

УДК [378:629.7]-042.4:004
DOI 10.20339/AM.06-23.109

В.Т. Калугин,
д-р техн. наук, профессор,
руководитель НУК СМ
Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

А.Ю. Луценко,
канд. техн. наук, доцент,
первый заместитель декана факультета СМ
Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

И.К. Романова-Большакова*,
канд. техн. наук, доцент,
заместитель декана по магистратуре факультета СМ
Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
e-mail: irina.romanova@bmstu.ru

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ОБЪЕДИНЕННЫХ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СКВОЗНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ НА ФАКУЛЬТЕТЕ СМ МГТУ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

Предложен принцип единой цифровой платформы анализа и синтеза технических систем, реализованный в процессе подготовки специалистов и магистров факультета «Специальное машиностроение» (СМ) по направлению «Ракетно-космическая техника» (РКТ). Проанализированы требования работодателей. Выделены компетенции собственно утверждаемых образовательных стандартов МГТУ им. Н.Э. Баумана, связанные с моделированием и исследованием систем и реализуемые на кафедрах факультета СМ по направлению РКТ. Показаны возможности применения пакета MATLAB как организующего центра и дано описание всех его составляющих, включая интегрирование сторонних пакетов прикладных программ для решения основной задачи. В качестве примера рассмотрена задача моделирования объекта РКТ – летательного аппарата.

Ключевые слова: цифровая платформа, моделирование, анализ и синтез, летательный аппарат, MATLAB.

APPLICATION OF NEW UNITED DIGITAL TECHNOLOGIES OF END-TO-END MODELING AND DESIGN IN THE TRAINING OF SPECIALISTS AT THE FACULTY OF SM MSTU NAMED AFTER N.E. BAUMAN

Vladimir T. Kalugin, Dr. Sc. (Technic), Professor, Head of the NUC SM Bauman Moscow State Technical University
Alexander Yu. Lutsenko, Cand. Sc. (Technic), Docent, First Deputy Dean of the Faculty of SM Bauman Moscow State Technical University
Irina K. Romanova-Bolshakova*, Cand. Sc. (Technic), Docent, Deputy Dean for Master's Degree of the Faculty of SM Bauman Moscow State Technical University, e-mail: irina.romanova@bmstu.ru

The principle of a single digital platform for the analysis and synthesis of technical systems, implemented in the process of training specialists and masters of the Faculty of Special Engineering (SM) in the direction of rocket and space technology (RKT), is proposed. The requirements of employers is analyzed. The competencies of the approved educational standards of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, related to modeling and research of systems and implemented at the departments of the Faculty of SM in the direction of RKT. The possibilities of using the MATLAB package as an organizing center are shown, and a description of all components is given, including the integration of third-party application packages to solve the main problem. As an example, the problem of modeling an RCT object – an aircraft is considered.

Keywords: digital platform, modeling, analysis and synthesis, aircraft, MATLAB.

Введение

Цифровизация образовательного процесса в настоящее время является не просто перспективой развития, но

полноценным и активно используемым практическим инструментом в преподавании на всех уровнях образования [1] Выявление преимуществ и возможностей цифровизации, в том числе пока еще не до конца раскрытых, является

актуальной задачей. Эта проблема обсуждается в данной статье, при этом в качестве предметной области выбраны методы анализа и синтеза объектов ракетно-космической техники (РКТ), которые на практике используются в подготовке специалистов и магистров факультета «Специальное машиностроение» (СМ). Были выбраны следующие направления исследований:

- ♦ общие требования работодателей к наличию компетенций в области использования программ общего назначения [2];
- ♦ перечень программных продуктов, используемых в процессе преподавания дисциплин направления РКТ;
- ♦ основные компетенции в области моделирования и исследований по направлению подготовки РКТ.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ требований к компетенциям в области проектирования, конструирования, моделирования и исследования в области РКТ

При общем рассмотрении требований со стороны работодателей и соответствующих профессиональных стандартов [2] на первый план выходит применение компьютерных программ широкого назначения.

В таблице 1 представлены результаты анализа требований работодателей в организациях отрасли к владению программами проектирования и конструирования.

Таблица 1

Требования работодателей в организациях отрасли к навыкам использования программного обеспечения специалистами

Должность	Программное обеспечение
Специалист	Средства компьютерного проектирования
Инженер	Microsoft Office, AutoCAD
Инженер-программист	MATLAB Maple Microsoft Visual Studio
Инженер-технолог	AutoCAD, Компас-3D
Инженер-технолог аддитивного производства	SolidWorks 3D Моделирование AutoCAD Компас-3D
Инженер-электроник	AutoCAD/ Компас, PCAD/Altium Designer

В таблице 2 представлен перечень основных программ, используемых в преподавании дисциплин на факультете СМ по направлению РКТ, причем показаны как программы конструирования, так и моделирования, и программы для исследований объектов РКТ по специализациям кафедр.

