

СИСТЕМА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Лёвочкин П.С.¹, Мартиросов Д.С.^{1*}, Каменский С.С.¹, Козлов А.А.²,
Боровик И.Н.^{2**}, Беляева Н.В.^{2***}, Румянцев Д.С.³

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

³ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
ИПУ РАН, ул. Профсоюзная, 65, Москва, 117997, Россия

* e-mail: mrtsv@mail.ru

** e-mail: borovik.igor@mai.ru

*** e-mail: anata.believa@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.04.2019

Разработаны основные направления создания эффективной системы функциональной диагностики жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), работающей в режиме реального времени при проведении стендовых огневых испытаний (ОИ). Определены основные элементы структуры системы функциональной диагностики (СФД), включающие: аппаратно-программный комплекс, информационную систему и базу данных, эмулятор сигналов телеметрии и автоматизированное рабочее место оператора. Показана эффективность применения СФД на примере конкретного ОИ.

Ключевые слова: функциональный контроль и диагностирование жидкостных ракетных двигателей, система аварийной защиты ракетного двигателя, стендовые огневые испытания ракетных двигателей.

Введение

Основное назначение СФД – поиск неисправностей агрегатов, элементов конструкции или контуров ЖРД и определение момента времени их возникновения. Теоретические основы протекающих в двигателе процессов и их математическое моделирование были заложены в 1930-х годах в связи с созданием новых энергетических установок [1, 2]. Эти работы получили своё развитие в публикациях [3–13]. Предприятия, имея потребность не только в системах аварийной защиты (САЗ) двигателя, но и в системах диагностики, самостоятельно создают программно-технические комплексы для решения указанных задач [14–18]. В настоящее время в связи с кратным увеличением быстродействия вычислительной техники стала возможной реализация диагностических процедур в режиме реального времени.

В НПО «Энергомаш им. академика В.П. Глушко» разработана и штатно применяется СФД

ЖРД, прошедших огневые испытания. Диагностирование проводится путём сравнения по усреднённым на каждом стационарном режиме значениям измеряемых на работающем двигателе и расчётных различными способами по эталонной математической модели процессов медленноменяющихся параметров (ММП) в соответствии с техническими требованиями.

Проверка адекватности работы штатной СФД (после проведения ОИ) за весь период применения, начиная с 1988 г., подтверждает её надёжную работу, включая отсутствие ложных срабатываний. Уже на первых порах применения СФД был отмечен случай предотвращения поставки двигателя РД120 в товар из-за выявленной СФД ошибки в сборке в магистрали питания горючим газогенератора. В остальных случаях, при медленно развивающихся неисправностях, СФД подтверждала анализ, проведённый другими экспертными средствами.

Поиск методов совершенствования СФД с целью упреждения развития аварийных ситуаций в процессе огневого испытания, а именно определение момента времени возникновения неисправности и контроль параметров в процессе развития неисправности привёл к идее применения штатной СФД в режиме непрерывного сканирования телеметрии. Предполагалось, что это должно обеспечить существенно раннее обнаружение неисправности. В период 2006—2013 гг. с целью реализации этой идеи в НПО «Энергомаш им. академика В.П. Глушко» в рамках НИР проведены исследования по функциональной диагностике ЖРД на основе измеряемых параметров и математических моделей процессов. В результате разработаны методы, алгоритмы и программное обеспечение процедур диагностирования в режиме реального времени с помощью аппаратно-программных комплексов [19].

Положительный опыт применения вновь разработанных методов диагностирования двигателей после ОИ с целью определения момента времени и локализации неисправности с использованием зарегистрированных на испытании текущих значений телеметрии ММП отражён в заключениях аварийных технических комиссий в виде рекомендаций создания СФД ЖРД, работающей в реальном масштабе времени.

Для оценки эффективности результатов исследований использовались сигналы телеметрии, зарегистрированные на работающем двигателе с

частотой 125 и 500 Гц и подвергнутые после ОИ вторичной обработке с дискретностью 0,02 и 0,05 с. Так, имитировались сигналы телеметрии в реальном масштабе времени при ОИ, в том числе, завершённых по срабатыванию САЗ. Результаты диагностирования приведены в таблице: СФД всегда срабатывала раньше САЗ.

