

Информационно-измерительная и управляющая система огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги

Е.С. Неретин, О.Ю. Чубаров

Аннотация

В данной статье описывается разработанная автоматизированная информационно-измерительная и управляющая система огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРД МТ). Основными результатами работы являются: разработка структуры и алгоритмов работы системы. Использование автоматизированной системы позволяет получить, проанализировать и сделать выводы о качестве работы различных ЖРД МТ.

Ключевые слова

Информационно-измерительная и управляющая система, жидкостный ракетный двигатель малой тяги, огневые испытания, применение SCADA-систем.

Введение

Испытаниям ЖРД МТ присущи определённые особенности, связанные как со спецификой процессов, происходящих в этих двигателях, так и с условиями их эксплуатации [1].

Первой особенностью испытаний ЖРД МТ является их кратковременность, практически исключая возможность проведения оператором какого-либо анализа и

корректировки режима работы в ходе испытания. В связи с этим процессы управления испытанием и измерения параметров должны быть максимально автоматизированы.

Применяемые быстродействующие автоматические управляющие системы обеспечивают заданную последовательность режимов работы, позволяют моделировать разнообразные условия запуска и стационарной работы ЖРД МТ.

Кратковременность работы двигателя и необходимость автоматизации измерений потребовали разработки и применения специальных измерительных систем и оборудования. Причем к этим системам предъявляются два принципиальных требования – высокая точность измерения параметров на установившихся режимах и минимальная инерционность при измерениях ряда физических величин на переходных режимах, в том числе на режимах запуска и выключения.

Вторая особенность – это повышенная опасность испытания ЖРД МТ. Она связана, главным образом, с применением высокоактивных топлив и, в первую очередь, окислителей. Их использование предопределяет высокий уровень температуры в камере сгорания, а также способствует быстрому развитию дефектов, которые в некоторых случаях могут заканчиваться взрывом.

Третья особенность – это высокая стоимость испытаний, что связано в значительной степени, с большими расходами топливных компонентов и, очень часто, уникальностью испытательного оборудования. В связи с этим возникают требования высокой информативности испытаний и рационального их планирования, позволяющие получить возможно более полные данные о двигателе за кратчайшее время, а значит и при минимальном расходе топлива.

Снижение стоимости отработки и, в частности, затрат на испытания ЖРД МТ может быть достигнуто путем применения научных методов планирования испытаний и обработки экспериментальных данных [1, 2].

Информационно-измерительная и управляющая система (ИИиУС) огневых испытаний ЖРД МТ, учитывающая отмеченные особенности их испытаний и позволяющая снизить затраты на эти испытания, должна обеспечивать:

- высокую точность и повышенную надёжность средств измерений;
- дистанционность и заданный алгоритм измерений;
- автоматизацию управления аппаратурой;
- возможность визуального контроля параметров двигателя и стендовых систем по выбору оператора-испытателя;

- высокую помехозащищенность средств измерений и каналов сбора и передачи информации;
- возможность выборочной обработки информации в процессе испытаний, работу средств измерений и обработку полученной информации в режиме единого времени;
- защиту двигателя при достижении критических значений параметров.

Проведённый анализ существующих систем огневых испытаний ЖРД МТ в атмосферных условиях показал, что ни одна из разработанных на сегодняшний день систем полностью не отвечает всем заявленным требованиям для испытания образцов двигателей ДМТ МАИ-200 и ДМТ МАИ-500, разрабатываемых кафедрой «Ракетные двигатели» Московского авиационного института (государственного технического университета) «МАИ».

Для проведения испытаний указанных ЖРД МТ на стенде огневых испытаний ЖРД МТ в атмосферных условиях кафедры «Ракетные двигатели» МАИ, отвечающих всем предъявляемым требованиям, и разработана ИИиУС, предлагаемая в данной работе.

Архитектура ИИиУС

Общая структурно-функциональная схема ИИиУС представлена на рис. 1.

Разработанная ИИиУС включает в себя:

- измерительную подсистему, получающую показатели температуры поверхности стенки ЖРД МТ, давления в трубопроводах и камеры сгорания двигателя, токи и напряжения клапанов, тяги ЖРД, а также расходов компонентов;
- подсистему сбора данных, позволяющую собирать результаты измерений как аналоговых, так и дискретных величин, поступающих с датчиков;
- подсистему управления, осуществляющую испытания в ручном и автоматическом режимах по заданной циклограмме [6];
- подсистему контроля испытаний в реальном времени, отслеживающую все измеряемые параметры, отображающая их в удобном для экспериментатора виде (таблицы, графики);
- подсистему формирования отчетов о проведённых испытаниях, печати и архивирования протоколов экспериментов.

