

К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ, МОНИТОРИНГА, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

K. I. Bastrygin, A. A. Trofimov

THE MEASUREMENT SYSTEM, MONITORING, CONTROL AND DIAGNOSTICS PARAMETERS OF THE ROCKET ENGINE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Актуальность данной темы подтверждается повышенными требованиями к надежности, предъявляемыми к жидкостным ракетным двигателям. Основной целью разработки системы является решение ряда задач: увеличение номенклатуры датчиков и перечня измеряемых ими параметров, снижение стоимости и массогабаритных параметров системы, увеличение площади и количества контролируемых объектов, автоматизация процедур накопления, систематизация и классификация статистических данных огневых испытаний узлов и агрегатов двигателя. **Материалы и методы.** Изложены особенности построения системы измерения и мониторинга. Приведены схематехнические решения и описаны принципы работы системы. Разработан алгоритм информационного взаимодействия блока сбора данных и цифровых датчиков. **Результаты.** Разработанный макет системы измерения, мониторинга, контроля и диагностики двигателя при огневых стендовых испытаниях состоит из распределенной сети датчиков физических величин (ДФВ), измеряющих физические параметры двигателя, и блока сбора данных, обеспечивающего подключение ДФВ, непрерывный или систематический сбор и обработку сигналов, передаваемых по измерительным каналам с датчиков, и передачу обработанных. **Выводы.** По результатам исследования проведено сравнение разработанной системы с применяемой для аналогичных целей в настоящее время и сделан вывод о значительном превосходстве первой, что в дальнейшем должно обеспечить более высокую надежность и безопасность при создании, отработке и запуске ракетносителей.

A b s t r a c t. Background. The relevance of this topic is confirmed by the high requirements to reliability requirements to a liquid-propellant rocket engines. Main design goal of the system is the number of tasks: increasing the range of sensors and list their measured parameters, cost reduction and mass-dimensional parameters of the system, increasing the area and number of monitored objects, the automation of procedures for the accumulation, systematization and classification of statistical data of fire tests components and assemblies of the engine. **Materials and methods.** Peculiarities of construction of measuring and monitoring systems. Showing circuit solutions, and describes the principles of operation of the system. The algorithm of information interaction of data acquisition unit and digital sensors. **Results.** Designed project of the system of measurement, monitoring, control and diagnostics of the engine at fire test bench consists of a distributed network of sensors of physical quantities (DFV), which measure the physical parameters of the engine, and block data collection, providing connection DFV, continuous or systematic collection and processing of the signals transmitted by measuring channels with sensors and transmitting the processed signals through the channel «Ether-

net» connection to the higher level system. **Conclusions.** According to the research results a comparison of the developed system used for the same purposes at the present time and concludes that there is significant superiority of the first that should ensure higher reliability and safety in creating, testing and launching rockets.

К л ю ч е в ы е с л о в а: система измерения параметров жидкостного ракетного двигателя, датчики, блок сбора данных, цифровой выход.

К e y w o r d s: the system of measurement of parameters of liquid rocket engine, sensors, a data collection unit, digital output.

Безаварийность жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) и проблема обеспечения сохранности дорогостоящих наземных сооружений (стендов и стартовых устройств) при испытаниях является одной из важнейших задач. Безаварийность функционирования ЖРД во многом определяется надежностью двигателей, которая, в свою очередь, обеспечивается многократными испытаниями двигателя на стенде в процессе отработки, и высокой эффективностью применяемых систем аварийной защиты и диагностики, обладающих высоким уровнем надежности и обеспечивающих реализацию наилучших технических характеристик ЖРД при наименьших экономических затратах [1].

В настоящее время к системам функциональной диагностики двигателя предъявляются следующие требования:

- комплексная автоматизация процессов огневых стендовых испытаний;
- простота в управлении при практической эксплуатации в условиях сложной обработки диагностической информации;
- применение цифровых информационных технологий, универсальных алгоритмов и быстродействующей аппаратуры;
- автоматизация процедур накопления, систематизации и классификации статистических данных огневых испытаний узлов, агрегатов и двигателя в целом;
- минимальная масса системы [2, 3].

