

АРХИТЕКТУРА ПОЛУНАТУРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОТРАБОТКИ АВИАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Н.А. Захаров, В.И. Клепиков, Д.С. Подхватилин (НПП «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ»)

Рассмотрены архитектурные, аппаратные и программные решения, обеспечивающие построение стенда полунатурной отработки авиационного оборудования (АО). Стенд обеспечивает совместную работу специализированных блоков АО в жестком реальном времени, выполнен с использованием только российской электронной компонентной базы, с полностью открытым программным кодом.

Ключевые слова: полунатурный стенд, авиационное оборудование, имитационное моделирование.

Современная тенденция развития систем управления оборудованием самолетов и вертолетов состоит в применении распределенных архитектур. При этом микропроцессорные блоки управления интегрируются во все большее число агрегатов воздушного судна, и задача управления решается не в одном или нескольких процессорах центрального компьютера, а во взаимодействующих между собой узлах сети.

Имитационное моделирование работы узлов и агрегатов, входящих в состав распределенной системы, на этапе их отработки может выполняться в рамках высокоуровневой архитектуры (High Level Architecture — HLA). Технология HLA предполагает создание моделей силами разработчиков устройств. Модели устройств и связей между ними делаются с соблюдением соглашений формата HLA, что позволяет объединить их на одном компьютере в модель распределенной системы управления в целом.

На практике моделирование в среде HLA сталкивается с некоторыми ограничениями. В частности, моделирование взаимодействия узлов сети может выполняться со значительными погрешностями и не отражать в полной мере процессы, происходящие в реальной сети с фактически используемым кабельным планом и приемопередающими устройствами [1].

Более эффективным для отработки агрегатов авиационного оборудования в части их интеграции в единую систему в настоящее время является применение полунатурных стендов [2–4]. На полунатурном стенде электронные блоки агрегатов самолета объединяются в сеть, при этом марка и длина сетевых кабелей соответствуют реально используемым в бортовой сети самолета.

Устройства в составе распределенной системы управления на полунатурном стенде подключаются к системе распределенного моделирования. Система распределенного моделирования служит для имитации самолета в целом и отдельных его агрегатов. Для агрегатов, электронные блоки которых представлены на стенде, имитируется физическая часть агрегата. Для агрегатов и изделий, отсутствующих полностью, имитируется агрегат (изделие) в целом на уровне узла системы управления. Полное отсутствие агрегатов на стенде может быть обусловлено тем, что их разработка будет закончена позже имеющихся агрегатов. В ряде случаев включение громоздких и сложных изделий, таких как двигатель, нецелесообразно. Отсутствующие агрегаты система моделирования имитирует вместе с их электронными блоками.

Система распределенного моделирования является сложной многопроцессорной распределенной системой реального времени. Она строится в синхронно-временной архитектуре (СВА), основанной на синхронно-временном протоколе (СВП) [5]. Последний разработан специально для удовлетворения требованиям построения высоконадежных систем управления жесткого реального времени. За 25 лет своего развития идеология СВА пополнилась методиками, инструментарием и аппаратно-программными компонентами, обеспечивающими интегрированный подход ко всем этапам проектирования, начиная с декомпозиции системы и заканчивая ее реализацией.

Основным блоком СВА-системы является узел. Узел состоит из процессора с памятью, подсистемы ввода/вывода, коммуникационного СВП-контроллера, ОС и соответствующего прикладного ПО. Узел реализуется в едином модуле. Шина СВП объединяет узлы в кластер. СВП-шина вместе с коммуникационными контроллерами узлов образует в кластере коммуникационную систему, которая функционирует автономно от прикладного ПО в соответствии с определенным периодическим расписанием в режиме разделения времени.

Коммуникационная система читает сообщения (пакеты данных) сетевого интерфейса в определенные расписанием моменты времени и отправляет их в другие узлы. Моменты времени чтения и записи сообщений содержатся в едином для всех узлов расписании.

Проектирование СВА системы выполняется в два этапа. На первом этапе проектируется и отрабатывается расписание кластера, обеспечивающее передачу всех данных с нужной периодичностью. Расписание реализуется коммуникационной системой и никак не влияет на работу процессора узла. На втором этапе отрабатывается прикладное ПО, то есть модели систем и драйверы ввода/вывода.

СВА структура является альтернативным подходом к обеспечению временного и ресурсного разделения (partitioning) ПО по сравнению с подходами, реализованными в LynxOS, VxWorks, HLA, системе Комдив/Багет.

