

УДК 629.7.018

МОБИЛЬНЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛЁТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

© С. А. Белоконов¹, Д. С. Деришев², Ю. Н. Золотухин¹,
К. Ю. Котов¹, А. С. Мальцев¹

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²Акционерное общество «Новосибирский научно-исследовательский институт авиационной
технологии и организации производства»,
630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 15
E-mail: serge@idisys.iae.nsk.su

Представлен разработанный и реализованный программно-аппаратный комплекс для проведения лётных экспериментов, обеспечивающий работу в режимах стенда полунатурного моделирования, комплекса подготовки экипажа летательного аппарата и наземного пункта управления. Выделены назначение и функциональные особенности каждого из режимов работы комплекса. Приведены результаты исследований с использованием разработанного комплекса на примере дистанционно управляемого летательного аппарата — летающей лаборатории.

Ключевые слова: полунатурное моделирование, лётные испытания, пилотажно-навигационный комплекс, наземный пункт управления, подготовка экипажа.

DOI: 10.15372/AUT20210402

Введение. В ИАиЭ СО РАН разработана архитектура комплекса полунатурного моделирования для создания и тестирования систем автоматического управления беспилотными летательными аппаратами [1]. Этот комплекс реализован и использован при разработке систем управления для перспективных летательных аппаратов.

На этапе лётных испытаний и сопровождающего моделирования возникла необходимость создания мобильного комплекса, который в дополнение к характеристикам, указанным в [1], должен обеспечивать следующие требования: компактность, мобильность, эргономичность, малое энергопотребление, малое время на подготовку данных для экспресс-анализа.

Для реализации данных требований комплекс подвергся существенной модернизации в части как аппаратного, так и программного обеспечения: рабочие места для моделирования объекта и системы автоматического управления, для визуализации закабинной обстановки, для пилота и инженера реализованы на базе одного вычислителя; физический макет носовой камеры летательного аппарата заменён виртуальным монитором с системой визуализации и индикации на лобовом стекле; обновлены и дополнены протоколы взаимодействия программных модулей; добавлен блок подготовки данных для экспресс-анализа.

Целью работы является исследование и разработка мобильного программно-моделирующего комплекса, предназначенного для наземной отладки алгоритмов управления, экспериментальной отработки элементов бортового радиоэлектронного оборудования, а также выполнения испытательных полётов модели в ручном и автоматическом режимах.

Особенности реализации комплекса. Представленный комплекс (рис. 1) обеспечивает работу в трёх режимах:

