

Оценка вероятности безотказной работы системы аварийной защиты ЖРД при стендовых испытаниях

© А.В. Рудинский

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Представлена методика оценки вероятности безотказной работы системы аварийной защиты по электромагнитным свойствам продуктов сгорания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) при стендовых испытаниях. Контрольным параметром этой системы выбрана амплитуда сигнала с электромагнитного датчика, приведенная в виде линейной зависимости от давления перед смесительной головкой серийного ЖРД. По предельным значениям амплитуд сигналов, поступающих с электромагнитного датчика, в соответствии с нуль-мерной моделью «Нагрузка — прочность» определены значения максимального давления перед смесительной головкой при заданной вероятности безотказной работы системы аварийной защиты. Результаты оценок (выбранных параметров контроля) позволяют обосновать возможность использования этой системы при стендовых испытаниях ЖРД.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, бесконтактная диагностика, рабочий процесс, стендовые испытания, электромагнитное поле, квантиль нормального распределения

Введение. Испытания ракетных двигателей на стендах — важнейший этап в процессах их разработки и эксплуатации. Полученные результаты помогают проверить характеристики двигателя, выявить неисправности и обеспечить безопасность работы. Однако в связи с тем что конструкции современных ракетных двигателей становятся сложнее и требования к их надежности повышаются, возникает необходимость внедрять современные системы диагностики и аварийной защиты (САЗ). Поскольку современные ракетные двигатели работают в условиях предельных тепловых и механических нагрузок, их параметры требуется точно контролировать с целью повышения быстродействия САЗ. В тех случаях, когда возможно появление аварийных ситуаций, своевременное обнаружение и предотвращение таких событий позволяет избежать потерь дорогостоящих испытательных стендов и оборудования, а также снизить риски для персонала [1, 2].

Современные конструкции жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) состоят из большого количества компонентов и систем, что усложняет их диагностику [3]. Поэтому зачастую бывает недостаточно использовать традиционные методы для своевременного выявления неисправностей, что требует внедрения автоматизированных и интеллектуальных систем мониторинга. Благодаря автоматической диагностике можно сокращать время проведения испытаний ЖРД, оперативно реагировать на изменения таких параметров, как давление в камере

сгорания, коэффициент избытка окислителя, температура в газогенераторе, число оборотов турбонасосного агрегата и др., и быстро устранять выявленные неисправности, что способствует более эффективной работе испытательных стендов. Современные первичные измерительные преобразователи (датчики) позволяют измерять давление, температуру, вибрации, токи и другие параметры с высокой точностью и частотой. Посредством интеграции этих данных в автоматизированные системы обеспечивается постоянный мониторинг состояния двигателя, а использование методов машинного обучения и аналитических алгоритмов предоставляет возможность выявлять закономерности, прогнозировать отказы и принимать в автоматическом режиме решения по аварийной защите.

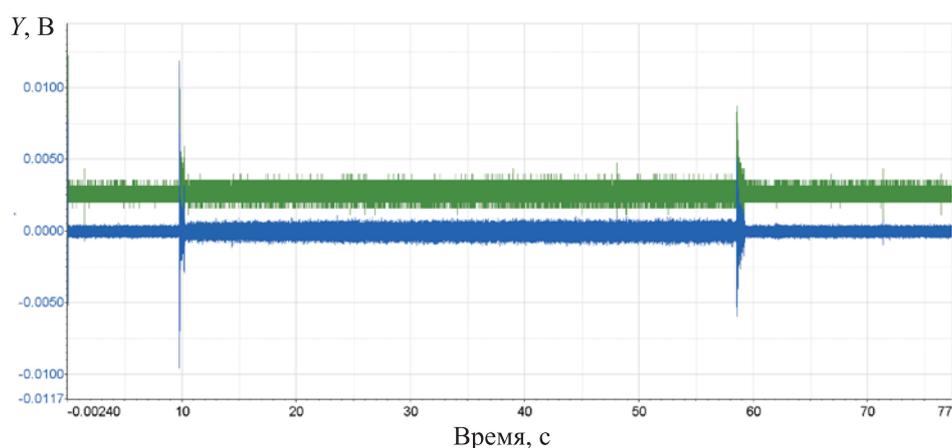
Сейчас представляется актуальной разработка систем, способных в режиме реального времени отключать или ограничивать работу ЖРД при выявлении отклонений от режимных параметров, чтобы предотвращать развитие аварийных ситуаций и обеспечивать безопасность испытаний, не проводя дополнительных изменений конструкции двигателя [4, 5].