В данной статье остановимся на применении компьютерных технологий в задачах моделирования, исследования, анализа и синтеза объектов РКТ.

Таблица 2

Перечень программ, используемых в курсах факультета СМ по направлению РКТ

Пакет	СМ1	СМ2	СМ3	СМ8	СМ12	СМ13
ANSYS Academic Research Mechanical and CFD	√					√
CATIA	√					
MATLAB\Simulink	√		√	√		√
Mathcad, Wolfram Research Mathematica	√	√	√	√	√	
SolidWorks, AutoCAD	√	√		√	√	
Компас-3D	√	√		√	√	

Поскольку в основе подготовки специалистов лежит компетентностный подход [3; 4], были проанализированы основные компетенции в области моделирования и исследований в соответствии с СУОС (собственно утверждаемыми образовательными стандартами) для кафедр факультета СМ (табл. 3).

Рассмотрим, как эти компетенции формируются в процессе обучения на примере программного комплекса MATLAB – Simulink, который является в настоящее время одним из основных программных комплексов, способных решать разнообразные задачи общематематического характера (методы оптимизации, решение систем обыкновенных дифференциальных уравнений, уравнений в частных производных, методы искусственного интеллекта, интеллектуального анализа данных, машинного обучения, анализа сигналов, изображений, нейросетей, методов нечеткой логики и др.), а также специальные средства исследования объектов РКТ.

MATLAB как единая цифровая платформа подготовки в области моделирования и исследования объектов РКТ

Есть по крайней мере два аспекта, которые необходимо учитывать при формировании направления цифровизации в подготовке специалистов.

Во-первых, это системный подход как теоретическая, методологическая и практическая основа исследования, проектирования, обучения во всех сферах деятельности человека. Во-вторых, это проектный подход, которому посвящены работы авторов [5–7]. Объединение трех составляющих: системный подход, проектный подход и цифровизация – позволяет перейти к новому этапу формирования подготовки.

Предлагается один из вариантов реализации этой концепции: применение пакета MATLAB, обеспечивающее применение всех трех подходов.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать два средства исследований: специальный пакет Aerospace Blockset, предоставляющий блоки пакета

Таблица 3

Основные компетенции в области моделирования и исследований по направлению подготовки РКТ 24.05.04 «Навигационно-баллистическое обеспечение применения космической техники»

Номер компетенции	Компетенция по СУОС
ОПК*-1	Способен применять естественно-научные и общинженерные знания, методы математического анализа и моделирования, навыки теоретического и экспериментального исследования для решения различных задач профессиональной деятельности
ОПК*-2	Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для анализа и решения задач профессиональной деятельности
ОПК*-6	Способен разрабатывать физические и математические модели объектов космических и ракетно-транспортных систем и процессов их управления
ОПК*-8	Способен проводить исследования, прогнозирование и расчет баллистических, аэродинамических и кинематических параметров, определять характеристики динамики полета и управления движением космических объектов
ОПК*-9	Способен разрабатывать новые и использовать известные подходы и методы математического моделирования расчета параметров навигационно-баллистического обеспечения применения космической техники с учетом аэродинамических и баллистических параметров, механики движения и управления полетом
ОПК*-10	Способен разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы, пригодные для практического применения
ПКС**-1.4	Способен формировать логику функционирования системы управления КА при отказах бортовой аппаратуры
ПКС-2.4	Способен оценивать выполнимость требований к динамическим характеристикам системы управления КА
ПКС-2.6	Способен разрабатывать алгоритмы работы системы управления летательных аппаратов
ПКС-2.7	Способен формулировать и решать задачи оптимизации проектно-баллистических параметров ракет и космических систем
ПКС-2.8	Способен разрабатывать методики исследования баллистических и динамических характеристик при моделировании траекторий полетов космических аппаратов
ПКС-3.4	Способен организовывать и проводить проектировочные расчеты параметров обтекания и аэродинамических характеристик ракет и космических транспортных систем, включая элементы их конструкций

* ОПК – собственные общепрофессиональные компетенции.

** ПКС – собственные профессиональные компетенции по направлению.

Simulink для моделирования, симуляции и анализа аэро-космических аппаратов, и общие блоки пакета Simulink для формирования собственных блоков и подсистем.

В таблице 4 показаны основные виды исследований и их связь с основными компетенциями из таблицы 3.

