

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Афанасьев А.А.<sup>1,2</sup>, Колбая Т.Ч.<sup>1,2,3</sup>, Медведчук А.С.<sup>1</sup>, Солдатов Д.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО КБХА, г. Воронеж

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «ВГТУ», г. Воронеж, <sup>3</sup>timur2607@rambler.ru

*Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, обнаружение аномалий, испытания ЖРД, многомерные данные, техническая диагностика, машинное обучение без учителя, изоляционный лес, теоретические распределения, порог аномальности.*

Наметившаяся в последнее время тенденция к сокращению количества дорогостоящих натурных испытаний жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) объективно влечет за собой сокращение объема получаемой по результатам таких испытаний информации о техническом состоянии ЖРД как при наземной отработке, так и в процессе контроля качества серийно изготавливаемых изделий. Вопрос о полноценном замещении такой информации результатами математического моделирования в настоящее время остается открытым из-за недостаточной полноты инструментального контроля параметров изделия при проведении испытаний и в процессе изготовления.

Низкая информативность существующих систем технического контроля, отсутствие интегрированных измерительно-вычислительных систем, обеспечивающих автоматическую регистрацию и обработку параметров изделий и технологических процессов в процессе изготовления, широкое использование допусковых средств контроля, а также преобладающая в настоящее время практика регистрации и оценки результатов измерений по альтернативному признаку «соответствует – не соответствует» и т.п. создает объективные трудности для полноценного внедрения концепции «цифровых двойников», требующей максимально полных количественных измерений.

В данных условиях возникает объективная необходимость применения методов многомерного анализа для оценки технического состояния ЖРД [1]. Применение инструментария многомерного анализа параметров, характеризующих техническое состояние ЖРД в процессе изготовления и испытаний, позволит компенсировать дефицит количественной информации за счет выявления и использования межпараметрических зависимостей.

Существенным системным препятствием для внедрения методов многомерного анализа данных в отраслевую практику является дефицит отечественной методической литературы, систематизирующей алгоритмы адаптации и практического применения данных методов к отраслевой специфике, а также отсутствие публичных аналитических обобщений результатов их апробации в условиях реального производства. Таким образом, потенциал многомерных методов анализа данных в настоящее время в отечественном ракетном двигателестроении остается нереализованным.

Настоящая работа направлена, в первую очередь, на разработку и практическую апробацию таких методов для повышения информативности технического контроля и достоверности оценки технического состояния ЖРД.

Применительно к анализу параметров функционирования ЖРД представляется перспективным применение алгоритма машинного обучения Isolation Forest (IF), основанного на принципе изоляции объектов в пространстве признаков (зарегистрированных в ходе испытаний параметров ЖРД). Этот метод не требует априорной разметки данных, проверки гипотез о законе распределения параметров, устойчив к выбросам и отличается низкой требовательностью к вычислительной мощности [2]. Алгоритм IF вычисляет

интегральный количественный показатель (балл аномальности), показывающий насколько существенно конкретное наблюдение отличается от статистически преобладающих значений в исследуемой совокупности. В рамках настоящей работы метод IF был применен к массиву экспериментальных данных, полученных по результатам испытаний 189 двигателей и сформированных из 14 внутриводвигательных параметров (давлений, температур и оборотов турбонасосных агрегатов), зарегистрированных при каждом испытании [3].

По результатам обучения модели IF на данной эмпирической статистике были получены хорошие значения стандартных метрик, характеризующих качество модели: Cohen's  $d = 2,172$  – выраженная разделяющая способность модели, Stability (Spearman corr mean) = 0,966 – высокая воспроизводимость ранжирования объектов по аномальности при повторных запусках модели, а низкое значение Stability (Spearman corr std) = 0,0037 – минимальная вариативность стабильности полученной многомерной модели.

В связи с тем, что для обучения модели были использованы результаты испытаний двигателей за 20 лет серийного изготовления, не имелось возможности провести в полном объеме верификацию модели и определение порогов баллов аномальности по первичным документам (протоколы испытаний и контроля технического состояния, акты дефектации и т.д.) из-за особенностей установленного порядка хранения таких документов. Поэтому для верификации модели и установления порога баллов аномальности был определен следующий порядок работы:

- проверка согласия эмпирического распределения баллов аномальности с известными теоретическими законами распределения;
- расчет пороговых значений на уровне 95-го и 99-го квантилей (процентилей) эмпирического распределения;
- оценка устойчивости выбранных порогов к выборочной вариативности методом параметрического бутстрэпа.

В результате проведенных работ было установлено, что эмпирическое распределение баллов аномальности с высокой степенью согласия аппроксимируется распределением Фреше, что подтверждено критериями Колмогорова-Смирнова и Андерсона-Дарлинга. Важно отметить, что распределение Фреше теоретически обоснованно для описания времени до отказа и экстремальных нагрузок высоконадежных технических систем.