- 1) стенд полунатурного моделирования,

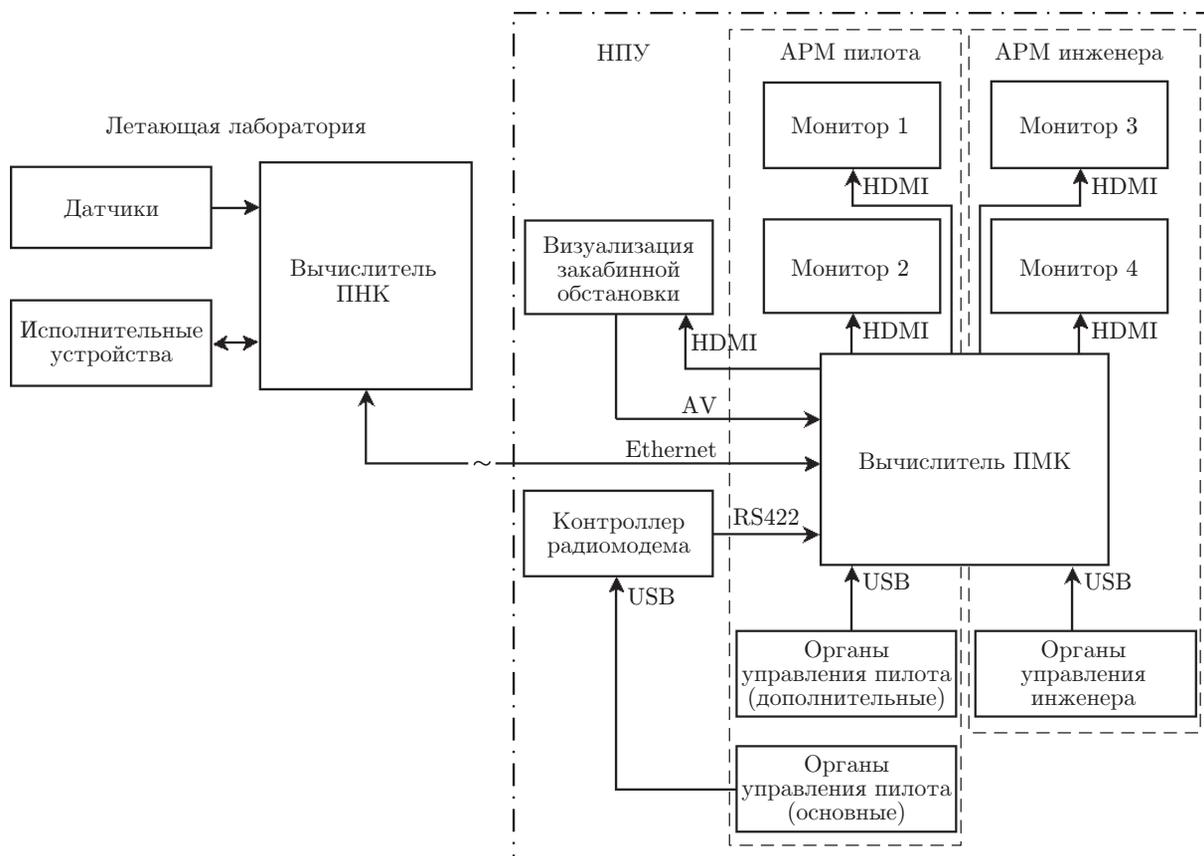


Рис. 1. Комплекс полунатурного моделирования

- 2) предполётные тренировки экипажа в полевых условиях,
- 3) наземный пункт управления.

В состав комплекса (см. рис. 1) входят следующие основные компоненты:

- программно-моделирующий комплекс (ПМК),
- пилотажно-навигационный комплекс (ПНК),
- наземный пункт управления (НПУ),
- летающая лаборатория (ЛЛ).

Стенд полунатурного моделирования предназначен для разработки и тестирования систем автоматического управления полётом беспилотных летательных аппаратов, модулей работы с бортовым оборудованием, датчиками, исполнительными устройствами.

При реализации программного обеспечения стенда полунатурного моделирования использовано модульное построение с отдельными рабочими пространствами, которые расположены в пределах одного компьютера (рис. 2, 3).

Обмен данными между отдельными элементами системы (модель летательного аппарата, модель системы управления, система визуализации, макет наземного пункта управления) осуществляется с помощью нереляционной базы данных Redis и системы обмена сообщениями ROS [2].

В целях исследования модели функционирования изделия, отражающей основные параметры движения изделия и функционирования бортового оборудования, работа программно-моделирующего комплекса должна осуществляться в следующих основных режимах: «модель в контуре управления» (Model-In-the-Loop, MIL) и «оборудование в контуре управления» (Hardware-In-the-Loop, HIL).

