

Разработка технологии создания системы диагностирования и аварийной защиты жидкостных ракетных двигателей

© Т.Ч. Колбая¹, С.М. Пасмурнов², Д.Ю. Якуш¹

¹АО «Конструкторское бюро химавтоматики», г. Воронеж, 394006, Россия

²Воронежский государственный технический университет,
г. Воронеж, 394026, Россия

Рассмотрены задачи, решаемые при создании систем диагностирования и аварийной защиты (СДАЗ) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Сформулированы основные направления совершенствования СДАЗ. Приведена структура системы, включающая помимо программно-аппаратной части, которая позволяет непосредственно реализовать функции диагностирования и аварийной защиты, комплекс вспомогательных элементов для настройки и отладки системы. Предложены схемы проверок СДАЗ как на этапе автономного тестирования, так и при комплексных тестах с участием объекта защиты и системы управления верхнего уровня. Предложена процедура, позволяющая проводить отладку подавляющей части программного обеспечения СДАЗ без привязки к его аппаратной части. Дана оценка результатов разработки технологии.

Ключевые слова: диагностика, система аварийной защиты и управления, программное обеспечение, диагностический алгоритм, жидкостный ракетный двигатель.

Введение. В статье представлена информация о задачах, решаемых с помощью системы диагностирования и аварийной защиты (СДАЗ) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) и сформировавшихся в процессе разработки технологии создания СДАЗ и ее структуры, а также о направлениях отработки этой технологии.

Технология разрабатывается как инструмент для создания систем, позволяющих решать задачи эффективного обнаружения аварийных ситуаций, предупреждения их возникновения и парирования. Эти задачи актуальны на всех этапах жизненного цикла ЖРД. Создание и внедрение технологии автоматизации разработки программно-математического обеспечения (ПМО) СДАЗ для применения в составе стендовых и объектовых средств управления и контроля состояния ЖРД на этапах их отработки, производства и эксплуатации — определяющее условие появления в ракетно-космической отрасли современных эффективных образцов новой техники и их успешной эксплуатации [1–3].

Функции СДАЗ ЖРД усложнялись с течением времени: от требования к повышению уровня безаварийности перешли к повышению надежности, т. е. от задачи контроля — к задаче диагностирования, от обнаружения отказа — к его прогнозированию, от формирования

решения о выключении двигателя — к формированию команд на изменение режима его работы, от систем аварийной защиты — к системам диагностирования и аварийной защиты (аварийного выключения и превентивного управления). Усложнением задач, стоящих перед космической отраслью, увеличением расходов при их решении обусловлены новые требования к безопасности и надежности ракетно-космических комплексов [3–5].

Диагностирование ЖРД — основная функция СДАЗ (функции управления агрегатами двигателя при наступлении аварийной ситуации могут быть полными, частичными либо могут отсутствовать). Целью диагностирования ЖРД в реальном времени с помощью СДАЗ является предотвращение аварий ЖРД, т. е. существенной деградации конструкции в процессе отказа двигателя. Вторичные процессы разрушения или горения, вызванные отказом, приводят как к катастрофическим последствиям (угроза жизни или здоровью людей, значительные экологические последствия, существенные прямые материальные потери: разрушение стендовых сооружений, ракетных блоков), так и к вторичным материальным потерям, обусловленным непригодностью материальной части для исследования причин первичного отказа.

Разработкам технологии применения СДАЗ в России уделяется большое внимание, однако единой концепции и методологии в настоящее время не существует [3, 6, 7]. Развитие направления по созданию аналогичных систем за рубежом подтверждается публикациями в зарубежных журналах [8–11]. Исследования ведутся по заказу центров Маршалла и Льюиса рядом фирм и университетов (Honeywell, Pratt & Whitney, United Technologies и др.). Однако сведения о характеристиках методов и систем, о постановке задачи создания общего инструментария не публикуются, так как технологии их разработки рассматриваются как *ad-hoc-technology*. Новизна проблемы может быть преодолена благодаря широкому распространению программирования, рассчитанного на обширную вычислительную среду (типы вычислителей и операционных систем).

Постановка задачи. В настоящее время на предприятиях отрасли ведутся работы по автоматизации технологического процесса контроля и диагностирования состояния ЖРД [6, 12]. Созданы отдельные законченные системы, позволяющие решать задачи автоматизации оценки достоверности данных, полученных в результате первичных измерений, допускового контроля состояния ЖРД, и т. п. Законченных решений по созданию и применению универсальных аппаратурных комплексов (УАК) автоматизированных систем управления двигателями (АСУД) ЖРД в настоящее время не имеется. Подробных данных об аналогичных зарубежных разработках в печати нет. Опубликовано-

ная информация не дает представления о разработанных алгоритмах и системах [13–17].