Цель настоящей работы — оценка применения сигнала с датчика электромагнитного поля как диагностического параметра для бесконтактного контроля рабочего процесса серийного ЖРД.

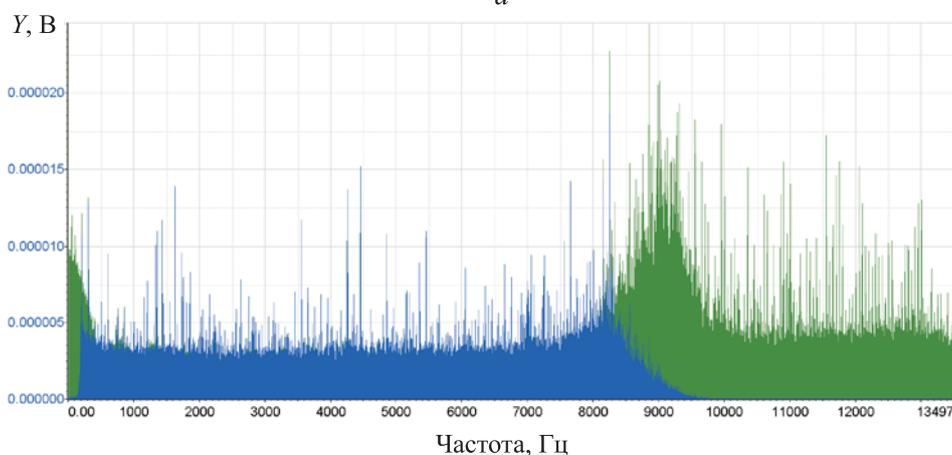
Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования электрофизических методов диагностики параметров рабочего процесса ЖРД проводили при стендовых испытаниях ракетного двигателя С5.92, разработанного АО «КБХиммаш им. А.М. Исаева». Жидкостный ракетный двигатель С5.92 имеет открытую схему с турбонасосной подачей компонентов топливной пары: азотный тетраоксид (АТ) и несимметричный диметилгидразин (НДМГ). Он был установлен на марсианских космических аппаратах «Фобос-1» и «Фобос-2», а его аналог — в разгонном блоке «Бриз-М» ракет «Рокот» и «Протон-М».

При испытаниях были зарегистрированы два параметра рабочего процесса: давление перед смесительной головкой (СГ) камеры сгорания ЖРД и вольтовые сигналы от датчика электромагнитного поля (ЭМП), установленного на срезе сопла. Этот датчик, представляющий собой многослойную цилиндрическую катушку индуктивности диаметром 37 мм и длиной 45 мм, имеет сопротивление обмотки 18,67 Ом. В ходе трех огневых испытаний были зарегистрированы сигналы с датчиков ЭМП. Анализ полученных данных выявил зависимости амплитуд и среднеквадратичных значений этих сигналов при изменении давления перед СГ: на основном режиме — монотонное падение давления; при запуске ЖРД и самовоспламенении компонентов топлива — резкое повышение давления; на останове (выключении) ЖРД — падение давления.

Далее будет рассмотрена методика обработки сигналов с датчиков ЭМП и давления перед СГ, чтобы установить зависимость между этими параметрами. Вторичная обработка сигналов с датчиков выполнялась в программе WinПОС Expert, разработанной НПП «Мера». С целью повышения информативности исходный сигнал ЭМП был преобразован с помощью полосового фильтра в диапазоне частот 200...8000 Гц (рис. 1, а). Амплитудные спектры исходного и преобразованного сигналов приведены на рис. 1, б.



а



б

Рис. 1. Реализации сигналов Y с датчиков электромагнитного поля (а) и частот исходного (зеленый) и преобразованного (синий) сигналов (б)

После применения полосового фильтра среднеквадратичное значение (СКЗ) сигнала (для выделения определенной полосы частот из более широкого спектра) с датчика электромагнитного поля («уровень» сигнала) центрировалось относительно нуля (см. рис. 1). Реализация сигналов с датчика давления перед СГ и с датчика ЭМП представлена на рис. 2, а. В реализованном с датчика ЭМП сигнале прослеживается

зависимость его амплитуды A_u от изменения давления перед СГ на переходных режимах — при запуске и останове ЖРД (рис. 2, б), поэтому при дальнейшем анализе была использована эта амплитуда именно с датчика ЭМП.