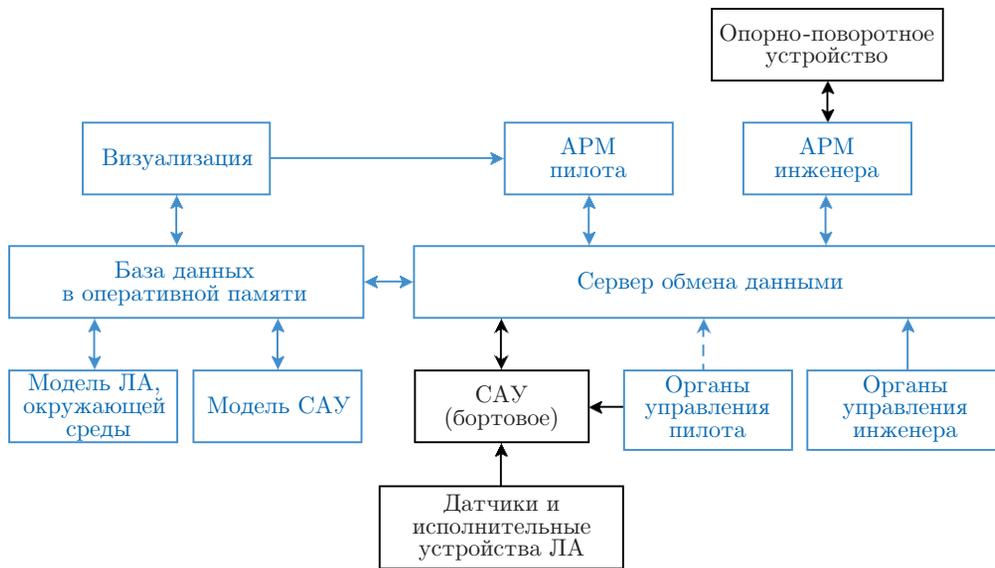


Рис. 2. Структурная схема программно-моделирующего комплекса в режиме тренировок экипажа

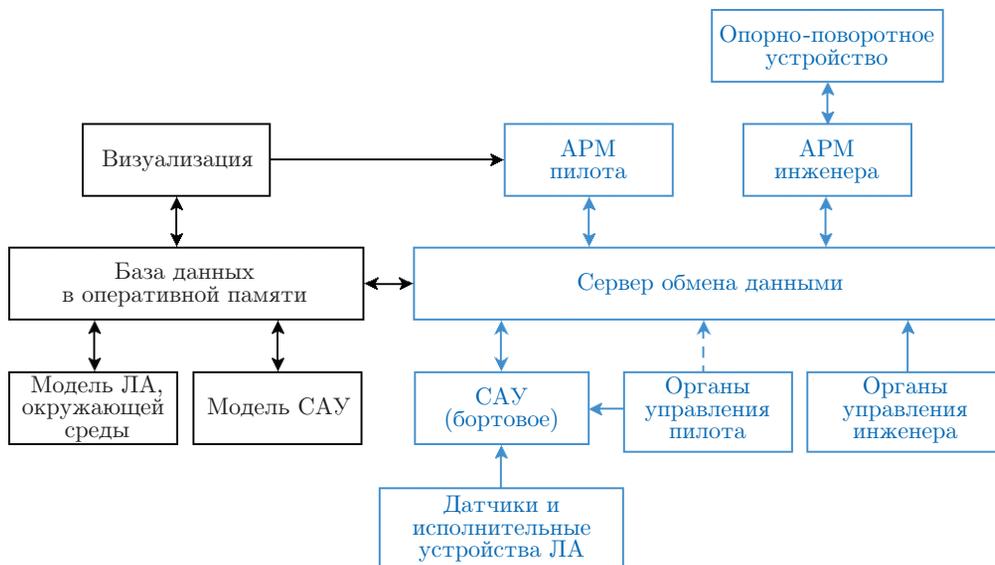


Рис. 3. Структурная схема программно-моделирующего комплекса в режиме НПУ

Для режима МП моделирование динамики летательного аппарата и системы управления движением выполняется в отдельных рабочих пространствах среды MATLAB/Simulink [3].

Для режима НП моделирование динамики летательного аппарата осуществляется в рабочем пространстве среды MATLAB/Simulink, в то время как моделирование системы управления движением летательного аппарата выполняется на вычислителе ПК.

Предполётные тренировки экипажа позволяют провести наземные отработки во всей области полётных режимов без осуществления реального полёта летательного аппарата.