На основе многолетней деятельности, обладая огромным опытом проектирования и отработки эффективных систем аварийной защиты и управления (САЗУ) для ЖРД различной мощности при разных схематических решениях и использовании различных компонентов топлива АО «Конструкторское бюро химавтоматики» предлагает к разработке технологию создания СДАЗ ЖРД на базе УАК АСУД. В этой области можно выделить следующие приоритетные задачи:

- систематизировать разработку диагностических моделей ЖРД нового поколения для отработки СДАЗ на базе современных средств математического моделирования рабочих процессов ЖРД и информационных технологий с использованием суперЭВМ;

- оснастить разработчика ЖРД производительными и легкодоступными (не ориентированными на профессионального программиста) программными средствами автоматизированной разработки ПМО СДАЗ (система автоматизированного программирования прикладной задачи СДАЗ) для решения задач проектирования, оперативной реконфигурации в процессе эксплуатации, тестирования, верификации, оперативного анализа функционирования ПМО совместно с объектом управления, интегрированной базой данных диагностического обеспечения ЖРД и интегрировать в них базы данных тестового диагностирования;

- создать стендовую программно-аппаратную базу, которая может обеспечить в процессе огневых доводочных испытаний ЖРД ускоренную и адекватную генерацию конфигурации бортовой системы и загрузочного модуля ее прикладного ПМО для изготовления этой системы, отработать технологию создания СДАЗ при применении УАК АСУД в составе стендовых и объектовых средств управления и контроля, определить оптимальную конфигурацию объектовых средств управления и контроля при испытаниях ЖРД;

- инициировать разработку датчиков СДАЗ ЖРД нового поколения.

В процессе разработки СДАЗ должны быть созданы УАК и ПМО, предназначенные для автоматизированного проектирования эффективных программных средств управления техническим состоянием ЖРД следующими методами:

- с помощью САЗУ ЖРД с функциями обнаружения аварийных ситуаций и парирования их путем как аварийного выключения, так и изменения режима работы ЖРД при его стендовых испытаниях и при работе в составе ракеты-носителя (РН);

- диагностирования в реальном масштабе времени с обнаружением неисправностей и принятием оперативного решения об изменении (сохранении) программы серии стендовых испытаний или после-

дующих включениях в составе ступени РН с многократным включением;

- пакетного (отложенного во времени) диагностирования с оценкой технического состояния ЖРД и принятием оперативного решения об изменении (сохранении) программы регламентной обработки и дефектации двигателя после контрольно-технологического испытания (в процессе производства двигателя) или после очередного полета (в процессе эксплуатации ЖРД в составе РН многократного применения);

- комплексной оценки технического состояния (накопления и систематической классификации диагностической информации по результатам огневых испытаний ЖРД и тестового контроля его технического состояния) с прогнозированием технического состояния ЖРД в процессе его эксплуатации в составе РН многократного применения и прогнозированием дрейфа технологического процесса изготовления ЖРД в процессе его производства.

Структура УАК АСУД и рабочего места пользователя на его базе должна быть такой, чтобы предусматривалось проектирование системы с применением современной элементной базы УАК АСУД и новейших алгоритмов контроля и диагностирования состояния ЖРД [18].

Разработка структуры СДАЗ. Применяемая при испытании на стенде СДАЗ представляет собой функциональный комплекс, в состав которого входят (рис. 1): АСУД; датчики ЖРД и их стендовые аналоги; исполнительные элементы (ИЭ) ЖРД и их имитаторы; кабельные изделия, предназначенные для коммутации элементов СДАЗ.

В состав АСУД входят:

- аппаратная часть — УАК АСУД;
- комплект драйверов для работы с периферией УАК АСУД;
- операционная система реального времени (ОСРВ) — QNX;
- программное обеспечение (ПО) основной работы (ОР) АСУД:
 - базовое прикладное программное обеспечение (БППО);
 - диспетчер сервисного программного обеспечения (СПО) — диспетчер информации УАК АСУД (Диспетчер);
 - ПО ОР системы измерения (СИ), интегрированной в АСУД;
 - ПО ОР системы управления (СУ), интегрированной в АСУД.

