

# Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.7.01

doi: 10.18698/0536-1044-2022-11-78-91

## Содержание и опыт реализации направления модельно-ориентированной разработки ракетно-космических систем в профильных учебных заведениях

А.А. Кабанов, И.А. Федоров, И.В. Дацюк

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

## The Content and Experience of Implementing the Direction of Model-Based Development of Rocket and Space Systems in Specialized Educational Institutions

A.A. Kabanov, I.A. Fedorov, I.V. Datsuk

Moscow Aviation Institute (National Research University)

Рассмотрен один из подходов к формированию сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды в профильных учебных заведениях — модельно-ориентированная разработка ракетно-космических систем. Это позволит восполнить дефицит высококвалифицированных специалистов предприятий ракетно-космической промышленности, способных к выработке принципиальных архитектурных решений по создаваемой ракетно-космической технике. Раскрыто содержание основных инструментов такого подхода, используемых для формирования целостного понимания процесса разработки ракетно-космических систем на основе применения методов и средств системной инженерии, комплексного моделирования космических миссий и систем, концептуального моделирования, с опорой на целевой характер обучения в привязке к решению задач конкретных космических миссий. Выполнен анализ опыта реализации подходов в учебном процессе. Получены результаты, демонстрирующие эффективность указанного подхода, выраженные в качественном повышении уровня курсовых и дипломных проектов студентов, развитии навыков решения прикладных задач с использованием современного программного обеспечения.

**Ключевые слова:** ракетно-космические системы, процесс проектирования, модельно-ориентированная разработка, цифровые двойники, онтологический инжиниринг, подготовка специалистов

One of the approaches to the formation of an end-to-end design and production and experimental environment in specialized educational institutions is considered — model-oriented

development of rocket and space systems. This would make it possible to fill the deficit of highly qualified specialists of the enterprises of the rocket and space industry, primarily those, who are capable of developing fundamental architectural solutions for the created rocket and space technology. The disclosure is made for the content of the main tools of this approach. They are used to form a holistic understanding of the process of developing rocket and space systems. The tools items are the following: methods and tools of system engineering; integrated modeling of space missions and systems, as well as conceptual modeling, based on the targeted nature of training in binding to solving problems of specific space missions. The analysis of experience in the implementation of approaches in the educational process is carried out. The results are obtained demonstrating the effectiveness of the implementation of this approach. They are expressed in a qualitative increase in the level of the course and diploma projects of students, the development of skills in solving applied problems using modern software.

**Keywords:** rocket and space systems, design process, model-based development, digital twins, ontological engineering, specialist training

При обучении студентов в профильных высших учебных заведениях фактически не решается задача подготовки высококвалифицированных специалистов, способных принимать оптимальные архитектурные решения на стадиях концептуального и эскизного проектов, на которых в основном и закладывается уровень эффективности разрабатываемых изделий.

Выпускаемые вузами специалисты в лучшем случае обладают необходимыми знаниями по отдельным предметным областям инженерной деятельности. При этом они имеют слабое представление о взаимоувязанности комплекса процессов создания сложных наукоемких изделий ракетно-космической техники (РКТ). Как и раньше, главных конструкторов и технологов «воспитывает» не образовательное учреждение, а производство.

Основная причина такого состояния учебного процесса заключается в том, что системный подход к созданию изделий РКТ преподносится как отдельная дисциплина наряду с остальными узкоспециализированными дисциплинами, и студенты не понимают его фундаментальности.

Для сравнения следует указать, что в зарубежных высших образовательных учреждениях уже не первый десяток лет системная инженерия (ее методологические основы и инструменты) как технология реализации системного подхода является структурообразующей всех учебных процессов подготовки специалистов инженерных направлений [1–4].

По этой же причине в большинстве случаев у выпускаемых вузами специалистов почти не развита способность к целостному восприятию решаемой задачи. Зачастую нет понимания при-

чинности создаваемых в рамках учебного процесса проектов космических аппаратов (КА), ракет-носителей (РН), их систем или агрегатов. Отсутствует целевой характер обучения, которое направлено не на решение актуальной задачи, а на создание технического объекта.

Цель статьи — разработка методической основы, объединяющей комплекс прикладных специальных дисциплин, с целью реализации обучения на принципах модельно-ориентированной разработки ракетно-космических систем (РКС) в профильных учебных заведениях.

**Методы и средства решения проблем.** Указанные проблемы решают в рамках направления модельно-ориентированной разработки РКС, которое среди прочих направлений, служащих для формирования единой сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды [5], является системообразующим для таких направлений, как (рис. 1):

- модельно-ориентированная разработка промышленных производств РКС;
- прототипирование, изготовление, испытание изделий РКС.