В данном режиме проводится имитация полёта летательного аппарата в целях формирования и закрепления у пилота и инженера навыков управления, взаимодействия эки-

пажа. В процессе имитации полёта методом математического моделирования в масштабе времени, близком к реальному, вычисляются параметры движения и функционирования летательного аппарата, формируются изображение закабинной обстановки и телеметрическая информация, отображаемые на мониторах рабочих мест пилота и инженера. При этом следует отметить, что аппаратные средства управления полётом остаются неизменными во всех режимах.

Вычислитель ПНК обеспечивает формирование и запись в бортовой регистратор набора данных, аналогичных тем, которые формируются и записываются регистратором в реальном полёте. Модули, используемые в режиме тренировок экипажа, представлены на рис. 2 (обозначены синим цветом).

Наземный пункт управления предназначен для дистанционного управления полётом летательного аппарата и его полезной нагрузкой, а также приёма, обработки, отображения, документирования информации, поступающей от ЛА, и обеспечения информационного обмена с внешними потребителями.

Программное и алгоритмическое обеспечение вычислителя в режиме наземного пункта управления реализует следующие функции (рис. 3, синий цвет):

- обмен с ЛА телеметрической информацией в реальном масштабе времени;
- преобразование и отображение телеметрической информации на экранах мониторов в виде текста и графических образов;
- контроль технического состояния бортового комплекса;
- приём, отображение, запись, хранение и воспроизведение информации от полезной нагрузки на экранах мониторов в реальном масштабе времени;
- управление режимами полёта и работы полезной нагрузки;
- автоматизированную подготовку полётного задания и ввод его в бортовой комплекс.

В состав НПУ входят два автоматизированных рабочих места (АРМ): АРМ пилота и АРМ инженера.

Программное обеспечение АРМ пилота реализует функции визуализации внекабинной обстановки с бортовой видеокамеры и индикации на лобовом стекле. Оно предназначено для предоставления пилоту информации о текущей полётной ситуации; исследования вопросов устойчивости и управляемости самолётов, в том числе с системой управления; получения пилотажных оценок; отработки и уточнения алгоритмов системы управления полётом, системы обнаружения и сигнализации о критических ситуациях и других систем; подготовки пилота для выработки навыков ручного управления до полёта и в процессе проведения лётных испытаний летательных аппаратов, в том числе при действиях различных отказов; исследования поведения летательного аппарата и систем управления в докритических и критических режимах полёта.

Программное обеспечение АРМ инженера предоставляет оператору реализацию всех необходимых функций: подготовку и загрузку в бортовой вычислитель полётного задания; изменение параметров системы управления полётом; контроль работы бортового оборудования; управление полезной нагрузкой.

Общий вид мобильного наземного пункта управления, реализованного на базе автомобиля, представлен на рис. 4.

Объект управления (летающая лаборатория). Основное назначение ЛЛ — тестирование бортового радиоэлектронного оборудования, датчиков, каналов радиопередачи и телеметрии. Летающая лаборатория представляет собой устойчивый и управляемый летательный аппарат (полностью автономный или дистанционно управляемый), последствия потери которого минимальны. Компоновка ЛЛ выполнена по схеме двухбалочного двухкилевого моноплана с высокорасположенным крылом и П-образным хвостовым оперением (рис. 5). Фотография реального летательного аппарата на испытаниях представлена на рис. 6



Рис. 4. Наземный пункт управления на базе автомобиля

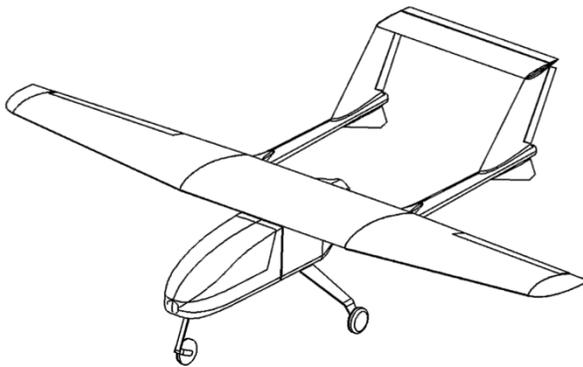


Рис. 5. Общий вид летающей лаборатории



Рис. 6. Летающая лаборатория на ВПП

Летательный аппарат оснащён тремя управляющими поверхностями: элеронами, рулём направления, рулём высоты. Основные параметры ЛЛ приведены в табл. 1.

