

Ю. А. Зеленков, В. Ю. Чувилин, В. Е. Журавлев

КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. ЧАСТЬ 1: УПРАВЛЕНИЕ СТЕНДОМ И СБОР ДАННЫХ

Рассматриваются вопросы комплексной автоматизации процесса испытаний газотурбинных двигателей (ГТД), включая процессы сбора данных, хранения и постобработки данных, а также управления стендовыми системами. Приведено описание систем, реализованных в рамках проектов ОАО «НПО «Сатурн». *Испытания газотурбинных двигателей; системы сбора данных; системы хранения данных; визуализация данных*

ВВЕДЕНИЕ

В 70–80-е годы прошлого века цикл проектирования нового авиационного ГТД составлял 12–15 лет (в 2–3 раза больше, чем цикл проектирования самолета), из которых собственно определение конструкции занимало не более двух лет, все остальное время тратилось на экспериментальную доводку параметров. После изготовления первого опытного экземпляра проводились его испытания, проверялись технические характеристики и в результате уточнялись параметры конструкции. Далее изготавливался следующий экземпляр, испытывался, вновь уточнялись параметры конструкции и так далее, до получения приемлемых характеристик.

В 2000-е годы встала задача уменьшить продолжительность разработки нового двигателя не менее чем в 2 раза, а соответствующие затраты – не менее чем в 4–5 раз. Эти параметры соответствуют уровню ведущих западных компаний. Достижение данной цели возможно только через создание виртуальной среды проектирования, которая включает следующие компоненты [1]:

- цифровое проектирование на основе 3-мерной мастер-модели, параллельная разработка конструкции деталей и методов их изготовления;
- аэродинамические, прочностные, тепловые и акустические расчеты, многокритериальная оптимизация;
- сбор максимального количества данных при испытаниях, их обработка, визуализация и стыковка с расчетными данными.

В данной работе рассматриваются вопросы комплексной автоматизации процесса испытаний авиационных ГТД. В первой части статьи приведено описание реализованных систем сбо-

ра данных и управления испытательным стендом.

1. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЗАЦИИ

Можно выделить следующие типы испытаний ГТД и их узлов:

- научно-исследовательский эксперимент, проводимый на стадии разработки;
- испытания на этапе доводки и подготовки к сертификационному тестированию;
- сертификационные и государственные испытания;
- серийные испытания на производстве.

Стенды для опытных (научно-исследовательских, доводочных и сертификационных) испытаний являются гораздо более сложными инженерными сооружениями, чем стенды для серийных испытаний. Основное различие между ними – количество каналов сбора данных, а также наличие специализированных систем (заброс льда, заброс птицы, обдув боковым ветром и т. д.), которые используются только для сертификационных испытаний в соответствии с требованиями авиационных властей.

Измерительная система испытательного стенда состоит из стендовых датчиков, каналов связи, устройств нормализации сигналов, вторичных преобразователей – собственно измерительных модулей, компьютера и измерительного программного обеспечения. Среди измерительных каналов можно выделить каналы сбора данных стационарных и переходных процессов (температура, давление и т. д.) с частотами опроса до 2 КГц, каналы динамических процессов (как правило, это вибронапряжения и пульсации давления) с частотами опроса до 40 КГц, расчетные каналы (эти значения вычисляются на основании измеренных величин в темпе процесса), а также дискретные и аналоговые сигналы, поступающие от стендовых систем и системы

управления двигателем. Типичные количества измерительных каналов для опытных и серийных испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1
Число каналов сбора данных

| Вид измерений | Опытные испытания | Серийные испытания |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------|
| Стационарные и переходные процессы | 2000 | 200 |
| Динамические процессы | 250 | 10 |
| Расчетные каналы | 200 | 10 |
| Аналоговые сигналы стендовых систем | 40 | 40 |
| Дискретные сигналы стендовых систем | 150 | 150 |

Структурная схема испытательного стенда представлена на рис. 1.

