Общие вопросы

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСОВ АППАРАТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИСПЫТАНИЯМИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

А.А. ЕГОРОВ (ООО "АВИАТЭКС")



В статье рассматриваются специфические вопросы проектирования сложных систем управления испытательными стендами. Анализируются специфические процессы проектирования интеллектуальных автоматизированных стендовых систем испытаний, на примере стендовых испытаний ракетных двигателей, в частности жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Система управления испытаниями ракетных двигателей представляется как комплекс систем, агрегатов, методов, алгоритмов и средств, которые обеспечивают управление режимами работы двигателя при огневых испытаниях в зависимости от заданных в программе испытаний значений тяги и соотношения расходов компонентов топлива на определенном временном участке. Подвергаются анализу особенности системного подхода при проектировании систем управления, сформулированы цели и задачи проектирования автоматизированных систем управления. Рассматриваются основные требования к технологии измерений и управления в измерительно-управляющих комплексах. На основе практического опыта создания измерительно-управляющих систем испытательных комплексов отмечены причины возможных неудач при их разработке.

Ключевые слова: стендовые системы испытательных систем; ракетные двигатели; системный анализ; жизненный цикл систем; проектирование систем; погрешности измерений; задачи управления; технологии измерений; многокритериальность; эксплуатация систем; модельно-ориентированное проектирование; экспериментальная отработка; системы функциональной диагностики; системы аварийной защиты; SCADE.

В самом общем виде процессы проектирования связаны с инженерной деятельностью человека, направленной на создание новых технических объектов, методов и теорий, которые совершенствуют среду его обитания. Проектировать – это значит творить, создавать что-то новое. Проектирование - это не только создание идеи построения объекта, но и обоснование способа его реализации, по существу, разработка модели объекта с учетом "жизненного цикла", т.е. последствий, к которым приведет создание объекта, его использование, эксплуатация и снятие с производства.

Процесс проектирования представляет собой процесс составления описания, необходимого для создания еще не существующего объекта (алгоритма его функционирования или алгоритма процесса) путем преобразования первичного описания, оптимизации заданных характеристик объекта или алгоритма его функционирования, устранения некорректности первичного описания и последовательного представления (при необходимости) описаний на различных языках.

Работа в области техники всегда связана с созданием новых или усовершенствованием имеющихся технических объектов, которые необходимы человеку. Творчество в этом направлении можно рассматривать как процесс переработки информации. Имеются информационные входы и информационные выходы, а также аппарат переработки информации, т.е. аппарат творческого процесса и принятия решений. Таким образом, проектирование можно рассматривать как целенаправленную последовательность действий принятия проектных решений, приводящую к построению описания проектируемого объекта с заданной степенью детализации.

Проектирование как разновидность инженерной деятельности обладает рядом специфических особенностей [1]:

- 1. Продуктом проектирования является упорядоченная совокупность сведений, служащих знаковой моделью объекта, реально еще не существующего во внешнем мире в момент проектирования.
- 2. Процедуры проектирования реального объекта представляются как процедуры





Тяга: на Земле/в пустоте (тс)	740/806,4
Удельный импульс: на Земле/в пустоте (с)	309,5/337,2
Давление в камерах сгораний (кгс/см²)	250
Номинальное соотношение компонентов	2,63
Диапазон регулирования, %:	50100 ±7
Угол поворота камер	±7°
Macca «сухого» двигателя, кг	9300

Рис. 1. Двигатель РД-171 и PH "Зенит-3SL" в программе морской старт

преобразования его исходного описания в некотором конечном пространстве.

- 3. Вследствие сложности проектируемых объектов на каждом этапе их создания вовлекаются различные специалисты, что придает проектированию характер коллективной деятельности. Как правило, привлекаются специалисты в области системного анализа, разработчики аппаратных и программных средств, математики и т.п.
- 4. Нестабильность и неопределенность постановки задачи управления конкретным объектом, ее изменчивость до завершения процесса проектирования определяют трудности создания технических объектов, но вместе с тем и создают предпосылки для широкого поля творческой деятельности инженеров. Неопределенность может относиться как к информационному входу и выходу, так и к самому аппарату проектирования.
- 5. Проектируемый объект входит в упорядоченную иерархию объектов и выступает как часть системы более высокого уровня и как система для объектов более низкого уровня. В связи с этим процесс проектирования

- состоит из двух этапов: внешнего проектирования (объект – часть системы более высокого ранга) и внутреннего проектирования (объект – совокупность компонентов).
- 6. Проектирование, как правило, носит итерационный многовариантный характер, в ходе которого для принятия проектных решений используются различные научно-технические знания в области теории систем управления, метрологии, вычислительной техники и т.п.