Компоненты MATLAB и интегрированные сторонние пакеты

Совместное использование пакета MATLAB и сторонних пакетов позволяет проводить комплексные исследования и проектирования. Среди этих пакетов:

- ◆ SolidWorks – используется для автоматизированного проектирования (САПР) и 3D-моделирования.
- ◆ MATLAB CFD Simulation Toolbox – совместное моделирование и численные расчеты динамики жидкости.
- ◆ UAV Toolbox – инструмент для исследования БПЛА.
- ◆ UAV Toolbox Support Package for PX4 Autopilots – инструмент для моделирования БПЛА с контроллером PX4.
- ◆ ALTERA – включение в модель ПЛИС.
- ◆ DSP – включение в модель сигнальных процессоров.
- ◆ Gazebo – симулятор, позволяющий тестировать и экспериментировать с физическими сценариями.
- ◆ Computer Vision Toolbox – проектирование и тестирование компьютерного зрения, 3D-видение и системы обработки видеоданных.
- ◆ ROS Toolbox – моделирование объектов робототехники.

Модель исследований

Рассмотрены два описания модели наведения летательного аппарата.

Первое описание представлено на рис. 1 (функциональная схема летательного аппарата (ЛА) как динамической системы) и соответствующая ей схема 2 иерархического уровня (рис. 2).

Реализация этих функциональных схем в пакете MATLAB – Simulink представлена на рис. 3 и 4 соответственно.

Модели были использованы для исследования процессов в системе наведения (терминальная задача) и стабилизации. Сложность модели обусловлена включением моделей реальной аппаратуры, включая систему датчиков, исполнительных устройств, средств коррекции для улучшения динамики наведения. Реализован метод теленаведения – совмещение. Оптимизационные задачи для внутреннего контура системы стабилизации были решены заранее. Оптимизация динамики наведения решалась в процессе моделирования движения. Открытая модель позволяет проводить многовариантные исследования, включая изменение параметров системы по траектории, маневрирование цели, влияние случайных внешних

Таблица 4

Основные виды исследований в соответствии с формированием компетенций

Раздел	Характеристика	Компетенции
Моделирование аэрокосмического аппарата	Моделирование динамики аэрокосмических аппаратов, в том числе при различных условиях полета и окружающей среды: Точечная масса, системы координат тела, ветра и связанных с Землей.	1:* ОПКС-1, 1: ОПКС-2, 1: ОПКС-5 2: ОПКС-1 2: ОПКС-6 2: ОПКС-9
Уравнения движения	Реализуются уравнения движения с тремя и шестью степенями свободы для определения положения тела, его скорости, отношения, связанные значения	1: ОПКС-5 2: ОПКС-8
Основные концепции системы координат	Системы координат Aerospace Blockset™	1: ОПКС-5
Файлы данных Datcom	Импорт файлов данных Digital Datcom Forces and Moments в MATLAB для моделирования аэродинамических сил и моментов летательного аппарата в Simulink	1: ПКС-1
Библиотека моделирования CubeSat	Позволяет моделировать, симулировать, анализировать и визуализировать движение и динамику спутников CubeSat	1: ПКС-1
Наведение, навигация, управление и анализ полетов	Используются шаблоны и функции для выполнения расширенного анализа динамических характеристик аэрокосмических аппаратов и блоков наведения, навигации и управления. Использование блоков наведения для расчета расстояния между двумя летательными аппаратами; навигационные блоки для моделирования акселерометров, гироскопов и инерциальных измерительных блоков; блоки контроллера для управления движением аэрокосмических аппаратов	1: ОПКС-5 1: ОПКС-10 2: ПКС-2.4
Проект Quadcopter	Управление, симуляция, визуализация	1: ОПКС-8
Визуализация	Визуализация динамики полета летательного аппарата с помощью стандартных пилотажных приборов и подключения моделирования к симулятору FlightGear. Использование блоков пилотажных приборов для отображения навигационных переменных. Блоки, доступные в библиотеке инструментов полета, включают скорость полета, скорость набора высоты и индикаторы температуры выхлопных газов, высотомер, искусственный горизонт, координатор поворота и многое другое	1: ОПКС-2 2: ОПКС-2 2: ПКС-2.4
Блок FlightGear Preconfigured 6DoF Animation	Позволяет управлять значениями положения и отношения к транспортному средству с двойной точностью для долготы, широты, высоты, крена, тангажа и рыскания	1: ОПКС-8 2: ОПКС-10 2: ПКС-1.4
Модели среды	Атмосфера. Гравитация и магнитное поле. Ветер	2: ОПКС-6
Компоненты летательного аппарата	Исполнительные механизмы, модели пилота, системы двигателей	1: ОПКС-5

Примечание. 1: относится к СУОС 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов»;
2: относится к 24.05.04 «Навигационно-баллистическое обеспечение применения космической техники».

