

УДК 629.7.018

## АРХИТЕКТУРА КОМПЛЕКСА ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

С. А. Белоконь, Ю. Н. Золотухин, М. Н. Филиппов

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: serge@idisys.iae.nsk.su*

Представлен программно-аппаратный комплекс, предназначенный для разработки и полунатурного моделирования систем управления летательными аппаратами, реализующий функции построения математической модели объекта, создания алгоритмов и программного обеспечения бортового радиоэлектронного оборудования и наземного пункта управления, а также визуализации трёхмерной модели аппарата и закабинной обстановки в режиме тренажёра.

*Ключевые слова:* полунатурное моделирование, математическое моделирование, летающие динамически подобные модели, пилотажно-навигационный комплекс, наземный пункт управления.

DOI: 10.15372/AUT20170405

**Введение.** Лётные испытания нередко связаны с большим риском потери опытного образца, что является основной причиной неполного изучения поведения летательного аппарата в таких опасных режимах полёта, как штопор, сваливание, манёвры на больших углах атаки. Использование только компьютерного моделирования в качестве промежуточного этапа между исследованиями в аэродинамической трубе и лётными испытаниями также не позволяет получить достоверный прогноз поведения самолёта на критических режимах полёта, поскольку для них часть аэродинамических характеристик может быть получена с необходимой степенью точности только в натурных испытаниях.

С 2012 года Институт автоматики и электрометрии (ИАиЭ) СО РАН и АО «НовосибНИАТ» совместно работают над одним из наиболее перспективных методов решения данной проблемы — технологией оценки аэродинамических и пилотажных характеристик летательных аппаратов с использованием свободно летающих динамически подобных моделей. Последние представляют собой беспилотные летательные аппараты научно-исследовательского назначения, способные совершать автономный или дистанционно управляемый полёт по заданной программе и обеспечивающие возможность регистрации получаемой в полёте информации.

В рамках данной работы создан программно-аппаратный комплекс полунатурного моделирования систем управления беспилотными летательными аппаратами, предоставляющий функции разработки математической модели объекта, исследования характеристик системы управления в различных условиях полёта, создания алгоритмов и программного обеспечения наземного пункта управления (НПУ) и бортового радиоэлектронного оборудования, а также визуализации трёхмерной модели аппарата и закабинной обстановки в режиме тренажёра.

Стенды имитационного и полунатурного моделирования давно разрабатываются в России и за рубежом для моделирования систем автоматического управления летательными аппаратами и визуализации полёта в различных режимах, тестирования алгоритмов

пилотирования, для сопровождающего моделирования летательных аппаратов, в качестве тренажёров для пилотов и т. д. [1–4].

Отличительной особенностью разработанного в ИАиЭ СО РАН программно-аппаратного комплекса являются встроенные функции поддержки технологии динамически подобных летающих моделей, в частности, поддержки анализа, сравнения и итерационного уточнения математического описания объекта по результатам лётных испытаний, а также реализация метода полунатурного моделирования, позволяющего задействовать как установленный на самолёте пилотажно-навигационный комплекс (ПНК), так и наземный пункт управления для регистрации и отображения телеметрических данных в реальном времени и проверки функционирования системы в целом.

Таким образом, целью данной работы являлось создание программно-аппаратного комплекса полунатурного моделирования, предоставляющего следующие ключевые возможности:

- 1) построение математических моделей объекта и системы автоматического управления;
- 2) разработка алгоритмов и программ бортового радиоэлектронного оборудования и наземного пункта управления;
- 3) исследование динамики летательного аппарата и визуализация полёта;
- 4) тестирование пилотажно-навигационного комплекса и наземного пункта управления;
- 5) использование тренажёра лётчиком-оператором и инженером-оператором;
- 6) управление беспилотными летательными аппаратами в автоматическом и ручном режимах полёта;
- 7) идентификация и корректировка модели по результатам лётных испытаний.

**Структура комплекса.** Функциональность и структура программно-аппаратного комплекса естественным образом вытекают из требований технологии динамически подобных летающих моделей, положенной в основу разработки.

На структурной схеме комплекса полунатурного моделирования (рис. 1) представлены следующие элементы:

- автоматизированное рабочее место (АРМ) моделирования (среда MATLAB/Simulink);
- АРМ визуализации (авиасимулятор FlightGear);
- макет наземного пункта управления: АРМ инженера, АРМ пилота, контроллер модема, эмулятор радиолинии;
- макет летательного аппарата: пилотажно-навигационный комплекс, сервоприводы.