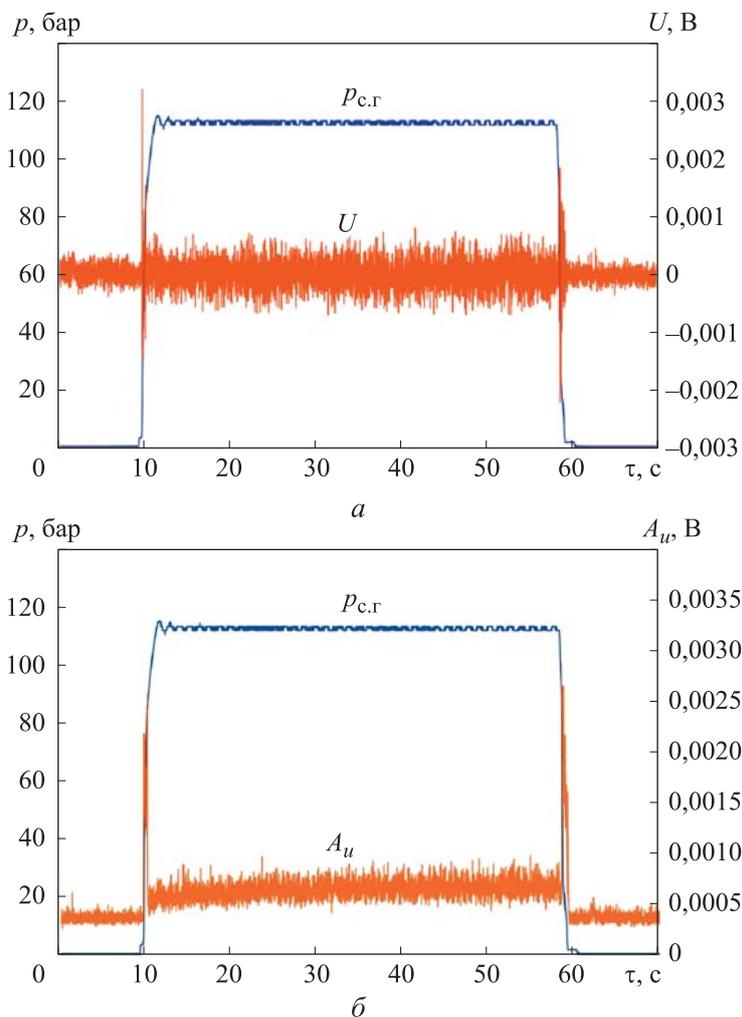


Рис. 2. Реализации давления $p_{с.г.}$ перед смесительной головкой, напряжения сигналов с датчика электромагнитного поля (а) и амплитуды сигнала с датчика ЭМП (б) в течение всего времени τ испытаний

Для построения зависимости амплитуды A_u сигнала с датчика ЭМП от давления $p_{с.г.}$ перед СГ проводился анализ сигналов с датчика ЭМП при запуске ЖРД, т. е. при подаче компонентов, воспламенении и выходе на основной режим, в интервале времени τ от 9,9 до 10,1 с (рис. 3, а) и при останове (по команде на отсечку клапанов подачи компонентов топлива до полного падения давления) в интервале времени от 58,5 до 59,3 с (рис. 3, б).

