УДК 629.7.015.3

МЕТОДИКА СИНТЕЗА МЕТЕОЗАВИСИМОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПОЛЁТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО ДАННЫМ РАСЧЕТА В ANSYS CFX

А. М. Агеев, И. Н. Ищук, М. Г. Матвеев, В. В. Михайлов, А. С. Попов

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Поступила в редакцию 31.03.2015 г.

Аннотация. В работе приводятся результаты исследований по разработке нелинейной имитационной математической модели проектируемого беспилотного летательного аппарата по данным расчета в программной среде инженерных газодинамических расчетов ANSYS CFX. Разработанная в среде MATLAB/Simulink имитационная модель динамики полета позволила уточнить летно-технические характеристики комплекса, осуществить расчет и отработку его системы управления.
Ключевые слова: математическая модель, аэродинамические характеристики, динамика полета, система управления полетом, беспилотный летательный аппарат.
Annotation. The results of development research of nonlinear mathematical simulation model of designed unmanned aerial vehicle according to the calculation in the ANSYS CFX software engineering environment of gas-dynamic calculations are given. Developed in the MATLAB/Simulink simulation flight dynamics model helped to determine the flight characteristics, to perform calculating and testing of its flight control system.
Keywords: mathematical model, aerodynamic characteristics, flight dynamics, flight control system, unmanned aerial vehicle.

ВВЕДЕНИЕ

На начальных этапах проектирования перед заказывающими и проектирующими организациями комплексов с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) стоит проблема определения круга задач, общих летно-технических требований, формирования аэродинамического облика, расчет типовых траекторий, обеспечивающих необходимые режимы полета. Возникает необходимость создания универсального инструмента для решения указанных научно-исследовательских и инженерных задач, обоснованию требований к летно-техническим характеристикам БЛА и предварительной оценки их эффективности до принятия решения на изготовление опытного образца. Учитывая острую необходимость сокращения времени на разработку изделия, а также расширяющиеся возможности вычислительных и программных средств автоматизации научных и инженерных расчетов, была поставлена задача отработки методического аппарата создания существенно нелинейной математической модели динамики полета БЛА.

Среди существующих программных средств имитационного моделирования динамических систем для решения задач моделирования динамики полета с системой управления хорошо зарекомендовали себя такие пакеты как AerospaceToolbox из со-

© Агеев А. М., Ищук И. Н., Матвеев М. Г., Михайлов В. В., Попов А. С., 2015

Работа выполнена по гранту РФФИ 15-08-02611А

става MATLAB фирмы Mathsoft [1], а также FlightSim, разработки ЦАГИ (г. Жуковский) [2]. Создание адекватных моделей в этих программах возможно при наличии данных об аэродинамических характеристиках летательного аппарата, то есть наличии аэродинамического банка данных, который, как правило, предоставляет разработчик планера после проведения продувок в аэродинамических трубах. Данные исследования достаточно трудоемки и дороги, поэтому на ранних стадиях проектирования изделия целесообразно с достаточной степенью приближения рассчитывать их другими способами. Такую возможность предоставляют специализированные программы газодинамического расчета, одним из которых является среда ANSYS CFX [3]. Крупные конструкторские, научно-исследовательские организации и ВУЗы имеют возможность приобретения лицензий на указанные программные средства. Кроме того, они являются достаточно распространенными в инженерном и научном сообществе. Поэтому, полноценное использование их возможностей для решения поставленной задачи является целесообразным.

Процесс создания модели был разделен на следующие основные этапы:

1) Разработка трехмерных моделей планера БЛА и его элементов методами 3D-проектирования;

2) Формирование банка данных аэродинамических характеристик БЛА на основе расчётов его трёхмерной модели в среде ANSYSCFX;

3) Создание имитационной модели динамики полёта БЛА в MATLAB/Simulink;

4) Создание имитационных моделей элементов комплекса управления БЛА в MATLAB/Simulink;

5) Комплекс контрольных расчетов и отработка функционирования модели;

6) Создание средств визуализации и вывода результатов.

ДАННЫЕ ОБ ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа была выполнена в рамках совместной с ООО НПП «Автономные аэрокосмические системы «АВАКС-ГеоСервис» (г. Красноярск) [4] опытно-конструкторской работы по созданию БЛА малой дальности «Гамма» (рис. 1).