На рисунке синим цветом выделены линии связи, задействованные при программно-аппаратном тестировании, зелёным — видеоканал макета носовой камеры самолёта.

При реализации программного обеспечения стенда полунатурного моделирования использовано модульное построение с изолированными рабочими пространствами (контейнерами), которые могут исполняться одновременно как на одном, так и на нескольких компьютерах локальной технологической сети, что позволяет: использовать сложные модели летательных аппаратов и систем автоматического управления, требующие значительных вычислительных ресурсов; активировать несколько систем визуализации одновременно (ракурсы и сценарии); имитировать оборудование и линии обмена командной и телеметрической информацией посредством динамически подключаемых программных модулей; реорганизовать рабочие места разработчиков математических моделей и программного обеспечения по мере необходимости.



Рис. 1. Схема комплекса полунатурного моделирования

**Моделирование и визуализация.** Математическое описание летательного аппарата (включая модели системы управления, датчиков, исполнительных механизмов, радиолинии) и окружающей среды (силы и моменты реакции опоры, аэродинамических возмущений и т. д.) осуществляется на включённом в состав комплекса АРМ моделирования, которое представляет собой одно или несколько рабочих мест (в стандартной конфигурации разделены рабочие пространства модели физического объекта и модели системы управления), оборудованных средой разработки MATLAB/Simulink с расширениями Aerospace Toolbox и Aerospace Blockset.

На рис. 2 в качестве примера представлен видеокادر MATLAB/Simulink модели летательного аппарата ЛЛ (летающая лаборатория). Для первоначального описания аэродинамических характеристик объекта (блок Forces and Moments) использованы материалы, полученные при исследовании макета аппарата в аэродинамической трубе. Пространственное движение летательного аппарата задаётся блоком 6DOF, адаптированным к стандартизованной в России системе координат [5]. Описание летательного аппарата также включает блоки моделей: шасси (Gears), двигателя (Engine), сервоприводов (Actuators), датчиков (Sensors) и окружающей среды (Environment). Сопряжение модели летательного аппарата с моделью системы автоматического управления, средой визуализации и макетом наземного пункта управления осуществляется специализированными блоками ввода—вывода (Controller Outputs, Flightgear Environment, To Flightgear и Model Outputs).

Итерационное уточнение математической модели по результатам лётных экспериментов посредством процедуры сопровождающего моделирования позволяет достичь заметно