В статье рассматриваются процессы проектирования интеллектуальных автоматизированных стендовых систем испытаний, на примере стендовых испытаний ракетных двигателей, в частности жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Эти объекты являются сложнейшими техническими устройствами, объединяющими в себе множество пневмогидравлических систем, турбонасосных агрегатов, систем управления и т.д.

Проведем системный анализ ЖРД как объектов управления при натурных испытаниях.

На рис. 1 представлены технические характеристики ЖРД РД-171, разработанного и производимого НПО ЭНЕРГОМАШ [1].





Тяга: на Земле/в пустоте (тс)	390,2/423,4
Удельный импульс: на Земле/в пустоте (с)	311,9/338,4
Давление в камерах сгораний (кгс/см²)	261,7
Номинальное соотношение компонентов	2,72
Диапазон регулирования, %:	47100 ±7
Угол поворота камер	±8°
Масса «сухого» двигателя, кг	5480

Рис. 2. Двигатель РД-180 (РФ) и РН "Атлас V" (США)

Опытно-конструкторские работы по двигателю РД-171МВ выполняются с 2017 г. Разработчиком проекта является НПО "Энергомаш". За основу для нового изделия взяли существующую двигательную установку РД-171М вариант развития более старого двигателя РД-170. За счет использования отработанных решений и новых компонентов планировалось получить очередной рекордный прирост характеристик. Высокие заявленные характеристики уже привели к появлению прозвища "Царь-двигатель" [2].

Двигатель РД-171МВ разработан на основе существующих двигателей и отличается от них рядом комплектующих и примененных технологий, что обеспечивает улучшенные характеристики. Также новый проект интересен методами разработки. Это первый двигатель НПО "Энергомаш", изначально создававшийся в электронном виде и без применения бумажной документации.

РД-171МВ представляет собой четырехкамерный ЖРД, использующий топливную пару керосин-кислород. При собственной мас-

се 10.3 т изделие способно развивать в пустоте тягу 806 тс. Тепловая мощность — 27 тыс. МВт. Использован улучшенный турбонасосный агрегат мощностью 180 тыс. кВт. Таким образом, как указывают разработчики, по отдельным характеристикам новый ракетный двигатель похож на достаточно крупную электростанцию. Кроме того, на данный момент он является самым мощным ЖРД в мире.

От предыдущих изделий своего семейства новый двигатель отличается не только характеристиками, но и особенностями конструкции. В нем используются современные материалы и технологии. Кроме того, внедрены полностью новые элементы, такие как система регулирования, заимствованная у двигателя РД-191.

На рис. 2 представлены технические характеристики ЖРД РД-180, разработанного и производимого также в НПО ЭНЕРГОМАШ [3].

В конкурсе кроме проекта РД180 участвовал модернизированный двигатель МА5А фирмы Rocketdyne и российский двигатель НК33 производства ОКБ "Кузнецова". Как

Таблица 1. Характеристики двигателей МА-5А, НК-33 и РД180

Двигатель	MA-5A	HK-33	РД180
PH	Atlas II	H1	Atlas III, V
Разработчик	Rocketdyne	"Кузнецов"	НПО "Энергомаш"
Тяга земная, тс	185,4	154,6	390
Тяга пустотная, тс	206,5	172,1	423
Уд. импульс земной, с	262,1	297,5	311,9
Уд. импульс в пустоте, с	293,4	331,2	338,4
Давление в КС, кгс/см ²	44,1	148,3	262
Диапазон изменения тяги, %	100	10055	10047

следует из таблицы 1, двигатель РД180 по своим характеристикам занимает лидирующее положение.

Преимущества двигателя РД180 в конкурентной борьбе в значительной мере определились благодаря следующим основным характеристикам:

- 1. Удельный импульс. Достижение высокого импульса было обеспечено за счет высокого уровня давления в камере сгорания, а также за счет совершенства системы смесеобразования топлива в смесительной головке камеры.
- 2. Широкий диапазон изменения тяги от 100 до 47 %.