Резервирование АСУД осуществляется троированием ее элементов, исключение составляет модуль выдачи команд на исполнительные органы ЖРД.

Для решения задач диагностики и аварийной защиты конкретного ЖРД при конкретном испытании необходимы настроечные файлы:

- версия настройки алгоритмов (ВНА);
- версия настройки СИ, интегрированной в АСУД;
- версия настройки СУ, интегрированной в АСУД;
- версия конфигурации Диспетчера.

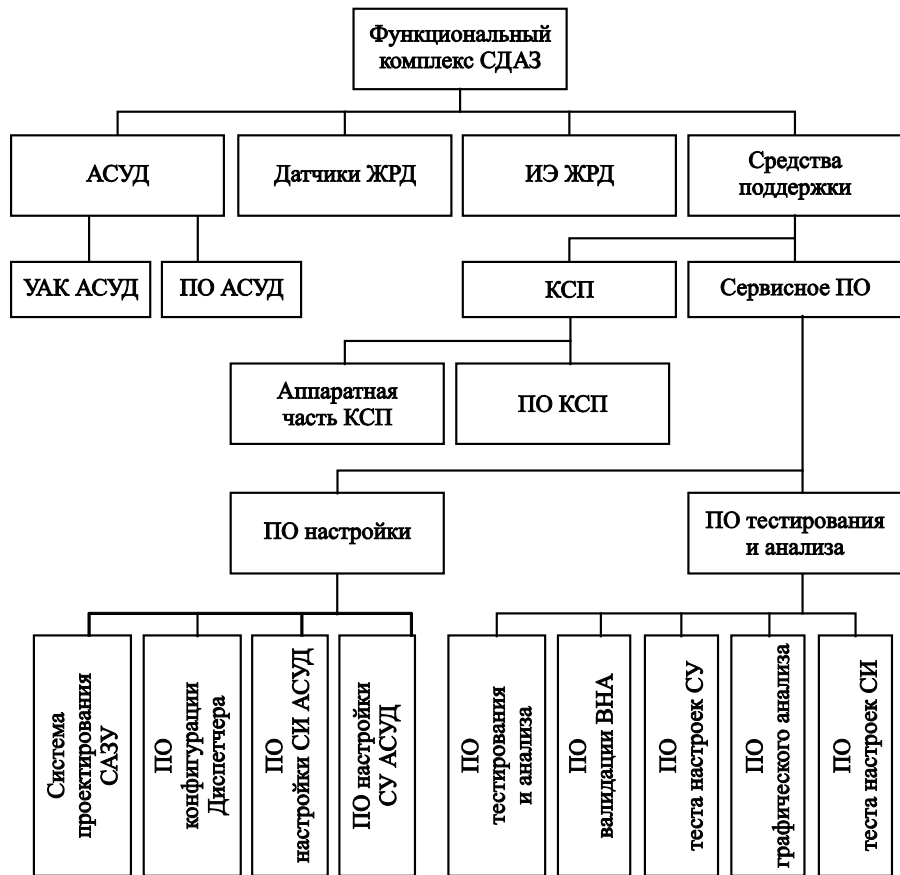


Рис. 1. Структурная схема СДАЗ

Средства поддержки функционального комплекса СДАЗ включают:

- контрольный стенд проверки (КСП), представляющий собой аппаратно-программное средство, предназначенное для проведения проверки АСУД;
- сервисное ПО для создания настроечных файлов:
 - программные средства создания ВНА;
 - программные средства создания настроечных файлов СИ;
 - программные средства создания настроечных файлов СУ;
 - программные средства создания настроечных файлов Диспетчера;
- сервисное ПО для тестирования готовности к испытаниям ЖРД элементов АСУД:
 - система проектирования САЗУ;
 - программа тестирования и экспресс-анализа результатов испытания;
 - программа формирования отчета по реализации настроек ВНА САЗУ;

программа статистической обработки и графического представления результатов испытаний;
 программа автономного тестирования СИ;
 программа автономного тестирования СУ.

Структуры ПО УАК АСУД и КСП представлены на рис. 2 и 3.