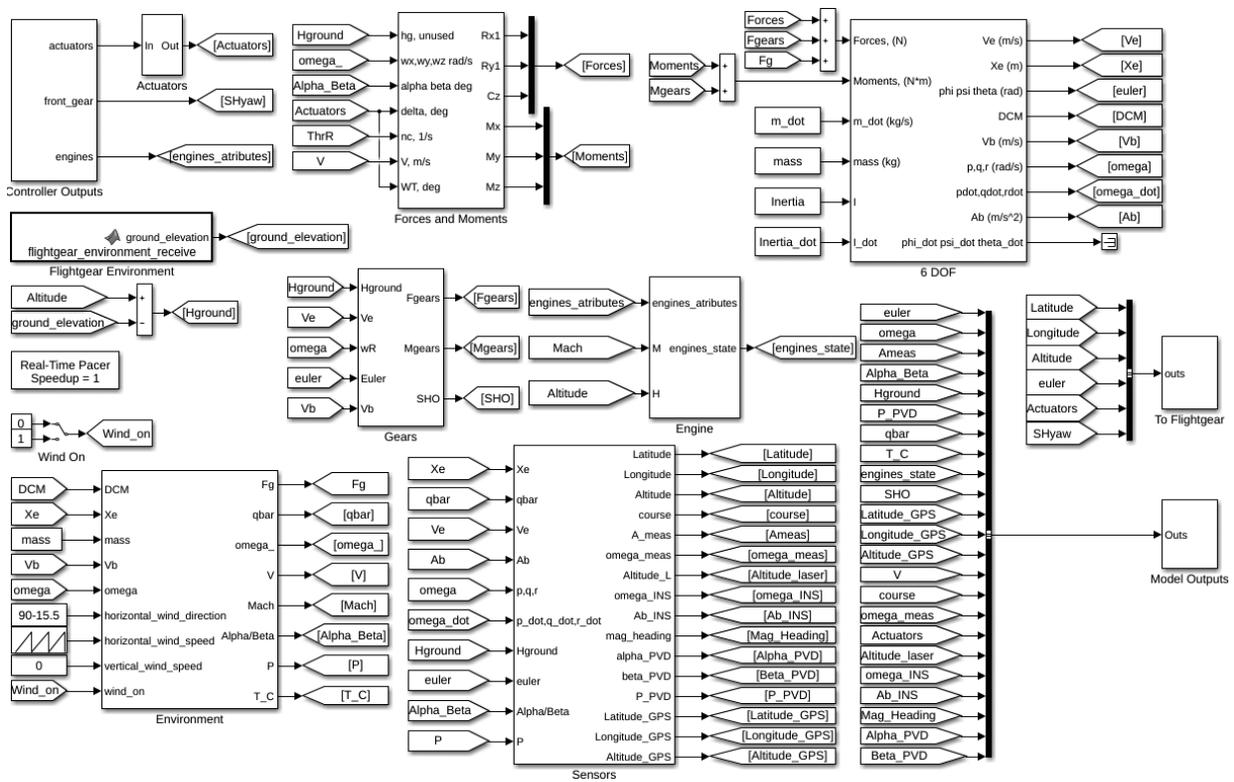


Рис. 2. Модель летательного аппарата в системе MATLAB/Simulink

большой точности описания объекта, чем при использовании данных, полученных только в аэродинамической трубе. В качестве примера на рис. 3 приведены графики сравнения модельных (красный цвет) и экспериментальных (синий) данных после проведенной процедуры уточнения коэффициентов.

Модель системы автоматического управления (Controller) в типовой конфигурации отделена от модели объекта для более точной имитации реального программного обеспечения ПНК, которое в отличие от MATLAB/Simulink модели летательного аппарата работает в режиме вычислений с фиксированным шагом на постоянной частоте 100 Гц. Общая схема функционирования приведена на рис. 4: в контроллер поступают информация о состоянии объекта управления (блок From Plant\_II) и команды от органов управления (блок From RC). Далее, в зависимости от показаний датчиков и выбранного режима полёта выбирается закон управления (прямое управление, возврат на базу, планирование, стаби-

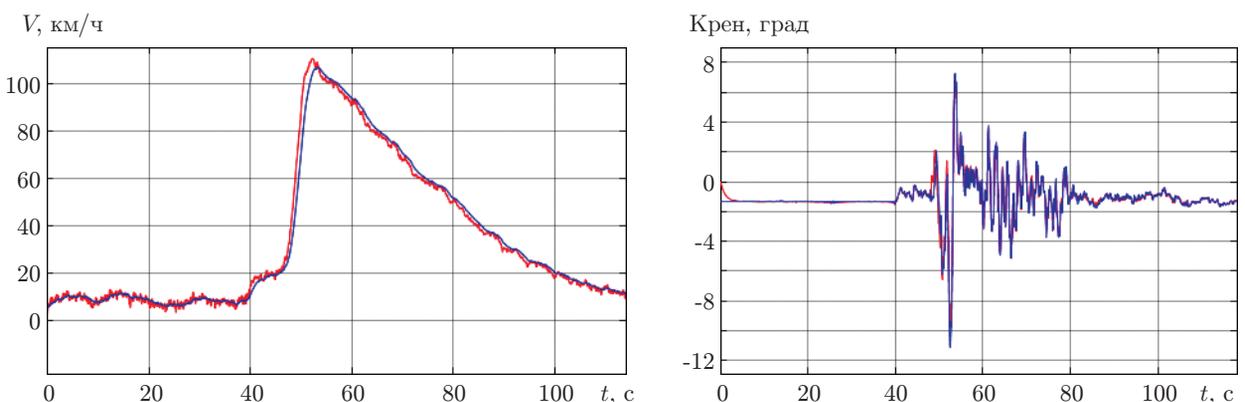


Рис. 3. Сравнение модельных и экспериментальных данных (приборная скорость и угол крена)