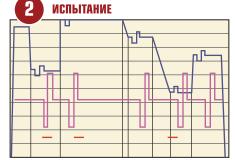
Это обеспечило возможность использования двигателя РД180 для всего семейства PH "Atlas". В процессе отработки двигателя РД180 продемонстрирована возможность длительной, более 300 сек, устойчивой работы на режиме 40% тяги. Планировалось, что такая возможность будет востребована на модификации РН тяжелого класса.

На рис. 3 представлена методика сдачи двигателей заказчику.

Одним из важнейших этапов создания ЖРД являются стендовые испытания.

Важным показателем, характеризующим эффективность процесса отработки, является количество затраченной материальной части









- Визуальный и инструментальный
- Пневмо- и электроиспытания
- Параметрическая диагностика

Методика сдачи двигателей заказчику

ОБРАБОТКА без разборки



- Замена одноразовых элементов
- Пневмо-, электроиспытания
- 3. Оформление формуляра и сопроводительной документации
- Упаковка в контейнер
- Отправка потребителю

ОТПРАВКА потребителю



- Слив компонентов топлива
- Сушка внутренних полостей
- Контроль качества обработки

Таблица 2

Назначение огневых испытаний	Количество испытанных двигателей
Испытание прототипа	2
Доводочные испытания	8
Испытание двигателя в составе ступени РН	1
Сертификационные испытания	4

(двигателей) при проведении всех видов огневых испытаний (таблица 2).

К первому сентября 2019 г. в АО "НПО Энергомаш" изготовлено больше 130 двигателей РД180, проведено более 260 огневых испытаний. Общая наработка при стендовых испытаниях составила более 50000 с. Проведено 86 летных испытаний различных версий РН "Atlas" с абсолютным успехом без замечаний к двигателю. Наработка при летных испытаниях составила более 21000 с [2].

При создании ракетных двигателей в настоящее время математическое моделирование сопровождает весь цикл их создания и, в частности, соответствующих систем управления. Применение модельно-ориентированного проектирования позволяет существенно сократить сроки и стоимость разработки систем управления за счет рационального сочетания экспериментальных и расчетных методов.

Система управления испытаниями ЖРД представляет собой комплекс систем, агрегатов, методов, алгоритмов и средств, которые обеспечивают управление режимами работы двигателя при огневых испытаниях в зависимости от заданных в программе испытаний значений тяги и соотношения расходов компонентов топлива на определенном временном участке.

Управление режимами работы двигателя чаще всего связано с измерением расхода окислителя и горючего, их температур и давлений, поступающих в агрегаты двигателя.

Система управления испытаниями предназначена для поддержания определенных характеристик ЖРД и в первую очередь тяги и соотношения компонентов горючего и окислителя. Система управления и регулирования

Таблица 3

Режим по тяге (R)	Режим 65%-100%	Менее 65%
Точность поддержания тяги (R)	±2,5%	±3,5%
Точность поддержания соотношения компонентов (Км)	±3,5%	±4,5%

двигателем обеспечивает: запуск двигателя; выход на основной режим работы; работу двигателя на режиме при изменяющихся внешних условиях; управление и регулирование двигателем по командам системы управления (СУ) и останов двигателя.

Погрешность обеспечения режимов по тяге и соотношению расходов компонентов, как правило, не должна превышать по техническому заданию (Т3) ± 2 -3 %.

Система управления и регулирования двигателем при его штатном использовании в полете должна выдавать команды на агрегаты управления и регулирования двигателем (в данном случае на приводы регулятора расхода (тяги) и дросселя горючего), обеспечивающие задаваемый системой управления уровень режима по тяге и соотношению расходов компонентов топлива с точностью, не меньше допустимой по ТЗ при реальных изменяющихся значениях внешних факторов (температуры, давления, плотности компонентов топлива и т.д.).

Для этого в исходные данные для управления и регулирования конкретным двигателем вводятся зависимости положений приводов регулятора расхода и дросселя горючего от уровня режима, учитывающие влияние внутренних и внешних факторов, в соответствии с которыми СУ выдает команды на изменение величин тяги (R) и соотношение компонентов (Кт).

