б. Бортовая система аварийной защиты ЖРД перспективных РН // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. 2015. № 32. С. 323-334.
3. Лёвочкин П.С., Мартиросов Д.С., Каменский С.С. и др. Система функциональной диагностики жидкостных ракетных двигателей в режиме реального времени // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 2. С. 147-154.
4. 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.
5. Морозов С.А., Костюков В.Н., Трушников С.Г. Использование методов технической диагностики для оценки качества изделий и параметров технологических процессов // Прогрессивная технология и автоматизация производства двигателей и агрегатов. — М.: НИИД, 1986. С. 60.
6. Вешкурцев Ю.М., Костюков В.Н., Бойченко С.М., Костюков А.В. Принципы построения измерительных-диагностических систем машин и оборудования // Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-96: Сборник трудов третьей международной научно-технической конференции: В 11 т. Т. 5. Измерения в радиоэлектронике. — Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного технического университета, 1996. С. 81-86.
7. Kryter R.C., Haynes H.D. Condition Monitoring of Machinery Using Motor Current Signature Analysis // Sound and vibration. 1989. No. 9, pp. 14-21.
8. Таршин М.С. Контроль и диагностика при испытаниях авиадвигателей и гидроагрегатов. — М.: Машиностроение, 1997. — 168 с.
9. Муромцев Ю.Л. Безаварийность и диагностика нарушений в химических производствах. Методы, модели, алгоритмы. — М.: Химия, 1990. — 144 с.
10. Костюков В.Н. Синтез инвариантных диагностических признаков и моделей состояния агрегатов для целей диагностики // Омский научный вестник. 2000. № 12. С. 77-81.
11. Михлин В.М. Прогнозирование технического состояния машин. — М.: Колос, 1976. — 288 с.
12. Александровская Л.Н., Круглов В.И., Кузнецов А.Г. и др. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: Учеб. пособие. — М.: Логос, 2003. — 736 с.
13. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: Учебник. — М.: Логос, 2001. — 208 с.
14. Swikert M. Innovative online monitoring reduces maintenance costs // Orbit. 1997. No. 3, pp. 15-16.
15. Mitchell J.S. Introduction to Machinery Analysis and Monitoring. — Second edition. — Tulsa (Oklahoma): Pennwell Corp, 1993. — 566 p.
16. Бершадский В.А., Коломенцев А.И. Основы технологии стендовых испытаний двигательных установок жидкостных ракет. Автономная отработка. — М.: Изд-во МАИ, 2014. — 216 с.
17. Жуковский А.Е., Кондрусев В.С., Левин В.Я., Окорочков В.В. Испытания жидкостных ракетных двигателей: Учеб. пособие / Под ред. проф. В.Я. Левина. — М.: Машиностроение, 1981. — 199 с.
18. Волок В.П. Испытательные стенды. — М.: Знание, 1980. — 63 с.
19. Шишкин И.Ф., Сергушев Г.Ф. Испытания и испытательное оборудование: Учеб. пособие. — СПб.: СЗТУ, 1999. — 50 с.
20. 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.
21. Ardell V.L. Failure Analysis of Centrifugal Pumps // Sound and vibration. 1997. No. 09, pp. 20-25.
22. Челькис Ф.Ю., Александров В.П. К вопросу о коэффициенте охвата аварийных ситуаций // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. 2007. № 25. С. 247-250.
23. Третьяк Л.Н. Обработка результатов наблюдений. — Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. — 171 с.
24. Закс Л. Статистическое оценивание / Пер. с нем. В.Н. Варыгина. — Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1979. — 120 с.
25. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. — Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1985. — 248 с.
26. Шишкин И.Ф. Прикладная метрология: Учеб. пособие. — М.: ВЗПИ, 1990. — 115 с.
27. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. — М.: Высшая школа, 1982. — 224 с.

A METHOD FOR CURRENT STATE MONITORING OF LIQUID ROCKET ENGINE IN STATIONARY AND TRANSIENT MODES

Kamenskii S.S.¹, Martirosov D.S.^{2*}

¹ *NPO Energomash named after academician V.P. Glushko,
1, Burdenko str., Khimki, 141400, Russia*

² *Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia*

* e-mail: mrtrsv@mail.ru

Abstract

The object of the study is an oxygen-kerosene liquid rocket engine (LRE), realized according to the scheme of the generator gas afterburning in the combustion chamber.

The method proposed in this article is a method for current state monitoring of modern high-power LRE in real-time scale of the test-bench fire tests. It allows estimating its actual state in both stationary and transient modes.

The method does not require pre-estimation of the fail-safe operation criteria boundaries of the LRE being monitored, and adapted to the operation modes and external conditions changing.

The current state of the engine is being monitored at the rate of measurement results receiving of the slowly changing engine parameters, determined with certain rather small time step.

Each specific situation is being considered as a continuation of the previous engine operation in the mode under consideration, for which purpose, both conformity and inconsistency of the current engine state to the “prehistory” of this state, which was recognized corresponding to the successful operation of the engine, are statistically confirmed.

Formally, this “prehistory”, as well as information about the current state of the engine, is a set of measurements of its parameters obtained from the initial control point to the one under consideration.

To make a decision on a malfunction occurrence, a statistical analysis method is used, developed to identify and exclude the results with abnormal inaccuracies. In case of current statistical characteristics threshold values are exceeded by their current values, the fact of malfunction occurrence is being registered, and the test is being terminated to development of the revealed malfunction.

For stationary LRE operation modes, the instant of a malfunction occurrence can be defined as the moment of a distinct change in the stability of

measured parameters. In this case, for making a decision on the malfunction occurrence and test termination, the time series of measured parameters are subjected to statistical evaluation based on the Student’s criterion.