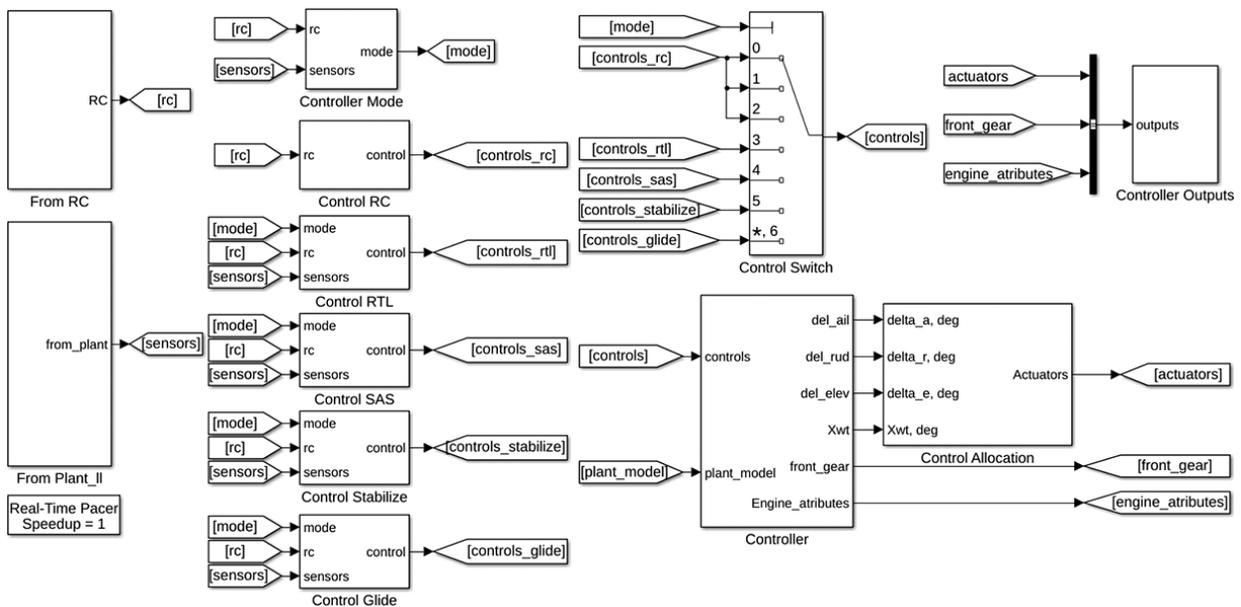


Рис. 4. Модель системы автоматического управления в MATLAB/Simulink

лизация) и рассчитываются необходимые параметры управляющих контуров. На следующем шаге вычисляются требуемые для выполнения заданного манёвра управляющие воздействия, которые затем распределяются по исполнительным механизмам (блок Control Allocation) и поступают на выходы контроллера (блок Controller Outputs).

Отдельные алгоритмы системы управления рассматривались в работах [6, 7]. В качестве примера на рис. 5 приведена траектория полёта в автоматическом режиме «возврат на базу», который активируется либо при отказе управляющей радиолнии, либо пилотом вручную. На параметры полёта при этом накладывается ряд ограничений по высоте, скорости, максимальным углам ориентации и радиусу поворота вокруг заданной точки.

Визуализация трёхмерной модели летательного аппарата и кабины обстановки реализована на основе свободно распространяемого авиасимулятора с открытым исходным кодом FlightGear, который поддерживает режим отображения информации, получаемой от внешней модели динамики полёта. Обмен информацией между АРМ моделирования и АРМ

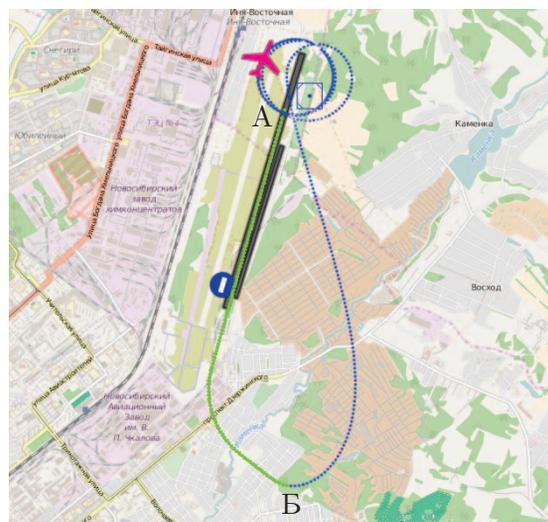


Рис. 5. Траектория полёта в режиме «возврат на базу»