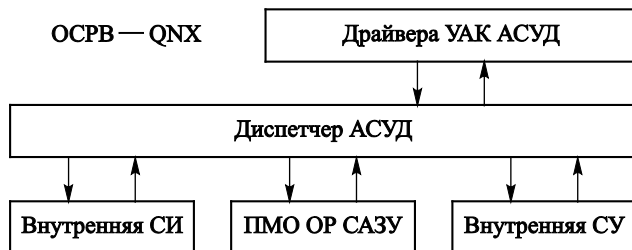


Рис. 2. Структура ПО АСУД

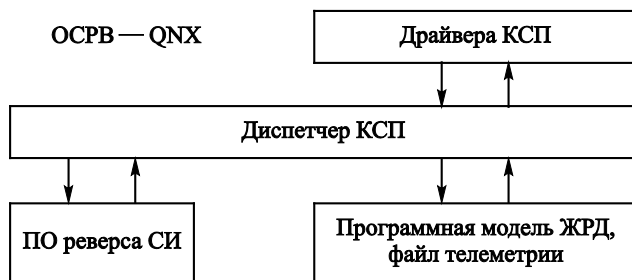


Рис. 3. Структура ПО КСП

Отработка взаимодействия элементов СДАЗ. На следующем этапе проводятся автономная отработка элементов СДАЗ, тестирование элементов БППО и Диспетчера, тестируется рабочее место пользователя АСУД.

Эти действия позволяют оценить работоспособность отдельных элементов ПМО СДАЗ и УАК АСУД. При этом используются сигналы от реальных датчиков, сформированные с помощью имитаторов входного воздействия. Проведение полноценного автономного тестирования УАК АСУД возможно с помощью КСП (рис. 4).

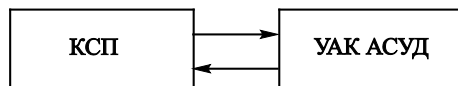


Рис. 4. Схема автономного тестирования АСУД

Отработка технологии применения УАК АСУД и КСП при подготовке к огневым испытаниям ЖРД и комплексной проверки ПМО СДАЗ означает отладку работы элементов СДАЗ:

- настройку ПО СИ, СУ, ОР САЗУ;
- эмуляцию режима огневых испытаний — обработку функционирования цепи: тестовый файл (файл телеметрии, модель двигателя) → → обратные тарифовочные характеристики → диспетчер КСП → → диспетчер УАК АСУД → СИ УАК АСУД → диспетчер УАК АСУД → ПМО ОР САЗУ → диспетчер УАК АСУД → СУ УАК АСУД → диспетчер УАК АСУД → диспетчер КСП. Организация взаимодействия диспетчеров КСП и УАК АСУД позволяет проводить отладку основных элементов ПО СДАЗ без привязки к аппаратной части;
- разработку многовариантного тестирования УАК АСУД на основе штатной схемы работы и базовых вариантов тестирования (рис. 5, 6).

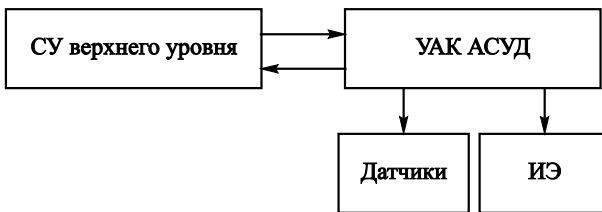


Рис. 5. Схема подключения АСУД при штатной работе

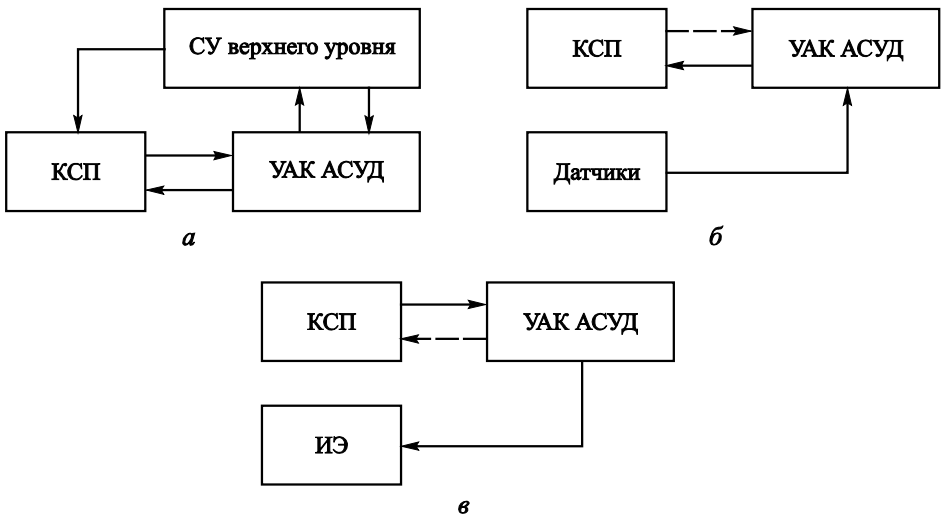


Рис. 6. Базовые варианты комплексного тестирования АСУД:

- a* — тестирование с СУ верхнего уровня; *б* — тестирование с сигналами датчиков;
в — тестирование с проверкой работы ИЭ

Заключение. Разработанная структура рабочего места пользователя АСУД, состоящей из отдельных блоков и модулей, позволяет:

- вести поэтапную разработку СДАЗ, сопровождая тщательной проверкой качества каждую составляющую ее часть;
- проводить в случае необходимости замену или доработку отдельных блоков и модулей, не внося изменения в остальные;
- без существенной реконструкции системы в целом добавлять разработанные заново алгоритмы управления, контроля или диагностирования для повышения качества управления, получения более достоверных результатов диагностирования или увеличения глубины диагностирования.

Технология разработки СДАЗ предназначена для использования при огневой доводке, изготовлении и летной эксплуатации ЖРД любого класса. Результаты разработки данной технологии могут быть использованы в системах аварийной защиты объектов с постоянной времени переходных процессов от 0,01 с.

Разрабатываемая технология предназначена для создания и модернизации широкого спектра наукоемкой продукции в виде ПМО СДАЗ, прямо не связана с конкретными видами образцов или комплексов. Она является перспективной для промышленного применения при отработке, производстве и эксплуатации ЖРД; позволяет повысить эффективность и надежность проектирования, построения, изготовления и отладки, минимизировать ошибки и отклонения, допускаемые на отдельных этапах, максимально автоматизировать процедуру поиска причин допущенных отклонений, радикально сократить время и уменьшить трудоемкость изготовления и отработки ПМО СДАЗ в целом.

Методы и алгоритмы обработки измерительной информации, применяемые при разработке технологии создания СДАЗ, имеют универсальный характер, поэтому технология может быть применена для любых объектов сопоставимой энергетической мощности и сложности в ракетно-космической, химической, нефтехимической, машиностроительной и авиационной отраслях, что открывает обширные перспективы для активного внедрения СДАЗ. Кроме того, работа инвестиционно привлекательна, поскольку полученные результаты могут быть использованы на зарубежных предприятиях ракетно-космической промышленности (КНР, Индия, Республика Корея, Франция и др.).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гликман Б.Ф. *Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Машиностроение, 1989, 296 с.
- [2] Моисеев Н.Ф., ред. *Испытательные комплексы и экспериментальная отработка жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Машиностроение, Машиностроение-Полет, 2012, 368 с.
- [3] Коломенцев А.И., Краев М.В., Назаров В.П. *Испытание и обеспечение надежности ракетных двигателей*. Красноярск, СГАУ-МАИ, 2006, 336 с.