Системы измерения, мониторинга, контроля и диагностики двигателя при огневых стендовых испытаниях позволяют провести комплексную автоматизацию процессов испытаний, снизить число отказов, приходящихся на двигательные установки при аварийных пусках ракет с жидкостными двигателями, сократить масштаб разрушений самого двигателя и стенда в случае аварий, расширить возможности анализа причин аварий при сохранении конструкций двигателей, обеспечив, в итоге, повышение уровня надежности и безопасности при создании, отработке и запуске ракет-носителей [4].

Разработанный в АО «НИИФИ» макет системы измерения, мониторинга, контроля и диагностики двигателя при огневых стендовых испытаниях (рис. 1) состоит из распределенной сети датчиков физических величин (ДФВ), измеряющих физические параметры двигателя, и блока сбора данных, обеспечивающего подключение ДФВ, непрерывный или систематический сбор и обработку сигналов, передаваемых по измерительным каналам с датчиков, и передачу обработанных сигналов по каналу связи Ethernet в систему верхнего уровня.

Максимальное количество аналоговых датчиков:

- 416 шт. со встроенными усилителями и частотным выходом;
- 104 шт. на основе тензомостов;
- 208 шт. на основе термоэлектрических преобразователей и термопреобразователей сопротивления;
- 208 шт. пьезодатчиков;
- 208 шт. со встроенными усилителями и синхронизацией.

Работа программно-алгоритмического обеспечения системы мониторинга ЖРД состоит из двух основных этапов:

- 1) установка соединения с входными и выходными интерфейсами (поиск и открытие портов, установка Ethernet-соединения с персонального компьютера (ПК));
- 2) опрос датчиков и передача данных в систему верхнего уровня.

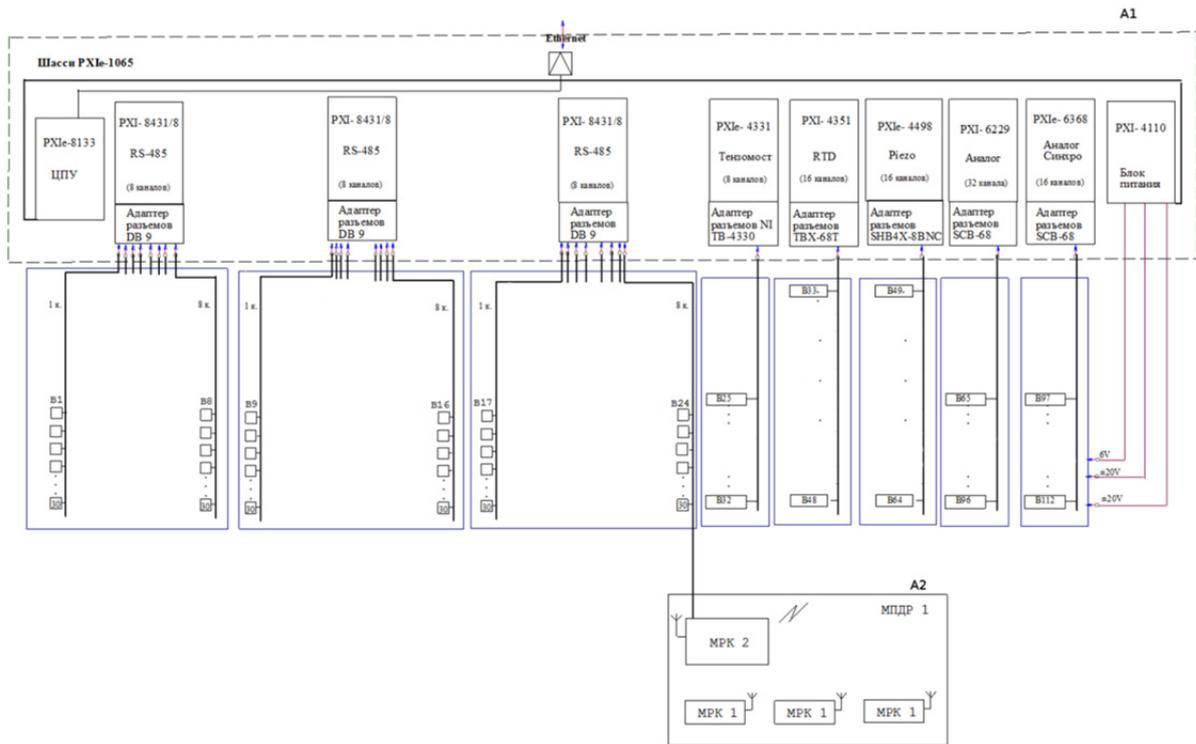


Рис. 1. Структурная схема системы:

A1 – блок сбора данных (БСД); A2 – модуль передачи данных с радиоканалом, состоящий из трех модулей с радиоканалом МРК 1 и одного модуля с радиоканалом МРК 2, предназначенный для преобразования и передачи по радиоканалу выходных сигналов цифровых датчиков, приема и обработки радиосигналов, формирования и передачи пакета данных по интерфейсу RS-485 (максимальное количество цифровых ДФВ с выходным интерфейсом RS 485, передающих выходные данные по радиоканалу – 100 шт.); B1...B24 – цифровые ДФВ с выходным интерфейсом RS 485, передающие данные по кабельным линиям связи (максимальное количество цифровых датчиков – 744 шт.); B25...B112 – аналоговые ДФВ

Опрос датчиков и передача данных в систему верхнего уровня реализуется с помощью механизма обмена сообщениями с датчиками. Для этого предусмотрено использование таймера, генерирующего сообщения для датчиков и использующее событие по приходу сообщения на входной буфер порта.

Обмен сообщениями подразумевает следующие этапы (рис. 2):

- идентификацию подключенных датчиков;
- запрос паспортных данных датчиков;
- задание сегментных номеров датчикам;
- запрос данных от датчиков.

После прохождения вышеперечисленных этапов полученные данные группируются в посылку и передаются на Ethernet-порт [5].

Для подключения требуемого количества аналоговых датчиков в состав БСД должны вводиться дополнительные измерительные модули, количество которых должно соответствовать следующей формуле:

$$N_{\text{мод}} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5, \quad (1)$$

где N_1 – количество модулей для подключения датчиков со встроенными усилителями и частотным выходом; N_2 – количество модулей для подключения датчиков на основе тензочувствительных элементов; N_3 – количество модулей для подключения датчиков на основе терморезисторов сопротивления и термоэлектрических преобразователей; N_4 – количество модулей для подключения пьезоэлектрических датчиков; N_5 – количество модулей для подключения датчиков со встроенными усилителями и синхронизацией.



Рис. 2. Протокол информационного взаимодействия БСД с датчиками

Максимальное количество измерительных модулей в составе БСД для подключения аналоговых датчиков равно 13.

Максимальное количество подключаемых аналоговых датчиков рассчитывается по формуле

$$N_{\text{датч}} = N_{\text{мод}} \cdot k, \tag{2}$$

где $N_{\text{мод}}$ – количество измерительных модулей требуемого типа; k – количество каналов измерительного модуля.

Для работы с системой мониторинга ЖРД разработано специализированное программное обеспечение (ПО) для ПК. После первого запуска ПО и начала работы требуется ввести во всплывающее окно: «Тип датчика», «Год изготовления», «Поддиапазон номеров» и т.д. В случае успешного обнаружения датчиков с заданными параметрами цвет поля «Наличие датчика» становится зеленым и в поле отображается символ ✓. Во время испытаний на экран ПЭВМ выводится информация о текущих показаниях датчиков (рис. 3).