В составе направления модельно-ориентированной разработки РКС выделены три группы:

- разработка концептуальных моделей или метамоделей для описания предметной области средствами онтологического инжиниринга, если использование типовых шаблонов моделей затруднено;
- управление разработкой РКС при решении общих системных задач (требования, системная интеграция участников жизненного цикла (ЖЦ) и др.);

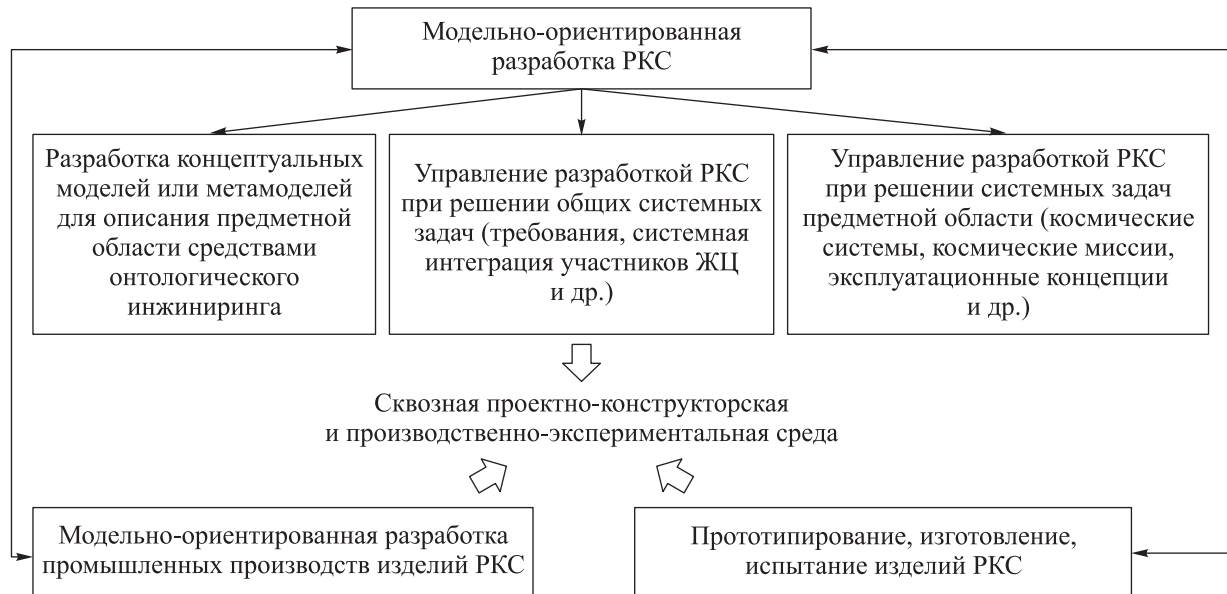


Рис. 1. Схема формирования сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды

- управление разработкой РКС при решении системных задач предметной области (космические системы, космические миссии, эксплуатационные концепции и др.).

Целью рассматриваемого направления является формирование целостного понимания процесса разработки РКС на основе использования методов и средств системной инженерии, комплексного рассмотрения элементов РКС при реализации космических миссий, а также целевой характер обучения в привязке к решению задач конкретных миссий.

**Управление разработкой РКС при решении общих системных задач** (см. рис. 1) базируется на методологии системной инженерии, в основу которой положены модели (MBSE — Model-Based System Engineering). Методология MBSE, успешно применяемая при разработке сложных технических объектов, инвариантна к предметной области.

Сложность изделий РКС, а следовательно, длительные циклы разработки и огромное количество требований делают невозможным выполнение работ по их созданию в ходе реализации процессов системной инженерии без поддержки программными системами.

На предприятиях ракетно-космической отрасли наибольшее распространение получили следующие промышленные платформы, разработанные как зарубежными, так и отечественными компаниями: 3DExperience, (Dassault Systemes, Франция), Digital Innovation Platform

(Siemens Digital Industries Software, Германия/США), Лоцман PLM (Аскон, Россия), Союз PLM (PLM-СОЮЗ, Россия).

Отличительными особенностями этих платформ являются: единое информационное пространство в рамках платформы; веб-интерфейс; поддержка 3D-, 1D-моделирования (системного моделирования) и управления разработкой; универсальность по отношению к предметным областям применения.

Эти платформы представлены и в учебных заведениях, но используются отдельные функциональные фрагменты указанных автоматизированных систем для решения частных задач, в основном расчетных (рис. 2) [6]. Разворачиваемые в них процессы системной разработки изделий должного внимания в учебном процессе не находят, так как в качестве объектов разработки студенческих конструкторских бюро выступает, как правило, сравнительно несложная техника (малые КА или легкие РН).