НПП «Дозор» успешно применил технологию СВА в нескольких системах управления самолетов, совместно с ПКК «Миландр» была разработана микросхема СВП контроллера.

Структура стенда представлена на рис. 1. Оборудование стенда размещено в помещениях приборного оборудования и в помещении инструктора и инженерно-технического состава.

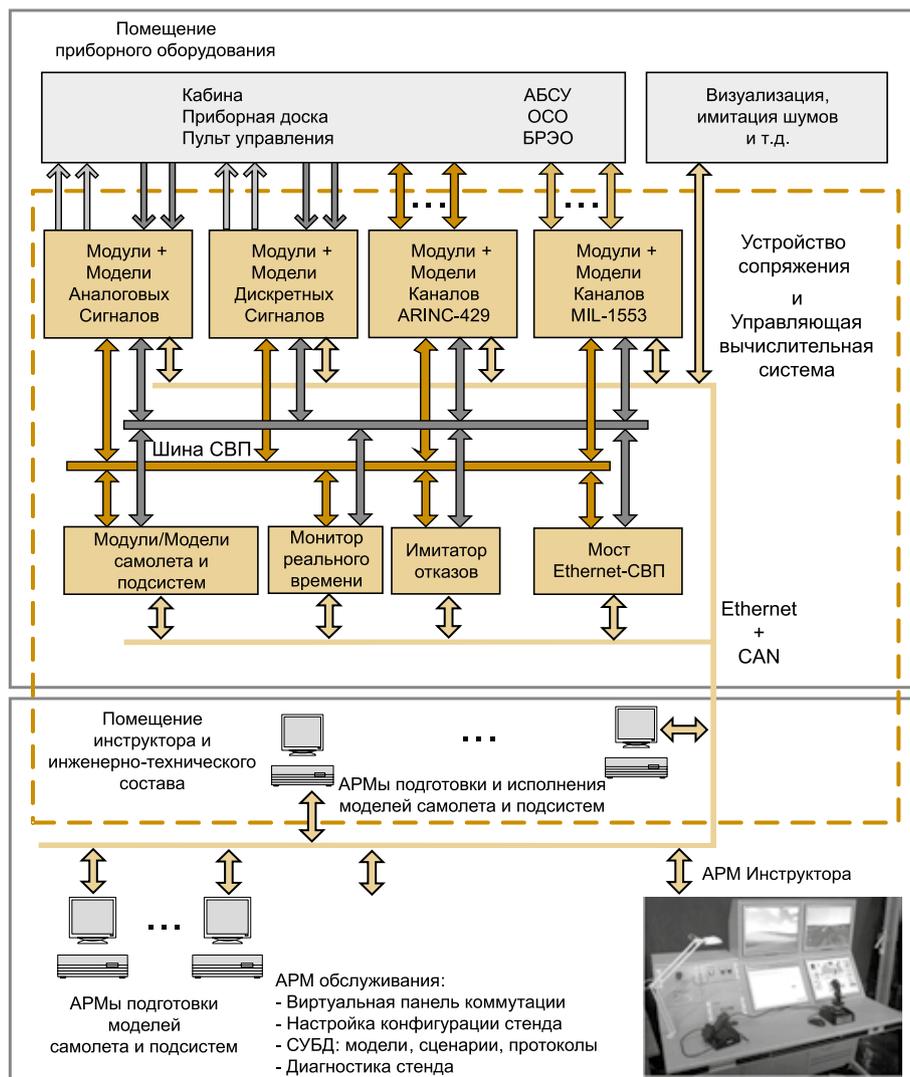


Рис. 1. Структура полунатурного стенда

В помещении приборного оборудования расположены:

- модель кабины пилота, приборная доска, пульт управления;
- натурное оборудование стенда (автоматическая бортовая система управления, общесамолетное оборудование, бортовое радиоэлектронное оборудование и т.д.);
- подсистемы визуализации и имитации шумов и др.;
- единый комплекс «Устройство сопряжения и управляющая вычислительная система». При этом «АРМ подготовки и исполнения моделей самолета и подсистем», относящиеся к данному комплексу, могут располагаться либо в помещении приборного оборудования, либо в помещении инженерно технического состава.