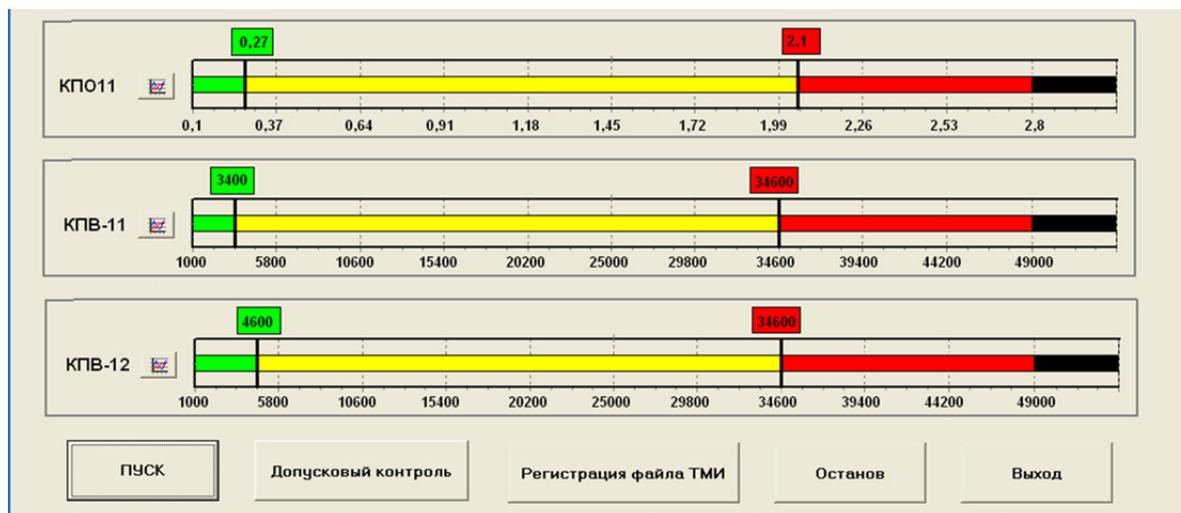


Рис. 3. Окно «Результаты испытаний»

По результатам испытаний выводится диалоговое окно «Результаты допускового контроля» (рис. 4) позволяющее получить информацию о всех показаниях датчиков в системе. Запись результатов испытаний в виде графиков начинается с момента включения системы ЖРД и хранится в памяти ПЭВМ на протяжении всего цикла ее эксплуатации.

Аббревиатура	Тип датчика	Нижняя граница ДК	Верхняя граница ДК	Значение параметра	Единица измерения	Начальное время циклограммы	Конечное время циклограммы	Результат допускового контроля
ДОВД-1	ПЛИ 088	0,1	1,6	0,25	мм	15.02.2012_11_35_58	15.02.2012_11_41_11	Нормальная работа
ДОВД-2	ПЛИ 088	0,1	1,6	0,25	мм	15.02.2012_11_38_27	15.02.2012_11_42_03	Нормальная работа
ДОКП-1	НТ 048	0	5880	120	кН	15.02.2012_11_34_56	15.02.2012_11_41_03	Нормальная работа
ДОАН-3	Вм 212А1	0	53	15,4	Мпа	15.02.2012_11_34_56	15.02.2012_11_40_03	Нормальная работа
ФИРС1-1	Вм 114	0	94	58,3	кН	15.02.2012_11_35_51	15.02.2012_11_39_24	Нормальная работа

Рис. 4. Окно «Результаты допускового контроля»

Разработанная система обладает улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками:

1. Широкая номенклатура датчиков и обширный перечень измеряемых параметров обеспечивают достоверность описания физических процессов двигателя и формирование полной совокупности измерительной информации, необходимой для функциональной диагностики технического состояния двигателя.

2. Применение модуля передачи данных с радиоканалом позволяет:

- снизить стоимость и массогабаритные параметры системы, повысить надежность передачи данных за счет передачи результатов измерений датчиков физических величин по беспроводному каналу на расстояние до 50 м;

- увеличить площади и количество контролируемых объектов за счет большого числа каналов передачи данных – до 100;

- увеличить производительность системы за счет большой скорости передачи данных.

3. Построение системы на основе измерительных модулей PXI компании National Instruments, обладающих высокой производительностью, обеспечивает возможность работы в режиме реального времени, регистрацию данных при многоканальных измерениях электрических сигналов, характеризующихся широкими динамическими и частотными диапазонами, сложной формой и высокой точностью измерений, а также легкость управления большим количеством датчиков и конфигурирование информационных каналов из интегрированной программной среды LabView [6, 7].

4. Метрологический диагностический самоконтроль, реализуемый за счет входящих в состав системы цифровых датчиков и специального программно-алгоритмического обеспечения, обеспечивает самодиагностику состояния системы, повышая в дальнейшем надежность и достоверность диагностики состояния двигателя.