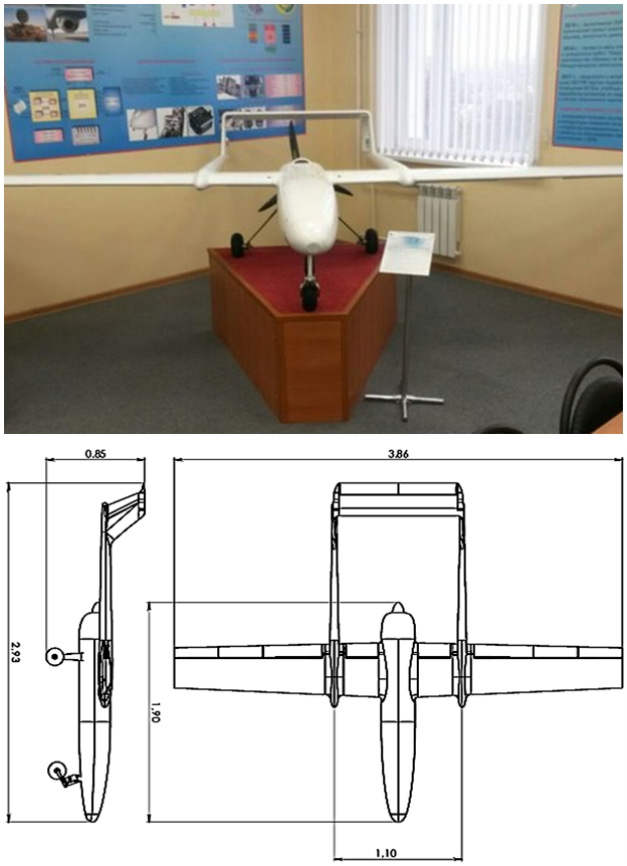


Рис. 1. Внешний вид и геометрические размеры БЛА «Гамма»

БЛА «Гамма» представляет собой одномоторный самолёт с П-образным хвостовым оперением. БПЛА имеет V-образное ($\psi = 1{,}15°$), стреловидное ($\chi = 2{,}6°$), механизированное крыло среднего удлинения ($\lambda = 9{,}36$), расположенное по схеме высокоплан. Двигатель располагается в фюзеляже. Самолет имеет трехопорное (с носовой опорой) шасси. Масса аппарата в полетной конфигурации 54 кг с полным баком, без топлива 40 кг.

Закладываемые разработчиком тактико-технические характеристики БЛА «Гамма» приведены в табл. 1.

Таблица 1

Закладываемые тактико-технические характеристики БЛА «Гамма»

Характеристика	Значение
Размах крыла	4 м
Продолжительность полета	до 12 ч
Дальность действия радиосвязи	50 км
Скорость	70–140 км/ч
Крейсерская скорость	120 км/ч
Высота полета	100 м до 3000 м
Взлётная масса	50 кг
Тип силовой установки	ДВС (авиационный керосин)
Мощность бортового генератора	400 Вт
Масса полезной нагрузки	до 15 кг
Диапазон рабочих температур	от –35 до +50 °С
Максимальная допустимая скорость ветра	20 м/с
Взлёт и посадка	по-самолётному
Аварийная посадка	система авт. парашютного спасения

РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛА В ANSYS CFX

На первом этапе по данным конструкторской документации и описанию комплекса, предоставленным разработчиком БЛА были разработаны трехмерные модели планера в нескольких вариантах (рис. 2): полная с учетом точных размеров и всех конструктивных особенностей, упрощенная, отражающая основные аэродинамические особенности конструкции. Также были созданы 3D-модели отдельных элементов конструкции: органов управления, шасси, винта силовой установки, специальных законцовок крыла.

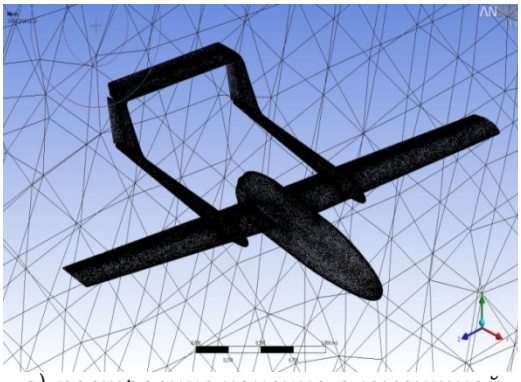
В ходе решения второй, наиболее трудоемкой, задачи был выполнен комплекс расчетов по созданию банка данных аэродинамических характеристик БЛА «Гамма» для дальнейшего исследований динамики самолета на всех режимах полета. На практике такие данные получаются путем экспериментальных исследований планера в аэродинамической трубе. Однако эти исследования очень затратны по времени и материальным ресурсам. С целью получения требуемых данных с достаточной точностью и экономии средств было проведено исследование в среде ANSYS CFX.