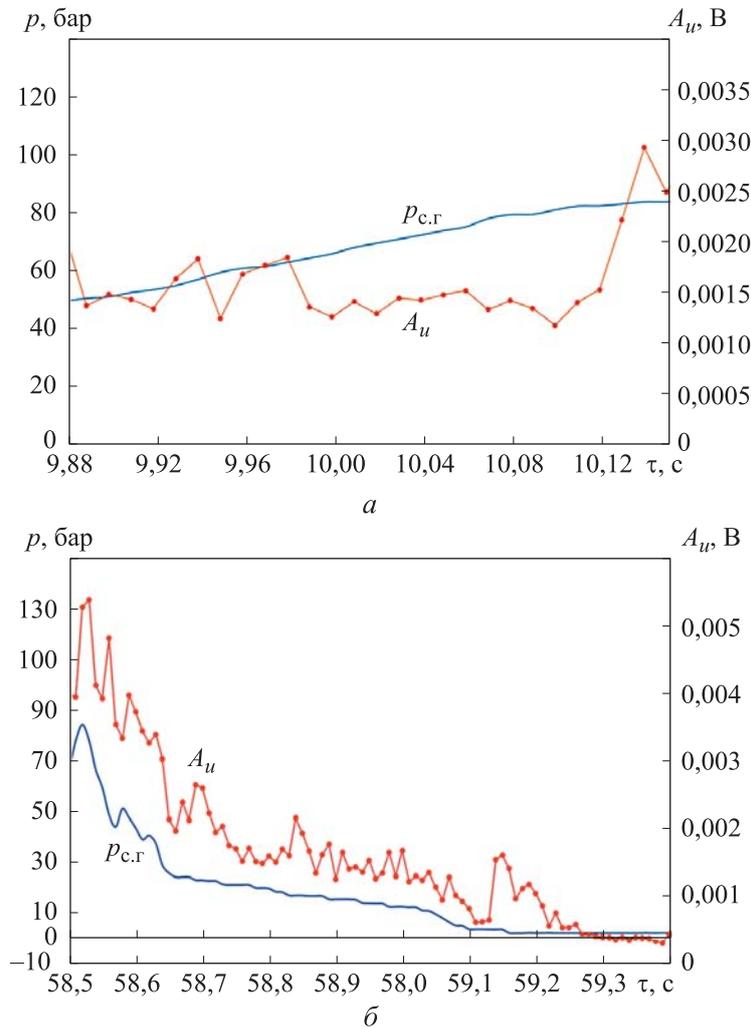


Рис. 3. Реализации значений давления перед СГ и амплитуды A_u сигнала с датчика ЭМП на запуске (а) и останове ЖРД (б)

В результате анализа данных, представленных на рис. 3, были выявлены две зависимости амплитуд A_u сигналов с датчика ЭМП от изменения давления перед СГ $p_{с.г}$ (рис. 4). Эти зависимости были использованы в алгоритме определения предельных значений давления $p_{с.г}$ перед СГ при заданном значении вероятности безотказной работы (ВБР) ЖРД.

Амплитуды сигналов A_u с датчика ЭМП от давления перед СГ (см. рис. 4) на переходных режимах работы ЖРД (на запуске и на останове) аппроксимируются соответствующими линейными зависимостями:

$$A_u = 10^{-5} \cdot p_{с.г} + 0,0008, \quad (1)$$

$$A_u = 6 \cdot 10^{-5} \cdot p_{с.г} + 0,0007. \quad (2)$$

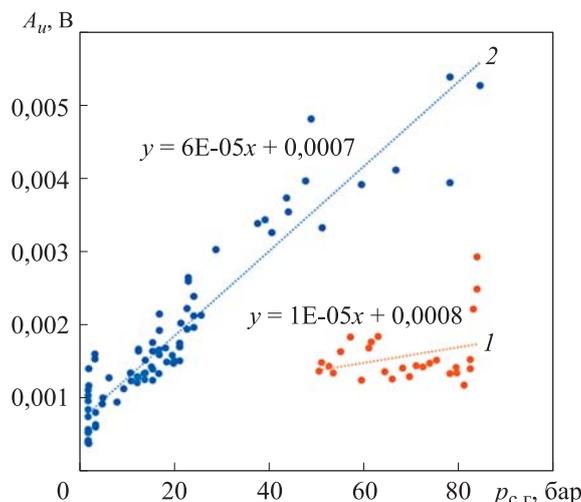


Рис. 4. Зависимости амплитуд A_u сигналов с датчика ЭМП от давления $p_{c,r}$ перед СГ при запуске (1) и останове (2) ЖРД

Коэффициенты корреляций, определенные за интервалы времени запуска и останова, составили $K_1 = 0,31$ и $K_2 = 0,95$ соответственно (индекс 1 относится к запуску, индекс 2 — к останову двигателя) [6, 7]. При останове рабочий процесс ЖРД определяется динамикой истечения продуктов сгорания из сопла, а также опорожнением объема камеры сгорания и «заклапанных» полостей, что обуславливает более монотонное течение рабочих процессов, и, следовательно, большей корреляцией сигналов с датчиков давления и ЭМП. Положительные знаки коэффициентов корреляций, полученных при анализе, свидетельствуют о прямо пропорциональных зависимостях амплитуд сигналов с датчика ЭМП от давления перед СГ. В дальнейших оценках вероятности безотказной работы и предельных значений параметров использована зависимость (2).