С одной стороны использование «тяжелого» программного обеспечения (ПО) для решения задач системной разработки для этих объектов менее актуально, а с другой — требует дополнительных ресурсов. Таким образом, системообразующая основа выпадает из учебного процесса, что дополнительно усугубляет обозначенные проблемы. Кроме того, рассматриваемые платформы априори ориентированы на конкретную методологию, без знаний основ которой, их применение существенно осложнено.

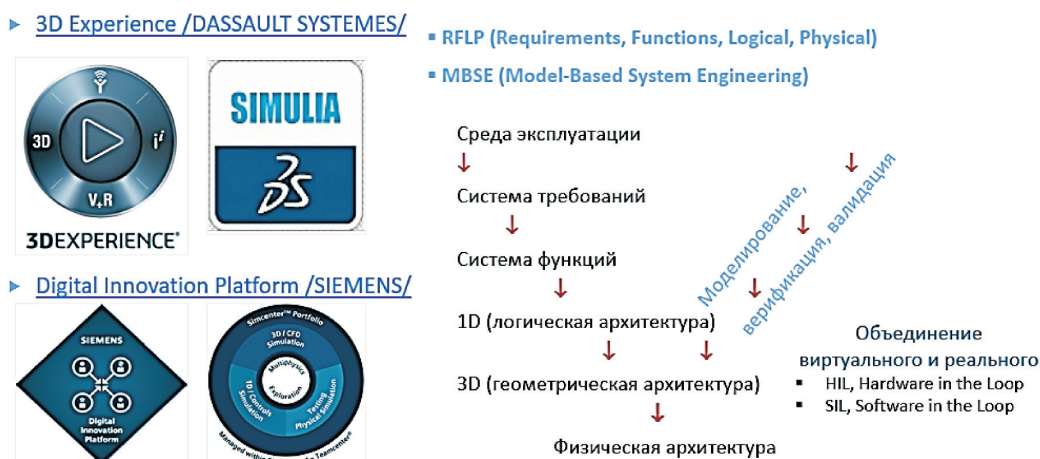


Рис. 2. Примеры промышленных платформ управления разработкой изделий при решении общих системных задач и поддерживаемые ими методологии

**Управление разработкой РКС при решении системных задач предметной области** (см. рис. 1) выполняют на основе комплексного моделирования сценариев реализации космических миссий, содержание которых определяет так называемая эксплуатационная концепция. Моделируют не только работу отдельных КА, но и их взаимодействие в составе орбитальной группировки и с объектами наземной инфраструктуры. Такое управление реализуют как на самых ранних этапах ЖЦ проекта, в ходе концептуального проектирования [7], так и в ходе эксплуатации, при осуществлении поддержки или модернизации уже действующих систем.

Известны также попытки связать модели макро- и микроуровня, когда работа отдельных систем или даже узлов/деталей РКТ напрямую отражается на функционировании системы в целом [8]. Ключевым элементом комплексного моделирования является моделирование баллистики и динамики РН и КА.

Очевидно, что комплексное моделирование, как и управление разработкой при решении системных задач предметной области, невозможно без соответствующего ПО, с помощью которого так называемая концепция цифровых двойников [9] приобретает прикладной характер.

С учетом опыта и особенностей применения в образовательной среде высшей школы на кафедре «Космические системы и ракетостроение» Московского авиационного института такое ПО подразделено на четыре класса.

*Средства начального уровня, требующие минимальной подготовки в части динамики движения и орбитальной механики.* Эти сред-

ства предназначены главным образом для студентов первого, второго курсов и учеников старших классов школ, готовящихся к поступлению в аэрокосмические вузы. Примером таких средств является симулятор Kerbal Space Program, разработанный компаниями Squad (Мексика) и Private Division (США).

*Средства базового уровня, требующие среднего уровня подготовки в части динамики движения и орбитальной механики.* Эти средства предназначены для студентов начальных курсов, уже знакомых с основами теории полета и устройства ракет и КА. Примером таких средств является симулятор Orbiter разработки Мартина Швейгера (Великобритания). Примечательно, что этот симулятор разработан в академической среде (Department of Computer Science University College London, Великобритания) [10].

*Средства профессионального уровня, применяемые в промышленности, требующие профессиональной подготовки.* Эти средства предназначены для студентов старших курсов, освоивших специальные дисциплины, и аспирантов. Примерами зарубежных средств профессионального уровня служат STK (System Tool Kit), FreeFlyer и GMAT (General Mission Analysis Tool). В отличие от STK и FreeFlyer, являющихся коммерческими программными пакетами, GMAT — открытое ПО, разрабатываемое NASA и партнерами, доступное для студентов [11].