Аэродинамические характеристики самолёта в крейсерской конфигурации [4] получены разработчиком ЛА по инженерным методикам с использованием программ X-foil (расчёт профильных характеристик) [5], MDV (программа расчёта характеристик летательного аппарата на дозвуковых скоростях). Поляра построена при постоянном числе Рейнольдса.

Силовая установка ЛЛ состоит из электрического двигателя Double AXI 5345/14 HD Gold Line и двухлопастного воздушного винта диаметром 0,45 м.

Описание эксперимента. Горизонтальный полёт происходил на высоте 300 м с приборной скоростью 100 км/ч и нейтральным положением ручки управления самолётом. В момент времени 100 с (рис. 7) задаётся ступенчатое отклонение ручки управления самолётом на 15 % «от себя», затем через 2 с ступенчатое отклонение ручки управления на 15 % «на себя» и через 2 с ручка возвращается в нейтральное положение.

Далее на стенде полунатурного моделирования проведён подобный эксперимент с теми же исходными данными.

Цель эксперимента — сравнение результатов вычислений в среде MATLAB/Simulink и результатов, полученных в процессе выполнения реального испытательного полёта. Раз-

Таблица 1

Характеристики ЛЛ

Параметр	Единицы измерения	Значение
Размах крыла (l)	м	2,7
Площадь крыла (S)	м ²	0,963
Масса (m)	кг	16,14
Средняя аэродинамическая хорда (b)	м	0,3667
Моменты инерции:		
по оси x (I_x)	кг · м ²	3,4
по оси y (I_y)	кг · м ²	4,8
по оси z (I_z)	кг · м ²	4,2