Цель и задачи разработки

Цель работы — повышение безопасности проведения огневых испытаний ЖРД на основе применения эффективной системы функциональной диагностики ЖРД, работающей в режиме реального времени.

Решается задача разработки аппаратно-программного обеспечения диагностических процедур с заданной дискретностью по времени не более 0,02 с и вывод диагностической информации в виде таблиц, протоколов, графической информации в темпе проведения ОИ.

Основные задачи, решаемые СФД ЖРД по медленноменяющимся параметрам в режиме реального времени:

- Определение правильности функционирования двигателя на всех стационарных режимах, заданных профилем испытания.
- Выявление и локализация неисправности, нарушающей правильное функционирование.
- Определение слабых мест двигателя — элементов или контуров, склонных к конструкционным или производственным отказам.

Сравнение момента времени срабатывания СФД и САЗ

| № | Неисправность | СФД | САЗ | Упреждение диагностики, с |
|---|--|--------------------------------|---------|---------------------------|
| | | Момент времени срабатывания, с | | |
| 1 | Разрушение трубопровода, приведшее к потере управляемости приводами регулятора и дросселя | 274,4 | 324,99 | -50,54 |
| 2 | Выгорание элементов конструкции турбины, газовода и смесительной головки камеры | 29,42 | 29,609 | -0,189 |
| 3 | Прогар газовода, выгорание спрямляющей решётки и ряда форсунок | 291,325 | 291,441 | -0,16 |
| 4 | Закрытие дросселя из-за разрушения трубопровода, приведшего к потере управляемости приводами МРГ и МДГ | 279,82 | 280,98 | -1,16 |
| 5 | Разрушение двигателя | 53,6 | 77,7 | -32,1 |
| 6 | Разрушение трубопровода управления клапаном окислителя | 165,6 | 166,37 | -0,77 |

- Подтверждение надёжности двигателя перед использованием в составе ракеты-носителя.

Структура системы

Укрупнённая структурная схема СФД представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема СФД

Основу СФД составляет аппаратно-программный комплекс (АПК), который служит для преобразования электрических аналоговых сигналов телеметрии в кодовые, содержащие информацию о физических характеристиках измеряемых параметров (положениях приводов регулирующих органов, давлениях, расходах, оборотах турбин, температурах и т.д.) и передачи этих данных на автоматизированное рабочее место (АРМ) СФД.

Информационная система и база данных (ИСИБД) предназначена для сбора, обработки и хранения информации о тарировках датчиков, характеристиках автономных испытаний агрегатов, данных телеметрии предыдущих испытаний и передачи этой информации на АРМ.

Эмулятор сигналов телеметрии (ЭСТ) создан для имитации сигналов телеметрии для настройки и тестирования АПК перед ОИ. ЭСТ может проигрывать сценарий планируемого ОИ. Имитируя работу двигателя, эмулятор проверяет, сможет

ли СФД выполнить свои задачи в условиях планируемого ОИ.

АРМ оператора СФД используется для ввода и обработки информации из базы данных (БД), АПК и системы управления, проведения диагностических процедур (расчётов), вывода графичес-

кой и цифровой информации на экран монитора и протокола мониторинга ОИ.

Особенностью телеметрии ЖРД при стендовых огневых испытаниях является совместное использование одних и тех же данных различными подсистемами испытательного стенда. Так, например, измерения положений регулирующих органов необходимы не только для СФД, но и для системы управления режимами работы двигателя. Это создаёт определённые трудности при решении задачи «распараллеливания» данных телеметрии, т.к. при этом могут возникнуть помехи в работе обеих систем.

Функциональные возможности отдельных подсистем

Программное обеспечение

Программное обеспечение (ПО) АПК осуществляет работу функциональной модели диагно-

стики, реализует взаимодействие со сторонними системами (подсистемами управления АПК), выполняет контроль и самодиагностику.

