

Модернизация измерительно-вычислительного комплекса для отработки твердотопливных ракетных двигателей

Д.В. Богданов, В.С. Куренков, П.К. Соломатин, А.В. Чушкин (ФГУП «ФЦДТ «Союз»)

Рассматривается проект модернизации измерительно-вычислительного комплекса ФГУП «ФЦДТ «Союз» для отработки твердотопливных ракетных двигателей различного назначения. Показана актуальность модернизации в связи с необходимостью более эффективной и оптимальной стратегии отработки изделий, а также появлением более «жестких» требований к проведению огневых испытаний в части повышения точности измерений и получения дополнительной информации в процессе испытания. Это позволит получить больше информации об испытываемых изделиях при проведении огневых стендовых испытаний.

Ключевые слова: измерительно-вычислительный комплекс, огневые стендовые испытания, твердотопливный ракетный двигатель, измерения, измерительные каналы, датчики, метрологическое обеспечение.

В ходе модернизации испытательной базы предприятий часто возникают следующие проблемы:

- применяющийся парк испытательного и измерительного оборудования после модернизации не полноценно используется при создании новых изделий и их наземной отработке;
- после «точечной» модернизации зачастую возникает необходимость «стыковки» различного оборудования с ЭВМ и объединения этого оборудования в единый комплекс;
- после модернизации возникают сложности с метрологическим обеспечением измерительных комплексов.

Опыт модернизации испытательной базы крупных промышленных предприятий [1–3] показал, что наиболее быстрый и эффективный способ модернизации — это замена или разработка новых систем автоматизации проведения испытаний изделий на испытательных стендах, в частности измерительно-вычислительных комплексов (ИВК). При этом современные информационные технологии позволяют не выводить используемое оборудование из цикла текущих работ при проведении модернизации в короткие сроки. Также необходимо серьезно подойти к выбору аппаратно-программных средств и компонентов измерительных комплексов (особенно сегодня, когда на рынке предлагается широкий ассортимент различных средств автоматизации).

Рассмотрим в качестве примера проект модернизации стендового комплекса для проведения огневых испытаний твердотопливных ракетных двигателей (РДТТ) на испытательной базе ФГУП «ФЦДТ «Союз».

Наземные огневые стендовые испытания (ОСИ) — один из важнейших этапов отработки РДТТ, выполняемый для определения и подтверждения основных технических характеристик изделия. На этом этапе проверяется и подтверждается правильность выбранных конструктивных решений. Основная задача ОСИ — от-

работка и проверка функционирования РДТТ, оценка соответствия характеристик требованиям, установленным в техническом задании на разработку.

Нормативная база на проведение ОСИ РДТТ и их зарядов в настоящее время представлена закрытыми стандартами, а вопросы проведения ОСИ для отработки РДТТ подробно отражены в работах [4, 5].

В настоящее время с появлением новых РДТТ к проведению ОСИ предъявляются все более «жесткие» требования, в том числе это относится к получению дополнительной информации в процессе испытания. Например, для реализации более эффективной и оптимальной стратегии отработки изделий, кроме измерения основных внутрибаллистических характеристик РДТТ (таких как давление, тяга, температура, время), требуется измерение дополнительных параметров. Так, измерение пульсаций давления позволяет подробнее изучить процессы горения топлива в натурном двигателе. Измерение вибрации и ударных ускорений позволяет определить уровни механического нагружения как топлива, так и других элементов конструкции двигателя. Измерение температуры поверхности корпуса в узких (например, 20...80°C) и широких (-60...2800°C) диапазонах температур в течение длительного времени позволяет определить эффективность применения теплозащитного покрытия и т. д.

В связи с этим появляется необходимость значительного увеличения числа измеряемых параметров (до нескольких сотен измерительных каналов) даже для мало- и среднеразмерных РДТТ. С учетом того, что типы измеряемых параметров различны (давление, тяга, температура, виброускорение, перемещение и т. д.), то ИВК должны обладать «гибкостью» для оперативного подключения новых типов первичных преобразователей (датчиков) с различными выходными сигналами без проведения соответствующей длительной и дорогостоящей доработки ИВК.