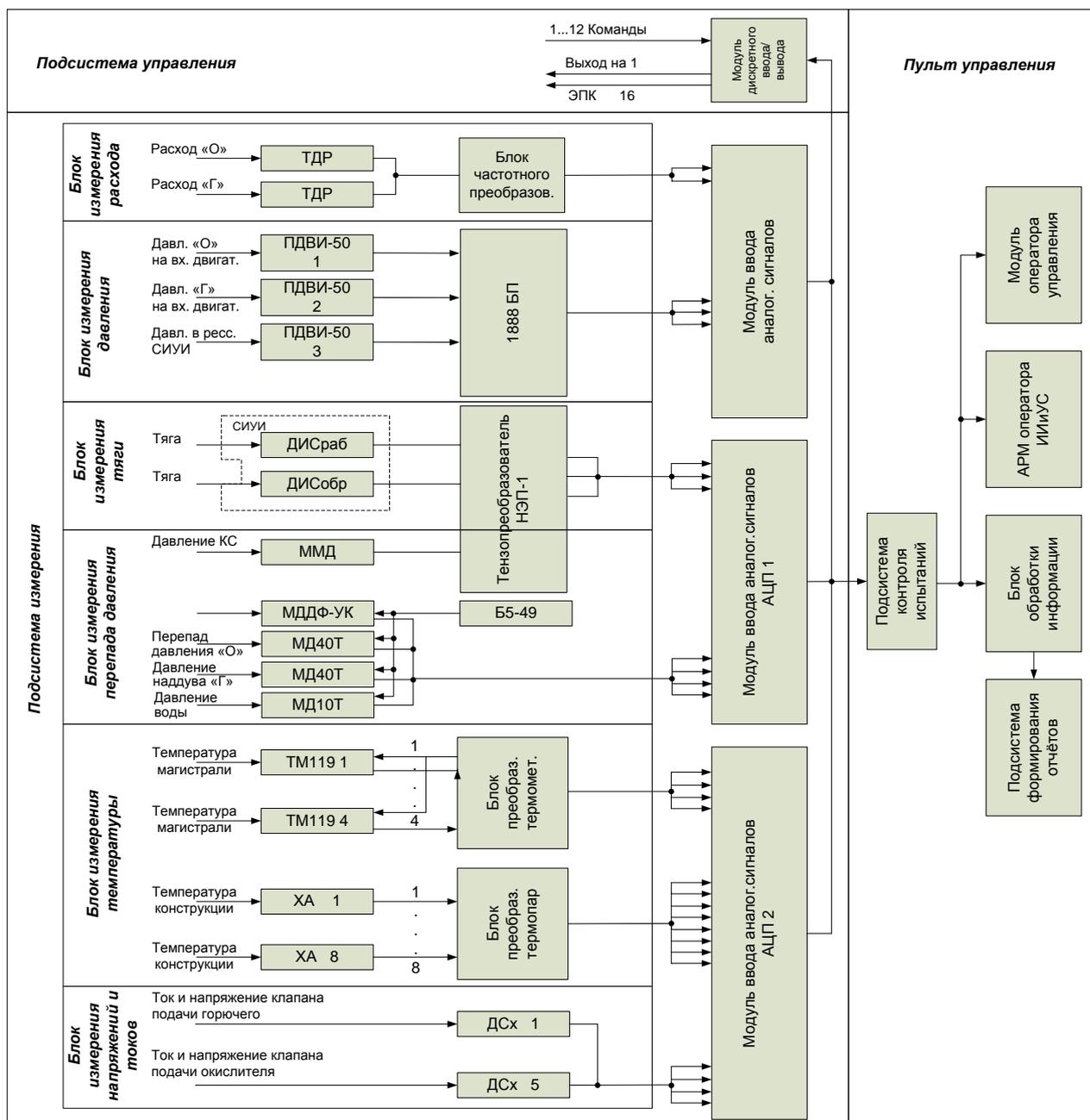


Рисунок 1. Структурно-функциональная схема системы измерения и управления

Блоки измерения параметров, включённые в схему обеспечивают восприятие всей необходимой информации о состоянии ЖРД МТ в процессе испытаний.

Для удобства и надёжности все измерительные модули (стенд на рис. 1) располагаются на одной стойке, защищающей их от внешних воздействий и вмешательств.

Управление в схеме осуществляется с персональной ЭВМ оператора стенда. Она включает в себя модули дискретного ввода/вывода сигналов и ввода аналоговых сигналов [6].

Измерительная часть системы состоит из блоков, каждый из которых отвечает за свой измеряемый параметр [7], а именно:

- блоки измерения давления окислителя и горючего на входе двигателя;
- блоки измерения расхода горючего и окислителя;
- блоки измерения тяги двигателя;
- блоки измерения перепада давления окислителя, давление наддува горючего, давления подаваемой для охлаждения воды, давления камеры сгорания (КС);
- блоки измерения температуры магистрали и измерения температуры конструкции;
- блоки измерения напряжения и тока на клапанах окислителя и горючего.

Блок измерения температуры поверхности двигателя построен на базе термопар. Он включает преобразователи сигналов с термопар и реализуется в виде печатной платы для установки 8 модулей аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) с возможностью мультиплексирования каналов.

Схема подключения этого блока представлена на рис. 2.

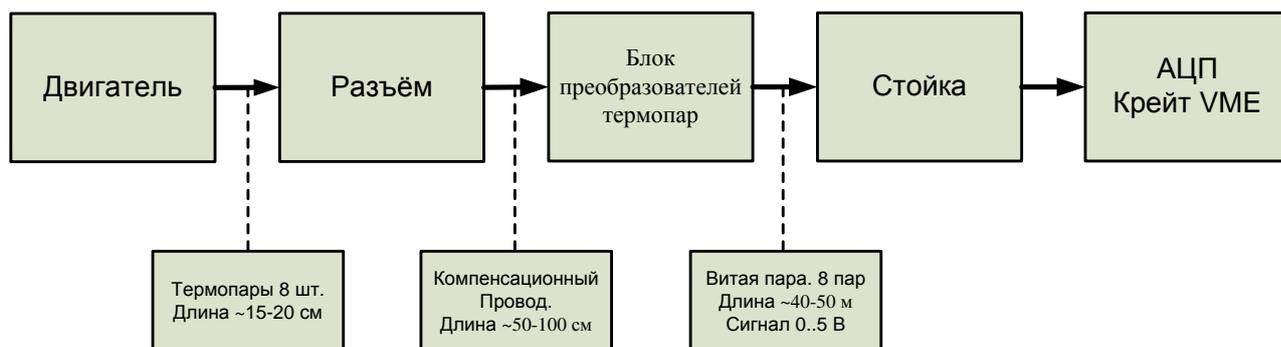


Рисунок 2. Схема подключения измерительного блока.