5. Применение и разработка новых цифровых датчиков позволяют получить полную и достоверную информацию о техническом состоянии двигателя. Так как применяемые в настоящий момент датчики избыточного давления имеют низкие показатели вибропрочности и термоустойчивости, при работе двигателя могут проявляться:

- обрывы электрических цепей датчика в зоне чувствительного элемента или в месте заделки кабельной перемычки в консольную часть корпуса датчика, приводящие к потере измерительной информации;

- разрушение сварного шва в верхней части корпуса датчика (без потери герметичности и без обрыва электрической цепи);

- несанкционированные уходы выходного сигнала датчика, приводящие к увеличению погрешности измерения вследствие различного рода температурных воздействий (паразитные термоЭДС; неразгруженные температурные деформации на конструкции его чувствительного элемента со стороны контролируемой или окружающей среды; температурное воздействие со стороны подводящих проводов, проявляющееся под воздействием виброперемещений, а так-

же предварительно заоложенных конструкций корпуса и кабельной перемычки датчика после начала работы двигателя). Требуется переход на новую модификацию датчиков избыточного давления, имеющих уменьшенную угловую конструкцию корпуса в зоне заделки кабельной перемычки и новую конструкцию чувствительного элемента [8].

Термометры сопротивления, устанавливаемые в настоящее время на агрегатах двигателя, отличающиеся высокой вибронапряженностью, не обеспечивают требования по вибрационным воздействиям. Из-за этого происходит их отказ в части обрыва электрической цепи в зоне чувствительного элемента на первом или втором цикле работы. Многолетние исследования в направлении увеличения ресурса работы данных конструкций существенных положительных результатов не дали. В то же время получен положительный опыт их создания на базе технологий с применением термокабеля, что позволило, в частности, создать высоконадежную для жестких условий эксплуатации термодатчик ТТ249 с повышенными габаритными размерами. В настоящее время есть все основания и гарантированный задел для создания нового аналога, но с габаритными размерами, соответствующими термодатчикам ТТ135 и ТТ142 [8, 9].

Пьезоэлектрические датчики, применяемые в существующей системе, имеют сравнительно большие геометрические размеры, значительный диаметр сквозного отверстия ($\varnothing 12$ мм) внутри агрегата двигателя, снижающий показатели механической надежности конструкции, а также не способствующий смещению спектра собственных частот датчика в сторону повышения их значений. Также имеются замечания по помехозащищенности. В разрабатываемой системе применен вновь разработанный высокотемпературный пьезоэлектрический датчик с чувствительным элементом, выполненным из пьезоэлементов на основе монокристаллического галлотанталата лантана (лангатат – ГТЛ), позволяющим увеличить диапазон измерения быстропеременных давлений, воздействия статических давлений, частотный диапазон, стойкость к вибрационным ускорениям и снизить погрешность [8, 10, 11].

6. Широкий набор функций обработки данных о параметрах или деятельности двигательной установки позволяет получать разнообразную, прошедшую специальную обработку информацию, необходимую для проведения расширенного анализа технического состояния двигателя с целью выявления технических неисправностей и нарушений технологических процессов его функционирования.

7. Дружественный интерфейс отображения информации обеспечивает обслуживающий персонал наиболее полной информацией о параметрах или деятельности двигательной установки, технических неисправностях и нарушениях технологических процессов функционирования двигательной установки, при этом обслуживающий персонал имеет возможность настройки отображения измерительной информации, а количество терминалов отображения ограничивается только отсутствием нужного количества сетевой аппаратуры и компьютеров.

8. Хранение всей совокупности информации, получаемой в результате применения системы для функциональной диагностики двигателей при проведении огневых стендовых испытаний, обеспечивает обслуживающий персонал полной и достоверной информацией в случае необходимости, находит свое применение для предотвращения угрозы возникновения критических ситуаций и аварий, а также используется в соответствующих центрах системного мониторинга и оперативного управления.

9. Передача данных по скоростной сети Ethernet (не менее 1 Гбит/с) обеспечивает высокую скорость передачи данных и сопряжение как с существующими, так и с перспективными системами хранения данных [12].

Для сравнения в табл. 1 приведены основные технические характеристики разрабатываемой системы и системы функциональной диагностики ЖРД, применяемой в настоящее время [4].