Рис. 2. Трехмерные модели планера БЛА и его элементов

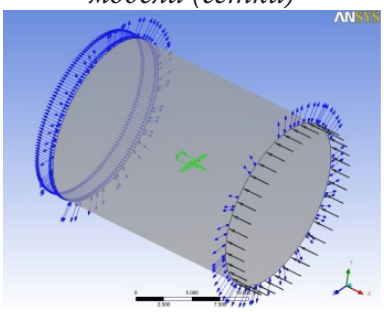
ANSYS CFX – мощный инструмент для оптимизации процесса разработки и технологической подготовки в области динамики жидкостей и газов. Для решения задач аэродинамики в рамках платформы ANSYS Workbench можно получить доступ к общим для всех расчетов инструментам, таким как инструменты для работы с геометрией ANSYS Design Modeler и с сеткой ANSYS Meshing, постпроцессинг результатов графического и количественного анализа, полученных в ANSYS CFX, выполняется в ANSYS CFD-Post.

На этапе аэродинамических расчетов 3D-модели были импортированы в ANSYS CFX. На их основе генерировались конечно – элементные модели (сетки) для аэродинамического расчета (рис. 3а). Для каждой модели найдена оптимальная дисперсность сетки, которая задействует оптимальное количество ресурсов вычислительной системы (память, время) и обеспечивает необходимую точ-

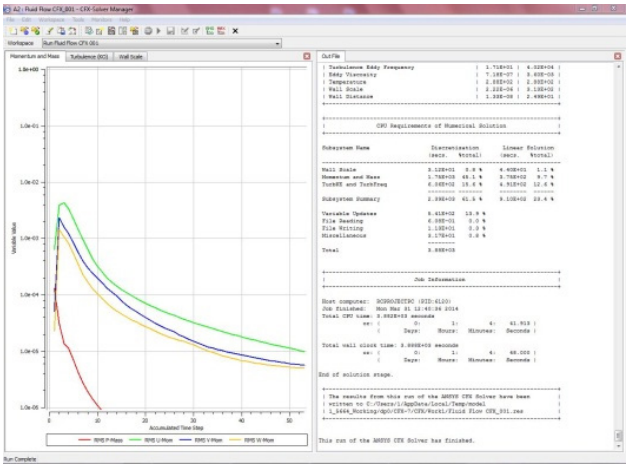
ность вычислений. Полное число ячеек сетки составляло порядка 5 млн. Параметры моделирования задаются в модуле предобработки ANSYS CFX (рис. 3б), здесь же определяются области входа и выхода воздуха в трубу его скорость и давление. Также настраиваются параметры решателя ANSYS CFX, количество итераций, точность расчёта, а так же прочие начальные условия. Расчет проводился в связанной системе координат. Модель была параметризирована по углу атаки, углу скольжения и скорости потока. Расчетная область выбиралась в форме цилиндра. Продувка осуществлялась в диапазоне углов атаки от –4 до 12 градусов и углов скольжения от 0 до ± 10 градусов. На линейном участке все рассмотренные модели турбулентности продемонстрировали удовлетворительное совпадение расчетных данных с экспериментальными характеристиками аналогов. В зоне Cy_{max} максимальное соответствие с экспериментальными данными показала модель турбулентности SST $k-\omega$ (рис. 3в). С использованием постпроцессора CFX POST файл с результатами расчета позволяет визуализировать картину обтекания крыла. Линии тока (рис. 3г) и поле распределение давлений хорошо иллюстрируют отрывное течение и распределение давления на поверхности БЛА.