Система помещена в специально разработанный высокозащищенный корпус. Используемый принцип работы позволяет обеспечить надежность производимых измерений.

На корпусе ЖРД МТ закреплены 8 термопар, снимающих температуру по всей длине корпуса. Сигналы с термопар поступают на универсальный разъём блока. Далее сигналы поступают на плату, где они оцифровываются и поступают на шину VME.

Разработанный **блок измерения тока и напряжения** используется для слежения за изменениями этих сигналов на клапанах, подающих горючее и окислитель на ЖРД МТ.

При проведении испытаний используются два типа клапанов: с номинальными токами потребления 1 А и 5 А. В качестве примера схема подключения клапана с номинальным током потребления 5 А к модулю измерения тока и напряжения представлена на рис. 3.

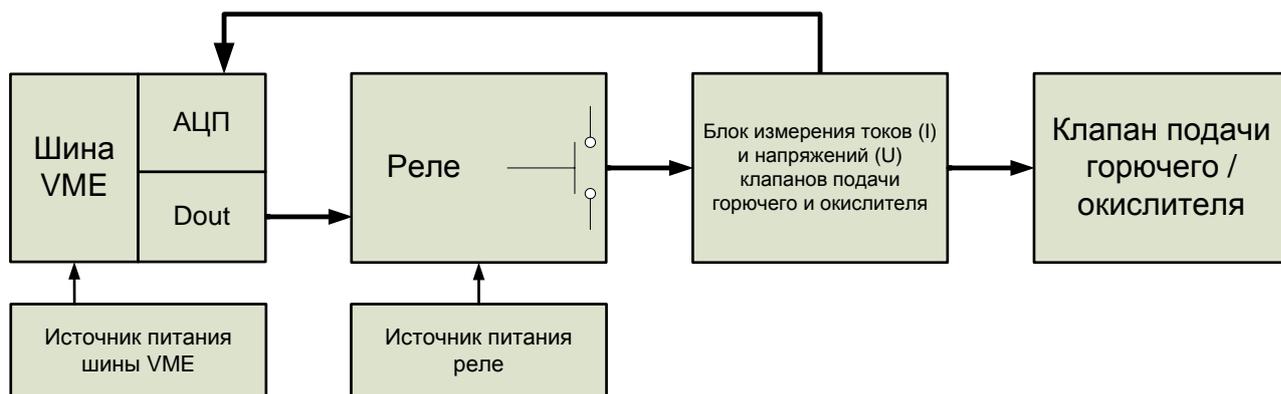


Рисунок 3. Схема подключения клапана с номинальным током 5 А к блоку измерения тока и напряжения

В схеме использованы датчики измерения напряжения LV 25-Р и датчики измерения тока LTS 6-NP производства компании LEM, которые обеспечивают достаточно высокую точность измерения.

Датчик напряжения LV 25-Р построен по принципу преобразования входного тока пропорционального приложенному напряжению (постоянному, переменному, импульсному и т.д.) в пропорциональный выходной ток с гальванической развязкой между первичной (силовой) и вторичной (измерительной) цепями.

Принцип работы заключается в следующем: преобразуемое напряжение подается на входные клеммы датчика через внешний резистор, сопротивление которого выбирается исходя из номинального входного тока датчика. Измерения снимаются с выбранного пользователем резистора.

Датчик тока LTS 6-NP позволяет измерять электрические величины постоянного и переменного тока, а также импульсные величины тока. Датчик представляет собой гальваническую развязку между первичной схемой (силовой) и вторичной (электронным модулем). Предел измерения тока – 6 А.

Управляющая часть системы выполняет следующие основные функции [8]:

- автоматический запуск и останов двигателя по заданной циклограмме;
- автоматический контроль за основными параметрами двигателя, а при достижении ими критических значений - аварийный останов по заданной программе;
- автоматическое изменение режимов работы;

- автоматическое управление стендовыми клапанами, поддержание заданных давлений наддувов и продувок;
- автоматический контроль наличия компонентов в стендовых баках;
- автоматический контроль целостности электрических цепей двигателя;
- выдачу временных команд;
- ручное управление стендом при подготовке к испытанию и во время испытаний.

Управляющая часть системы разбита на подсистемы, жёстко связанные между собой, но решающие свои независимые задачи и построена в соответствии с принятыми на сегодня принципами [1].

Функциональный состав этой части дан на рис. 4.