К точности измерений также предъявляются довольно «жесткие» требования, что обусловлено не только малым числом испытываемых образцов и их высокой стоимостью, но и ужесточением требований к стартовым характеристикам обрабатываемых изделий.

Измерения — неотъемлемая часть ОСИ, предоставляющая разработчику РДТТ основную информацию о режимах и особенностях работы изделия. Учитывая, что ОСИ РДТТ характеризуются высокой стоимостью и однократностью использования РДТТ, измерения при ОСИ — очень ответственная процедура, не терпящая ошибок операторов и сбоев аппаратуры.

Применяемые в настоящее время системы предыдущих поколений (80–90-х годов XX века и даже 2000-х годов) не позволяют выполнить такие измерения не только из-за отсутствия соответствующих каналов, но и из-за недостаточной частоты их опроса.

Приведем характерные примеры.

Общая информативность одного из ИВК 2008 г. изготовления, применяемого в настоящее время в ФЦДТ «Союз» при ОСИ РДТТ, составляет всего 32 кГц (суммарно на все каналы), что не позволяет организовать измерения высокочастотных вибрационных, акустических и других процессов (частота опроса только одного датчика виброускорения — ≥ 25 кГц).

При этом опрос каналов производится в последовательном режиме, а при увеличении числа измерительных каналов ≥ 20 ед. приходится уменьшать частоты их опроса ≤ 1 кГц.

Кроме того, указанный ИВК не имеет измерительных каналов для приема сигналов от термометров сопротивления, датчиков с токовым выходом (4...20 мА), зарядовых датчиков и др., что ограничи-

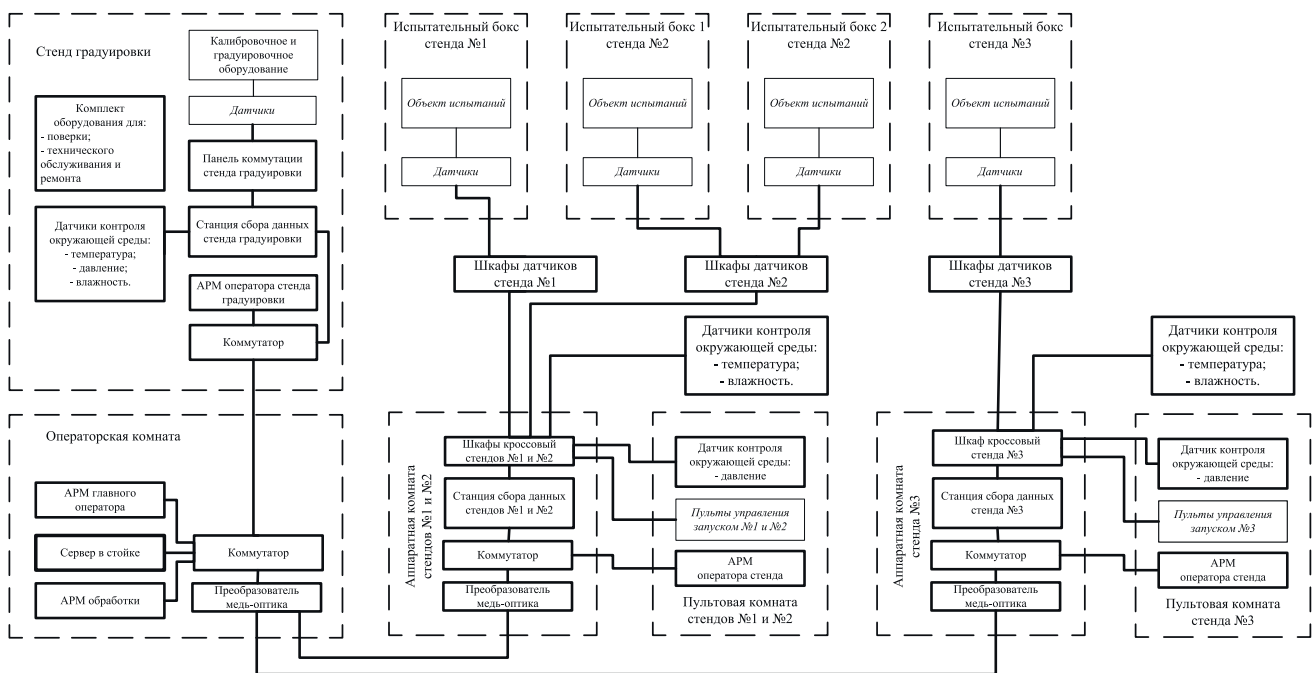
вает круг применяемых датчиков и соответственно видов измерений.