На основании сказанного выше можно сформулировать следующие требования к системе сбора данных и управления стендом, которую в дальнейшем будем называть УИВК (управляющий измерительно-вычислительный комплекс):

- возможность измерения сигналов с разных видов датчиков;

- встроенные схемы нормализации, преобразования и согласования сигналов;
- возможность дискретного управления исполнительными элементами стенда и испытуемого изделия;
- высокая надежность, в том числе механическая прочность и виброустойчивость;
- возможность автоматического создания протоколов испытаний;
- высокая производительность – возможность сбора и обработки данных в режиме реального времени, возможность проведения испытаний в параллельном режиме;
- возможность визуализации в темпе процесса и сохранения больших объемов измеренных данных;
- возможность записи и просмотра «черного ящика» – регистрация необходимых параметров до / после наступления критического события;
- функционально гибкое программное обеспечение, дающее возможность корректирования программ стендовых испытаний непосредственно во время их проведения, а также применения встроенных алгоритмов обработки и постобработки данных измерений.

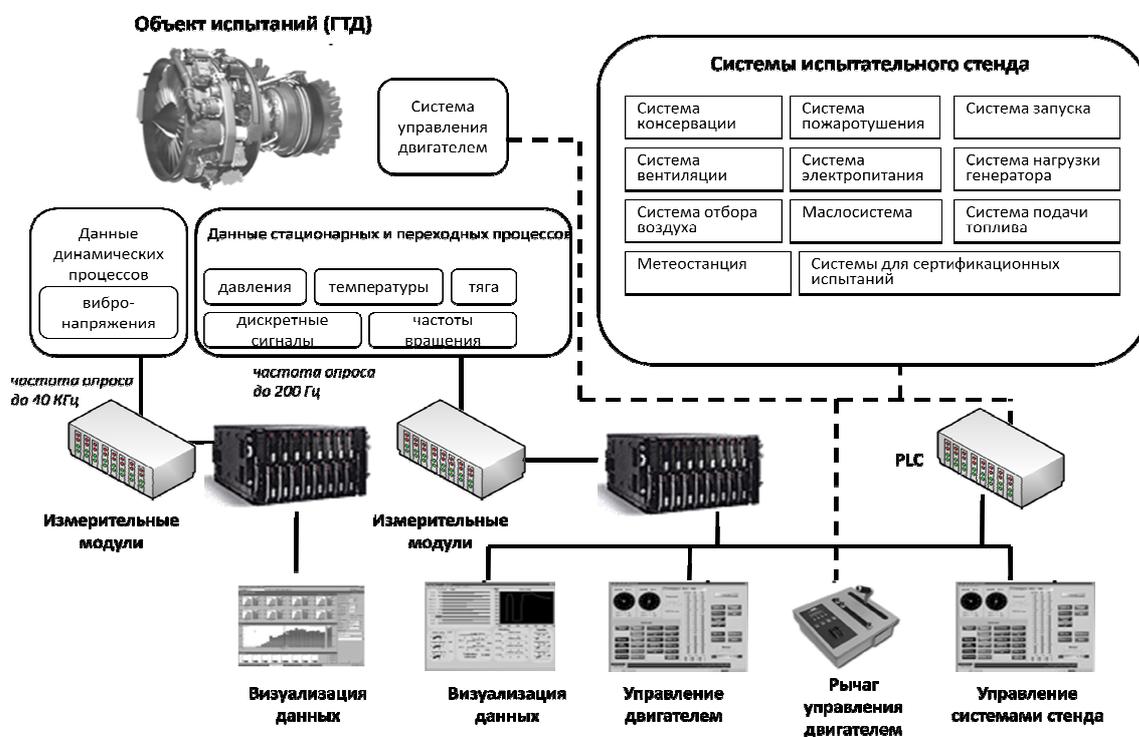


Рис. 1. Структурная схема испытательного стенда

Структурно в УИВК можно выделить следующие подсистемы:

- Подсистема управления стендом и объектом испытаний. Реализуется, как правило, на базе программируемого логического контроллера (PLC).

- Рычаг управления двигателем (РУД). В процессе испытаний оператор задает положение РУД, а автоматика по заданным законам преобразует его в цифровой код, который через систему управления двигателем устанавливает положение дроссельной заслонки. Для длительных циклических испытаний необходимо использовать автоматическое управление РУД по заданной программе. Это предотвращает влияние ошибок испытателя и обеспечивает повторяемость результатов отдельных циклов испытаний.