- [4] Головин Ю.М. Перспективы развития систем диагностики и аварийной защиты ЖРД. *Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики*, 2002, № 9, с. 34–38.
- [5] Головин Ю.М., Губертов А.М., Якушин Н.И. Новые подходы к диагностике жидкостных ракетных двигателей. *Российский космос*, 2002, № 2, с. 9–12.
- [6] Мартиросов Д.С., Синьков С.А., Способ оценки предельно достигаемой точности определения параметров элементов ЖРД при их функциональной диагностике. *Тр. НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко*, 2005, № 23, с. 151–160.
- [7] Пинчук В.А., Грибакин В.А., Болдырев К.Б., Перфильев А.С. Диагностирование технического состояния жидкостных ракетных двигателей на основе электрофизических измерений. *Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение*, 2007, № 11, с. 17–23.
- [8] Тейджвани Г., Маквэй Г., Лангфорд Л. Диагностирование кислородно-углеводородных ракетных двигателей: развитие аналитических и экспериментальных методов. *41-я объединенная конференция AIAA/ASME/SAE/ASEE по двигателям и их демонстрации*, 2006, AIAA 2006–4407.
- [9] Роемер М. Дж., Каспржински Г. Дж., Маллой Д. Подход к созданию подстраиваемой системы диагностики дефектов двигателей и стендов для их испытаний. *38-я совместная конференция AIAA/ASME/SAE/ASEE по двигателям и их демонстрации*, 2002, AIAA 2002–4307.
- [10] Барихарадан С. Оценка систем контроля реального времени для двигательных и энергетических систем. *41-я объединенная конференция AIAA/ASME/SAE/ASEE по двигателям и их демонстрации*, 2005, AIAA 2005–3716.
- [11] Пиззо Д. Т., Адиб Р. М. Вероятностный анализ видов и механизмов отказа и воздействий. *38-я объединенная конференция AIAA/ASME/SAE/ASEE по двигателям и их демонстрации*, 2002, AIAA 2002–4043.
- [12] Бондарь А.И., Пасмурнов С.М., Якуш Д.Ю. Программно-математическое обеспечение системы аварийной защиты и управления ЖРД и процедура его тестирования. *Наука и технологии: сб. науч. тр.* Т. 5. Москва, РАН, 2015, с. 137.
- [13] Агуилар Р., Лю Ч., Санти Л.М., Шейн Соуэрс Т. Имитация в реальном времени для проверки и утверждения диагностических и прогностических алгоритмов. *41-я объединенная конференция AIAA/ASME/SAE/ASEE по двигателям и их демонстрации*. 2005, AIAA 2005–3717.
- [14] Хуанг Б., Ли Кс., Ли М., Бернштейн Дж., Шмидт К. Профиль отказа программного обеспечения, вызванный отказом аппаратных средств. *41-я объединенная конференция AIAA/ASME/SAE/ASEE по двигателям и их демонстрации*. 2005, AIAA 2005–4483.
- [15] Тансел И.Н., Чен П., Енилмез А., Линдсей Х., Вю Б. Разработка алгоритма прямой и обратной оценки с использованием нейронной сети. *41-я объединенная конференция AIAA/ASME/SAE/ASEE по двигателям и их демонстрации*. 2005, AIAA 2005–4527.
- [16] Соуэрс Ш.Т., Санти М.Л., Бикфорд Р.Л. Оценка производительности системы проверки достоверности данных. *41-я объединенная конференция AIAA/ASME/SAE/ASEE по двигателям и их демонстрации*. 2005, AIAA 2005–4486.
- [17] Бикфорд Р.Л., Маллой Д. Осуществление установки системы диагностики двигателя турбины при наземных испытаниях в реальном времени.

41-я объединенная конференция AIAA/ASME/SAE/ASEE по двигателям и их демонстрации. 2005, AIAA 2005-4334.

- [18] Бондарь А.И., Колбая Т.Ч., Шостак А.А., Якуш Д.Ю. Технология автоматизации разработки систем диагностирования, аварийной защиты и управления жидкостных ракетных двигателей. *Ракетно-космические двигательные установки: сб. материалов Всерос. науч.-техн. конф.* Москва, ИИУ МГОУ, 2013, с. 78–80.

Статья поступила в редакцию 05.02.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Колбая Т.Ч., Пасмурнов С.М., Якуш Д.Ю. Разработка технологии создания системы диагностирования и аварийной защиты жидкостных ракетных двигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 8.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-08-1524>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.

Колбая Тимур Чичикович — канд. техн. наук, руководитель проекта АО «Конструкторское бюро химвавтоматики». Автор более 30 научных трудов в области математического моделирования течения сжимаемой жидкости, диагностики исполнительных устройств, разработки систем контроля технического состояния и систем аварийной защиты жидкостных ракетных двигателей и энергоустановок. e-mail: timur2607@rambler.ru

Пасмурнов Сергей Михайлович — канд. техн. наук, профессор, декан факультета информационных технологий и компьютерной безопасности Воронежского государственного технического университета. Автор около 150 научных и научно-методических трудов в области математического обеспечения анализа и синтеза проектных решений в автоматизированных системах. e-mail: smpasmurnov@mail.ru

Якуш Дмитрий Юрьевич — ведущий конструктор АО «Конструкторское бюро химвавтоматики». Автор более 10 научных трудов в области разработки систем аварийной защиты жидкостных ракетных двигателей. Аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования и информационных систем Воронежского государственного технического университета. e-mail: duyakush@mail.ru

Development of technology of creating a system for diagnosis and emergency protection of liquid rocket engines

© T.Ch. Kolbaya¹, S.M. Pasmurnov², D.Yu. Yakush¹

¹JSC “Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiki”, Voronezh, 394006, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, 394026, Russia

The article deals with the diagnostics and emergency protection system (DEPS) of liquid rocket engines (LRE) and the challenges the system faces. First, we formulate the main directions of DEPS improvement and show the structure of the system, including not only the software and hardware which directly implement the fault detection and emergency protection functions, but also the system's ancillary elements complex, making possible its setting and adjustment. Next, we propose DEPS test set-up for both the autonomous system testing, and complex testing with the protection object and the top-level control system. Moreover, we present the procedure that enables debugging of the most part of DEPS software without reference to its hardware. Finally, we evaluate the technology development results.