АПК находится в одном из режимов. Режим ожидания задания запускается при подаче питания и отсутствии задания на диагностику в энергонезависимой памяти контроллера. В режим готовности АПК переходит после получения задания на диагностику, при этом проводятся проверки задания на допустимость, функционирование и готовность всех подсистем, в том числе сбора и обработки результатов измерений. Режим проведения диагностики проверяет состояние и готовность технических средств СФД. Режим получения результатов останавливает подсистемы сбора и обработки измерений, скачивает данные регистрации системой верхнего уровня. В режиме отладки и проверки функционирования ПО не задействованы подсистемы имитации и оператору запрещено вмешиваться в процесс диагностики.

Информационная система и база данных

Целями создания информационной системы и базы данных являются:

- автоматизация создания конфигураций функциональных моделей СФД ЖРД в рамках единого информационного поля;
- автоматизация производственных процессов обслуживания СФД ЖРД;
- оптимизация процессов передачи технической и управляющей информации;
- обеспечение оперативного информационно-го взаимодействия при изменении стендового оборудования;
- автоматизация информационных стендовых производственных процессов подготовительных и технологических операций.

Для реализации поставленных целей используется высоконадёжное защищённое электронное хранилище данных. ИСиБД обеспечивает гибкие возможности чтения и совместного изменения данных и документов авторизованными пользователями системы. Единая система рубрикаторов позволяет эффективно группировать информационные объекты и осуществлять их интеллектуальный поиск. Включение в хранилище библиотек документов, тематически связанных с обрабатываемыми данными и процессами, формирует единое информационное поле в данных областях знаний. ИСиБД имеет инструменты сквозного и гибкого поиска информации и обеспечивает возможность удалённой работы сотрудников предприятия с объектами, распределёнными по предприятию.

ИСиБД также автоматизирует следующие процессы и виды деятельности:

- Взаимодействие между конструкторским бюро и испытательным комплексом (ИК) предприятия в части получения задания на испытание двигателя, формулярных данных; актуализация справочной информации по типам двигателей, компонентам топлива, математическим моделям, номенклатуре измеряемых параметров; формирование отчёта о проведённых технологических операциях; формирование отчёта о проведённом огневом испытании.

- Взаимодействие между отделом метрологии и подразделением ИК в части поверки первичных преобразователей; актуализация калибровочных характеристик преобразователей; метрологическая аттестация измерительных каналов; формирование и отслеживание плана проведения регламентного обслуживания.

- Взаимодействие между производством и конструкторским бюро в части сопровождения электронных паспортов двигателя, его деталей и сборочных единиц.

- Взаимодействие между подразделениями ИК в части оперативного согласования действий в ходе проведения технологических работ и обслуживания стендового оборудования.

- Подготовка конфигурации АПК СФД.

- Подготовка конфигурации ЭСТ СФД.

Конфигуратор объектов информационной системы служит для удобной работы с ИСиБД и позволяет гибко конструировать информационное поле двигателя и его агрегатов. Опытную математическую модель СФД, не связанную с реальными двигателями, агрегатами и испытаниями, легко отработать с его помощью. Для этого создаются типовые объекты с признаком «реальный»/«мнимый». Попадание мнимых объектов к реальным запрещено, но обратное допустимо. Например, возможно наличие в ИСиБД мнимого двигателя, собранного частично из реальных и частично из мнимых агрегатов.

Каждый тип двигателя способен иметь несколько математических моделей. Выбор модели, загружаемой в АПК, определяется заданием на проведение испытания.

Модуль «Диагностическая модель» реализует основную функцию СФД. Для её определения нужно задать блочную модель двигателя, связать параметры блочной модели и измеряемых параметров стенда, сконфигурировать «решешник» и диагностические признаки.

Задание блочной модели – это описание процессов ЖРД с помощью системы уравнений. Одна

запись блочной модели определяется характеристиками:

- тип блока (вид уравнений);
- начальное числовое приближение для параметра;
- наименование параметра;
- тип переменной (переменная/константа/неизвестная переменная).

Пользовательский интерфейс ИСиБД учитывает, что создаваемая блочная модель двигателя взаимосвязана с пневмогидросистемой ЖРД, а типовые блоки (уравнения) отражают физические процессы.

Эмулятор сигналов телеметрии

ПО ЭСТ позволяет сформировать данные по определённому закону и организовать их поступление с установленным темпом на вход математических алгоритмов.