Наличие подобных недостатков свидетельствует о необходимости выработки подходов к модернизации измерительных комплексов, применяемых на сегодняшний день при проведении ОСИ РДТТ. Модернизация состоит не только в замене программно-технических средств на более современные. Нужен комплексный подход в решении множества возникающих проблем, таких как:

- модернизация ИВК без вывода используемого оборудования из цикла текущих работ;
- построение ИВК в единой архитектуре для обеспечения удобства технического обслуживания и дальнейшего оперативного расширения состава;
- формирование ИВК с универсальным набором измерительных каналов;
- формирование ИВК с высокой информативностью — до десятков МГц;
- организация метрологического обеспечения измерений;
- объединение процедур подготовки первичных преобразователей и проведения измерений при ОСИ в единый технологический процесс средствами ИВК;
- формирование алгоритмов выявления и предупреждения ошибок операторов ИВК;
- формирование алгоритмов автоматического контроля работоспособности и исходного состояния датчиков непосредственно перед ОСИ.

Необходимо понимать, что все испытательные стенды для проведения ОСИ уникальны и имеют свои особенности, которые должны учитываться при разработке и создании ИВК.

Характерными особенностями ОСИ на испытательной базе ФГУП «ФЦДТ «Союз» являются:



Структурная схема ИВК

- наличие трех огневых стендов с центральным пультом управления измерительным комплексом;
- широкая номенклатура типов испытываемых ежегодно РДТТ (в том числе большой процент испытываемых впервые);
- проведение испытаний малых и среднеразмерных РДТТ;
- проведение 1...20 испытаний в течение одной рабочей смены (8 ч);
- малое время работы подавляющего большинства испытываемых изделий — 0,01...10 с;
- широкая номенклатура типов применяемых датчиков и соответственно типов измерительных каналов;
- различное число измеряемых параметров во время испытания на одном стенде — 5...100 ед.;
- малое время на принятие решения о проведении следующего испытания в серии (на основе экспресс отчета) — 10... 20 мин.;
- малое время формирования полного отчета по измерениям — 1–2 дня;
- периодическая смена датчиков и кабелей в измерительных каналах (датчики и кабели периодически проверяются и могут входить в состав испытываемых изделий).

На рисунке приведена структурная схема ИВК, предлагаемого для проведения ОСИ на стендовой базе ФЦДТ «Союз».

Основными измерительными компонентами в структуре ИВК являются станции сбора данных (ССД), обеспечивающие питание датчиков и прием от них измерительной информации. Для подключения «подкидных» кабельных линий и датчиков применяются кроссировочные шкафы.

В состав ИВК входят АРМы, которые позволяют управлять режимами работы ИВК, формировать программы испытаний, отображать результаты контроля (самоконтроля) состояния измерительных каналов, управлять процессом регистрации измерительной информации и ее обработки, взаимодействовать с пультовым оборудованием для организации автоматического режима регистрации, управлять процессом визуализации результатов измерений в графическом виде в ходе проведения испытания и др.

АРМ главного оператора предназначено для управления процессом регистрации через ССД на стендовых комплексах. Помимо этого, на каждом стенде предусмотрено наличие своего АРМ для оперативной настройки программы испытаний и дополнительного контроля измерительных каналов. АРМ оператора стенда отличается тем, что на стендовом комплексе имеется два территориально разнесенных испытательных бокса, и на каждый из них идут независимые измерительные каналы от одной ССД.

АРМ оператора стенда градуировки предназначено для проведения подготовительных работ с датчиками (градуировка).

АРМ обработки предназначено для вторичной обработки измерительной информации после испытания и оформления отчетной документации.