Разработанная система значительно превосходит отечественный аналог по максимальному количеству аналоговых и цифровых измерительных каналов и цифровых датчиков, что позволит проводить комплексную автоматизацию процессов огневых стендовых испытаний, снизить число отказов, происходящих на двигательные установки при аварийных пусках ракет с жидкостными двигателями, сократить масштаб разрушений самого двигателя и стенда в случае аварий, расширить возможности анализа причин аварий при сохранении конструкций двигателей, обеспечив в итоге повышение уровня надежности и безопасности при создании, отработке и запуске ракет-носителей.

Сравнительные технические характеристики систем мониторинга и диагностики

Наименование параметра	Разработанная система мониторинга, контроля и диагностики двигателя при огневых стендовых испытаниях АО «НИИФИ»	Система функциональной диагностики ЖРД, применяемая в настоящее время
Количество цифровых каналов	24	–
Максимальное количество цифровых датчиков	744	–
Максимальное количество аналоговых датчиков со встроенными усилителями и частотным выходом	416	337
Максимальное количество аналоговых датчиков на основе тензомостов	104	34
Максимальное количество аналоговых датчиков на основе термоэлектрических преобразователей	104	–
Максимальное количество аналоговых датчиков термопреобразователей сопротивления	104	128
Максимальное количество аналоговых датчиков пьезодатчиков	208	44

Библиографический список

1. Ягодников, Д. А. Исследование внутрикамерных характеристик и моделирование циклограммы работы ракетных двигателей малой тяги с использованием ЭВМ : метод. указания к лабораторным работам / Д. А. Ягодников, А. Р. Полянский, Д. Ю. Эдин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 48 с.
2. Кочетков, Ю. Н. Методика определения энергетических характеристик ЖРДМТ / Ю. Н. Кочетков, Г. Я. Савельев, В. Н. Аверкина // Ракетно-космическая техника : науч.-техн. сб. НИИТП. – Вып. № 3 (136). – М. : Изд-во НИИТП, 1992. – С. 9–13.
3. Дмитриенко, А. Г. Тенденции развития датчиковой аппаратуры и систем измерения, мониторинга, контроля и диагностики технически сложных объектов на ее основе / А. Г. Дмитриенко, В. И. Волчихин, А. В. Блинов, Е. А. Ломтев // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 2 – С. 6–12.
4. Беляев, Е. Н. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / Е. Н. Беляев, В. К. Чванов, В. В. Черваков. – М. : МАИ, 1999. – 228 с.
5. Тревис, Д. LabView для всех / Джеффри Тревис ; пер. с англ. Н. А. Клушина. – М. : ДМК пресс, 2005. – 544 с.
6. Катков, А. Н. Структура системы диагностики двигательной установки для огневых и стендовых испытаний / А. Н. Катков, В. Н. Новиков // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 47.
7. Бутырин, П. А. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 (30 лекций) / П. А. Бутырин, Т. А. Васьковская, В. В. Каратаев. – М. : ДМК пресс, 2005. – 264 с.
8. Левочкин, П. С. Проблемы функциональной диагностики жидкостных ракетных двигателей / П. С. Левочкин, Д. С. Мартиросов, В. Т. Буканов // Вестник Московского государственного университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. – 2013. – № 1 (90). – 72 с.
9. Сайт фирмы АО «НПО ИТ». – URL: www.npoit.ru.
10. Баstryгин, К. И. Высокотемпературный пьезоэлектрический датчик пульсации давления / К. И. Баstryгин // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 76–81.
11. Баstryгин, К. И. Исследования температурной стабильности кристаллов для создания высокотемпературных пьезоэлектрических датчиков динамического давления / К. И. Баstryгин, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2015. – № 11. – С. 56–59.
12. Григорьев, В. А. Сети и системы радиодоступа / В. А. Григорьев, О. И. Лагутенко, Ю. А. Распаев. – М. : Экотрендз, 2005. – 384 с.

Бастрыгин Кирилл Игоревич

начальник лаборатории,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nik2@niifi.ru

Bastrygin Kirill Igorevich

head of laboratory,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Trofimov Alexei Anatol'evich

doctor of technical science, professor,
sub-department of information and measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 629.7.018.036.5

Бастрыгин, К. И.

Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя / К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 18–25. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-3.