ЭСТ обеспечивает формирование:

- аналоговых сигналов в диапазоне от 0 до 6 В с частотой выдачи от 1 до 10000 Гц по 13 каналам;
- частотных сигналов в диапазоне от 0,02 до 30 кГц с частотой выдачи от 1 до 50 Гц с разрешающей способностью по уровню 10 мВ_{эфф} по пяти каналам;
- сигналов термопреобразователей сопротивления в диапазонах от 0 до 200 Ом с частотой выдачи от 2 до 50 Гц не менее чем по 2 каналам;
- сигналов термоэлектрических преобразователей в диапазоне от минус 10 до 75 мВ с частотой выдачи от 100 до 1500 Гц по двум каналам;
- дискретных сигналов типа «сухой контакт» или потенциальных сигналов 0—6 В по двум каналам.

ПО ЭСТ может использовать данные сигналов телеметрии, полученные в ходе проведения предыдущих ОИ. ПО ЭСТ способно отобразить выбранные сигналы в едином окне в графическом и табличном виде, а также синхронизировать процесс запуска выдачи сигналов по всем имеющимся измерительным каналам.

Алгоритм работы СФД

Как в автоматическом (реальном времени), так и в интерактивном (после проведения огневого испытания) режиме работы СФД реализует следующие процедуры.

Процедура А «Нормальное функционирование» работает, пока все отклонения ΔX измеряемых (контролируемых) параметров от расчётных на

протяжении всего испытания не превышают допустимых значений $\Delta X_{\text{доп}}$:

$$\Delta X \leq \Delta X_{\text{доп}}$$

Выход за границу допуска только одного параметра рассматривается как повышенная погрешность измерения этого параметра.

Процедура В «Двигатель функционирует ненормально» выполняется, если два и более измеряемых (контролируемых) параметров выходят за границы допустимых значений. СФД фиксирует время выхода (возникновения неисправности) и переходит в режим локализации неисправности для определения контролируемой характеристики двигателя, которая может быть нарушена.

Процедура С «Нарушение характеристики двигателя» используется для локализации неисправности и определения первой вышедшей за границу допуска $A_{k \text{ доп}}$ контролируемой характеристики двигателя A_k :

$$\Delta A_k \leq A_{k \text{ доп}}$$

Если все контролируемые характеристики в норме, СФД переходит в режим локализации неисправности в контуре двигателя.

Процедура Д «Неисправность локализована в контуре двигателя» реализуется, когда СФД определила по методу структурного исключения [20] контур двигателя, в котором имеется неисправность.

Процедура Е «Неисправность не локализована» наступает, если по методу структурного исключения СФД не определяет однозначно, в каком именно контуре возникла неисправность.

Диагностирование двигателя в режиме реального времени

Рассмотрим типичное поведение диагностических признаков при возникновении и медленном развитии неисправности в ЖРД при огневом испытании. На рис. 2 относительное отклонение измеренного давления горючего от расчётного после дросселя показано сплошной кривой, после насоса — пунктирной. Процедура диагностирования «А» выполняет задачу контроля отклонений измеренных значений параметров от расчётных — ΔX %.

В момент времени $t_{\text{СФД}}$ два контролируемых параметра выходят за границы допуска. СФД в соответствии с процедурой «В» находит и фиксирует

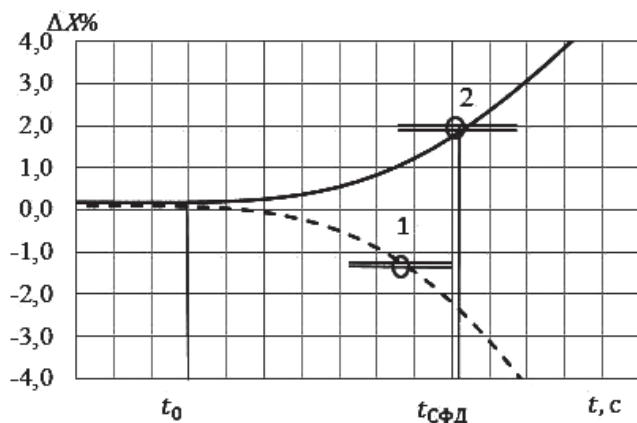


Рис. 2. Процедура диагностирования «А»: моменты выхода за допуски относительного отклонения измеренного давления горючего от расчётного: 1 – после насоса; 2 – после дросселя; — граница допуска

неисправность через $\Delta t - t_{сФД} - t_0 = 0,64$ с после её возникновения и переходит к локализации неисправности двигателя процедурой «С». Через время $\Delta t - t_{сФД} - t_0 = 0,26$ с после возникновения обнаружено нарушение перепадной характеристики дросселя горючего, которая на рис. 3 выходит за границы допуска; остальные параметры не превышают $\pm 1\%$.