Ниже приведены три метода аналитического определения ВБР системы аварийной защиты ЖРД:

- *метод деревьев отказов* [8], основанный на построении дерева отказов, которое представляет собой графическое изображение всех возможных путей отказа системы; с его помощью ВБР определяется как произведение вероятностей безотказной работы всех элементов системы, входящих в дерево отказов;

- *метод марковских процессов*, базирующийся на использовании этих процессов для описания поведения системы; здесь ВБР определяется как решение системы дифференциальных уравнений, описывающих поведение системы;

- *метод статистических испытаний (метод Монте-Карло)*, основанный на проведении большого количества статистических испытаний, в ходе которых моделируется работа системы; с его применением ВБР определяется как отношение числа успешных испытаний к общему числу испытаний.

Следует отметить, что при использовании этих методов требуется либо выполнять трудоемкие вычисления, либо собирать подробную информацию о конструкции двигателя и статические данные по отказам за определенное количество испытаний. Но поскольку предоставляется лишь ограниченная информация, наиболее оптимальным методом оценки ВБР, позволяющим определить предельные значения контрольных параметров САЗ, является модель «Нагрузка — прочность» [9]. Адаптированный с учетом полученных выше экспериментальных данных, алгоритм этой модели заключался в следующем:

1) задается значение вероятности безотказной работы (ВБР) — R_a ;
 2) по значению функции Лапласа, которым и является заданное ВБР, определяется квантиль нормированного нормального распределения h ;

3) задается «нагрузка» — значение давления перед СГ на основном режиме (см. рис. 2);

4) затем с помощью выражения (2) рассчитывается амплитуда сигнала с датчика ЭМП как «нагрузка» и определяются предварительно заданные сигналы корреляции запуска (СКЗ) «нагрузки» и «прочности», а также величина «прочности» в амплитуде сигнала датчика магнитного поля (ДМП);

5) далее по найденной «прочности» и формуле (2) определяется предельное для заданного ВБР значение давления перед СГ — $p_{с.г \max}$. Тогда при изменении ВБР при одной и той же нагрузке $p_{с.г} = f(A_u)$ изменяются параметр «прочности» A_u и, соответственно, $p_{с.г \max}$.

Параметры предельных значений системы аварийной защиты, определенные в соответствии с пунктами 1–5 модели «Нагрузка — прочность» в зависимости от ВБР, представлены на рис. 5.

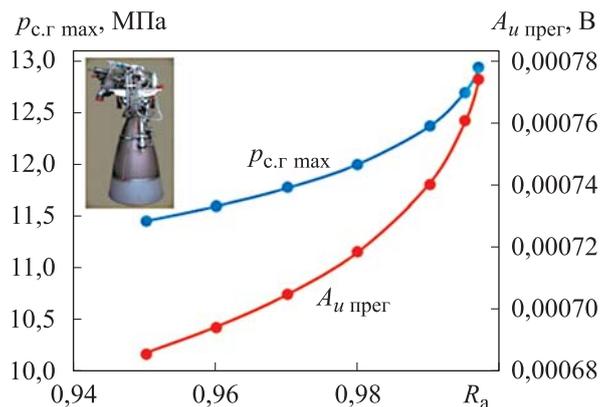


Рис. 5. Изменения предельного значения амплитуды напряженности $A_{u \text{ прег}}$ и давления перед смесительной головкой $p_{с.г \max}$ в зависимости от вероятности безотказной работы системы аварийной защиты

Анализ графиков на рис. 5 показал, что при увеличении вероятности безотказной работы значение контрольного параметра — амплитуды сигнала ЭМП — и максимального (порогового) значения давления перед смесительной головкой также возрастают. Особенность работы предложенной системы аварийной защиты при значениях $R_a > R_{0,98}$ будет заключаться в узком диапазоне изменения амплитуды A_u с датчика электромагнитного поля, для чего, в свою очередь, потребуется обязательное применение фильтрации частот в алгоритме обработки данных. Следует отметить, что эта операция не повлияет на быстрдействие всей системы [10].