- Подсистема сбора данных стационарных и переходных процессов. Предоставляет механизмы визуализации и сохранения данных, а также средства организации расчетных каналов.

- Подсистема сбора динамических данных. Также включает механизмы визуализации и записи данных и создания расчетных каналов.

- Подсистема синхронизации времени, поскольку измерения физических величин разного типа могут осуществляться с разной частотой опроса.

Подсистемы управления стендом и сбора данных стационарных процессов, как правило, поставляют компании, оказывающие инженерные услуги по созданию стендов под ключ – MDS Aero Support (Канада) [2], Cenco International (Бельгия – США) [3]. При этом стоимость одного измерительного канала может достигать 2000 евро, кроме того, эти системы, как правило, допускают использование оборудования только данных поставщиков. В России производителем таких систем является ряд компаний, таких как Информтест, Insys Ltd, НПП «Мера», предлагающих программно-аппаратные комплексы с собственной архитектурой. Системы динамических измерений поставляются такими компаниями, как DSPCon (США) [4], LMS International (Бельгия) [5], цена одного канала может достигать 5000 евро. Поэтому общие затраты на автоматизацию стендов чрезвычайно велики и составляют 30–40% общей стоимости стенда. Учитывая данные обстоятельства, на НПО «Сатурн» в рамках програм-

мы модернизации испытательной базы было принято решение о разработке собственного УИВК, который должен отвечать всем вышеперечисленным требованиям и при этом обеспечивать сокращение стоимости создания канала в 3–4 раза, а эксплуатационные расходы в 10 раз по сравнению с системами зарубежных поставщиков.

2. АРХИТЕКТУРА УИВК

Разработка УИВК выполнена в соответствии с рекомендациями работы [6], где предложен подход к проектированию информационных систем на основе последовательного описания архитектуры бизнес-процессов, данных, приложений и технической архитектуры.

Упрощенная модель бизнес-процессов опытных испытаний ГТД и используемых ими данных представлена на рис. 2 в нотации BPMN 1.2 [7].

Согласно данной нотации каждая горизонтальная полоса (lane) соответствует одному процессу, которые состоят из шагов. Группа однородных процессов может быть объединена в пул (pool). В данном случае в один пул объединены процессы, выполняемые непосредственно на испытательной станции. Процессы выполняются асинхронно, взаимодействие между ними осуществляется с помощью передачи сообщений (изображаются штрих-пунктирными линиями со стрелочкой на конце). Детерминированная последовательность выполнения шагов процесса обозначается сплошной линией со стрелочкой на конце. В случае наступления какого-либо события, которое необходимо обработать (прерывание по таймеру, ошибка и т. д.), выполнение шага процесса или процесса в целом может быть прервано с помощью «исключения» (exception). Исключения изображаются окружностью на границе прямоугольника, соответствующего данному шагу, или линии, соответствующей процессу. Внутри окружности может быть указан тип исключения. Данные, ассоциированные с шагом процесса, изображаются с помощью пиктограммы документа.

Ключевыми с точки зрения обеспечения испытаний на стенде являются процессы и функции (шаги процессов), требования к автоматизации которых приведены в табл. 2.