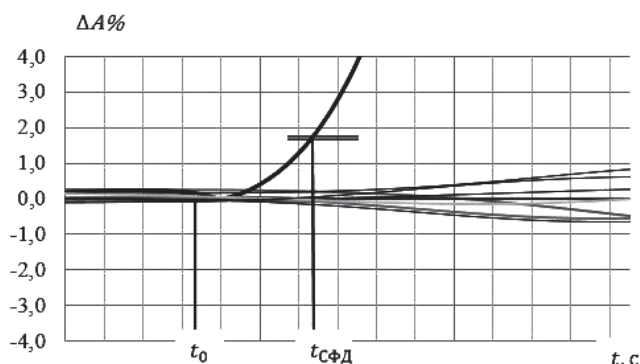


Рис. 3. Процедура диагностирования «С»: — граница допуска

Процедура «D» обработала данные методом структурного исключения, где в качестве исключаемого параметра служит давление горючего после насоса 1-й ступени, а в качестве контролирующего – давление горючего после дросселя. Неисправность локализована в контуре «выход насоса горючего 1-й ступени – дроссель горючего – вход в тракт охлаждения камеры».

Выводы

По представленным результатам разработки СФД ЖРД, основанной на контроле отклонений измеренных медленно меняющихся параметров процессов от эталонной математической модели и работающей в режиме реального времени, можно сделать вывод, что система обеспечивает определение момента времени возникновения и локализацию медленно развивающейся неисправности. Сформированная концепция диагностирования позволяет выработать упреждающий сигнал, предотвращая возникновение аварийной ситуации, приводящей к разрушению двигателя и материальной части огневого стенда. Реализация СФД может быть выполнена на основе существующей элементной базы – аппаратно-программном комплексе и компьютерной технике.

Библиографический список

1. Лангемак Г.Э., Глушко В.П. Ракеты: их устройство и применение. – М. – Л.: ОНТИ НКПТ, Главная редакция авиационной литературы, 1935. – 120 с.
2. Глушко В.П. Ракетные двигатели ГДЛ – ОКБ. – М.: Новости, 1975. – 110 с.
3. Ваничев А.П. Термодинамический расчёт горения и истечения в области высоких температур. – М.: Бюро новой техники, 1947. – 29 с.
4. Венгерский Э.В., Морозов В.А., Усов Г.Л. Гидродинамика двухфазных потоков в системах питания энергетических установок. – М.: Машиностроение, 1983. – 128 с.
5. Венгерский Э.В., Морозов В.А., Усов Г.Л. Некоторые особенности нестационарных процессов в гидросистемах энергетических установок при работе на насыщенных газом жидкостях // Кавитационные автоколебания в насосных системах: Материалы совещ.: В 2 ч. – Киев: Наукова думка, 1976. Ч. 2. С. 86–93.
6. Мошкин Е.К. Динамические процессы в ЖРД. – М.: Машиностроение, 1964. – 256 с.
7. Натанзон М.С. Разрывные кавитационные автоколебания в насосах // Кавитационные автоколебания в насосных системах: Материалы совещ.: В 2 ч. – Киев: Наукова думка, 1976. Ч. 2. С. 3–12.
8. Пилипенко В.В., Задонцев В.А., Натанзон М.В. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем. – М.: Машиностроение, 1977. – 352 с.
9. Овсянников Б.В. Теория и расчёт насосов жидкостных ракетных двигателей. – М.: Оборонгиз, 1960. – 247 с.
10. Овсянников Б.В., Боровский Б.И. Теория и расчёт агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 376 с.
11. Чебаевский В.Ф., Петров В.И. Кавитационные характеристики высокооборотных шнеко-центробежных насосов. – М.: Машиностроение, 1973. – 152 с.