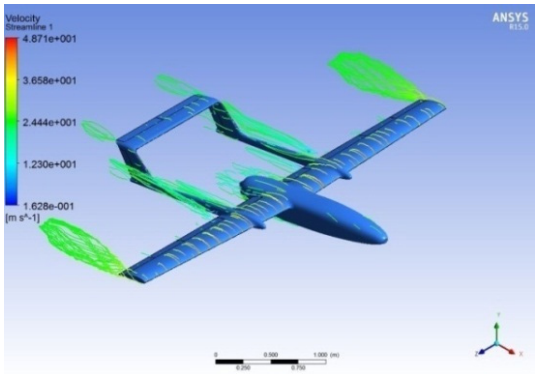
а) построение конечно-элементной модели (сетки)



б) задание начальных условий



в) определение сходимости результата



г) визуализация результатов расчета

Рис. 3. Этапы расчета аэродинамических коэффициентов в ANSYS CFX

На основе результатов моделирования получены значения подъемной, боковой силы и силы лобового сопротивления (X, Y, Z), а также моменты тангажа, крена и рысканья (M_x, M_y, M_z). Далее рассчитаны аэродинамические коэффициенты (АК) планера в виде следующих зависимостей:

– АК при нейтральном положении рулей (в зависимости от угла атаки и угла скольжения);

– АК при отклонении руля высоты;

– АК при отклонении руля направления;

– АК при отклонении закрылков.

Все коэффициенты рассчитаны для диапазона скоростей от 0 до 150 км/ч, и для высот от 0 до 5000 м. Графики некоторых аэродинамических коэффициентов представлены на рис. 4, 5. По полученным данным были построены поляра (рис. 6) и аэродинамическое качество (рис. 7) планера: аэродинамическое качество находится в диапазоне от 10 до 14 в зависимости от углов атаки и скольжения, а оптимальный угол атаки установившегося полета следует выбирать в диапазоне 2–4 град.