Между двумя помещениями, которые могут располагаться на расстоянии нескольких сотен метров, проложена волоконно-оптическая или проводная линия связи Ethernet. Дополнительно предусмотрена технологическая линия связи по каналу CAN.

Устройство сопряжения и управляющая вычислительная система работают как единая система распределенного моделирования, объединяющая по цифровой шине реального времени СВП модули устройства сопряжения, Модули исполнения моделей и АРМы исполнения моделей обеспечивают интеграцию в систему моделей, использованных в предыдущих версиях стендов и тренажеров.

Устройство сопряжения предназначено для:

- организации интерфейсных связей управляющей вычислительной системы стенда с оборудованием моделей кабины пилота, приборной доски, пульта управления и натурным оборудованием;
- приема и выдачи информации в шину реального времени СВП в соответствии с заданной циклограммой и расписание работы модулей;
- исполнения моделей отсутствующего или неиспользуемого натурального оборудования и элементов кабины пилота, приборной доски, пульта управления;
- имитации отказов натурального оборудования и элементов

кабины пилота, приборной доски и пульта управления.

Устройство сопряжения состоит из следующих модулей ввода/вывода: аналоговых и дискретных сигналов; каналов ARINC-429 и Mil-1553.

Все модули ввода/вывода дополнительно оснащены CAN интерфейсом для управления (при необходимости) дополнительным оборудованием стенда: электро- и гидроприводами, освещением, аварийной сигнализацией и т.д. (на схеме не показаны).

Конструктивно устройство сопряжения выполнено в виде стандартного крейта 6U со встроенным источником питания. В крейт набирается необходимое число модулей ввода/вывода. Крейт содержит дополнительные места для установки модулей ввода/вывода на случай расширения и модернизации стенда.

Модули содержат встроенные схмотехнические и программные средства контроля и самодиагностики, обеспечивающие в реальном времени обнаружение 100% отказов входных/выходных цепей модуля, а также исправность вычислительной части.

Результаты контроля и диагностирования передаются по сети Ethernet на сервер обслуживания стенда.

Модули содержат аппаратные средства имитации обрывов и коротких замыканий входных/выходных линий.

Устройство сопряжения содержит 100% комплектующих российского производства, работает под ОС uOS-178, которая в настоящее время проходит сертификацию в ГосНИИАС на соответствие стандарту ГОСТ Р 51904-200.

Модули ввода/вывода аналоговых, дискретных и цифровых сигналов, передаваемых по протоколам ARINC-429, Mil-1553 (рис. 2), реализованы на общей схемотехнической и программной платформе и представляют собой двухпроцессорные контроллеры, связанные в общую систему посредством двойной шины СВП. Дополнительно модули имеют технологические интерфейсы Ethernet, USB, CAN и RS-485.

Модули ввода/вывода обеспечивают:

- прием входной информации от датчиков и приборов стенда и передачу принятой информации в общее информационное пространство стенда по каналу СВП;
- прием из общего информационного пространства стенда выходных сигналов и передачу их на исполнительные устройства и приборы стенда;
- имитацию работы отсутствующих или неиспользуемых датчиков и приборов стенда.

Поддерживаются два режима имитации:

- «ручная», то есть оператор в любой момент может задать любое значение или любой закон изменения сигнала на входе/выходе имитатора;
- по встроенной модели реального времени, исполняемой на процессоре модуля ввода/вывода.

При работе в режиме имитации (моделирования) модули ввода/вывода обеспечивают:

- имитацию аналоговых датчиков (частот вращения, термопар, терморезисторов, датчиков давления, горения камер, вибраций, положений, потенциометров, дискретных);

- имитацию каналов связи (MIL-1553 (контроллер/оконечное устройство), ARINC-429, RS-485, CAN, Ethernet);

- имитацию аналоговых и дискретных исполнительных механизмов.

Основой модуля являются процессоры фирмы ПМК Миландр (г. Зеленоград) 1986BE91T с архитектурой ARM Cortex-M3.

Модули исполнения моделей представляют собой упрощенную реализацию модулей ввода/вывода, в которой отсутствуют интерфейсы взаимодействия с натурным оборудованием стенда. Они реализованы на той же схемотехнической и программной платформе, имеют интерфейсы Ethernet, USB, CAN и RS-485 и связаны в общую систему посредством того же интерфейса СВП, что модули ввода/вывода. Отсутствие интерфейсов с натурным оборудованием позволяет высвободить вычислительные мощности для выполнения моделей динамики самолета и систем.