Задача усложняется тем, что на эти зависимости влияют особенности изготовления деталей, узлов и агрегатов двигателя. В этой связи для каждого экземпляра двигателя в данных зависимостях определяются индивидуальные коэффициенты полиномов по результатам испытаний.

Точная настройка на каждом из режимов работы двигателя проводится по результатам измерения тяги и соотношения расходов компонентов топлива при последовательных изменениях положений приводов регулятора и дросселя.

Система управления стенда непрерывно получает измерительные данные от стендовых турбинных расходомеров, установленных в подводящих компоненты топлива магистралях стенда (обратная внешняя связь), о значениях расхода окислителя и расхода горючего.

Например, в соответствии с техническим заданием, двигатель РД191 должен обеспечивать точность поддержания тяги и соотношения расходов (таблица 3).

При проектировании стендовых систем управления широко используется системный подход к анализу и разработке этих систем. Он находит применение в системном анализе проектируемой системы и системотехнике. Системотехника представляет собой науку, изучающую вопросы планирования, проектирования и поведения сложных информационноизмерительных и управляющих систем.

Эти системы, обладают следующими признаками.

Во-первых, системы управления обладают целостностью (цельностью), т.е. все ее компоненты (аппаратные, программные, методические, метрологические и т.п.) служат достижению единой цели эффективного проведения испытаний двигателей (точность, надежность, временные затраты, безопасность и т.п.).

Во-вторых, система управления является большой как с точки зрения составляющих ее элементов, так и с точки зрения числа одинаковых частей, а также числа выполняемых функций [4].

Большая система - это управляемая система, рассматриваемая как совокупность взаимосвязанных управляемых подсистем, объединённых общей целью функционирования. Особенность больших систем состоит не только в очень большом числе элементов (компонентов), но и во множестве разнообразных связей между ними, образующих иерархию подсистем. Структура этих подсистем может изменяться в зависимости от многих условий как внутренних, так и внешних. Поэтому управление такими системами на основе строгого математического описания практически невозможно, так как все эти условия нельзя предусмотреть, а если даже удалось бы их принять учитывать, то объем необходимых вычислений оказался бы чрезвычайно большим и нельзя было бы обеспечить режим реального времени для своевременной выдачи управляющих сигналов. Поэтому управление большими системами в отличие от управления обычными, допускающими поэлементное математическое описание строится на основе специальных методов теории операций и сетевого моделирования, теории массового обслуживания и статистического моделирования.

В-третьих, управляющая система является сложной как по структуре, так и по математическим моделям как объекта управления, так и самой системы управления.

Характер функционирования сложных систем связывается с целями и критериями задачи управления. В теории сложных систем возможно использование нескольких видов таких связей. В статье исследовано непосредственное отражение критерия в характер функционирования [5]. Оно привело к выделению следующих классов. Системы автоматического регулирования, в которых формируются воздействия для поддержания определенных уровней некоторых целевых параметров. Оптимальные и экстремальные системы, предназначенные для поиска и поддержания оптимального управляющего воздействия, гарантирующего функционирование объекта управления при экстремальном значении выбранного критерия. И, наконец, адаптивные системы, которые осуществляют управление при недостаточно точном описании объекта управления, не формализованном критерии или критерии, имеющем вид функциональной зависимости (в том числе многокритериальные задачи).

В-четвертых, входные воздействия на управляемую систему в виде стендового оборудования и самого двигателя и систему управления испытаниями имеют стохастическую природу. Это, как правило, приводит к ситуации, когда практически невозможно предсказать поведение системы для любого момента времени.

ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Системный подход (анализ) является общей методической базой при проектировании сложных систем управления. Он позволяет решать сложные проблемы и задачи создания разработки систем управления и ее элементов на современной научно-технической основе. Отметим две характерные особенности системного анализа при проектировании систем **управления**.

Системный анализ предусматривает рассмотрение всех элементов и составляющих процесса проектирования систем управления в их взаимной связи, взаимообусловленности, взаимозависимости и взаимном влиянии для наиболее оптимального достижения как частных, так и общих целей создания систем управления.

Системный анализ исходит из обязательной предпосылки о необходимости анализа процессов проектирования (и их результатов) в их взаимной связи на основе широкого применения современных количественных методов исследования (аналитических методов математического, физического или натурного моделирования, методов исследования операций, экспертных оценок). Причем следует максимально использовать модельноориентированный подход к проектированию систем управления испытательными стендами нового поколения [6, 7].