«Мозговым центром» ИВК служит выделенный сервер, который посредством локальной вычислительной сети обеспечивает функционирование сетевой базы данных ИВК и взаимодействие со всеми АРМ и другими устройствами по IP-адресам, а также хранение результатов испытаний и другой служебной информации.

ИВК должен функционировать в следующих режимах:

- а) подготовка датчиков;
- б) подготовка проведения измерений;
- в) проведение измерений в ходе испытания;
- г) обработка результатов измерений;
- д) техническое обслуживание и настройка ИВК.

Исходя из потребностей отработчиков РДТТ, а также требований нормативной документации по ОСИ РДТТ и их зарядов сформированы основные требования к вторичным измерительным преобразователям по типам выходных сигналов датчиков, числу каналов на каждом стенде (с учетом резерва), метрологических и других технических характеристик (таблица).

Требования к точности измерений приведены с учетом реальных возможностей оборудования, серийно выпускаемого в настоящее время отечественной промышленностью.

Важной особенностью является и то, что к настоящему времени в продаже имеются модули с дифференциальными измерительными каналами, чего не было реализовано в предыдущих поколениях измерительной аппаратуры аналогичного назначения. Это позволяет на несколько порядков уменьшить взаимное межканальное влияние, что, в свою очередь, исключает потерю измерительной информации по всем каналам модуля в случае выхода из строя только одного.

В таблице дополнительно отражены служебные каналы (синхронизации и управления) и контрольные каналы (контактные).

Контактные каналы не являются измерительными, при этом они часто находят свое применение при контроле положения различных концевых устройств. Каналы синхронизации необходимы для синхронизации измерительного процесса с работой испытываемого изделия. Каналы управления необходимы для выдачи управляющих команд на различные устройства в ходе испытания при достижении на измерительных каналах ИВК пороговых уровней измерительного сигнала. Кроме того, контактные каналы и каналы управления необходимы для автоматизации измерительного процесса по командам от пультового оборудования, управляющего процессом испытания.

Учитывая требования к вторичным преобразователям по точности измерений и частоте опроса, наиболее целесообразным является использование ССД на основе крейтовых многоканальных систем. В [6, 7] приведены преимущества применения подобных систем. В настоящее время на отечественном рынке представлены изделия российских и зарубежных производителей. Отметим, что в настоящее время отечественная промышленность является вполне

Таблица. Требования к вторичным измерительным преобразователям

| № | Тип канала | Краткие технические характеристики | Требования к точности измерения | Максимальная частота опроса канала | Число каналов на станд. ед. | | |
|----|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|----|----|
| | | | | | 1 | 2 | 3 |
| 1 | Тензометрический | Мост, полумост, четвертьмост | Относительная приведенная погрешность измерения выходного напряжения и напряжения питания моста – 0,1 % | ≥ 10 кГц | 24 | 24 | 40 |
| 2 | Термопарный | Типы термопар по ГОСТ Р 8.585 – R, S, B, J, T, E, K (XA), N, A-1, A-2, A-3, L (XK), M | Абсолютная погрешность измерения напряжения постоянного тока – ± 0,020 мВ | ≥ 50 Гц | 32 | 32 | 80 |
| 3 | ICP | ± 0,1 В; ± 0,2 В; ± 1 В; ± 2 В; ± 10 В | Относительная погрешность 0,1 % в каждом диапазоне | ≥ 100 кГц | 16 | 16 | 32 |
| 4 | Токовый (токовая петля) | 0...5 мА; 0...20 мА; 4...20 мА | Относительная погрешность 0,1 % | ≥ 100 Гц | 16 | 16 | 20 |
| 5 | Резистивный (термометрический) | 50 ... 500 Ом; 200 ... 2000 Ом; 500 ... 5000 Ом; 1000 ... 10000 Ом | Приведенная погрешность 0,1 % в каждом диапазоне | ≥ 50 Гц | 12 | 12 | 16 |
| 6 | Частотный | 0,1 ... 50 000 Гц | Относительная погрешность 0,01 % | ≥ 5 кГц | 4 | 4 | 4 |
| 7 | Потенциометрический | ± 0,1 В; ± 1 В; ± 10 В; ± 50 В | Относительная приведенная погрешность 0,05 % | ≥ 5 кГц | 32 | 32 | 32 |
| 8 | Контактный («сухой контакт») | Замкнуто/ разомкнуто | – | ≥ 10 кГц | 8 | 8 | 8 |
| 9 | Синхронизация | Межканальная и с внешним сигналом | Абсолютная погрешность ± 10 ⁻⁵ с | – | 4 | 2 | |
| 10 | Управления | замыкание/ размыкание «Сухого контакта» | – | ≥ 10 Гц | 8 | 8 | 16 |