Модели для исполнения на данной группе модулей формируются на APM подготовки моделей в соответствующей среде моделирования (Matlab/Simulink/StateFlow) или программирования (Fortran, C/C++). Подготовленные на APM модели записываются во flash-память модуля для последующего исполнения.

Особенностью данных модулей является то, что они могут быть использованы вне управляющей вычислительной системы как самостоятельные полнофункциональные вычислительные устройства. Это позволяет различным разработчикам моделей отрабатывать свои частные модели на своих рабочих местах (в своих организациях) и поставлять на стенд завершенное аппаратно-программное изделие. Применение СВП протокола гарантирует, что отработанная автономно модель будет работать в управляющей вычислительной системе абсолютно с такими же временными характеристиками. При этом полностью исключается взаимное нежелательное влияние других моделей как по времени использования вычислительной мощности, так и по использованию совместных ресурсов — памяти и каналов обмена.

Интеграция модулей исполнения моделей в среду реального времени осуществляется посредством процедур обмена данными по стандартному каналу Ethernet между АРМами стенда и модулем «Мост СВП-Ethernet».

Модуль «Мост СВП-Ethernet» обеспечивает синхронизацию обмена данными в реальном масштабе времени с аппаратурой стенда, модулями ввода/вывода и модулями исполнения моделей.

Модуль «Мост СВП-Ethernet» реализуется с использованием комплектующих только российского производства и работает под ОС uOS-178.

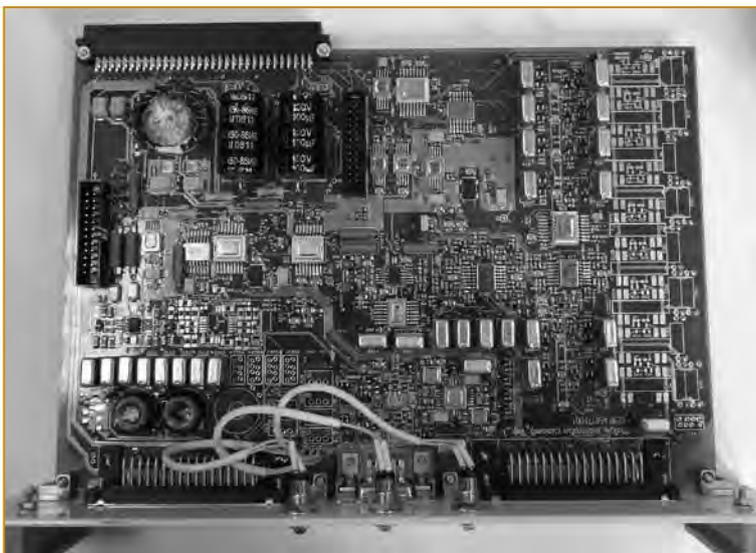


Рис. 2. Типовой модуль ввода/вывода

Модуль мониторинга работы сетевой структуры обеспечивает в реальном времени независимое от работы других модулей и моделей чтение всей информации, циркулирующей по шине СВП, и ее передачу по каналу Ethernet на АРМ обслуживания стенда для ее последующего анализа.

Модуль имитации отказов содержит набор моделей отказов, которые параметрически настраиваются от АРМа инструктора и вырабатывают команды управления и корректирующие искажения для любых данных, циркулирующих в общем информационном пространстве канала СВП.

Предусматриваются следующие основные модели отказов:

- обрыв входной/выходной линии — данные виды отказов реализуются модулем ввода/вывода путем физического отключения соответствующей линии;
- короткое замыкание (к.з.) входной/выходной линии — данные виды отказов реализуются модулем ввода/вывода путем физического замыкания соответствующей линии, при этом для выходной линии натурного оборудования сохраняется штатная нагрузка, чтобы она не вышла из строя;
- логическая имитация обрывов и к.з. — реализуются путем подачи в СВП шину данных, соответствующих граничным значениям сигнала;
- имитация линейного дрейфа — задается время начала дрейфа, его скорость и время окончания дрейфа или конечная величина дрейфа;
- имитация скачка — задается время появления и величина скачка;
- имитация повышенного шума — задается время появления, продолжительность, амплитуда и тип (синусоидальный или белый) шума.

На АРМах подготовки моделей могут быть разработаны специфические модели отказов, которые могут исполняться как на модулях исполнения моделей, так и на модуле имитации отказов.