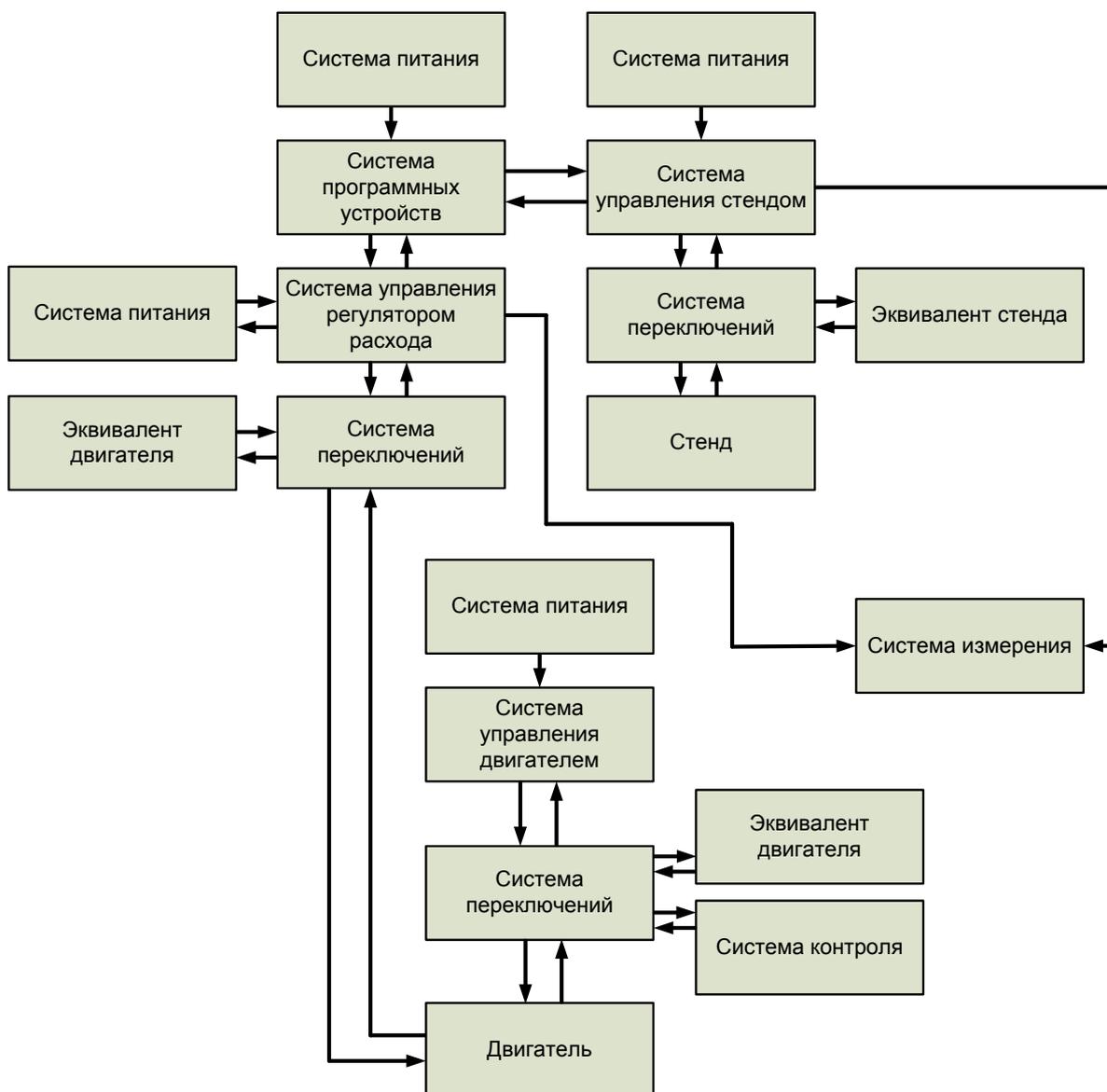


Рисунок 4. Функциональный состав системы управления.

Связь всех подсистем осуществляется через систему программных устройств, определяющую программу работы, реализующую сбор сигналов о готовности подсистем, выдачу команд, которые преобразуются в системе управления стендом, в системе управления регулятором расхода, в системе управления двигателем и через систему переключений передаются для исполнения на агрегаты стенда и двигателя. При необходимости система переключений коммутирует эти команды на эквиваленты стенда и двигателя. Сигналы обратных связей, которыми охвачена вся система управления, с датчиков через систему переключений коммутируются в системах управления стендом, двигателем и регулятором расхода, где корректируются командные сигналы подсистем. Все подсистемы выдают сигналы на запись в систему измерения, в задачу которой входит и контроль целостности электрических цепей двигателя. Всё необходимое питание в систему управления выдается с помощью комплекса взаимосвязанных блоков, образующих систему питания.

В разработанной ИИиУС **пульт управления** представляет собой персональную ЭВМ со специальным разработанным программным обеспечением, осуществляющим управление стендом, отображение результатов измерения с помощью специального модуля визуального контроля, вывод и хранение полученной информации с помощью разработанного модуля обработки информации.

Блок обработки информации позволяет создавать отчеты о результатах проведенных экспериментов в требуемом для экспериментатора виде.

Программное обеспечение ИИиУС

Функционально разработанное программное обеспечение системы испытания ЖРД МТ можно разделить на два уровня – верхний и нижний.

На *нижнем уровне* можно выделить две основные подсистемы:

- подсистема оперативной памяти и регистрации измерений, параметров, отсчетов и команд управления (именно эта подсистема ведет полный архив работы системы);
- подсистема решения задач коммуникационного обмена – эта подсистема непосредственно решает задачу связи верхнего уровня с нижним, в частности, передачу параметров и измерений, изменение значений параметров, запуск циклограмм.

В соответствии с функциональной схемой системы испытания ЖРД МТ программное обеспечение имеет два уровня [8]. На верхнем уровне использована операционная система WINDOWS с установленными SCADA-системой InTouch и разработанным программным обеспечением. На нижнем уровне функционирует операционная система OS-9, а разработанное программное обеспечение можно функционально разделить на шесть видов прикладных программ:

- «ПАРАМЕТРЫ»;
- «ЗАМЕРЫ»;
- «ДРАЙВЕРЫ»;
- «СЕРВЕРЫ И КЛИЕНТЫ»;
- «РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И ОТСЧЕТОВ»;
- «ЦИКЛОГРАММЫ».

Структурная схема этого программного обеспечения представлена на рис. 5.