При выборе порогов по квантилям 0,95 и 0,99 пороговые значения баллов аномальности, при общем диапазоне значений от 0 до 1 составили 0,25 и 0,57 соответственно, при этом к аномальным были отнесены 13 испытаний (7,9%) и 2 испытания (1%) испытаний соответственно. Параметрический бутстрэп (симуляции из параметрической модели с параметрами, оцененными по исходной выборке) выявил высокую чувствительность оценок порога к выборочной изменчивости, что потребовало проведения дополнительной верификации полученных результатов. Для этого к той же выборке был применен кластерный анализ методом самоорганизующихся карт Кохонена (SOM) [4]. Алгоритм выделил два кластера, один из которых содержал только 2 испытания. Полученный результат полностью согласуется с классификацией методом IF – эти же два испытания были идентифицированы как аномальные при пороге 0,99-го квантиля.

Совпадение результатов двух независимых методов подтверждает устойчивость обнаружения экстремальных отклонений в многомерном пространстве параметров. При этом необходимо особо отметить, что единственное аварийное из всей серии исследованных испытаний ЖРД оказалось классифицировано обоими методами как аномальное – одно из двух выделенных.

#### **Выводы:**

1. Разработана и верифицирована методология многомерного анализа технического состояния ЖРД на базе метода IF.
2. Надежность и обоснованность определения аномальных испытаний подтверждается результатами анализа технического состояния испытанных изделий.
3. Методика открывает широкие перспективы применения методов многомерного анализа для контроля стабильности параметров изделий и технологических процессов, оценки и контроля технического состояния изделий в том числе по результатам математического моделирования и функциональной диагностики в том числе в режиме реального времени.

#### **Список литературы**

1. Колбая Т.Ч. Разработка технологии создания системы диагностирования и аварийной защиты жидкостных ракетных двигателей / Т.Ч. Колбая, С.М. Пасмурнов, Д.Ю. Якуш – Текст: электронный // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2016, вып. 8.
2. Liu F.T., Ting K.M., & Zhou Z.H. Isolation Forest. Proceedings of the 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining, 2008, 413-422.
3. Кретинин А.В., Солдатов Д.В., Колбая Т.Ч., Медведчук А.С. Применение метода случайной изоляции аномалий для обработки многомерных параметров функционирования технических систем // Насосы. Турбины. Системы. – 2026. – С. 88.
4. Валухов С.Г., Кретинин А.В., Солдатов Д.В. Оценка стабильности технологических процессов изготовления ЖРД с использованием кластерного анализа многомерных данных, зарегистрированных при огневых испытаниях // Насосы. Турбины. Системы. – 2025. – С. 56.

#### **Сведения об авторах**

Афанасьев Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, главный специалист по моделированию отдела 116, АО КБХА, г. Воронеж, Россия; доцент кафедры ракетных двигателей, ФГБОУ ВО «ВГТУ»; Область научных интересов: разработка цифровых двойников агрегатов сложных технических систем, турбонасосные агрегаты, вычислительная гидрогазодинамика, механика деформируемого твердого тела, системное моделирование, телефон: +7(919)232-00-21, e-mail: afanasev.a.a@kbkhavr.ru.

Колбая Тимур Чичикович – кандидат технических наук, главный специалист научно-технического комплекса по цифровому проектированию, АО КБХА, г. Воронеж, Россия; доцент кафедры ракетных двигателей, ФГБОУ ВО «ВГТУ»; Область научных интересов: математическое моделирование сложных технических систем, разработка цифровых двойников, разработка систем функционального контроля, технического диагностирования и аварийной защиты, телефон: +7(909)215-52-70, e-mail: timur2607@rambler.ru.

Солдатов Дмитрий Валерьевич – кандидат технических наук, ведущий конструктор отдела 100, АО КБХА, г. Воронеж, Россия; Область научных интересов: моделирование технических систем, нейронные сети, машинное обучение, техническая диагностика изделий, телефон: +7(905)053-00-57, e-mail: sdim2005@yandex.ru.

Медведчук Алексей Сергеевич – заместитель главного конструктора по двигателям на КРТ «кислород-керосин», АО КБХА, г. Воронеж, Россия; Область научных интересов: разработка цифровых двойников агрегатов сложных технических систем, жидкостные ракетные двигатели, системное моделирование, машинное обучение, техническая диагностика изделий, телефон: +7(920)414-07-97, e-mail: Xamas597@yandex.ru.

**APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS  
FOR MULTIDIMENSIONAL ANALYSIS OF FUNCTIONING PARAMETERS  
OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS**

Afanas'ev A.A.<sup>1,2</sup>, Kolbaya T.Ch.<sup>1,2,3</sup>, Medvedchuk A.S.<sup>1</sup>, Soldatov D.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>KBKHA JSC, Voronezh, <sup>3</sup>timur2607@rambler.ru

<sup>2</sup>VSTU, Voronezh

A method for multivariate analysis of the technical condition of liquid-propellant rocket engines based on the Isolation Forest method is proposed. This method opens up broad prospects for the application of multivariate analysis methods to monitoring the stability of product parameters and technological processes, assessing and monitoring the technical condition of products, including using the results of mathematical modeling and functional diagnostics, including in real time.