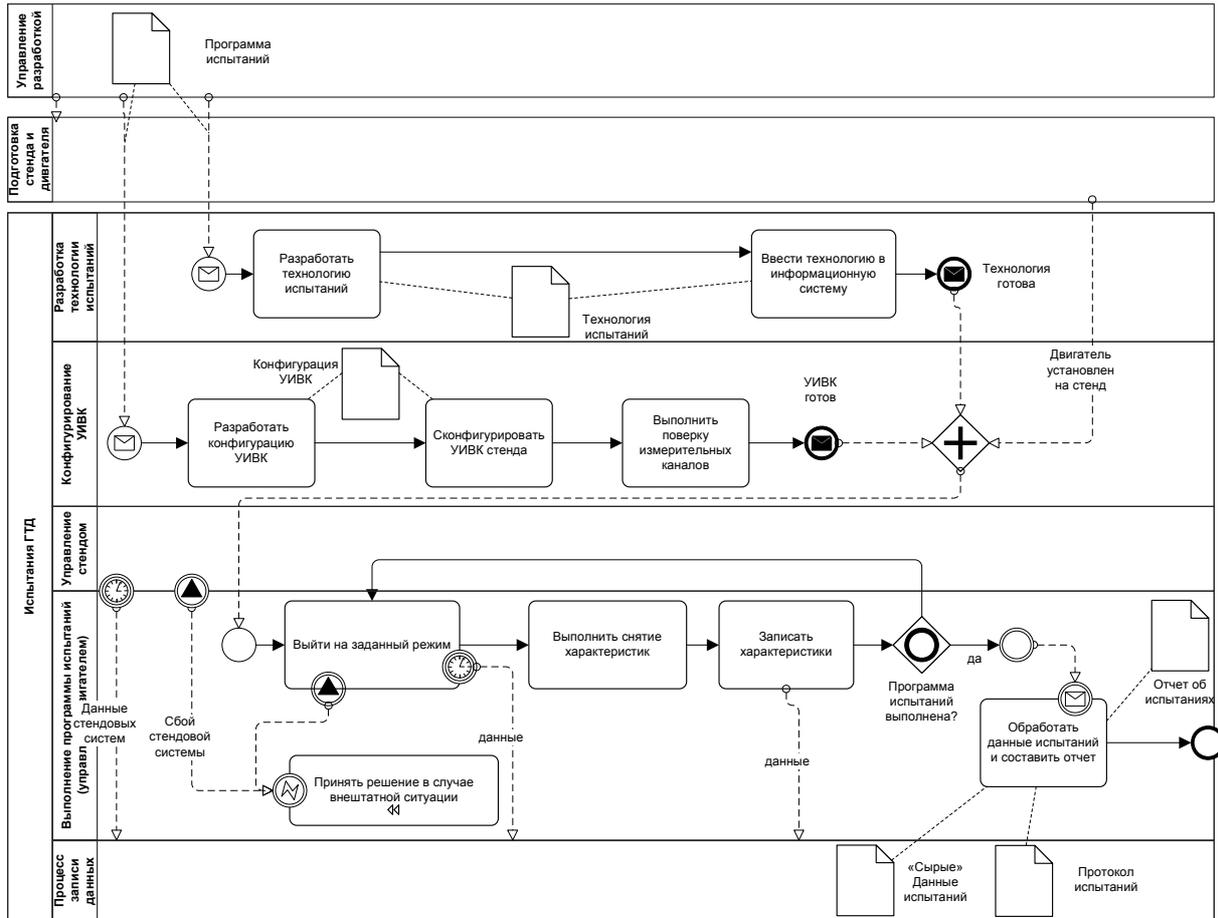


Рис. 2. Бизнес–процессы опытных испытаний ГТД

Таблица 2

Процессы обеспечения испытаний ГТД

| Процесс | Требования к автоматизации |
|--|---|
| Разработка технологии испытаний | При разработке технологии описывается последовательность действий вида «режим двигателя (частота вращения, время наработки) – выполняемые измерения». Необходимо иметь эту последовательность в электронном виде для исключения ошибок персонала в процессе испытаний и обеспечения прослеживаемости. |
| Конфигурирование УИВК | При большом количестве каналов необходимо обеспечить централизованную настройку всех компонентов системы, чтобы избежать ручного конфигурирования каналов при изменении программы испытаний. Конфигурация УИВК должна сохраняться во внешнем файле. |
| Метрологическая поверка | В соответствии с требованиями сертификационных органов все измерительные каналы должны быть метрологически поверены. При большом количестве каналов необходимы средства автоматизации, упрощающие эту задачу. |
| Управление стендовыми системами | Необходимо иметь централизованную систему мониторинга и управления всеми стендовыми системами с современным интерфейсом. |
| Управление объектом испытаний (ГТД) | Необходимо иметь автоматизированную систему управления РУД по заранее заданному закону, интегрированную с мониторингом ключевых параметров двигателя. |
| Запись данных | Необходимо обеспечивать возможность одновременной записи разных наборов параметров с разной частотой дискретизации. |
| Формирование отчета по результатам испытаний | Необходимо предоставить гибкую систему формирования пользовательских экранов для наблюдения за параметрами изделия в темпе процесса, а также средства генерации отчетов по итогам испытаний. |