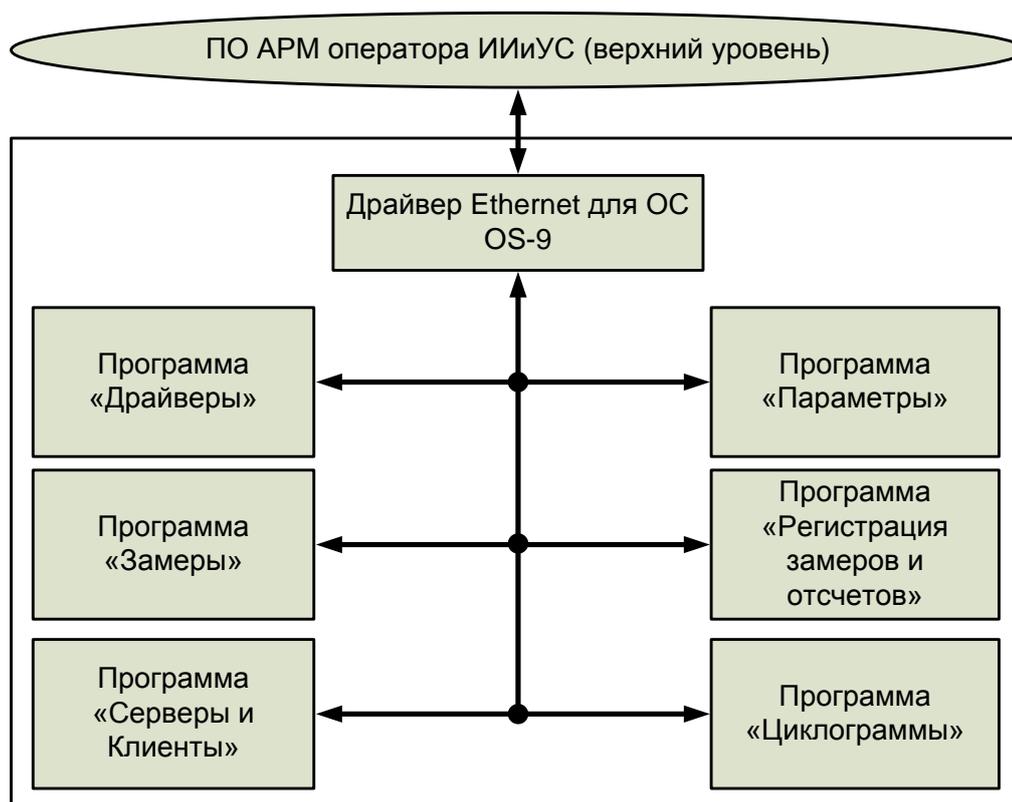


Рисунок 5. Структурная схема программного обеспечения.

Блок-схема алгоритма сбора и передачи измерительных данных, реализованного на нижнем уровне этой схемы, представлена на рис. 6.