конкурентоспособной в этой области. Учитывая текущую политику государства по импортозамещению продукции, при разработке проекта рассматривались преимущественно отечественные производители составных частей ИВК.

В составе ИВК предусмотрено наличие подсистемы громкой связи, обеспечивающей голосовое взаимодействие как операторов ИВК, так и операторов пультового оборудования и других подсистем.

Важным элементом ИВК, обеспечивающим контроль параметров окружающей среды, являются внешние датчики атмосферного давления, влажности и температуры. Во время испытания и при подготовке датчиков информация с них автоматически привязывается к результатам измерений и используется при последующей обработке с целью корректного внесения поправочных коэффициентов.

Из опыта эксплуатации действующих в настоящее время ИВК определено, что одной из причин некачественной регистрации параметров является выход из строя измерительных кабельных линий. При этом выявление неисправных линий — трудоемкий и длительный процесс.

Для организации оперативного периодического и внеочередного контроля состояния подкидных

и стационарных кабельных линий в состав создаваемого ИВК дополнительно включена подсистема автоматизированного контроля электро монтажа. Эта подсистема позволяет контролировать целостность электрических цепей, сопротивление изоляции, электрическую прочность изоляции, правильность пайки витых пар и т.д.

Дополнительно определены требования к подкидным кабельным линиям с учетом схем подключения датчиков, типов их соединителей, расстояний от мест коммутации к щитам до объектов испытаний.

В части экранирования кабельных линий при формировании требований учтены рекомендации, приведенные в [8]. При этом переход цепи экрана с подкидных линий на стационарные и далее вплоть до измерительного модуля должен осуществляться через отдельные контакты разъемных соединений, а не через их корпуса. Заземление экранов должно осуществляться в одной точке со стороны модулей.

Электрическая связь корпусов датчиков с экранами подкидных линий должна быть исключена. Обеспечение таких требований позволит существенно снизить уровень помех от наводок внешних электромагнитных полей.

Важной составной частью ИВК является специализированное программное обеспечение (СПО), организующее рабочую среду операторов. СПО должно обеспечивать не только процесс регистрации измерительной информации, но и оперативную (не более получаса) гибкую подготовку ИВК к регистрации в части выбора и настройки измерительных каналов, привязки к каналам датчиков, формирования и привязки к каналам градуировочных характеристик, визуализацию процесса измерения в реальном времени (в ходе проведения испытания), контроль действий операторов, первичную и вторичную обработку измерительной информации и т.д. В настоящее время обеспечить выполнение таких требований не составляет труда благодаря значительному повышению производительности современных ПК.

Основы метрологического обслуживания измерительных систем подробно изложены в [9]. Метрологическое обеспечение измерений при ОСИ организу-

ется путем разработки и аттестации самостоятельных методик измерений. Для этого есть несколько причин:

— универсальность ИВК, широкая номенклатура применяемых датчиков и различные условия их применения в зависимости от испытываемого изделия предполагает большое разнообразие методик измерений, которые не могут быть внесены в эксплуатационную документацию ИВК;

— внедрение новых типов датчиков во время эксплуатации ИВК, которые также не могут быть внесены в методики измерений эксплуатационной документации ИВК;

— необходимость учета дополнительных погрешностей датчиков, возникающих в ходе ОСИ, которые могут зависеть от конкретных видов РДТТ;

— нецелесообразность организации метрологического обеспечения измерений по ГОСТ Р 8.596-2002.