Заключение. Применение новых систем бесконтактной диагностики и аварийной защиты при испытаниях ракетных двигателей на стендах является обязательным условием повышения их надежности, безопасности и эффективности. Современные технологии позволяют не только своевременно обнаруживать неисправности, но и предотвращать аварийные ситуации, что особенно важно в условиях высоких рисков при испытаниях и необходимости обеспечения безопасности персонала и оборудования. Внедрение таких систем следует считать важным направлением развития ракетостроения и космической техники в целом.

Автор выражает благодарность коллективу испытательной базы АО «КБХиммаш им. А.М. Исаева» и заведующему кафедрой «Ракетные двигатели» д-ру техн. наук, профессору Д.А. Ягодникову за организацию работ и полученные данные.

*Работа выполнена при поддержке Проекта № 0705-2020-0044
фундаментальных научных исследований Минобрнауки РФ*

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Галеев А.Г., Денисов К.П., Ищенко В.И., Лисейкин В.А., Сайдов Г.Г., Черкашин А.Ю. *Испытательные комплексы и экспериментальная отработка жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Машиностроение, 2012.
- [2] Галеев А.Г. [и др.]. *Методология экспериментальной отработки ЖРД и ДУ, основы проведения испытаний и устройства испытательных стендов*. Киров, МЦНИП, 2015, 436 с.
- [3] Левочкин П.С., Мартиросов Д.С., Буканов В.Т. Проблемы функциональной диагностики жидкостных ракетных двигателей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2013, № 1, с. 72–88.
- [4] Пинчук В.А., Грибакин В.А., Болдырев К.Б., Перфильев А.С. Диагностика технического состояния жидкостных ракетных двигателей на основе электрофизических измерений. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2007, № 11, с. 17–23.
- [5] Пушкин Н.М. *Электрофизика ракетно-космического полета и электрофизические методы контроля и диагностики изделий РКТ: монография*. Москва, Научный консультант, 2016, 278 с.

- [6] Баврина А.П., Борисов И.Б. Современные правила применения корреляционного анализа. *Медицинский альманах*, 2021, № 3 (68), с. 70–79.
- [7] Yagodnikov D.A. A correlation statistical analysis of peculiarities of turbulent flame front propagation through a mixture of boron particles with air. *Chem. Phys. Reports*, 1999, vol. 17 (12), pp. 2301–2323.
- [8] Берман А.Ф., Павлов Н.Ю., Николайчук О.А. Метод синтеза и анализа деревьев отказов на основе понятий механизма и кинетики событий. *Проблемы анализа риска*, 2018, т. 15, № 3, с. 62–77.
- [9] Ворожеева О.А., Ягодников Д.А., Агеенко Ю.И. Моделирование и расчет вероятности безотказной работы жидкостного ракетного двигателя малой тяги по температурному запасу. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 8, с. 79–85. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-8-79-85
- [10] Ягодников Д.А., Рудинский А.В. Экспериментально-теоретическое определение параметров быстродействия системы аварийной защиты жидкостного ракетного двигателя по электромагнитным свойствам продуктов сгорания. *Инженерный журнал наука и инновации*, 2013, вып. 4 (16). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-706

Статья поступила в редакцию 05.11.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Рудинский А.В. Оценка вероятности безотказной работы системы аварийной защиты ЖРД при стендовых испытаниях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 12. EDN RWQSFT

Рудинский Александр Викторович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели», начальник отдела научно-исследовательского института «Энергомашиностроение» 1.5, МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: alex_rudinskiy@mail.ru

Failure-free operation probability evaluation of a liquid rocket engine emergency protection system during bench tests

© A.V. Rudinskii

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

The method for assessing the probability of failure-free operation of the emergency protection system (EPS) based on the electromagnetic properties of the combustion products of a liquid-propellant rocket engine (LRE) during testing on a bench is presented. The amplitude of the signal from the electromagnetic sensor was chosen as the control parameter of the EPS LRE due to the established linear relationship with the pressure before the mixing head of a serial LRE. Based on the maximum values of the amplitudes of the signals from the electromagnetic sensor, the maximum pressures before the mixing head were determined using the zero-dimensional "Load–Strength" model, given the specified probability of failure-free operation of the emergency protection system. The evaluation results justify the possibility of using this EPS (selected control parameters) during bench tests of liquid-propellant rocket engines.