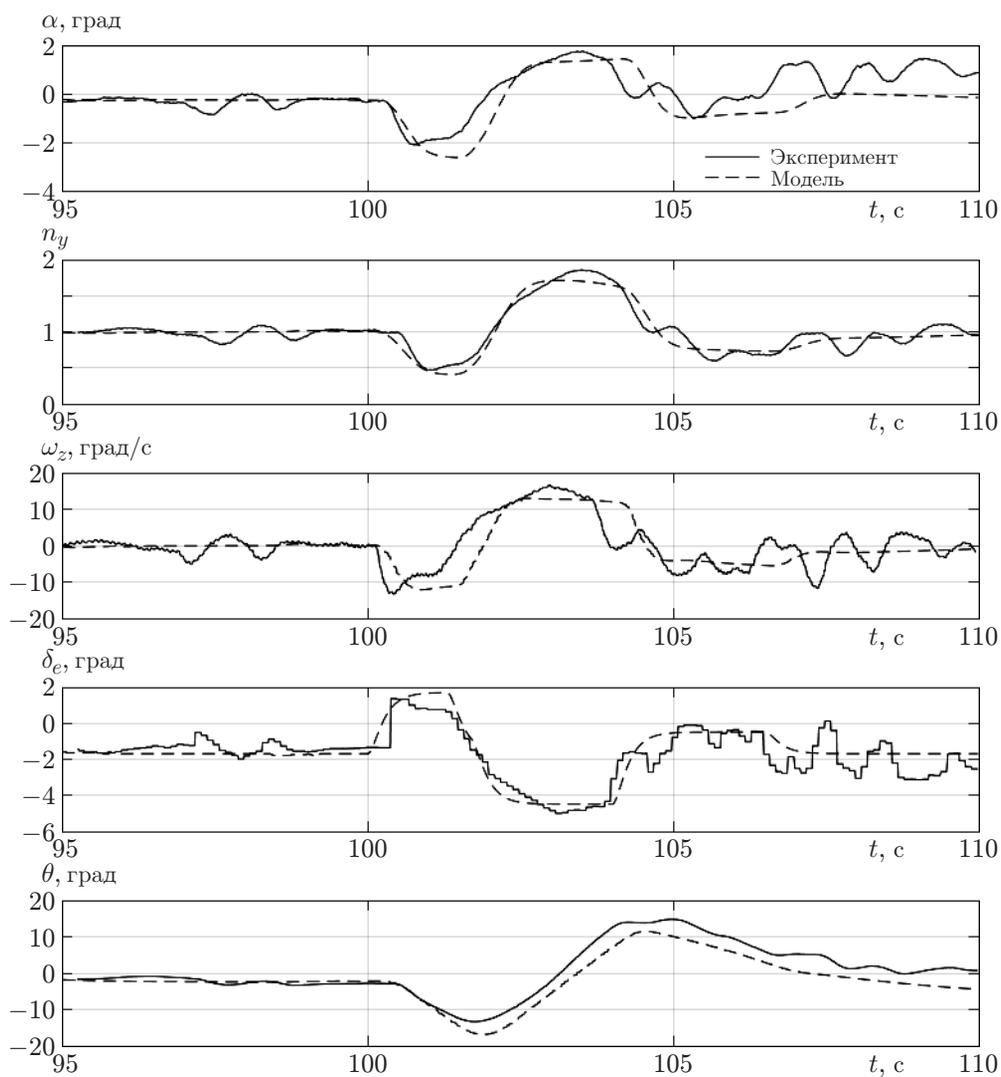


Рис. 7. Данные моделирования в среде MATLAB/Simulink и эксперимента

ница в значениях показывает точность математических вычислений, достигнутую на процессоре и наборе библиотек бортового вычислителя, и отличия от вычислений в среде MATLAB/Simulink. Итерационное уточнение математической модели по результатам лётных экспериментов позволяет достичь заметно большей точности описания объекта, чем при использовании данных, полученных только в аэродинамической трубе или расчётными методами.

На графиках (см. рис. 7) представлены следующие параметры: α — угол атаки, n_y — нормальная перегрузка, ω_z — скорость тангажа, δ_e — угол отклонения руля высоты, θ — угол тангажа.

Полностью повторить эксперимент на модели не представляется возможным, так как сложно воспроизвести условия полёта, например внешние возмущения. Но полученных в результате натурных испытаний данных достаточно для проведения поэтапной коррекции модели.

Заключение. В данной работе представлены результаты исследования и создания мобильного программно-аппаратного комплекса, поддерживающего три режима работы: стенд полунатурного моделирования, комплекс подготовки экипажа летательного аппарата и наземный пункт управления.

Программно-аппаратный комплекс использовался при проведении нескольких этапов лётных испытаний ряда ЛА. Возможность проведения экспресс-анализа и оперативного корректирования и тестирования алгоритмов позволила существенно сократить время экспериментов.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № 121042900050-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Филиппов М. Н.** Архитектура комплекса полунатурного моделирования систем управления летательными аппаратами // *Автометрия*. 2017. **53**, № 4. С. 44–50. DOI: 10.15372/AUT20170405.
2. **The Robot Operating System (ROS)**. 2021. URL: <https://www.ros.org/> (дата обращения: 15.05.2021).
3. **Дьяконов В. П.** MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. 768 с.
4. **Микеладзе В. Г., Титов В. М.** Основные геометрические и аэродинамические характеристики самолётов и ракет: Справочник. М.: Машиностроение, 1982. 149 с.
5. **XFOIL** — Subsonic Airfoil Development System 2021. URL: <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil> (дата обращения: 15.05.2021).

Поступила в редакцию 02.06.2021

После доработки 07.06.2021

Принята к публикации 11.06.2021