Для организации поверки измерительных модулей на месте применения в состав ИВК включен комплект поверочного оборудования. Организация поверки силами метрологической службы предприятия позволяет не только сократить расходы на поверку компонентов ИВК, но и значительно сократить сроки ее проведения.

Заключение

Таким образом, для обеспечения выполнения современных требований к измерениям при огневых стендовых испытаниях РДТТ и проведение работ в условиях импортозамещения необходим комплексный подход по модернизации ИВК, учитывающий множество проблем.

Во ФГУП «ФЦДТ «Союз» предложен проект модернизации ИВК для проведения ОСИ на примере собственной стендовой базы, который позволит:

— организовать измерения как статических, так и динамических процессов с применением более широкой номенклатуры датчиков за счет высокоскоростных измерительных каналов с параллельным опросом и переключаемыми диапазонами измерений;

— повысить точность измерений основных и дополнительных параметров испытания за счет применения высокоточных измерительных модулей с поканальной гальваноразвязкой, исключения промежуточных усилителей и преобразователей сигнала;

— существенно уменьшить или полностью устранить риск ошибок операторов при подготовке и во время испытаний, приводящих к потере или искажению измерительной информации за счет автоматизированного контроля наличия и состояния датчиков в измерительных каналах, применения видеопанелей, обеспечивающих оперативный контроль результатов измерений;

— повысить скорость обработки и качество анализа измерительной информации за счет автоматизации сбора вспомогательной информации (градуировочных характеристик, климатических условий проведения испытаний — температуры, давления, влажности), измерения новых видов параметров и применения сервера;

— создать прозрачность контроля и соответственно повысить доверие потребителей (заказчиков) к результатам измерений за счет автоматизированного формирования первичных протоколов измерений, содержащих основные сведения для дальнейшей обработки;

— упростить процедуру подготовки измерительных каналов ИВК к испытаниям за счет применения специализированного ПО и автоматизированного контроля наличия и состояния датчиков;

— упростить организацию ремонта, а также технического и метрологического обслуживания ИВК за счет применения измерительной аппаратуры модульного типа.

Список литературы

1. *Батьковский А.М.* Направления модернизации организации производства в радиоэлектронной промышленности в условиях преобразования оборонно-промышленного комплекса // Общество, наука и инновации: сборник статей Международной научно-практической конференции. 2015. С. 14.
2. *Пичхадзе К.М. и др.* Модернизация стендовой базы наземной отработки с имитацией условий космического пространства // Вакуумная техника и технология. 2010. Т. 20. № 1. С. 37-46.
3. *Перцовский М.И.* Автоматизация испытаний в аэрокосмической отрасли — искусство или технология? // Аэрокосмический курьер. 2011. №3-4. С.56-60.
4. *Жарков А.С., Потапов М.Г., Демидов Г.А., Леонов Г.В.* Стендовые испытания энергетических установок на твердом топливе: Уч. пособие. Алт. гос. техн. ун-т. 2001. 281 с.
5. *Волков В.Т., Ягодников Д.А.* Исследование и стендовая отработка ракетных двигателей на твердом топливе. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 296 с.
6. *Зайченко С.Н., Хартов В.В., Кочура С.С., Филимонов С.Н.* Новое поколение модульных рабочих мест автономных и комплексных испытаний РКТ // Аэрокосмический курьер. 2009. № 3-4. С.32-37.
7. *Зайченко С.Н., Перцовский М.И.* Новое поколение смешанных и динамических модульных информационно-измерительных и телеметрических систем в стандарте VХI и LXI // Автоматизация в промышленности. 2009. № 7. С.3-10.
8. *Денисенко В.В.* Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия — Телеком. 2009. 608с.
9. *Яковлев Ю.Н.* Метрологическое обслуживание измерительных систем: Уч. пособие. М.: АСМС, 2010. 36с.

*Соломатин Петр Кириллович — главный конструктор направления,
Куренков Валерий Сергеевич — начальник отделения автоматизации,*

Богданов Дмитрий Владимирович — начальник группы,

Чушкин Александр Викторович — ведущий инженер-электроник ФГУП «ФЦДТ «Союз»

Контактные телефоны: (495) 551-71-23, (495) 551-77-60.

E-mail: soyuz@fcdt.ru