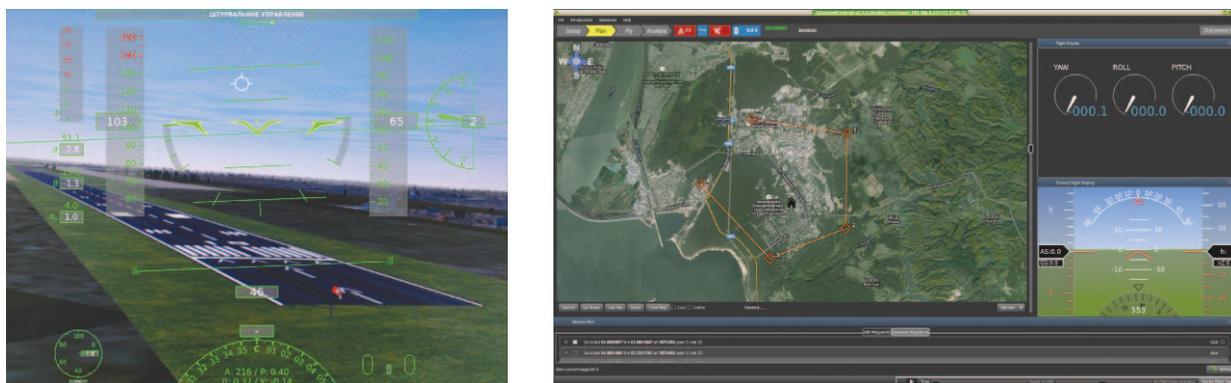


Рис. 6. Видеокадры АРМ пилота и АРМ инженера

визуализации реализован через промежуточную высокоскоростную базу данных Redis с помощью разработанных блоков MATLAB/Simulink и сетевого программного адаптера, что позволяет обеспечить одновременный доступ нескольких программ к разделяемым данным и их независимую работу в режиме реального времени.

**Макет наземного пункта управления.** Наземный пункт управления предназначен для дистанционного управления беспилотными летательными аппаратами и включает АРМ пилота, осуществляющего непосредственное управление самолётом, и АРМ инженера, контролирующего состояние оборудования и параметры полёта.

Автоматизированное рабочее место пилота оборудовано органами управления самолётом: джойстиком, блоком управления двигателем и педалями (Thrustmaster HOTAS Warthog Replica USAF A-10C и Saitek Combat Rudder Pedals), которые через эмулятор радиолинии подключаются либо к модели системы автоматического управления, либо при программно-аппаратном тестировании непосредственно к бортовому ПНК (см. рис. 1).

Специально разработанное программное обеспечение предназначено для преобразования и отображения поступающей видео- и телеметрической информации на экране монитора в формате «индикатор на лобовом стекле» (рис. 6). В режимах моделирования и тренажёра видеоданные поступают от макета носовой камеры самолёта, направленной на экран АРМ визуализации, что позволяет учесть задержки при получении и обработке изображений на реальном оборудовании.

В качестве базовой версии программного обеспечения на АРМ инженера установлен доработанный пакет с открытым исходным кодом QGroundControl, предоставляющий отображение карты местности и текущего положения самолёта (см. рис. 6), контроль технического состояния оборудования в виде индикаторов и графиков, подготовку и ввод полётного задания, а также запись, хранение и воспроизведение полученной информации.

**Заключение.** Создан программно-аппаратный комплекс, предназначенный для разработки и полунатурного моделирования систем управления летательными аппаратами. Реализованы функции построения математической модели объекта, создания алгоритмов и программного обеспечения бортового радиоэлектронного оборудования и наземного пункта управления, а также визуализации трёхмерной модели аппарата и за кабиной обстановки в режиме тренажёра.

Разработанный комплекс использован для исследования динамически подобных моделей при наземных и лётных испытаниях образцов перспективных летательных аппаратов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чертков М. С., Андреев С. В., Ильиных В. В. и др.** Алгоритмическое и аппаратное обеспечение стенда имитации динамики полёта объекта // Тр. Междунар. симп. «Надёжность и качество». Пенза: Изд-во Пензенского гос. ун-та, 2011. С. 165–166.

2. **Макаров И. В.** Имитационное моделирование полёта комплекса беспилотного летательного аппарата // НПО «Автономные аэрокосмические системы — ГеоСервис» — Новости и статьи. 7.03.2017. URL: <http://uav-siberia.com/content/imitacionnoe-modelirovanie-polyota-kompleksa-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata> (дата обращения: 28.04.2017).
3. **Матвеев А. В., Махуков А. А.** Сопровождающее моделирование в процессе летных испытаний беспилотных летательных аппаратов // Электронный журнал «Труды МАИ». 2011. Вып. 45. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=25461> (дата обращения: 28.04.2017).
4. **Murch A. M.** A flight control system architecture for the NASA AirSTAR flight test infrastructure // Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit (AIAA 2008-6990). Honolulu, USA, 2008. P. 1–8.
5. **ГОСТ 20058-80.** Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. М.: Изд-во стандартов, 1981. 51 с.
6. **Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А.** Управление угловым положением летательного аппарата // Автометрия. 2015. **51**, № 5. С. 35–41.
7. **Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А.** Планирование маршрутов движения летательного аппарата с использованием гладких траекторий // Автометрия. 2017. **53**, № 1. С. 3–11.

*Поступила в редакцию 28 апреля 2017 г.*

---