In transient modes, the time series values of changes gradients in the measured parameters, possessing the property of stationarity, are subjected to a similar analysis. This property is stipulated by the fact that during bench tests conducted according to a given cyclogram, the engine control in transient modes is being ensured by changing the drive angle of the control unit by the linear law.

The developed method for assessing the current state of the LRE during bench tests allows preventing the LRE malfunction development, and generate an appropriate signal to the engine control system in real time of the test-bench fire test.

Keywords: LRE, engine state monitoring, statistical methods, abnormal errors of measurements, Student’s criterion.

References

1. Antipov Yu.S., Davydov I.B., Il’in O.V. et al. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko*, 2002, no. 20, pp. 173-183.
2. Davydov I.B. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko*, 2015, no. 32, pp. 323-334.
3. Levochkin P.S., Martirosov D.S., Kamenskii S.S. et al. Liquid rocket engines functional diagnostics system in real-time mode. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 147-154.
4. Martirosov D.S. *Diagnostirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem na osnove matematicheskikh modelei fizicheskikh protsessov i izmeryaemykh parametrov metodom strukturnogo isklyucheniya* (Diagnostics of complex tectonic systems based on mathematical models of physical processes and measured parameters by the structural exclusion method), Moscow, MAI, 1998, 53 p.
5. Morozov S.A., Kostyukov V.N., Trushnikov S.G. *Progressivnaya tekhnologiya i avtomatizatsiya*

- proizvodstva dvigatelei i agregatov* (Progressive technology and automation of engines and aggregates production), Moscow, NIID, 1986, p. 60.
6. Veshkurtsev Yu.M., Kostyukov V.N., Boichenko S.M., Kostyukov A.V. *Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy elektronnoho priborostroeniya"*. APEP-96. V 11 tomakh. T. 5. Izmereniya v radioelektronike. Novosibirsk, Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1996, pp. 81-86.
 7. Kryter R.C., Haynes H.D. Condition Monitoring of Machinery Using Motor Current Signature Analysis. *Sound and vibration*, 1989, no. 9, pp. 14-21.
 8. Tarshish M.S. *Kontrol' i diagnostika pri ispytaniyakh aviadvigateli i gidroagregatov* (Control and diagnostics during aircraft engines and hydraulic units testing), Moscow, Mashinostroenie, 1997, 168 p.
 9. Muromtsev Yu.L. *Bezavariinost' i diagnostika narushenii v khimicheskikh proizvodstvakh. Metody, modeli, algoritmy* (Fail-safety and diagnostic of violations in chemical production. Methods, models, algorithms), Moscow, Khimiya, 1990, 144 p.
 10. Kostyukov V.N. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2000, no. 12, pp. 77-81.
 11. Mikhlin V.M. *Prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya mashin* (Prediction of technical condition of machines), Moscow, Kolos, 1976, 288 p.
 12. Aleksandrovskaia L.N., Kruglov V.I., Kuznetsov A.G. et al. *Teoreticheskie osnovy ispytaniy i eksperimental'naya obrabotka slozhnykh tekhnicheskikh sistem* (Theoretical basics of tests and experimental testing of complex technical systems), Moscow, Logos, 2003, 736 p.
 13. Aleksandrovskaia L.N., Afanas'ev A.P., Lisov A.A. *Sovremennye metody obespecheniya bezotkaznosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem* (Modern methods for reliability ensuring of complex technical systems), Moscow, Logos, 2001, 208 p.
 14. Swikert M. Innovative online monitoring reduces maintenance costs. *Orbit*, 1997, no. 3, pp. 15-16.
 15. Mitchell J.S. *Introduction to Machinery Analysis and Monitoring*. Second edition. Tulsa (Oklahoma), Pennwell Corp, 1993, 566 p.
 16. Bershadskii V.A., Kolomentsev A.I. *Osnovy tekhnologii stendovykh ispytaniy dvigatel'nykh ustanovok zhidkostnykh raket. Avtonomnaya otrabotka* (Basics of test bench technology tests of liquid rockets engine systems. Stand-alone development), Moscow, MAI, 2014, 216 p.
 17. Zhukovskii A.E., Kondrusev V.S., Levin V.Ya., Okorochkov V.V. *Ispytaniya zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* (Tests of liquid rocket engines), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 199 p.
 18. Volok V.P. *Ispytatel'nye stendy* (Test benches), Moscow, Znanie, 1980, 63 p.
 19. Shishkin I.F., Sergushev G.F. *Ispytaniya i ispytatel'noe oborudovanie* (Tests and testing equipment), St. Petersburg, SZTU, 1999, 50 p.
 20. 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
 21. Ardell B.L. Failure Analysis of Centrifugal Pumps. *Sound and vibration*, 1997, no. 09, pp. 20-25.
 22. Chel'kis F.Yu., Aleksandrov V.P. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko*, 2007, no. 25, pp. 247-250.
 23. Tret'yak L.N. *Obrabotka rezul'tatov nablyudenii* (Processing of monitoring results), Orenburg, GOU OGU, 2004, 171 p.
 24. Sachs L. *Statistische Auswertungsmethoden*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1972, 548 p. DOI: 10.1007/978-3-662-10037-0
 25. Novitskii P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnostei rezul'tatov izmerenii* (Estimation of measurement results errors), Leningrad, Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1985, 248 p.
 26. Shishkin I.F. *Prikladnaya metrologiya* (Applied Metrology), Moscow, VZPI, 1990, 115 p.
 27. L'vovskii E.N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul* (Statistical methods for constructing empirical formulas), Moscow, Vysshaya shkola, 1982, 224 p.