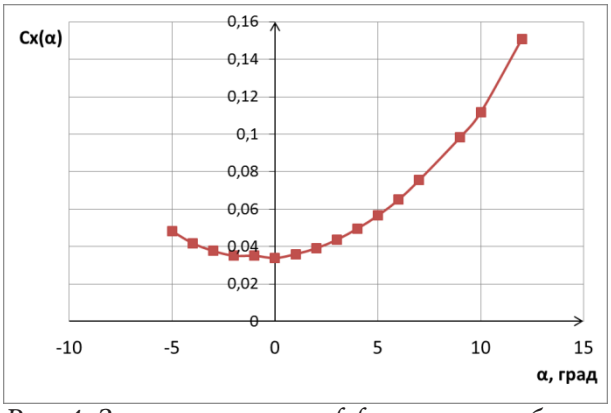


Рис. 4. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от угла атаки

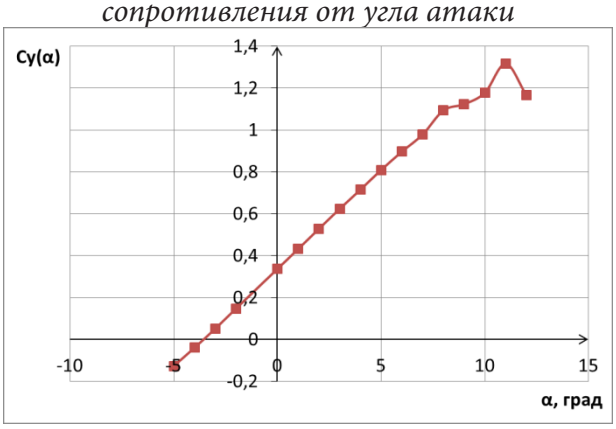


Рис. 5. Зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки

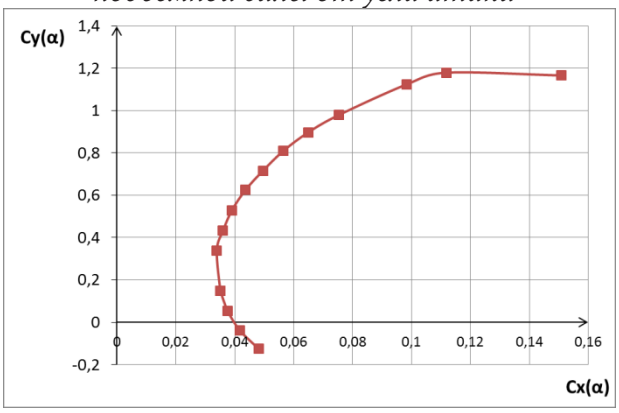


Рис. 6. Поляра планера

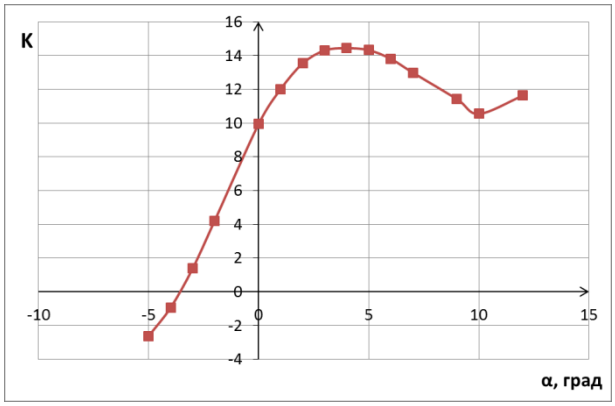


Рис. 7. Аэродинамическое качество планера

Полученные данные хорошо согласуются с характеристиками аналогов, результатами расчетов и данными, полученными по данным летных испытаний. Данные, полученные в ходе аэродинамического расчета, а также массово-инерционные, геометрические параметры, параметры САУ, силовой установки заносились в виде аргументов, функций и констант в единую базу данных – т.н. математический паспорт БЛА.

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ПОЛЁТА И ЭЛЕМЕНТОВ КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ БЛА В MATLAB/SIMULINK

Полученные на предыдущем этапе данные из математического паспорта БЛА были использованы для создания имитационной модели БЛА в MATLAB/Simulink с целью ее исследования на всех режимах полета и расчета системы управления. Структура модели динамики БЛА состоит из блоков вычисления сил и моментов, вычисления тяги двигателей, уравнений движения, моделей датчиков первичной информации, рулевых приводов, системы навигации и автоматического управления (СНАУ) (рис. 8).

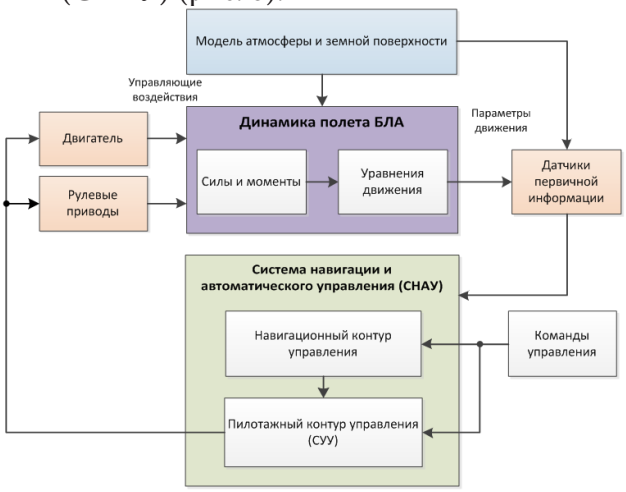
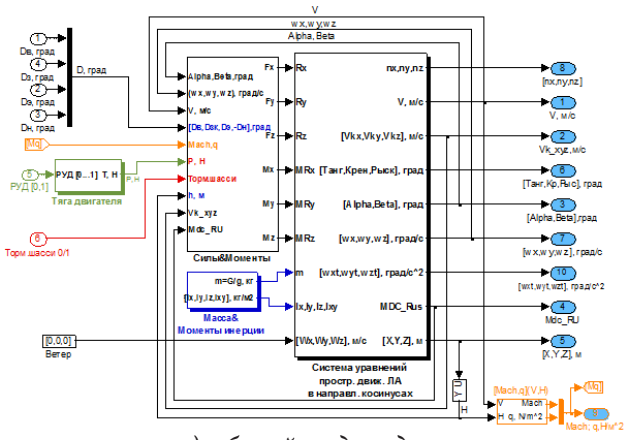


Рис. 8. Блок-схема полной модели динамики самолета

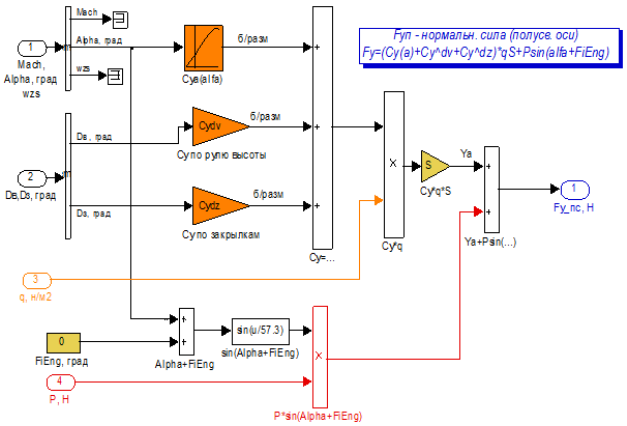
В качестве основных уравнений движения БЛА использовались известная система дифференциальных уравнений полной нелинейной модели пространственного движения ЛА в углах Эйлера [6, 7] в связанной системе координат согласно ГОСТ 20058-80 [8]. Модель