АРМы подготовки моделей предназначены для подготовки исполняемого кода на модулях исполнения моделей. Для данных АРМ силами НПП «Дозор» в среде моделирования Matlab/Simulink/StateFlow разрабатывается специальное ПО, позволяющее переносить отработанные модели в память модулей исполнения моделей с полным исключением процесса пользовательского программирования. При этом разработанные модели автоматически подключаются к циклограмме и расписанию обмена по шине СВП, что обеспечивает их автоматическую интеграцию в среду управляющей вычислительной системы.

При необходимости для АРМов подготовки моделей может быть разработано специальное ПО, позволяющее переносить в модули исполнения моделей также код, разработанный в средах программирования Fortran и C/C++.

Специальное ПО АРМов подготовки моделей совместно с модулями исполнения моделей может использоваться разработчиками автономно от управляющей вычислительной системы.

В качестве основной среды моделирования используется широко распространенная система Matlab/Simulink/StateFlow и развиваемый ею модельно-ориентированный подход к разработке ПО, что существенно снижает время разработки и отладки. Активно используется входящий в состав Simulink набор блоков для моделирования авиационных систем и внешних факторов, часто применяемых при моделировании воздушного судна. Данный набор блоков называется Aerospace Blockset.

Он включает:

- уравнения, моделирующие движение самолета;
- модели двигательной установки, авиационных датчиков, приводов разного рода;
- модели атмосферы, земного притяжения, ветров, магнитных полей;
- блоки преобразования величин из одних систем измерения в другие, преобразования систем координат;
- прочие типовые модели.

При применении Aerospace Blockset возможно использование 3D-симулятора полета самолета FlightGear. Данный симулятор позволяет системному инженеру визуально оценить динамику летательного аппарата на этапе проектирования модели того или иного агрегата до интеграции модели в управляющую вычислительную систему.

НПП «Дозор» имеет опыт по разработке подобной системы, в которой алгоритмы проектируются в среде Matlab/Simulink, а затем интегрируются в виде задач ОС uOS-178, содержащей исходный код поддержки аппаратного обеспечения. Операционная система для встроенных применений uOS-178 представляет собой ПО с открытым исходным кодом. Использование uOS-178 ориентировано на применение свободных программных средств компиляции и отладки: GCC, Eclipse. НПП «Дозор» обеспечивает развитие и поддержку данной ОС.

АРМы подготовки и исполнения моделей самолета и подсистем предназначены для интеграции в среду стенда моделей, разработанных для предыдущих версий пилотажных тренажеров и стендов в ОС DOS и Windows.

На данных АРМах могут быть запущены модели, разработанные на различных языках, например, Fortran, и различных внутрикорпоративных графических системах моделирования.

Все модели на данных АРМах подготавливаются в своих системах программирования и запускаются в среде Windows как отдельные .exe файлы.

Предусмотрена возможность перевода в процессе развития стенда моделей, исполняемых на АРМах подготовки и исполнения моделей, на модули исполнения моделей с соответствующей подготовкой моделей на АРМах подготовки.

АРМ обслуживания стенда предназначено для:

- настройки физической конфигурации стенда, то есть для задания перечня натурного оборудования и набора физических каналов ввода/вывода;

- настройки логической конфигурации стенда, то есть для задания набора математических моделей и связей между ними;
- поддержки СУБД моделей, конфигураций, сценариев и протоколов информационного обмена;
- предоставления информации о результатах диагностики стенда;
- других сервисных функций.

Благодаря СВП протоколу все модули работают в едином информационном пространстве, содержащем всю входную/выходную натурную и модельную информацию. В АРМ обслуживания стенда реализуется механизм «виртуальной панели коммутации», который позволяет без изменения физической конфигурации стенда (то есть без выполнения перекоммутации разъемов) настраивать логические связи между входами и выходами моделей для создания требуемой конфигурации стенда.

АРМ инструктора содержит аппаратно или программно реализованные органы управления, позволяющие оператору управлять всеми данными, необходимыми для перевода бортовых систем в особые или аварийные ситуации работы, для задания метеословий, например, положения нижней кромки облаков и дальности видимости, направления и скорости бокового ветра и т. д.

На мониторы АРМа инструктора выводится изображение, видимое обучаемым экипажем, ведется запись переговоров, отображается информация о состоянии органов управления, расположенных в кабине пилота.