Можно предложить следующий подход к проектированию систем управления.

На первом этапе проводится оценка целесообразности разработки и предварительный выбор структуры системы управления испытательным стендом на основе результатов системного анализа объекта управления. Этот анализ включает оценку технического и экономического эффектов от внедрения системы управления, формирует основные требования к методическому обеспечению, к программно-техническому комплексу системы управления и т.п.

На втором этапе проводится разработка и согласование с Заказчиком подробного технического задания на систему управления, включая состав и структуру СУ, требования к измерительной системе и системе управления, системе регулирования и контроля за работой двигателя, требования к системе хранения данных, требования к системе видеонаблюдения, математическому обеспечению, информационному, лингвистическому, программному, техническому, метрологическому и организационному обеспечениям, требования по безопасности, надежности, эргономике и технической эстетике и т.п. В ТЗ входит состав и содержание работ по созданию (развитию) системы управления. Как правило, объем технического задания состоит от 50 до 100 страниц.

На третьем этапе проводится предварительный выбор методических и технических решений при проектировании системы управления на основе результатов модельноориентированного проектирования, использующего математические модели компонентов двигателя, алгоритмы измерения, сбора и обработки результатов измерений, модели измерительно-управляющих компонентов системы управления и т.п.

Четвертый этап связан с окончательным выбором структуры и технических средств системы управления на основе комплексного использования результатов модельноориентированного проектирования и полу-

натурных испытаний компонентов системы управления, включая натурные компоненты аппаратного и программного обеспечения.

Пятый этап посвящен разработке специализированных аппаратно-программных технических решений и средств построения подсистем и системы управления в целом.

Содержанием шестого этапа является организация функций систем управления на базе выбранных методических (например, ПИДрегуляторы и т.п.) и технических средств автоматизании.

На седьмом этапе осуществляется изготовление, монтаж и автономная отладка элементов системы управления.

И, наконец, на восьмом этапе реализуется комплексная отладка, испытания и внедрение систем управления в опытную и затем в промышленную эксплуатацию.

Современный уровень развития методических средств (например, теория нечеткого управления, искусственные нейронные сети и т.п.), измерительной и вычислительной техники (микропроцессорная техника, ПЛИС, ЦОС и т.п.) поставили задачу разработки общих принципов проектирования систем управления. Цель – обеспечить создание высокоэффективных систем управления и повысить эффективность самого процесса проектирования этих систем. Основные причины чрезвычайной актуальности этой задачи заключаются в следующем. Технологические объекты управления, а к ним относятся, безусловно, системы автоматизации испытаний двигателей, становятся все более крупномасштабными и дорогостоящими, что приводит к удорожанию и к увеличению сроков проектирования систем управления. Любые ошибки, допущенные в процессе проектирования систем управления, особенно на начальных этапах разработки, приводят к значительным затратам материальных и трудовых ресурсов впоследствии. Увеличивается сложность самих систем управления. Это выражается в том, что возрастает число задач, решаемых в процессе управления испытаниями. Простейшие задачи стабилизации управляемых параметров уступают место более сложным задачам самонастройки системы на оптимум нескольких критериев (показателей). Одновременно с ростом числа параллельно решаемых задач управления сокращается допустимое время принятия решений по управлению и повышаются требования к надежности проектируемых систем. Растет число параллельно обрабатываемых

Multidisciplinary Teamwork Projects

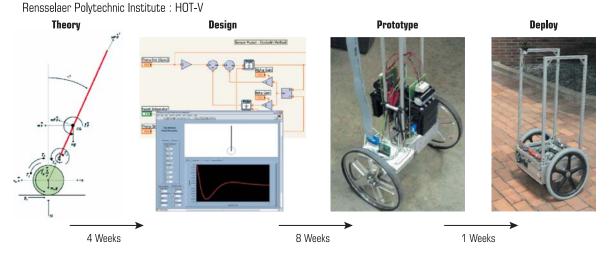


Рис. 4. Процесс модельно-ориентированного проектирования макета гироскутера

потоков информации и скорости их поступления. Проектирование систем управления, как правило, начинается и достаточно долго проводится в условиях существенной неопределенности, т.е. при отсутствии в полном объеме информации, необходимой для правильного выбора методических и технических решений по построению систем управления.