реализована в FlightSim в виде dll-библиотеки Euler08_ru.dll. Силы и моменты вычислялись в отдельных блоках для продольных и боковых составляющих. Начальные условия записывались в специальный файл SpInd_ru.par. При реализации моделей (рис.9) были выбраны следующие параметры моделирования: метод интегрирования Рунге-Кутта 4-го порядка (Runge-Kutta ode4), фиксированный шаг интегрирования (fixed-step = 0.01), параметр синхронизации с реальным временем (x_real_timer = 1).

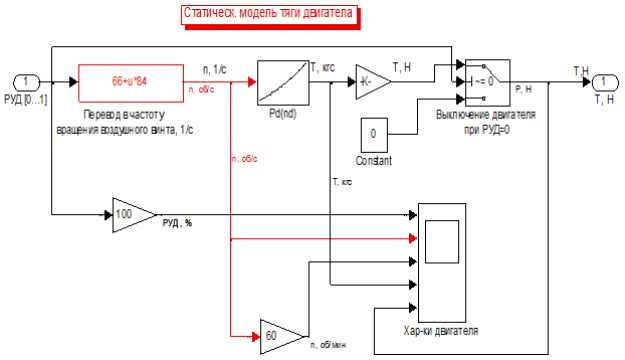
Модель динамики БЛА была дополнена нелинейными моделями элементов комплекса управления БЛА: силовой установки, датчиков первичной информации и рулевых приводов, в том числе с учетом аэродинамических шарнирных моментов, учитывающих нелинейности типа «ограничение хода» и «зона нечувствительности».



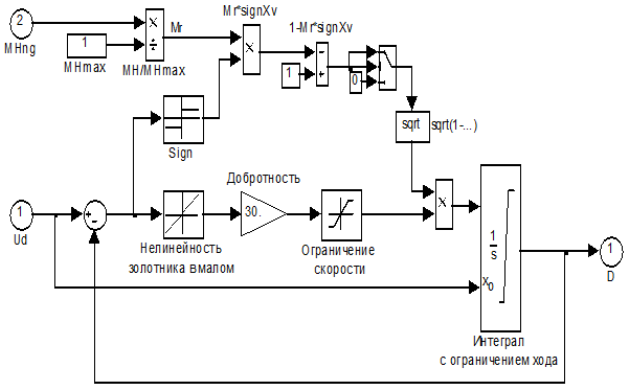
а) общий вид модели



б) блок вычисления нормальной силы



в) модель тяги винтомоторной установки



г) модель рулевого привода с учетом шарнирного момента

Рис. 9. Элементы модели БЛА в MATLAB/Simulink

СОЗДАНИЕ СРЕДСТВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ВЫВОДА РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчета представляются в виде графиков выходных параметров модели, которые для удобства объединены в группы (угловые, траекторные, высотно-скоростные, параметры силовой установки и т.п.), либо могут быть выведены произвольно для решения конкретных задач. Кроме того, имеются дополнительные возможности визуализации: от стандартного набора средств MATLAB до специальных средств из состава FlightSim (приборные доски, индикаторы углового положения, построители профиля полета и др.).

В качестве дополнительного программного обеспечения визуализации использовался авиационный симулятор с открытым исходным кодом FlightGear [9]. Разработанная 3D-модель БЛА «Гамма» импортирована в виртуальную среду симулятора (рис. 10), организована передача данных о пространственном перемещении, эволюциях, скорости

Рис. 10. Визуализация смоделированного полета БЛА в симуляторе FlightGear

полета и отклонениях рулей БЛА из модели в симулятор, а также передача данных о высоте над подстилающей поверхностью из симулятора в модель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием выполненных расчетов и полученной математической модели были рассчитаны балансировочные положения рулевых поверхностей, коэффициенты регуляторов пилотажного контура БЛА, уточнены летно-технические характеристики аппарата, в том числе определены ограничения по высотам и скоростям полета. Также были определены потребные и располагаемые тяги силовой установки, максимально и минимально допустимые значения высот, скоростей полета и углов тангажа, произведен расчет взлета и посадки на ВПП. Полученные расчеты были подтверждены путем дачи тестовых входных воздействий, моделирования и последующей обработки его результатов, а также выполнения тестовых полетных заданий по отработке соответствующих режимов полета.