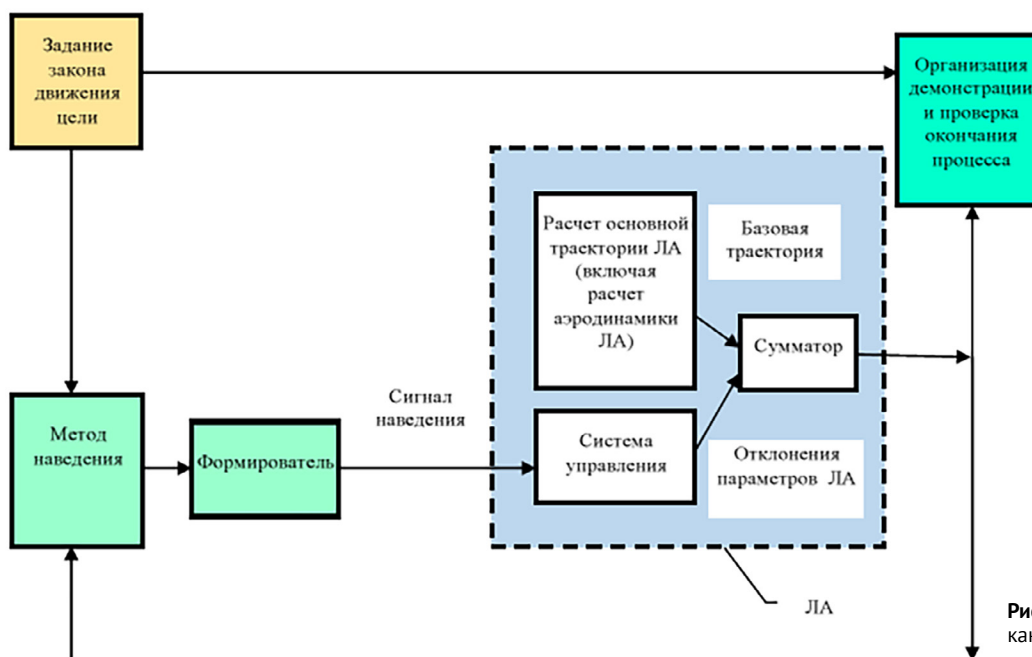


Рис. 1. Функциональная схема ЛА как единой динамической системы

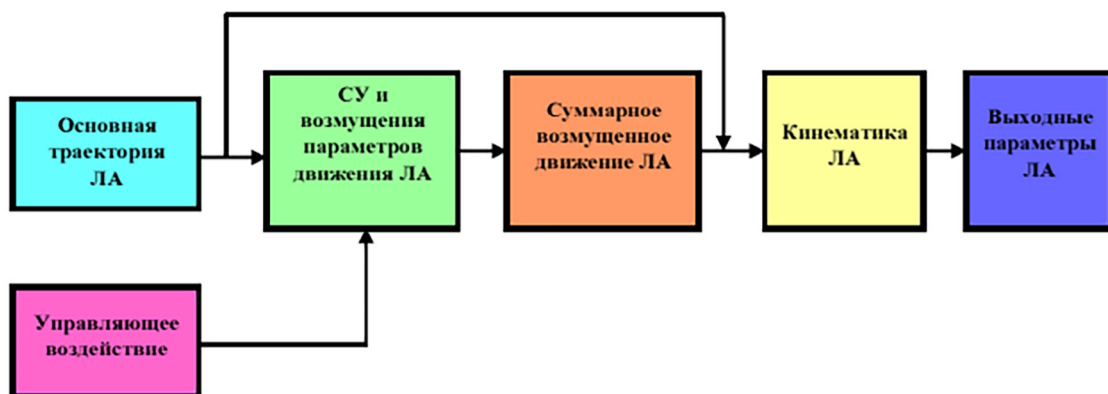


Рис. 2. Функциональная схема 2 уровня модели ЛА

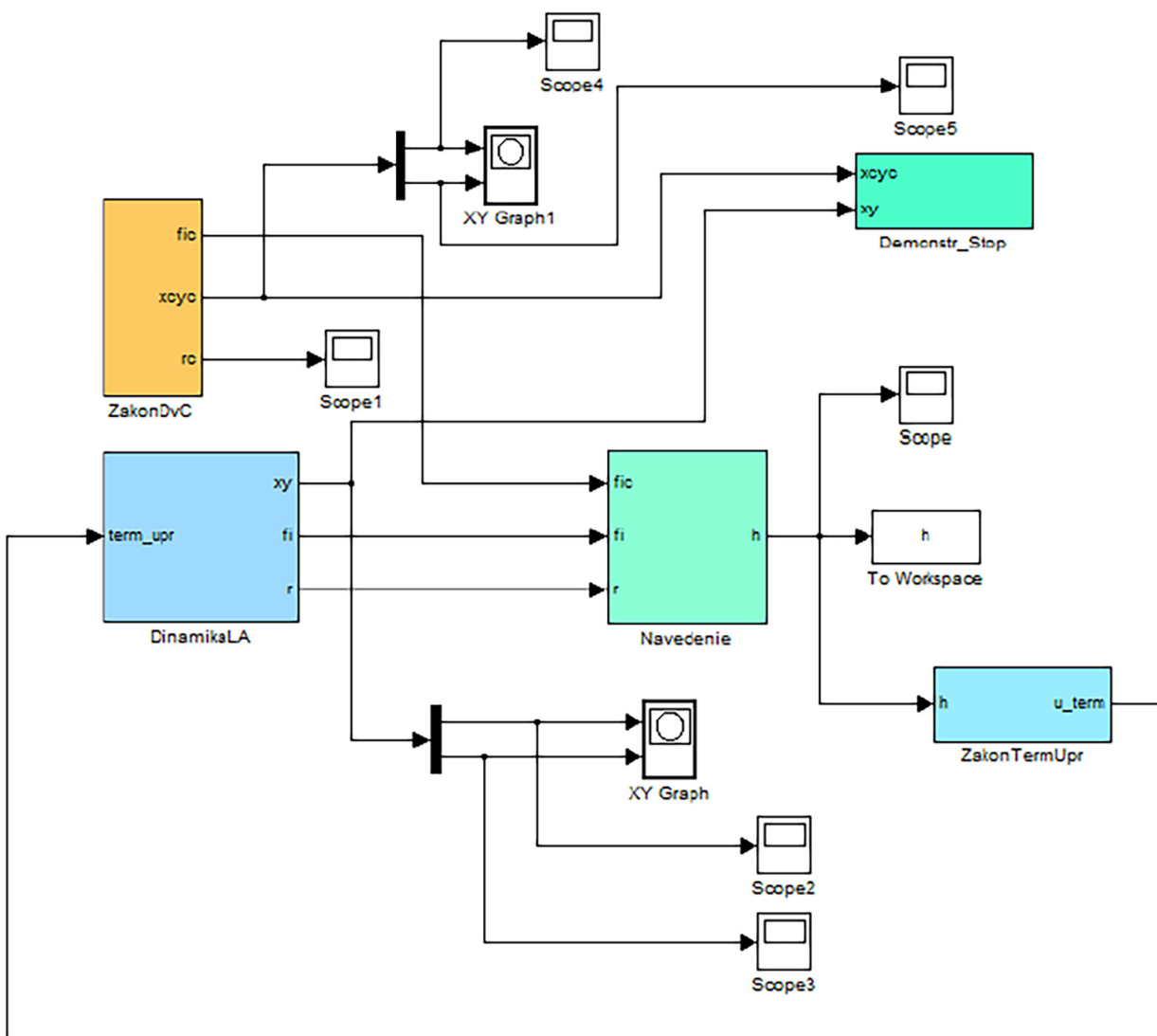


Рис. 3. Структурная схема, набранная в основном пакете Simulink

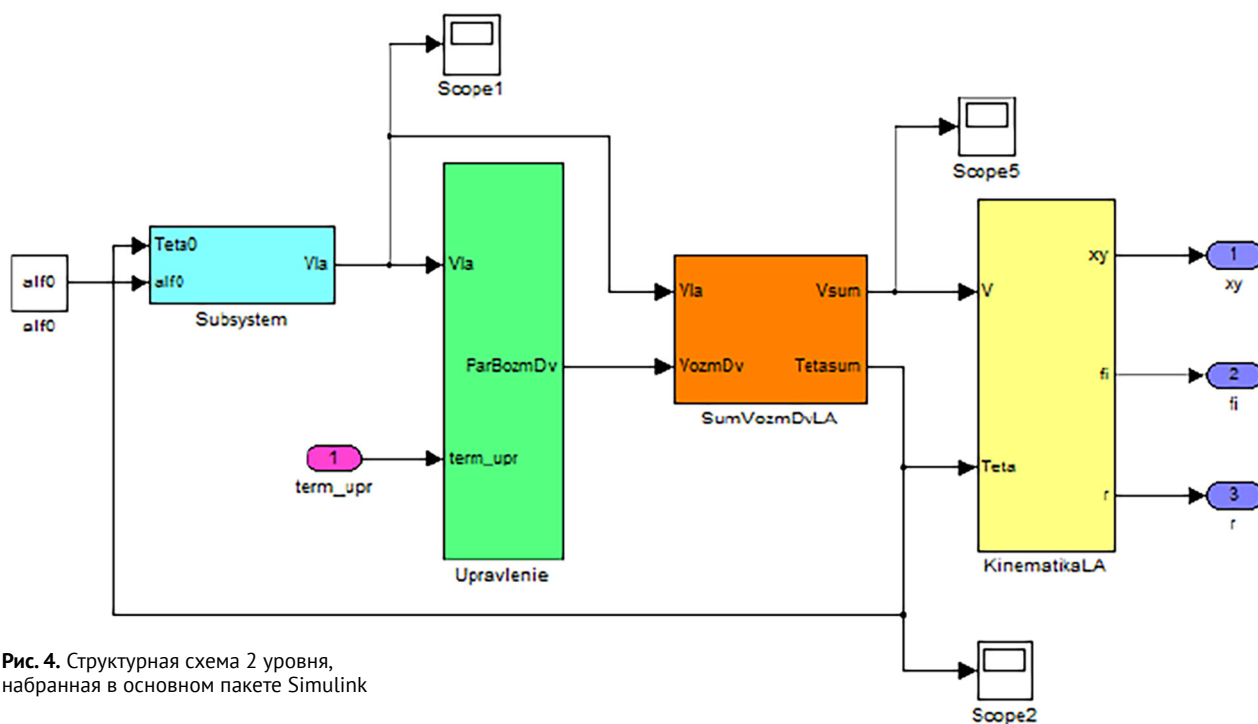


Рис. 4. Структурная схема 2 уровня, набранная в основном пакете Simulink

и внутренних возмущающих факторов [8; 9]. Результаты моделирования процессов наведения представлены на рис. 5.

Альтернативным описанием является использование блоков Aerospace Blockset. Выявлены две проблемы, которые необходимо учитывать в процессе моделирования. Во-первых, это некоторые отличия в системах координат. Во-вторых, необходимость тщательной проверки результатов автоматической линейаризации на границе областей устойчивости объекта.

На рис. 6–7 показаны результаты формирования модели системы наведения с использованием блоков после модификаций для принятой в отечественных исследованиях системы координат.

Мониторинг состояния динамики движения осуществляется через применение блоков – осциллографов. Некоторые результаты представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

Результатом создания модели наведения и проведения исследований является вклад в формирование следующих компетенций для СУОС 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация

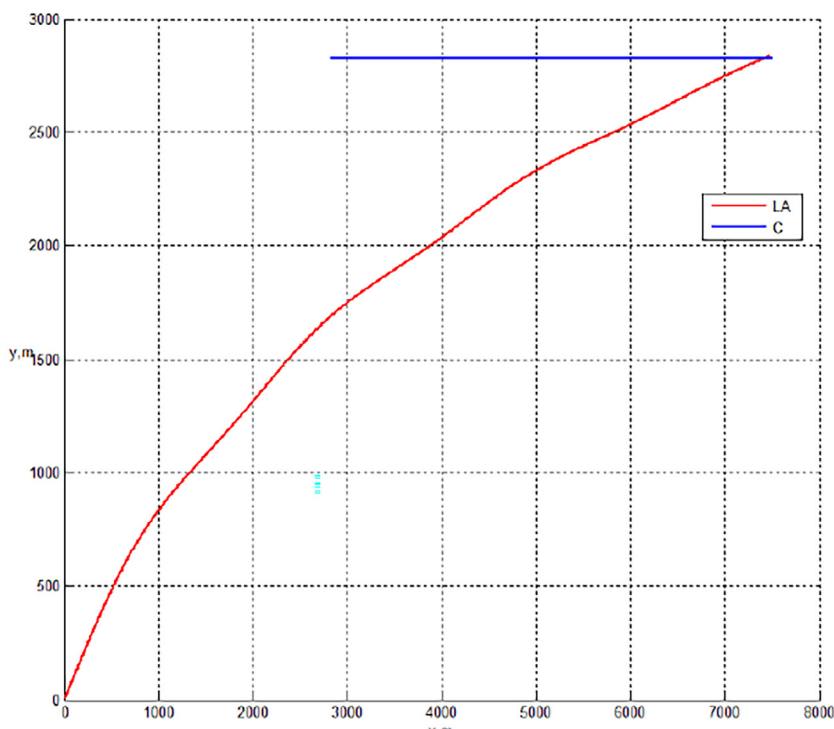


Рис. 5. Результат моделирования процессов наведения по моделям рис. 1–4

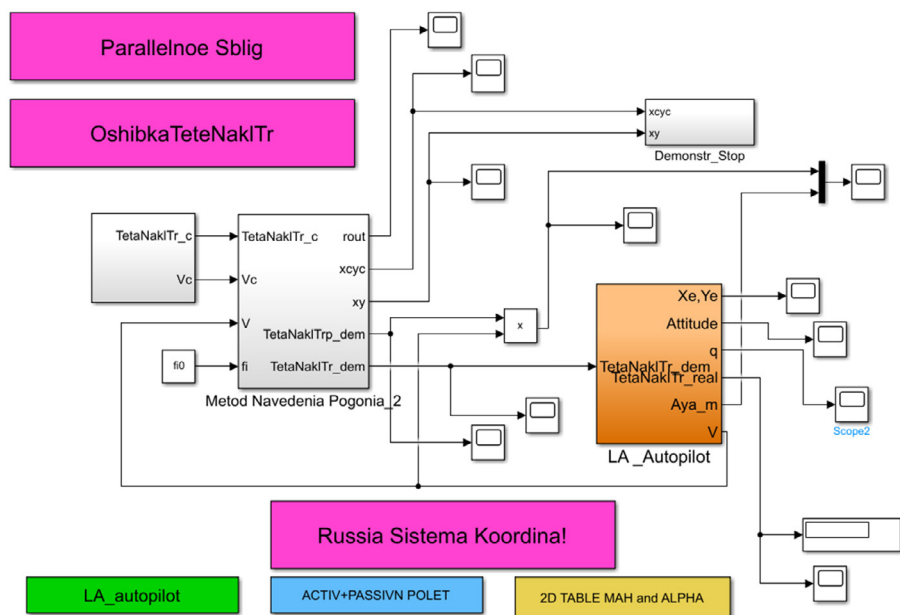


Рис. 6. Модель наведения (альтернативное представление) – верхний уровень

ракет и ракетно-космических комплексов» (1) и 24.05.04 «Навигационно-баллистическое обеспечение применения космической техники» (2):
 1: ОПКС–1; 1: ОПКС–2; 1: ОПКС–5;
 2: ОПКС–1; 2: ОПКС–6; 2: ОПКС–9;
 2: ОПКС–8; 1: ОПКС–10; 2: ПКС–2.4;
 2: ОПКС–2.

Заключение

Показаны особенности реализации компетентного подхода в моделировании, исследовании и проектировании объектов РКТ в рамках цифровизации подготовки специалистов. Учтены требования работодателей и перечня компетенций в СУОС, опыт преподавания дисциплин на кафедрах факультета СМ. Показаны возможности пакета MATLAB для реализации поставленных задач, и приведен практический пример моделирования системы наведения двумя способами.