Keywords: liquid rocket engine, non-contact diagnostics, workflow, bench tests, electromagnetic field, normal distribution quantile

This work was supported by Project No. 0705-2020-0044 of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for Fundamental Scientific Research

REFERENCES

- [1] Galeev A.G., Denisov K.P., Ischenko V.I., Liseikin V.A., Saidov G.G., Cherkashin A.Yu. *Ispytatelnye komplekсы i eksperimentalnaya otrabotka zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Test complexes and experimental development of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012.
- [2] Galeev A.G. et al. *Metodologiya eksperimentalnoy otrabotki ZHRD i DU, osnovy provedeniya ispytaniy i ustroystva ispytatelnykh stendov* [Methodology of experimental development of LRE and propulsion systems, fundamentals of testing and test stand design]. Kirov, MTSNIP Publ., 2015, 436 p.
- [3] Levochkin P.S., Martirosov D.S., Bukanov V.T. Problemy funktsionalnoy diagnostiki zhidkostnykh raketnykh dvigateley [Problems of functional diagnostics of liquid rocket engines]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2013, no. 1, pp. 72–88.
- [4] Pinchuk V.A., Gribakin V.A., Boldyrev K.B., Perfiliev A.S. Diagnostirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley na osnove elektrofizicheskikh izmereniy [Diagnostics of technical condition of liquid rocket engines based on electrophysical measurements]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye — Mechatronics, Automation, Control*, 2007, no. 11, pp. 17–23.
- [5] Pushkin N.M. *Elektrofizika raketno-kosmicheskogo poleta i elektrofizicheskiye metody kontrolya i diagnostiki izdeliy RKT: monografiya* [Electrophysics of rocket and space flight and electrophysical methods of control and diagnostics of rocket and space technology products: monograph]. Moscow, Nauchny Konsultant Publ., 2016, 278 p.

- [6] Bavrina A.P., Borisov I.B. Sovremennyye pravila primeneniya korrelyatsionnogo analiza [Modern rules for application of correlation analysis]. *Meditinskiy almanakh — Medical Almanac*, 2021, no. 3 (68), pp. 70–79.
- [7] Yagodnikov D.A. A correlation statistical analysis of peculiarities of turbulent flame front propagation through a mixture of boron particles with air. *Chem. Phys. Reports*, 1999, vol. 17 (12), pp. 2301–2323.
- [8] Berman A.F., Pavlov N.Yu., Nikolaichuk O.A. Metod sinteza i analiza dereviyev otkazov na osnove ponyatiy mekhanizma i kinetiki sobytiiy [Method of synthesis and analysis of fault trees based on concepts of event mechanism and kinetics]. *Problemy analiza riska — Issues of Risk Analysis*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 62–77.
- [9] Vorozheeva O.A., Yagodnikov D.A., Ageenko Yu.I. Modelirovaniye i raschet veroyatnosti bezotkaznoy raboty zhidkostnogo raketnogo dvigatelya maloy tyagi po temperaturному zapasu [Modeling and Calculation of Failure-Free Operation Probability of Low-Thrust Liquid Rocket Engine by Temperature Margin]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2018, no. 8, pp. 79–85.
DOI: 10.18698/0536-1044-2018-8-79-85
- [10] Yagodnikov D.A., Rudinsky A.V. Eksperimental'no-teoreticheskoye opredeleniye parametrov bystrodeystviya sistemy avariynoy zashchity zhidkostnogo raketnogo dvigatelya po elektromagnitnym svoystvam produktov sgoraniya [Experimental-theoretical determination of response time parameters of liquid rocket engine emergency protection system based on electromagnetic properties of combustion products]. *Inzhenerny zhurnal nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 4 (16).
DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-706

Rudinsky A.V., Ph.D. in Engineering, Associate Professor of the Rocket Engines Department, Head of the Department of the Research Institute of Power Engineering 1.5, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: alex_rudinskiy@mail.ru