В результате анализа этой модели процессов и данных выделены следующие приложения (АРМы), которые должны входить в состав УИВК:

- АРМ бригадира-испытателя – предназначен для конфигурирования УИВК и контроля всех систем в процессе испытаний;
- Универсальный АРМ инженера-аналитика для специалистов в различных предметных областях (термодинамика, акустика, прочность и т.д.) с возможностью конфигурирования экранов пользователем в режиме WISIWYG;
- АРМ управления стендом – предназначен для управления стендовыми системами и РУД;
- АРМ метролога должен обеспечивать поверку сквозного канала (от датчика до отображающего устройства), групповую калибровку, поверку и градуировку датчиков и каналов, выдачу метрологических протоколов установленного образца;
- АРМ технолога – предназначен для пошагового описания процесса испытаний (последовательности выхода на режимы двигателя и выполняемых измерений);
- генератор отчетов в текстовой, табличной и графической форме с возможностью экспорта в популярные форматы (PDF, CSV, JPEG и др.).

На уровне технической (системной) архитектуры выделены следующие компоненты:

Системы сбора данных (ССД), обеспечивающие изоляцию аппаратного и программного уровней УИВК, поставку данных в унифицированной форме. ССД различаются по виду собираемых данных и, соответственно, виду измерительного оборудования. В настоящее время реализованы ССД для сбора данных на оборудовании National Instruments, термостанций и тензостанций производства VXI Technology и т. д.

Сервер – расчетное ядро системы, обеспечивающее обмен данными между всеми компонентами системы, сохранение значений каналов между запусками, ведение лог-файлов и запись всех данных («сырых» данных).

Система записи, обеспечивающая запись контрольных точек, динамических протоколов, протоколов аварийного останова. Разработан собственный формат хранения данных на основе языка XML.

Система синхронизации времени, обеспечивающая формирование единой системы временных отсчетов для всех компонентов УИВК, ведение таймеров для расчета времени работы

ГТД на режимах и измерение временных интервалов, а также реализацию триггерных событийных каналов;

Монитор, осуществляющий запуск компонентов системы, проверку их функционирования и автоматический перезапуск в случае сбоя, а также отображение состояния всех каналов.

3. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УИВК

Поскольку при разработке УИВК была поставлена задача радикально сократить затраты на его создание и эксплуатацию, при выборе конкретных решений как можно шире использовались стандартные технологии, протоколы и оборудование. Такой подход позволяет создать модульную распределенную систему, различные компоненты которой могут заменяться и обслуживаться независимо друг от друга. При этом также снижаются квалификационные требования как к обслуживающему персоналу, так и к инженерам, занятым развитием комплекса.

В данном конкретном случае были выбраны протоколы Ethernet и TCP/IP для организации связи компонентов системы, для промышленных сетей – протоколы ProfiBus и др., для связи с САУ двигателя – ARINC-429, для синхронизации времени – IRIG. Основу измерительной части составляет оборудование компании National Instruments, поддерживающее стандарт PXI, для согласования сигналов измерительных систем используется стандарт SCXI. Также предусмотрен сбор данных с приборов с интеллектуальным выходом (расходомеры, терморегистраторы) по протоколу ModBUS. Все компьютеры, используемые в составе УИВК, имеют стандартную архитектуру IA32/IA64. Аппаратная структура УИВК, созданного с использованием перечисленных выше принципов, показана на рис. 3.

УИВК фактически представляет собой локальную сеть испытательной станции, в которой также реализованы основные сетевые сервисы – печать, совместный доступ к файлам и т. д. Для предотвращения несанкционированного доступа к данным испытаний УИВК подключается к корпоративной сети с помощью маршрутизатора.

Системное программное обеспечение, обеспечивающее функционирование системы (сервер, монитор, система записи), реализовано на языке С, экраны отображения информации – с помощью виртуальных инструментов, созданных в системе LabView (использование этой системы для автоматизации серийных испытаний ГТД рассмотрено в работе [8]).