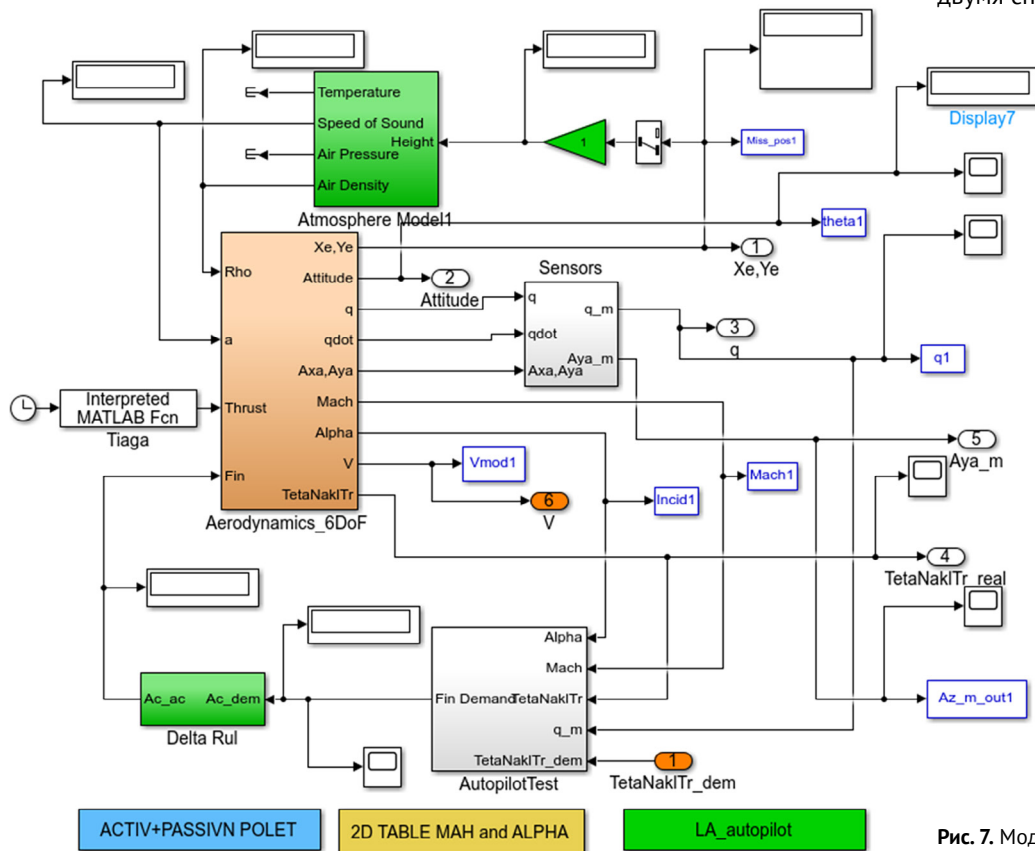


Рис. 7. Модель наведения (альтернативное представление) – второй уровень

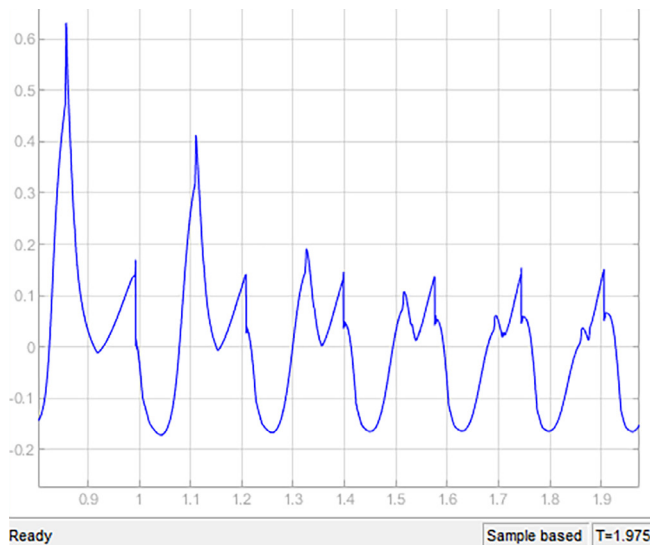


Рис. 8. Осциллограмма текущего потребного наклона траектории

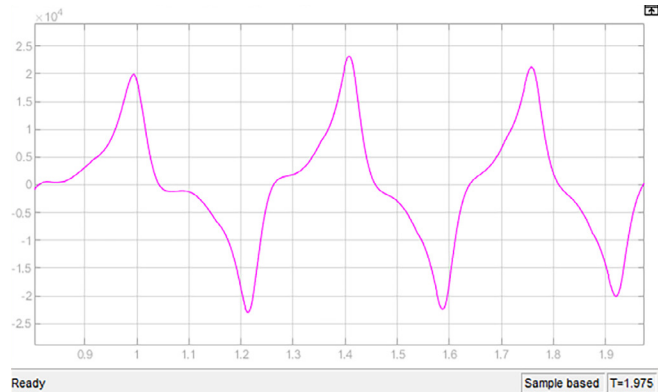


Рис. 9. Изменение углов атаки

Литература/References

1. Минина В. Н. Цифровизация высшего образования и ее социальные результаты // Вестник Санкт-Петербургского университета. Социология. 2020. Т. 13. Вып. 1. С. 84–101.

Minina, V.N. Digitalization of higher education and its social results. *Vestnik of Saint Petersburg University. Sociology*. 2020. Vol. 13. Iss. 1. P. 84–101.

2. Профессиональный стандарт 25.001 Специалист по проектированию и конструированию космических аппаратов и систем.

Professional Standard 25.001 Spacecraft and Systems Design and Engineering Specialist.

3. Лисицына Л.С., Лямин А.В., Шехонин А.А. Разработка рабочих программ дисциплин (модулей) в составе основных образовательных программ, реализующих ФГОС ВПО. СПб.: НИУ ИТМО, 2013.

Lisitsyna, L.S., Lyamin, A.V., Shekhonin, A.A. Development of Work Programmes of Disciplines (Modules) in Basic Educational Programmes Implementing FGOS VPO. St. Petersburg: NRU ITMO, 2013.

4. Казинец В.А., Тринадцатко О.А. Компетентностная модель высшего образования // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 12 (Ч. 1). С. 160–165.