Сформулируем основные требования к технологии измерений и управления в измерительно-управляющих комплексах.

Во-первых, необходимость реализации жесткого реального времени (интервал времени от начала измерения до выдачи управляющих воздействий составляет десятки мс, а иногда и мкс!).

Во-вторых, необходимо реализовать требования высокой надежности аппаратных средств измерений и обработки измерительной информации (троирование датчиков, резервирование контроллеров обработки измерительных данных и т.п.). При этом недопустима потеря измерительных данных, участвующих в процессе управления стендом и объектом испытания.

В-третьих, необходима высокая надежность программных средств измерений и управления (например, отлажена исполнительная система на контроллерах, причем изменение алгоритма измерений и управляющей циклограммы испытаний проводится только путем конфигурирования их с использованием базы данных и т.п.).

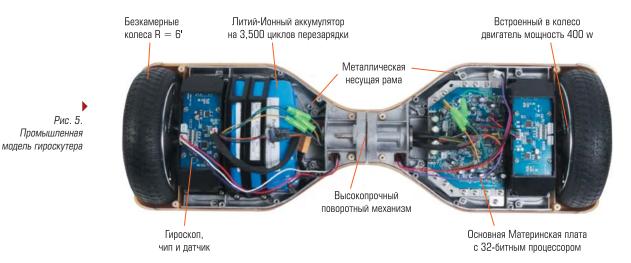
Для полноценного удовлетворения этих требований необходимо использовать технологии модельно-ориентированного проектирования.

Приведем удачный пример использования модельно-ориентированного проектирования для создания гироскутера, разработанного специалистами Политехнического института Ренсселера (США). На улицах больших городов все чаще можно увидеть самокат без руля, который бесшумно и плавно перемещает стоящего на нем человека. Называют эту технику гироскутером, а его главная функциональная характеристика - быстрое и легкое маневрирование. История создания гироскутера, как называется двухколесный скутер, началась еще в 1990-х гг., когда появились первые машины с самостоятельным балансированием. Прародителем этого транспорта стал сигвей, появившийся на свет в 2001 г. благодаря трудам Дина Кеймена. Отличительной особенностью устройства стало то, что наезднику не нужно было удерживать равновесие, чтобы не упасть. Транспортное средство само отлично справлялось с этой задачей благодаря системе управления с встроенным гироскопом.

На рис. 4 отражен процесс проектирования макета гироскутера.

Весь процесс проектирования макета складывается из четырех стадий. На первой стадии разрабатывается математическая модель гироскутера с использованием графического языка программирования в среде модельно-ориентированного проектирования (например, MATLAB, SimInTech, SCADE и др.). В этой среде модель отлаживается и настраивается. По оценкам специалистов на эту стадию затрачивается около 4-х недель. На следующей, второй, стадии разрабатывается макет гироскутера, изготавливаются меха-

Рис. 5.



нические детали, макет комплектуется электрическими двигателями, блоком управления с гироскопами и т.п. С использованием автоматической кодогенерации программируется контроллер блока управления. Проводятся автономные испытания макета гироскутера. На эту стадию специалисты затратили около 8-ми недель. На третью стадию была затрачена 1 неделя. Эта стадия связана со сборкой и комплексной отладкой экспериментального образца гироскутера.

На рис. 5 представлена промышленная модель гироскутера. В этой модели используются бескамерные колеса. В качестве источника энергии используется литий-Ионный аккумулятор на 3500 циклов перезарядки. В состав системы управления входят гироскоп, чип, датчики, связанные с основной микропроцессорной материнской платой с 32-битным процессором. Движение обеспечивает встроенный в колесо электродвигатель мощностью 400 Вт.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВА-НИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

К основным задачам, решаемым в процессе проектирования автоматизированных систем управления, относятся следующие:

- Анализ объекта автоматизации (объекта управления) и формулирование технических требований к системе.
- Определение рационального уровня автоматизации, определение структуры системы контроля и управления автоматизируемого процесса.
- Выбор и обоснование методов контроля, регулирования и управления технологиче-

- скими процессами, прогнозирования и диагностирования.
- Выбор комплекса технических средств автоматизации.
- Оптимальное размещение средств автоматизации на технологическом оборудовании, по месту, на щитах и пультах в постах управления.
- Обеспечение эффективности методов и способов монтажа технических средств автоматизированных систем управления и линий связи.
- Подготовка технологической и эксплуатационной документации.
- Обеспечение открытости автоматизированной системы управления.