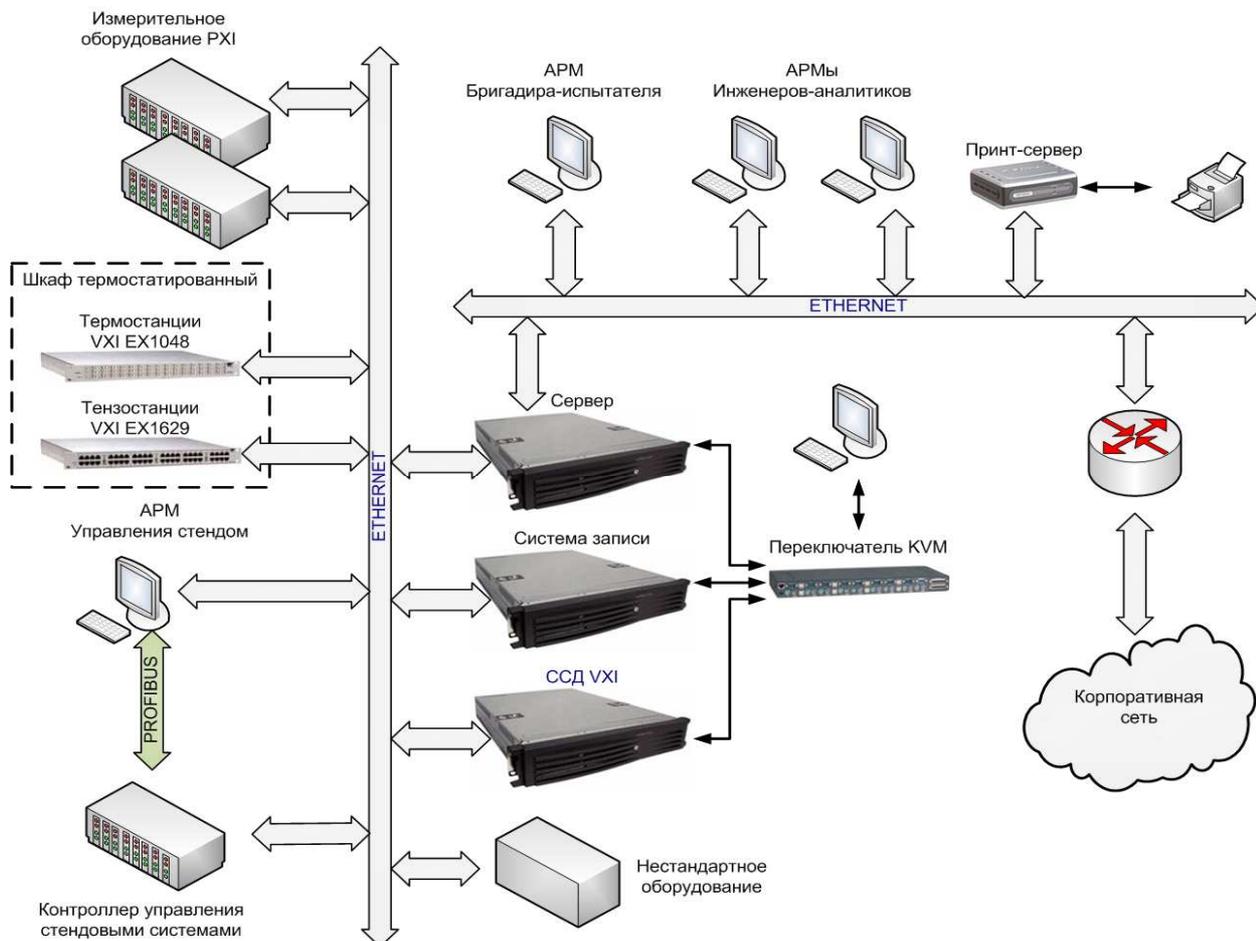


Рис. 3. Аппаратная структура УИВК

Таблица 3

Характеристики УИВК

| | Мера | MDS Aero Support | НПО «Сатурн» |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Архитектура системы | Несколько ССД + 1 АРМ | 1 сервер + несколько АРМ | Модульная распределенная структура |
| Виды АРМ (возможность настройки) | 1 управляющий (да) | 1 управляющий (нет), инженерные (да) | 1 управляющий (да), инженерные (да) |
| Конфигурирование | изменение программного кода системы | XML с экспортом в файл настройки | Единый конфигурационный файл XML |
| Макс. количество каналов | 100 на крейт | Без ограничений | Без ограничений |
| Макс. скорость опроса | 4 канала – 50 Гц, прочие – 0,5 Гц | 200 Гц | 100 Гц |
| Поддерживаемые аппаратные средства | Мера, PXI | NI, VXI, Pressure Systems, ARINC | NI, PXI, LXI, VXI, Pressure Systems, ARINC |
| Интеграция с системами управления | Дискретные сигналы | Дискретные сигналы | Siemens Simatic, NI FieldPoint, дискретные сигналы |
| Формат выходных данных | BIN, TXT | XML, CSV | XML, CSV |

Однако опыт эксплуатации созданных УИВК показал, что возможность применения виртуальных инструментов LabView ограничена системами с небольшим количеством каналов и малыми частотами опроса. Поэтому в настоящее время разработан ряд собственных средств отображения быстро изменяющихся параметров.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ УИВК

В настоящий момент описанный УИВК внедрен на 7 испытательных стендах ОАО «НПО «Сатурн», общее число измерительных каналов на которых – 3500 для стационарных и переходных процессов и 70 для динамических процессов. В табл. 3 приведены основные характеристики созданного комплекса по сравнению с системами компании Мера и MDS Aero Support (система ProDAS).

Как следует из приведенных данных, созданный УИВК превосходит аналоги по функциональности и в то же время обеспечивает сокращение затрат на внедрение и эксплуатацию.