АРМ инструктора выполняет функции конфигурирования сценариев обучения и ведения базы данных обучаемых, выполненных ими заданий и их успехов.

АРМ сохраняет «трассы» изменения указанных инструктором параметров при выполнении учебного сценария на жесткий диск с возможностью последующего просмотра в виде графиков. Данная функция

необходима инструктору для демонстрации обучаемым их ошибок, а также разработчикам моделей и оборудования для анализа правильности работы систем в тех или иных ситуациях, созданных в процессе моделирования на стенде.

Обмен данными АРМ инструктора с устройством сопряжения и управляющей вычислительной системой осуществляется по каналу Ethernet через модуль «Мост Ethernet-СВП». Также по каналу Ethernet АРМ инструктора взаимодействует с системами визуализации, имитации шумовой обстановки и др.

Программное обеспечение АРМ инструктора реализуется в ОС МСВС, разрешенной к применению в ВВС РФ. В качестве инструментальных средств программирования используются открытые, свободно распространяемые инструменты GCC, Eclipse и QT4, которые позволяют выполнить сертификацию ПО по ГОСТ Р 51904.

Для выполнения указанных выше задач необходима разработка типовых программных образов элементов управления и отображения информации. Помимо универсальных графических элементов отображения возможна разработка специфичных для задач индикаторов.

Программы отображения графических элементов разрабатываются инженерами-программистами по эскизам инструкторов и не подлежат оперативному изменению. Размещение же элементов на экране может быть сконфигурировано самим инструктором с помощью специального программного средства — редактора экранов, позволяющего также разместить на экране статический текст, числовые поля для отображения параметров и органы подачи стимулов в виде кнопок, движков и пр. На рис. 3 приведен пример экрана, разработанного в редакторе.

В качестве редактора экранов возможно использование программного средства с открытым исходным кодом коммерческого качества Qt Creator.

Оперативная информация может отображаться на экранах АРМа инструктора также в виде графиков. Параметры, отображаемые на графическом поле, выбираются инструктором или техническим специалистом из списка всех доступных параметров. Это могут быть параметры имитируемого полета (высота, скорость, давление и пр.), входные/вы-

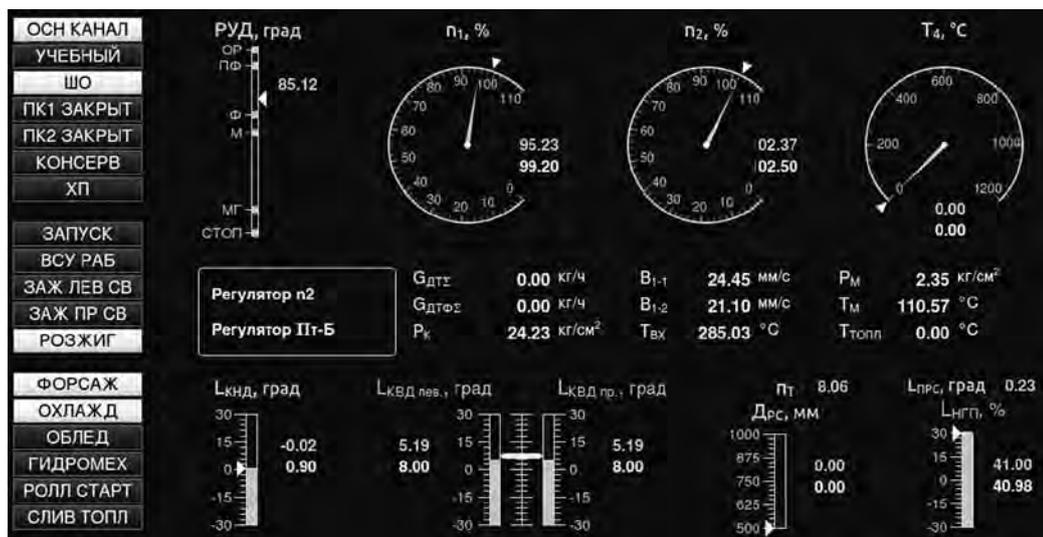


Рис. 3. Пример экрана, разработанного в редакторе экранов

ходные параметры моделей оборудования, выходные параметры подключенного реального оборудования.

Для возможности анализа произведенных полетов, качества работы оборудования и правильности действий экипажа значения параметров записываются в специальный файл — трассу, который впоследствии может быть считан и отображен на экране в виде графиков.