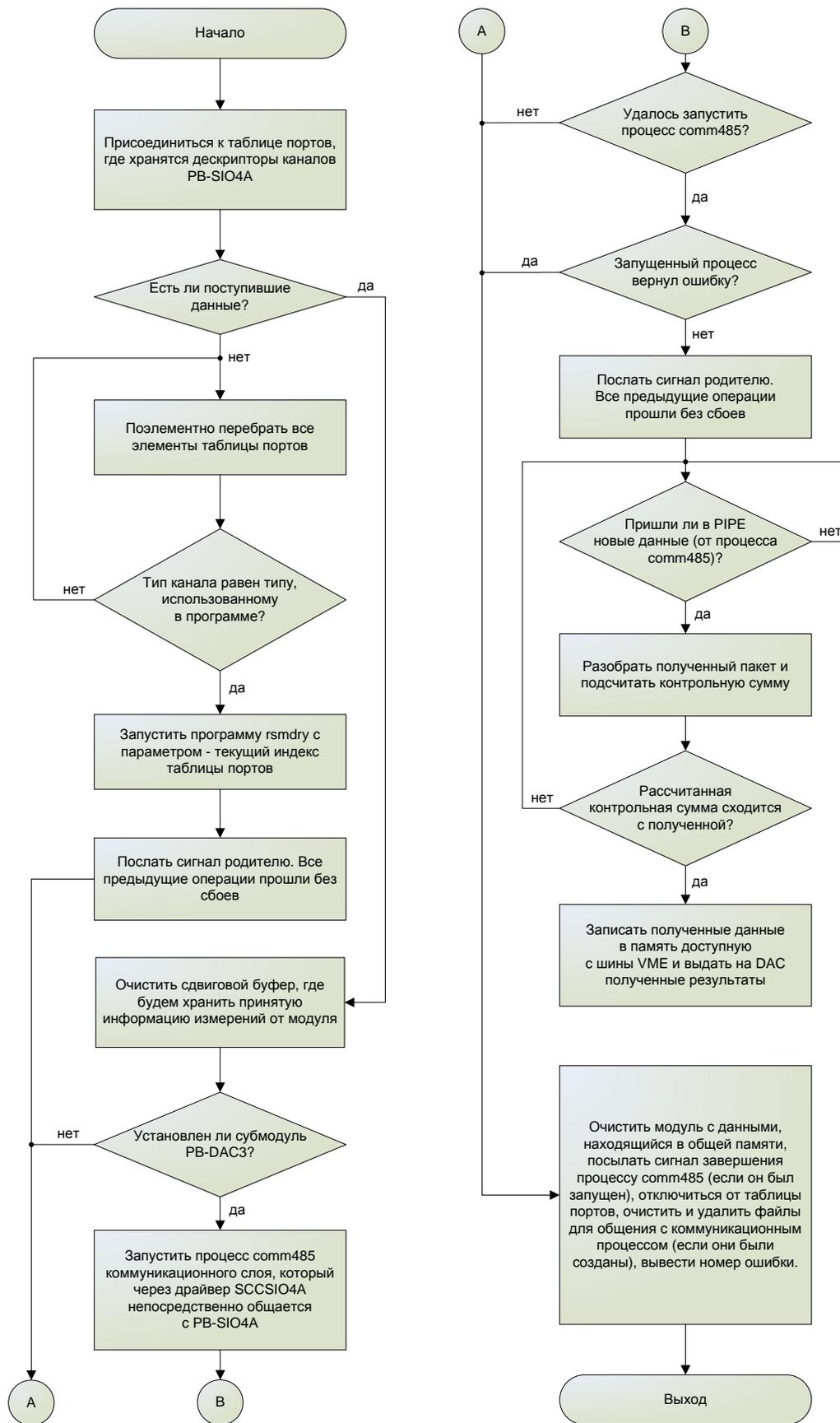


Рисунок 6. Блок схема алгоритма программного обеспечения сбора и передачи измерительных данных.

Разработанный алгоритм реализует сбор и передачу измерительных данных от модулей РВ-DAC через контроллер ИИиУС с последующей передачей в ПЭВМ оператора.

Программное обеспечение верхнего уровня представляет собой набор программ, обеспечивающих гибкую автоматизацию проведения экспериментов. Его структурная схема представлена на рис. 7.

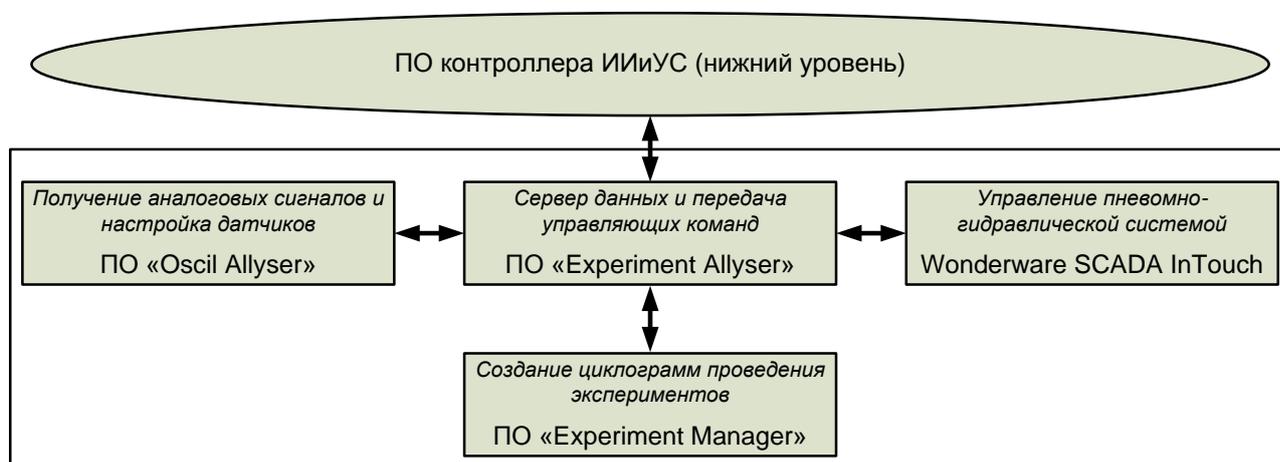


Рисунок 7. Структурная схема программного обеспечения верхнего уровня.

ПО «Experiment Allyser» отвечает за связь с контроллером ИИС, является общим сервером данных и осуществляет передачу управляющих сигналов с ПО в контроллер.

ПО «Oscil Allyser» используется для проверки преобразованных аналоговых сигналов и настройки датчиков.

ПО «Wonderware SCADA InTouch» осуществляет контроль и частичное управление испытаниями в удобном графическом интерфейсе.

ПО «Experiment Manager» служит для задания программы испытаний и циклограмм, и отвечает за общее проведение испытаний.

Управление стендом осуществляется в автоматическом режиме через SCADA-систему InTouch, позволяющую контролировать и управлять всеми объектами и системами, используя графические объекты, и включающую:

- отображение параметров для управления сигналами;
- отображение текущих и исторических трендов;
- отображение и регистрацию аварийных сигналов.

На рис. 8 в качестве примера приведена экранная форма SCADA-системы InTouch при исследовании схемы пневмо-гидравлической системы.