12. Чебаевский В.Ф., Петров В.И. Кавитация в высокооборотных лопастных насосах. — М.: Машиностроение, 1982. — 192 с.
13. Шерстянников В.А., Калнин В.М. Гидродинамическое моделирование рабочего процесса ЖРД на режимах запуска. — М.: Машиностроение, 1981. — 88 с.
14. Васин А.С., Венгерский Э.В. Автоматизированный контроль и диагностика сложных пневмогидравлических объектов // Новые наукоёмкие технологии в технике: Энциклопедия. — М.: МЦ «Аспект», 1994. Т. 1. — 280 с.
15. Буканов В.Т., Колбасенков А.И., Мартиросов Д.С. Анализ связи между процедурами диагностирования, управления и регулирования ЖРД // Труды НПО «Энергомаш им. академика В.П. Глушко». 2012. № 29. С. 174-187.
16. Каменский С.С., Мартиросов Д.С., Коломенцев А.И. Применение методов теории подобия для анализа стационарных рабочих процессов жидкостных ракетных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 32-37.
17. Турский А.А. Разработка и исследование автоматизированной системы функционального контроля и диагностирования ЖРД: Дисс. ... канд. техн. наук. — М.: МАТИ, 2001. — 200 с.
18. 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
19. Лёвочкин П.С., Мартиросов Д.С., Буканов В.Т. Проблемы функциональной диагностики жидкостных ракетных двигателей // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2013. № 1(90). С. 72-88.
20. Мартиросов Д.С. Диагностирование сложных технических систем на основе математических моделей и измеряемых параметров методом структурного исключения. — М.: Изд-во МАИ, 1998. — 53 с.

LIQUID ROCKET ENGINES FUNCTIONAL DIAGNOSTICS SYSTEM IN REAL-TIME MODE

**Levochkin P.S.¹, Martirosov D.S.^{1*}, Kamenskii S.S.¹, Kozlov A.A.²,
Borovik I.N.^{2**}, Belyaeva N.V.^{2***}, Rumyantsev D.S.³**

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

³ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
65, Profsoyuznaya str., Moscow, 117997, Russia

* e-mail: mrtsv@mail.ru

** e-mail: borovik.igor@mai.ru

*** e-mail: anata.beliaeva@mail.ru

Abstract

The hardware-software complex of the functional diagnostics system of the liquid jet engines operation during fire tests was developed. The system analyzes data in the real time mode. It deals with troubleshooting of units, structural elements or loops of a liquid rocket engine and determines the time instant of their occurrence.

Theoretical studies of the processes occurring in a rocket engine have been conducted since the 1930s. Differential equations reflect the dependencies between the engine parameters. The developed system employs the linearized equations of dynamics allowing accelerate computing and obtain numerical results in the real-time mode.

Each engine and each of its units are described by mathematical equations, on which basis the parameters values are calculated.

At each stationary mode, the averaged values of the operating engine measured parameters computed employing a mathematical model are compared.

If a calculated value deviates from the actual one, then there is a considerable probability of a defect presence in a unit, or in the entire engine. Functional diagnostics is based on this principle.

Modern measuring systems and high-speed computing systems are employed to diagnose engines in real-time mode.

The system consists of a hardware-software complex, an information system and a database, a

telemetry signal emulator and an operator's automated workplace.

The LRE functional diagnostics system solves the following tasks:

1. Increases the safety of the LRE fire tests conducting;
2. Determines the the engine functioning correctness in all stationary modes specified by the test profile;
3. Detects and localizes the malfunctions disrupting the proper functioning;
4. Identifies the engine "weak points", such as elements or loops prone to structural or manufacturing failures.
5. Confirms the engine reliability before prior to its employing as a part of the launch vehicle.

The results of the emergency protection system and functional diagnostics system operation were compared. The proposed system has always found a failure before the emergency protection system did.

Keywords: functional control and diagnostics of liquid rocket engines, rocket engine emergency protection system, rocket engines bench firing tests.