Keywords: *diagnostics, emergency protection and control system, software, diagnostic algorithm, liquid rocket engine.*

REFERENCES

- [1] Glikman B.F. *Avtomaticheskoe regulirovanie zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Automatic control of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 296 p.
- [2] Moiseev N.F., ed. *Ispytatelnye komplekсы i eksperimentalnaya otrabotka zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Test systems and experimental testing of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., Mashinostroenie–Polet Publ., 2012, 368 p.
- [3] Kolomentsev A.I., Kraev M.V., Nazarov V.P. *Ispytanie i obespechenie nadezhnosti raketnykh dvigateley* [Testing and ensuring the reliability of rocket engines]. Krasnoyarsk, SGAU-MAI Publ., 2006, 336 p.
- [4] Golovin Yu.M. *Fundamentalnye i prikladnye problemy kosmonavтики — Fundamental and Applied Problems of Astronautics*, 2002, no. 9, pp. 34–38.
- [5] Golovin Yu.M., Gubertov A.M., Yakushin N.I. *Rossiiskiy kosmos — Russian Space*, 2002, no. 2, pp. 9–12.
- [6] Martirosov D.S., Sinkov S.A. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko — Proceedings of NPO Energomash named after academician V.P. Glushko*, 2005, no. 23, pp. 151–160.
- [7] Pinchuk V.A., Gribakin V.A., Boldyrev K.B., Perfiliev A.S. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. Prilozhenie — Mechatronics, Automation, Control. Appendix*, 2007, no. 11, pp. 17–23.
- [8] Teidzhvani G., Makvey G., Langford L. *Diagnostirovanie kislorodno-uglevodorodnykh raketnykh dvigateley: razvitie analiticheskikh i eksperimentalnykh metodov* [Diagnosing oxygen-hydrocarbon rocket engines: the development of analytical and experimental methods]. *41-ya obyedinennaya konferentsiya AIAA/ASME/SAE/ASEE po dvigateleyam i ikh demonstratsii* [The 41th Joint Conference AIAA/ASME/SAE/ASEE on engines and their demonstration], 2006, AIAA 2006–4407.