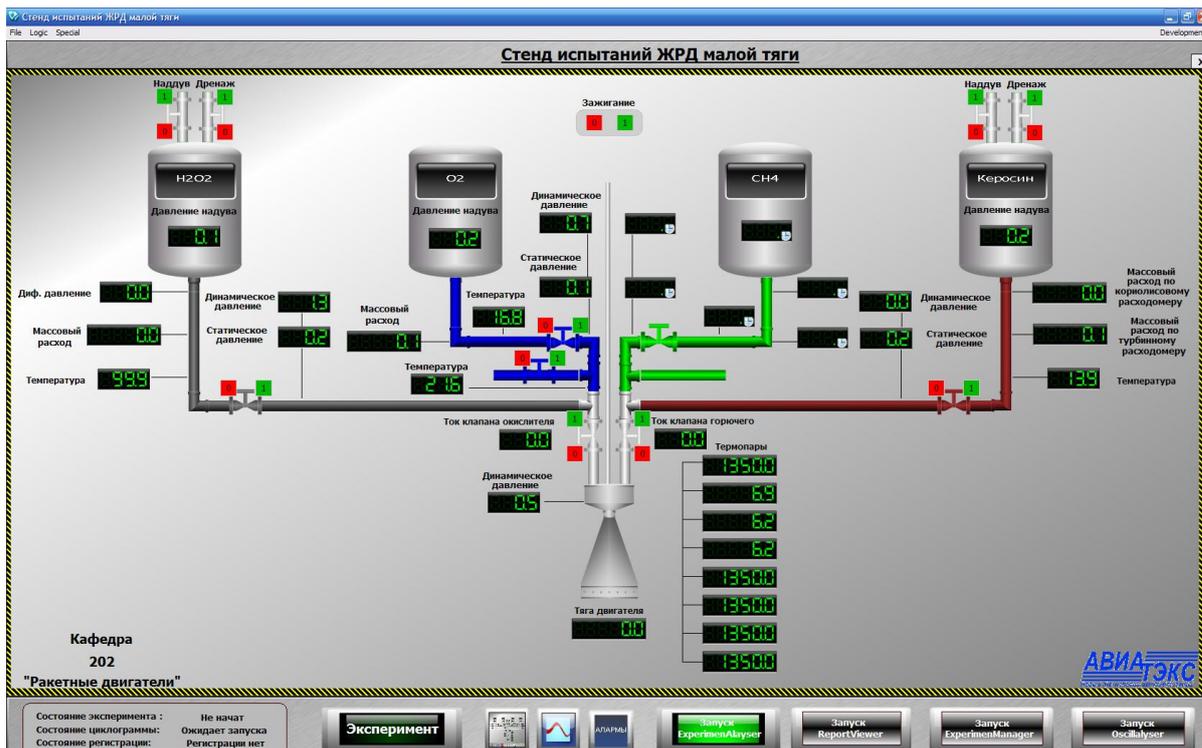


Рисунок 8. Схема пневмо-гидравлической системы.

Схема пневмо-гидравлической системы отображает следующие основные измерительные параметры:

- давление в баках компонентов;
- статическое и динамическое давление в магистрали;
- массовые расходы компонентов;
- температуры компонентов в магистрали;
- токи клапанов двигателя;
- тяга двигателя;
- температуры конструкции двигателя.

На рис. 9 представлена в качестве примера экранная форма, отражающая результаты испытаний.

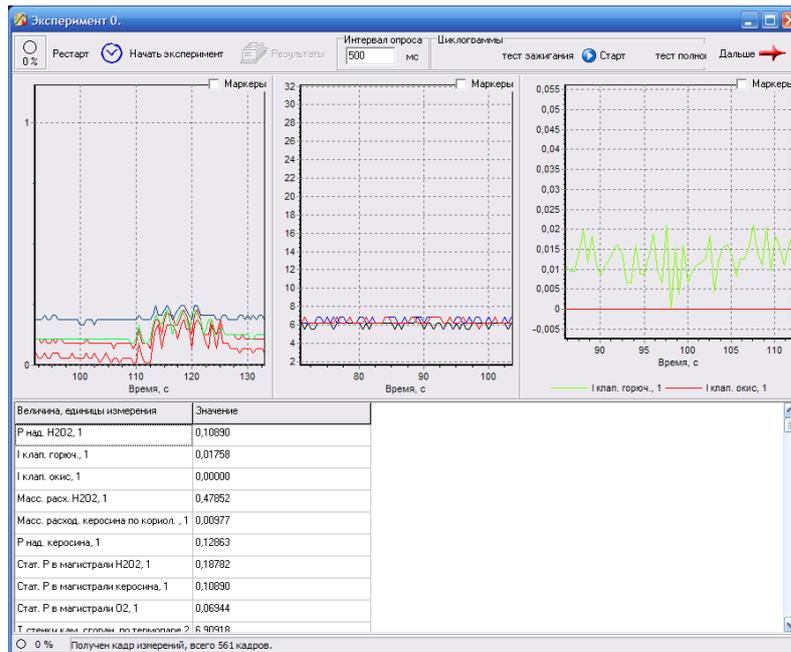


Рисунок 9. Экранные формы модуля испытаний.

Разработанное программное обеспечение позволяет осуществлять мониторинг основных измеряемых величин по времени как в ходе проведения эксперимента с заданным интервалом опроса, так и после него. По окончании испытаний формируется отчет в требуемой экспериментатором форме. Пример результатов измерения параметров опытного образца ЖРД МТ ДМТ-МАИ 200 представлен на рис. 10.