Kazinets, V.A., Trinadtsatko, O.A. Competence Model of Higher Education. *Modern Science-Intensive Technologies*. 2020. No. 12 (Pt. 1). P. 160–165.

5. Романова, И.К. Development of a New Concept of Modeling Systems Based on the Application and Development of Modern Information

Technologies. *AIP Conference Proceedings*. 2022. Vol. 2383. P. 030001-1-030001-9. DOI: 10.1063/5.0074539

6. Vladimir, Kalugin, Alexander, Lutsenko, Irina, Romanova, Ding, Ye. Development of teaching programs of artificial intelligence methods in aerospace education. *SHS Web of Conferences* 137, 01006 (2022), DOI: 10.1051/shsconf/202213701006AESHE 2021

7. Vladimir, Kalugin, Alexander, Lutsenko, Irina, Romanova, Yongjian, Xu. Implementation of artificial intelligence development strategy in the Russian Federation in the educational programs of aerospace engineering training of Bauman Moscow State Technical University. *SHS Web of Conferences* 137(2):01005. DOI: 10.1051/shsconf/202213701005

8. Romanova, I.K. Multi-objective optimization of dynamic systems and problem of the Pareto front control. *AIP Conference Proceeding*. XLIII Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists. 2019. Vol. 2171. P. 110016–110016-9. DOI: 0.1063/1.5133250

9. Romanova, I.K. Study of the influence of deformations and asymmetry on aircraft movement parameters. *AIP Conference Proceedings*. XLIII Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration. 2019. Vol. 2171. P. 130001–130001-8. DOI:10.1063/1.5133268