В АРМ инструктора заложена функция задания сценария моделирования. Имеются в виду некоторые начальные условия, формирующие обстановку для обучаемого экипажа: размещение объектов (аэропортов, взлетных полос, моделируемого самолета, окружающих самолетов и облаков, характер их движений и т. д.), конфигурация оборудования моделируемого самолета (наличие или отсутствие тех или иных блоков, наличие отказов в оборудовании) и задачи, которые должен выполнить экипаж.

Для выполнения этой функции АРМ содержит редактор сценариев. Редактор позволяет изменить состав объектов в моделируемом сценарии и для каждого объекта задать начальные значения набора свойств. Типы объектов и состав их свойств задаются разработчиками стенда, и только разработчики стенда могут их изменить по требованию. Инструктор может добавить в сценарий только объекты из разработанного набора.

Разработанный сценарий целесообразно хранить в виде XML-файлов — текстовых файлов, использующих расширенный язык разметки. Каждый объект сценария представлен в этом формате узлом — элементом, ограниченным скобками вида <Объект> и </Объект>. Язык имеет удобные способы для задания свойств элементов и вообще для хранения структурированной информации.

Отметим, что XML является хорошо отлаженной технологией, широко используемой во всем мире, в частности, в сети Internet. Для поддержки работы с языком имеется большое число библиотек с открытым исходным кодом. Одна из таких библиотек входит в инструментарий Qt.

Состав моделей стенда в каждом конкретном «прогоне» стенда также является частью сценария. Редактор сценариев должен предоставлять возможность указания конкретного состава моделей и оборудования.

В процессе разработки и отладки моделей оборудования появится несколько версий моделей каждого блока, которые необходимо сохранить. Например,

простая модель; усложненная модель; модель, имитирующая отказ или сбой в блоке и пр. Число сценариев также будет расти по мере использования стенда. Данные об обучаемых необходимо хранить и представлять на экране АРМа инструктора в структурированном виде.

Задачу хранения можно также решить с помощью системы файлов, использующих язык XML. Но можно применить и реляционную СУБД. Концепция СУБД в настоящее время отлично проработана и используется в массе проектов. Имеются отличного качества СУБД с открытым исходным кодом, такие как MySQL и PostgreSQL. Преимуществом использования СУБД является встроенная в них система ограничения доступа и возможность распределения хранения по сети. Инструментарий Qt имеет в своем составе средства для доступа к указанным СУБД, а также ко многим другим.

Описанный подход к хранению и обработке данных применяется специалистами НПП «Дозор» для разработки средств наземного контроля и диагностики оборудования самолетов.

Рассмотренный стенд предназначен для отработки системы управления авиационным оборудованием и ее компонентов. Наличие в его составе АРМ инструктора и функциональные возможности по моделированию работы агрегатов самолета и полета в целом позволяют создавать на его основе тренажеры для обучения летного состава, унифицированные с рассмотренным стендом по оборудованию и ПО.

Список литературы

1. Shupeng Zheng, Jingfeng He, Jun Jin, Junwei Han. DDS Based High Fidelity Flight Simulator. 2009 WASE International Conference on Information Engineering.
2. Погосян М.А., Поляков В.Б., Чекин М.Г. Технические средства обучения и полунатурное моделирование конкурентоспособной военной и гражданской авиационной техники. // Наука и технологии в промышленности №3. 2011. с. 52-56.
3. Грибов Д.И., Смелянский Р.Л. Комплексное моделирование бортового оборудования летательного аппарата. // <http://old.lvk.cs.msu.su/files/mco2005/Smelanskii.pdf>.
4. Баранов А.С., Грибов Д.И., Поляков В.Б., Смелянский Р.Л., Чистилинов М.В. Комплексный стенд математического моделирования КБО ЛА // http://lvk.cs.msu.su/~ashalimov/doc/MCO09_-_part2.pdf.
5. Захаров Н.А., Клепиков В.И., Подхватилин Д.С. Синхронно-временной протокол для распределенных систем управления // Автоматизация в промышленности № 2. 2013. с. 37-39.

Захаров Николай Анатольевич — канд. техн. наук, начальник отдела,
Клепиков Владимир Иванович — канд. техн. наук, заместитель руководителя по науке и новым технологиям,

Подхватилин Дмитрий Станиславович — начальник отдела научно-производственное подразделение «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ».

Контактный телефон (495) 640-09-47.

E-mail nazakharov@npp-dozor.ru