References

1. Langemak G.E., Glushko V.P. *Rakety: ikh ustroistvo i primeneniye* (Missiles, their structure and application), Moscow - Leningrad, ONTI NKPT, Glavnaya redaktsiya aviatsionnoi literatury, 1935, 120 p.
2. Glushko V.P. *Raketnye dvigateli GDL – OKB* (GDL-OKB rocket engines), Moscow, Novosti, 1975, 110 p.
3. Vanichev A.P. *Termodinamicheskii raschet goreniya i istechniya v oblasti vysokikh temperature* (Thermodynamic calculation of combustion and outflow at high temperatures), Moscow, Byuro novoi tekhniki, 1947, 29 p.
4. Vengerskii E.V., Morozov V.A., Usov G.L. *Gidrodinamika dvukhfaznykh potokov v sistemakh pitaniya energeticheskikh ustanovok* (Hydrodynamics of two-phase flows in power plants power systems), Moscow, Mashinostroenie, 1983, 128 p.
5. Vengerskii E.V., Morozov V.A., Usov G.L. *Kavitatsionnye avtokolebaniya v nasosnykh sistemakh. Sbornik statei*, Kiev, Naukova dumka, 1976. Part 2, pp. 86–93.
6. Moshkin E.K. *Dinamicheskie protsessy v ZhRD* (Dynamic processes in LRE), Moscow, Mashinostroenie, 1964, 256 p.
7. Natanzon M.S. *Kavitatsionnye avtokolebaniya v nasosnykh sistemakh. Sbornik statei*, Kiev, Naukova dumka, 1976. Part 2, pp. 3–12.
8. Pilipenko V.V., Zadontsev V.A., Natanzon M.V. *Kavitatsionnye avtokolebaniya i dinamika gidrosistem* (Cavitation self-oscillations and hydraulic systems dynamics), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 352 p.
9. Ovsyannikov B.V. *Teoriya i raschet nasosov zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* (Liquid rocket engines pumps theory and design), Moscow, Oborongiz, 1960, 247 p.
10. Ovsyannikov B.V., Borovskii B.I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* (Theory and calculation of power units for liquid rocket engines), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 376 p.
11. Chebaevskii V.F., Petrov V.I. *Kavitatsionnye kharakteristiki vysokooborotnykh shneko-tsentrobegnykh nasosov* (Cavitation characteristics of high-speed screw-centrifugal pumps), Moscow, Mashinostroenie, 1973, 152 p.
12. Chebaevskii V.F., Petrov V.I. *Kavitatsiya v vysokooborotnykh lopastnykh nasosakh* (Cavitation in high-speed vane pumps), Moscow, Mashinostroenie, 1982, 192 p.
13. Sherstyannikov V.A., Kalnin V.M. *Gidrodinamicheskoe modelirovanie rabocheho protsessa ZhRD na rezhimakh zapuska* (Hydrodynamic modeling of the LRE workflow at launch modes), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 88 p.
14. Vasin A.S., Vengerskii E.V. *Novye naukoemkie tekhnologii v tekhnike. Entsiklopediya*, Moscow, Aspekt, 1994, vol. 1, 280 p.
15. Bukanov V.T., Kolbasenkov A.I., Martirosov D.S. *Trudy NPO "Energomash im. akademika V.P. Glushko"*, 2012, no. 29, pp. 174–187.
16. Kamenskii S.S., Martirosov D.S., Kolomentsev A.I. Similarity theory methods application for lpre steady-flow working procedures analysis. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 32–37.
17. Tirskii A.A. *Razrabotka i issledovanie avtomatizirovannoi sistemy funktsional'nogo kontrolya i diagnostirovaniya ZhRD* (Development and study of LRE automated functional control and diagnostics system). Doctor's thesis, Moscow, MATI, 2001, 200 p.
18. 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
19. Levochkin P.S., Martirosov D.S., Bukanov V.T. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman*, 2013, no. 1(90), pp. 72–88.
20. Martirosov D.S. *Diagnostirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem na osnove matematicheskikh modelei i izmeryaemykh parametrov metodom strukturnogo isklyucheniya* (Complex technical systems diagnostics based on mathematical models and measured parameters by the structural studying method), Moscow, MAI, 1998, 53 p.