С помощью полученной математической модели становиться возможным осуществить разработку алгоритмического обеспечения навигационного (траекторного) контура БЛА, провести оценку его летно-технических, тактических характеристик с учетом метеоусловий [10, 11]. Отработанный при создании модели научно-методический аппарат обеспечит замкнутый цикл исследования систем управления БЛА, позволит решать задачи по оценке эффективности комплексов с БЛА по информационным показателям (в части касающейся систем управления и навигации) на ранних стадиях разработки и оценки технических проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aerospace Blockset // MathWorks. Центр компетенций. URL: http://matlab.ru/products/aerospace-blockset. (Дата обращения: 20.03.2015).

2. *Кувшинов В. М., Аминица О. В.* Программный комплекс для моделирования и анализа динамики самолета с системой управления в среде программирования MATLAB / Simulink («FlightSim») // Труды 1-ой Всерос сийской науч. конф. «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB». – М. : ИПУ РАН, 2002.

3. ANSYS CFX. URL: http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/luid+Dynamics+Products/ANSYS+CFX (Дата обращения: 20.03.2015).

4. Автономные аэрокосмические системы – ГеоСервис. Научно-производственное предприятие. URL: http://www.uav-siberia.com (Дата обращения: 20.03.2015).

5. *Дьяконов В. П.* MATLAB 7.*/R2006/R2007: Самоучитель. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 348 с.

6. *Красовский А. А., Вавилов Ю. А., Сучков А. И.* Системы автоматического управления летательных аппаратов. Под ред. А. А. Красовского. – М. : ВВИА, 1986.

7. *Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н.* Прикладные задачи теории оптимального управ-

ления движением беспилотных летательных аппаратов. – М. : Машиностроение, 1987.

8. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. – М. : Издательство стандартов, 1989.

9. Flightgear. Русскоязычный официальный ресурс. URL: http://www.flightgear.ru (Дата обращения: 20.03.2015).

10. *Михайлов В. В., Кирносов С. Л.* Методологические аспекты фрактально-структурированного учета метеоусловий при функционировании авиационных систем // Нелинейный мир. – 2014. – Т.12, № 3. – С. 14–19.

11. *Матвеев М. Г., Михайлов В. В., Семенов М. Е., Сирота Е. А.* Модель анализа динамики векторного метеорологического процесса // Вестник Воронежского ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2013. – № 1. – С. 89–95.

Агеев А. М. – к.т.н., заместитель начальника научно-исследовательского отдела, ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж).
E-mail: ageev_bbc@mail.ru

Ищук И. Н. – д.т.н., доцент, начальник 12 кафедры, ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж).
E-mail:boerby@rambler.ru

Матвеев М. Г. – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных технологий управления, ВГУ.
E-mail: itu@sc.vsu.ru

Михайлов В. В. – д.т.н., профессор, начальник 1 факультета гидрометеорологического, ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж).
E-mail: mvv987@pochta.ru

Попов А. С. – начальник тренажера, ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж).
E-mail: saga30@yandex.ru

Ageev A. M. – Ph.D. (Eng.), The deputy chief of research department, Military Educational Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin» (Voronezh). E-mail: ageev_bbc@mail.ru

Ishchuk I. N. – Dr. Sc.(Eng.), Associate Professor, The Head of the12th Chair of Technical hydrometeorological resources and the resources of aerial reconnaissance, Military Educational Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin» (Voronezh). E-mail: boerby@rambler.ru

Matveev M. G. – Dr. Sc.(Eng.), Associate Professor, The Head of the Department of information Technology Management Voronezh State University. E-mail: itu@sc.vsu.ru

Mikhailov V. V. – Dr. Sc.(Eng.), Associate Professor, The Head of the1th hydrometeorological Department, Military Educational Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin» (Voronezh). E-mail: mvv987@pochta.ru

Popov A. S. – The head of flight simulator of Training complex, Military Educational Research Centre of Air Force «Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin» (Voronezh). E-mail: saga30@yandex.ru