- [9] Roemer M. Dzh., Kasprzhinski G.Dzh., Malloy D. Podkhod k sozdaniyu podstraivaemoy sistemy diagnostiki defektov dvigateley i stendov dlya ikh ispytaniy [The approach to creating the adjustable diagnostic system of engine defects and test bench for them]. *38-ya sovmestnaya konferentsiya AIAA/ASME/SAE/ASEE po dvigatelyam i ikh demonstratsii* [The 38th Joint Conference AIAA/ASME/SAE/ASEE on engines and their demonstration], 2002, AIAA 2002–4307.
- [10] Barikharadan S. Otsenka sistem kontrolya realnogo vremeni dlya dvigatelnykh i energeticheskikh sistem [Evaluation of real time control systems, for propulsion and power systems]. *41-ya obyedinennaya konferentsiya AIAA/ASME/SAE/ASEE po dvigatelyam i ikh demonstratsii* [The 41th Joint Conference AIAA/ASME/SAE/ASEE on engines and their demonstration], 2005, AIAA 2005–3716.
- [11] Pizzo D.T., Adib R.M. Veroyatnostnyy analiz vidov i mekhanizmov otkaza i vozdeystviy [Probabilistic analysis of the failure types and mechanisms and impacts]. *38-ya sovmestnaya konferentsiya AIAA/ASME/SAE/ASEE po dvigatelyam i ikh demonstratsii* [The 38th Joint Conference AIAA/ASME/SAE/ASEE on engines and their demonstration], 2002, AIAA 2002–4043.
- [12] Bondar A.I., Pasmurnov S.M., Yakush D.Yu. Programmno-matematicheskoe obespechenie sistemy avariynoy zashchity i upravleniya ZhRD i protsedura ego testirovaniya [Software and mathematical support of the emergency protection and LRE (liquid rocket engine) control system and the procedure of its testing]. *Nauka i tekhnologii: Sbornik nauchnykh trudov* [Science and Technology. Collection of scientific papers]. Moscow, RAS Publ., 2015, vol. 5, p. 137.
- [13] Aguilar R., Liu Ch., Santi L.M., Shein Souers T. Imitatsiya v realnom vremeni dlya proverki i utverzheniya diagnosticheskikh i prognosticheskikh algoritmov [Real time simulation for verification and validation of diagnostic and prognostic algorithms]. *41-ya obyedinennaya konferentsiya AIAA/ASME/SAE/ASEE po dvigatelyam i ikh demonstratsii* [The 41th Joint Conference AIAA/ASME/SAE/ASEE on engines and their demonstration], 2005, AIAA 2005–3717.
- [14] Khuang B., Li Ks., Li M., Bernshtein Dzh., Shmidt K. Profil otkaza programmnoy obespecheniya, vyzvanny otkazom apparatnykh sredstv [Viewing software failure caused by hardware failure]. *41-ya obyedinennaya konferentsiya AIAA/ASME/SAE/ASEE po dvigatelyam i ikh demonstratsii* [The 41th Joint Conference AIAA/ASME/SAE/ASEE on engines and their demonstration], 2005, AIAA 2005–4483.
- [15] Tansel I. N., Chen P., Yenilmez A., Lindsei Kh., Viu B. Razrabotka algoritma pryamoy i obratnoy otsenki s ispolzovaniem neyronnoy seti [Development of forward and reverse estimation algorithm using neural network]. *41-ya obyedinennaya konferentsiya AIAA/ASME/SAE/ASEE po dvigatelyam i ikh demonstratsii* [The 41th Joint Conference AIAA/ASME/SAE/ASEE on engines and their demonstration], 2005, AIAA 2005–4527.
- [16] Souers Sh.T., Santi M.L., Bikford R.L. Otsenka proizvoditelnosti sistemy proverki dostovernosti dannykh [Evaluation of data validation system performance]. *41-ya obyedinennaya konferentsiya AIAA/ASME/SAE/ASEE po dvigatelyam i ikh demonstratsii* [The 41th Joint Conference AIAA/ASME/SAE/ASEE on engines and their demonstration]. 2005, AIAA 2005–4486.
- [17] Bikford R.L., Malloy D. Osuschestvlenie ustanovki sistemy diagnostiki dvigatelya turbiny pri nazemnykh ispytaniyakh v realnom vremeni [Implementation of the turbine engine diagnostics system installation during

ground tests in real time]. *41-ya obyedinennaya konferentsiya AIAA/ASME/SAE/ASEE po dvigatelyam i ikh demonstratsii* [The 41th Joint Conference AIAA/ASME/SAE/ASEE on engines and their demonstration], 2005, AIAA 2005-4334.

- [18] Bondar A.I., Kolbaya T.Ch., Shostak A.A., Yakush D.Yu. *Tekhnologiya avtomatizatsii razrabotki sistem diagnostirovaniya, avariynoy zashchity i upravleniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Automation technology of developing liquid rocket engines diagnostics, emergency protection and control systems]. *Raketo-kosmicheskie dvigatelnye ustanovki: sb. materialov Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Rocket-space propulsion systems: col. materials of All-Russian scientific and technical conference]. Moscow, IPC MRSU Publ., 2013, pp. 78-80.

Kolbaya T.Ch. (b. 1981) graduated from Voronezh State Technology Academy in 2004. Cand. Sci. (Eng.). Project manager of JSC “Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiki”. Author of over 30 scientific works in the field of mathematical modeling of compressible fluid, diagnostics of actuators, developing diagnostics, emergency protection and control systems of liquid rocket engines and power plants. e-mail: timur2607@rambler.ru

Pasmurnov S.M. (b. 1952) graduated from Voronezh Polytechnic Institute in 1977. Cand. Sci. (Eng.), Professor, the Dean of the Faculty of Information Technologies and Computer Security, Voronezh State Technical University. Author of about 150 scientific and methodological works in the field of software for analysis and synthesis of design solutions in automated systems. e-mail: smpas-murnov@mail.ru

Yakush D.Yu. (b. 1969) graduated from Voronezh Polytechnic Institute in 1992. Leading designer of JSC “Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiki”. Author of over 10 scientific works in the field of liquid rocket engines emergency protection systems development. Post-graduate Student of the Department of Computer-aided Design and Information Systems, Voronezh State Technical University. e-mail: duyakush@mail.ru