На требования к процессу проектирования и внедрения в производство АСУ объектов авиационно-космической отрасли, как специфического класса технических систем, влияют следующие особенности этих систем.

Физическая разнородность как объектов управления (пневмо-гидро агрегаты, электрические машины, шаговые двигатели и т.п.), так и устройств и элементов, входящих в автоматизированные системы управления (микроконтроллеры, ПЛИС цифровые процессоры обработки сигналов и т.п.).

Непрерывный динамический процесс функционирования как объектов управления, так и автоматизированных систем управления (ресурсные испытания и т.п.).

Многокритериальность условий функционирования и работоспособности, при этом многие критерии противоречивы, например, устойчивость, точность и стоимость, надежность и массогабаритные характеристики и др.

Неопределенность задаваемых физических параметров и возмущающих воздействий, определяемая наличием не только внешних, но и внутренних воздействий, нестационарность во времени параметров устройств и элементов систем управления.

Наличие, как правило, нескольких контуров управления (например, контуры управления подачей топлива и окислителя при испытаниях ЖРД, управления несколькими силовозбудителями в методе электромеханического моделирования флаттера самолетов и т.п.), многомерность систем управления, необходимость фильтрации сигналов с датчиков в условиях индустриальных помех [8].

Широкое использование в структурах систем управления микропроцессорной техники, программируемых логических интегральных схем, процессоров цифровой обработки сигналов и т.п.

Высокая стоимость, длительность и трудоемкость процессов проектирования и внедрения в промышленную эксплуатацию систем управления.

ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬ-НЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ (ИИУС)

В жизненном цикле современных информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) можно выделить два этапа.

На этапе создания систем осуществляется постановка задачи, проектирование системы и ее реализация. Иначе говоря, происходит декомпозиция задачи, т.е. переход от ее постановки к реализации отдельных функций, а затем объединение отдельных функций в приложения для конечных пользователей.

На этапе эксплуатации систем появляется потребность в развитии ее функциональных возможностей (функционала). Существование созданной системы говорит о том, что знания о предметной области уже систематизированы. На основе этих знаний и опыта эксплуатации возникают новые задачи, приводящие к выявлению новых прикладных задач и, как следствие, к формулированию новых требований к измерительноуправляющей системе. Эти требования зарождаются на рабочих местах в процессе эксплуатации системы. Их накопление обычно ведет к созданию ее следующей версии ИИУС.

Сложность современных ИИУС для испытаний ракетных двигателей постоянно возрастает. Это объясняется многими причинами:

- увеличением сложности объекта испытания (ДУ, КА), что приводит к необходимости контроля все большего числа различных физических параметров;
- увеличением уровня, длительности приложения и усложнением спектра нагрузок, действующих на объект испытания в полете, которые необходимо имитировать в процессе наземных испытаний с целью приближения условий наземных испытаний к полетным;
- ужесточением экологических требований к испытательным стендам, исключающих техногенное воздействие на окружающую среду и обеспечивающих безопасность испытаний.

Задачи разработки технологии создания ИИУС для стендовых испытаний ЖРД:

- Выявление типовых функционально законченных задач измерений, контроля и управления и их элементов на основе анализа технологических процессов испытаний ЖРД.
- Разработка типовых программно-аппаратных модулей, решающих функционально законченные задачи измерений, контроля и управления, а также методов интегрирования модулей в единую многоуровневую систему.
- Разработка аналитических, имитационных и полунатурных моделей технологических процессов испытаний и экспериментальной отработки ЖРД.
- Разработка и создание моделирующего программно-аппаратного комплекса для объективной оценки функционирования модулей системы.
- Разработка и экспериментальные исследования интеллектуальных ИИУС испытательных комплексов.

С целью минимизации материальных затрат, идущих на отработку и эксплуатацию ЖРД, повышения надежности испытаний в испытательные стенды вводятся специальные автоматизированные ИИУС в период огневых испытаний:

1. Системы управления и регулирования ЖРД (СУР ЖРД). Системы обеспечивают реализацию циклограмм управления исполнительными органами стенда и ЖРД по заданной программе.