В заключение авторы статьи хотели бы выразить глубокую благодарность своим коллегам Соколову Ю. В., Мазаеву Н. Н., Гаврилову А. В., Круглову Д. В., без участия которых данная работа не была бы выполнена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виртуальная среда проектирования / Ю. А. Зеленков [и др.] // Открытые системы. 2010. № 7. С. 42–45.
2. MDS Aero Support Corporation [Электронный ресурс] URL: <http://www.mdsaero.com> (дата обращения 10.10.2010).

3. Cenco International [Электронный ресурс] URL: <http://www.cenco-international.com> (дата обращения 10.10.2010).

4. DSPcon [Электронный ресурс] URL: <http://www.dspcon.com> (дата обращения 10.10.2010).

5. LMS International [Электронный ресурс] URL: <http://www.lmsintl.com> (дата обращения 10.10.2010).

6. Зеленков Ю. А. Формирование ИТ-стратегии предприятия: архитектура, проекты, организация // Вестник РГАТА им. П. А. Соловьева. 2010. № 3(18). С. 190–198.

7. Business Process Model and Notation (BPMN). Version 1.2 [Электронный ресурс] URL: <http://www.omg.org/spec/BPMN/1.2/PDF> (дата обращения 10.10.2010).

8. Автоматизация процесса испытания авиационных ГТД на базе SCADA-системы LabView / Д. А. Ахмедзянов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 13, № 2 (35). С. 61–68.

ОБ АВТОРАХ

Журавлев Валерий Евгеньевич, нач. сектора ОАСУТП ОАО «НПО «Сатурн». Дипл. инженер по конструированию и производству РЭА (РАТИ, 1974). Иссл. в обл. автоматическ. методов измерения и управления.

Чувиллин Владимир Юрьевич, нач. отдела АСУТП ОАО «НПО «Сатурн». Дипл. инженер по конструированию и производству РЭА (РАТИ, 1981). Иссл. в обл. автоматическ. методов измерения и управления.

Зеленков Юрий Александрович, дир. по инф. технологиям ОАО «НПО «Сатурн». Дипл. инженер по газотурбинным двигателям (РАТИ, 1986). Канд. физ.-мат. наук по механике деформируемого твердого тела (СПбГУ, 1998). Иссл. в обл. АСУ, методов матем. моделирования и оптимизации.