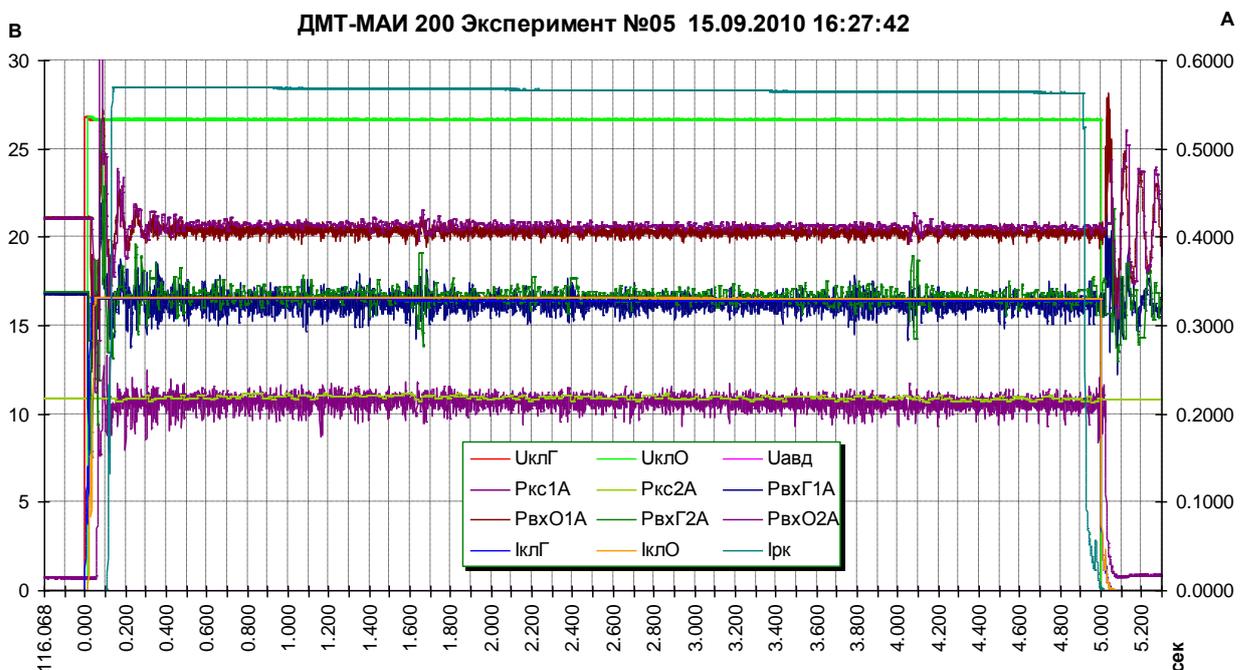


Рисунок 10. Пример результатов измерения параметров опытного образца ЖРД МТ ДМТ-МАИ 200.

Результаты эксперимента, представленные на рис. 10, отражают изменения основных технических параметров ДМТ-МАИ 200: токи и напряжения на клапанах подачи горючего и окислителя, давление в камере сгорания, а так же давления на входах клапанов подачи горючего и окислителя.

Заключение

Разработанная ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ позволяет производить автоматизированные испытания ракетных двигателей как в статическом, так и динамическом режимах при учёте трёх основных особенностей (кратковременность, повышенная опасность и высокая стоимость испытаний), обеспечивать измерения необходимых параметров работы стенда и объекта исследования с высокой точностью автоматизировать процесс испытаний, визуализировать и сохранять информацию о результатах испытаний в удобном для экспериментатора виде.

Результаты работы внедрены на стенде огневых испытаний ЖРД МТ в атмосферных условиях кафедры «Ракетные двигатели» Московского авиационного института.

В настоящее время с использованием полученных результатов на стенде проводятся работы по исследованию рабочих процессов в ЖРД МТ по контрактам с отечественными (ОАО «НПО Энергомаш») и зарубежными (ЧНУ – Южная Корея, ПАКУ – КНР) организациями.

Основными преимуществами разработанной системы являются:

- управление испытаниями как по заранее заданным алгоритмам, используя циклограммы, так и в ручном режиме по желанию оператора;
- автоматический сбор информации;
- измерение основных характеристик испытуемых устройств (напряжения, токи, давление, температуры клапанов подачи горючего и окислителя, камеры сгорания и т.д.);
- повышение точности измерений за счет использования современной элементной базы и разработанных алгоритмов измерения;
- возможность исследования характеристик любых одно- и двухкомпонентных ЖРД МТ без модификации системы;
- возможность гибкой модернизации программно-аппаратной части при необходимости изменения количества каналов измерения или управления.

Библиографический список

1. Испытание жидкостных ракетных двигателей / Под редакцией д-ра техн. наук проф. В.Я. Левина. – М.: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 1981.
2. Пухов В.А., Чучеров А.И. Стендовые огневые испытания ЖРД. – М.: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 1971.
3. Галлеев А.Г. Методы повышения безопасности испытаний ракетных двигателей, связанные с выбросами водорода // Альтернативная энергетика и экология. – №2. – 2005. – с. 9–14.
4. Galeev A.G. Research of Safe Starting of Hydrogen-Oxygen Engines and Power Units // 11th Int. Aerospace Congress, Moscow, IAG. 1997. – p. 300–303.
5. Бершадский В.А. Стратегия уменьшения опасности стендовых испытаний ракетных двигательных установок // Авиакосмическая техника и технология. – №2. – 2004. – с. 38–45.
6. Баланин Д.А., Кирпичёв К.Ю., Неретин Е.С. Разработка универсального микропроцессорного блока дискретного ввода-вывода для управления испытаниями электронных устройств // Проектно-конструкторские и производственные вопросы создания перспективной авиационной техники / Под ред. проф. Ю.Ю. Комарова. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009 – с. 163–168.
7. Воробьев А. Г., Боровик И. Н., Хохлов А. Н. и др. Модернизация испытательного огневого стенда для исследования рабочих процессов в жидкостных ракетных двигателях малых тяг на экологически чистых компонентах топлива. // Вестник МАИ, Т. 14, №1, 2010 г
8. Неретин Е.С., Кирпичёв К.Ю., Чубаров О.Ю. Система испытания приводов качания жидкостных ракетных двигателей РД–170, РД–171, РД–180, РД–191 // XXXV ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 8 томах. Москва, 7–10 апреля 2009 г. – М.: МАТИ, 2009. Т. 2. – с. 225–226.

Сведения об авторах

Неретин Евгений Сергеевич – аспирант Московского авиационного института (государственного технического университета), Evgeny.Neretin@gmail.com, (499) 158-41-69
Чубаров Олег Юрьевич – аспирант Московского авиационного института (государственного технического университета), Chubarovy@rambler.ru, (499) 158-41-69