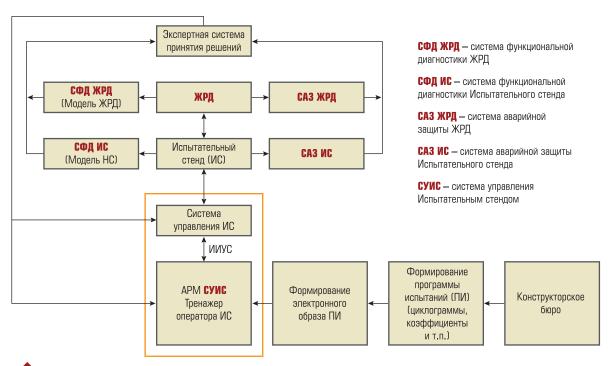


Рис. 6. Интеллектуальная измерительно-управляющая система реального времени для огневых испытаний ЖРД (ИИУС)

- 2. Системы защиты в случае возникновения аварийных ситуаций (САЗ). Системы обеспечивают выключение ЖРД или перевод его на щадящий режим работы в случае возникновения аварийной или нештатной ситуации.
- 3. Системы функциональной диагностики (СФД). Системы обеспечивают контроль состояния стенда и ЖРД в период огневых испытаний.

В качестве примера практической реализации рассмотрим интеллектуальную измерительно-управляющую систему реального времени для огневых испытаний ЖРД (ИИУС). Структурная схема этой системы представлена на рис. 6. Основные отличительные особенности этой системы - надежность проведения испытаний, безопасность и простота эксплуатации.

Это достигается, во-первых, применением модельно-ориентированного проектирования систем (использование SCADE, Matlab, LabView и др.). Во-вторых, за счет эффективности реализации режимов реального времени (применение операционных систем реального времени, использование программируемых логических интегральных схем, обеспечивающих физическое распараллеливание логических и вычислительных процессов). В-третьих, широкое использование принципов программируемости и конфигурирования структуры ИИУС (настраиваемость системы на структуру решаемой задачи на основе базы данных и т.п.). В-четвертых, за счет распределенности "интеллекта" (децентрализация средств измерения, управления, обработки данных и принятия решений). И, наконец, в-пятых, путем максимальной унификации, типизации и стандартизации всех функциональных подсистем, их модулей и процессов.

Практический опыт создания ИИУС испытательных комплексов позволяет выявить причины возможных неудач при их разработке:

- нечеткая и неполная формулировка требований к методическим, аппаратным и программным средствам;
- недостаточное вовлечение пользователей в работу над проектом;
- отсутствие необходимых ресурсов (людских, материальных и временных);
- неудовлетворительное планирование и отсутствие грамотного управления проектом;
- частое изменение требований и спецификаций в процессе работы над проектом;
- новизна и несовершенство используемых информационных технологий;
- недостаточная поддержка со стороны высшего руководства;
- недостаточно высокая квалификация разработчиков, отсутствие необходимого опыта создания ИИУС испытательных комплексов.

Список литературы

- 1. http://fdp.nntu.ru/books/
- 2. https://topwar.ru/162029-car-dvigatel-rd-171mv-i-perspektivy-kosmonavtiki.html
- 3. Чванов В.К., Пушкарев Д.С., Рахманин В.Х. АО "НПО Энергомаш": Двигатель РД180 научно-техническое достояние страны должен быть использован в новейших разработках космических ракет. // Журнал "Двигатель". 2019 г., № 4(124), стр. 4-12.
- 4. https://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/70317/%D 0%91%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%88% D0%B0%D1%8F
- 5. https://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/70317/%D 0%91%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%88% D0%B0%D1%8F

Продолжение в следующем номере журнала.

- Егоров А.А. Исследование и разработка измерительно-информационного и управляющего комплекса для полунатурного моделирования полета летательного аппарата// Прикладная физика и математика. 2018 г., № 10.
- Егоров А.А. Разработка нового поколения интеллектуальных автоматизированных систем контроля и управления испытательными стендами для наземной отработки перспективной авиационной и ракетно-космической техники // Справочник инженера. 2014 г., № 10.
- 8. *Егоров А.А., Крапивин С.В.* Линейное оценивание стационарных процессов с дискретным временем в задачах фильтрации сигналов с датчиков. //Инженерная физика. 2016 г., № 5.