Существуют и отечественные средства профессионального уровня, находящиеся в стадии разработки: система «КОСКОН» (КОСмический

КОНструктор) разработки ИПМ им. М.В. Келдыша РАН [12], программный комплекс для прецизионного моделирования орбитального и углового движений искусственных спутников Земли (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) [13] и др.

*Средства профессионального уровня широкого профиля, применяемые в образовательной среде и промышленности.* К ним относятся AnyLogic, Simio, Arena, Simulink, GPSS и др. С их помощью можно формировать модели различных предметных областей. Для рассматриваемой области в качестве примера следует выделить отечественную среду iWebsim (руководитель проекта А.Н. Балухто, Россия), в рамках которой создана экспериментальная библиотека компонентов для моделирования космических систем опико-электронного наблюдения [9, 14].

**Разработка концептуальных моделей или метамоделей для описания предметной области средствами онтологического инжиниринга** (см. рис. 1). Этот этап позволяет получить исчерпывающее описание рассматриваемой космической системы и ее окружения в контексте решаемых задач перед тем, как начать создавать модели с использованием формальных средств конкретного языка моделирования в рамках какой-либо выбранной программной системы.

Для реализации этих целей используют средства онтологического инжиниринга, среди которых известны: редактор онтологий OWL Protégé, разрабатываемый в академической среде (Стэнфорд, США) [15], редактор NeOn ToolKit и др.

**Содержание процесса управления разработкой РКС при решении общих системных задач.** Опережающий рост технологий, связанный с научно-техническим прогрессом, позволяет создавать все более сложные изделия. За последние десятилетия совершен полный переход от разработки монодисциплинарных изделий, чисто механических или электрических, к мехатронным, содержащим комплекс мультидисциплинарных решений, и далее к киберфизическим системам, способным принимать автономные решения без непосредственного участия пользователей.

Передовые технологии и объемы производства качественно увеличили сложность выпускаемой продукции, что обуславливает необходимость освоения и внедрения процессов си-

стемной инженерии на самых ранних этапах ЖЦ изделия как технологий разработки успешных с точки зрения всех заинтересованных сторон наукоемких изделий. В итоге изделие будет не только удовлетворять потребности пользователей, но и являться технологичным при производстве, эксплуатации и техническом обслуживании, тем самым гарантируя оптимальную стоимость полного ЖЦ.

В процессе разработки изделия специалисты различных предметных областей должны находиться в тесном взаимодействии друг с другом, чтобы принимать наиболее обоснованные решения. При этом существуют сложности, связанные с различными моделями представления разрабатываемого изделия, что часто приводит к принятию узкоспециализированных проектных решений, которые между собой имеют слабую корреляцию.

Также есть и существенные управленческие проблемы в организации структурированного процесса разработки, обеспечивающего эффективное междисциплинарное взаимодействие специалистов, в интересах создания конкурентоспособной продукции.

При разработке сложных наукоемких изделий можно выделить следующие основные проблемы:

- неуклонно возрастающая сложность изделий увеличивает риски при проектировании из-за неадекватной спецификации изделия и его неполной верификации;
- изделия часто спроектированы из отдельных частей, а не из архитектуры; это приводит к созданию «хрупких систем», которые характеризуются быстрым и существенным падением производительности при изменении состояния системы, в итоге они оказываются нетехнологичными при производстве и эксплуатации;
- технологии и инвестиции «теряются» на границах этапов ЖЦ изделия, что приводит к увеличению стоимости разработки и риску позднего обнаружения проблем проекта;
- технологии и инвестиции «теряются» между проектами, что сопровождается ростом затрат и рисков;
- техническая и программная стороны изделий слабо взаимосвязаны, что затрудняет принятие эффективных проектных решений.

Исследования показывают, что большинство дефектов возникает в изделии на ранних этапах его ЖЦ, но обнаруживаются они только на ста-

дии прототипирования или производства. По мере прохождения этапов ЖЦ стоимость компенсации таких дефектов возрастает в геометрической прогрессии.

Это связано с невысокой эффективностью неавтоматизированных процессов управления требованиями при неуклонном усложнении проектируемых изделий, что приводит к появлению неоднозначных, противоречивых или необязательных требований. Неоднозначные и противоречивые требования могут стать причиной потенциальных дефектов на более поздних этапах ЖЦ.

До появления методологий и автоматизированных инструментов системной инженерии изделия разрабатывались с применением традиционного подхода, основанного на использовании комплекта связанной документации, определяемой и регламентируемой в отрасли системой разработки и постановки продукции на производство (СРПП, ГОСТ Р15.000–2016).

Процесс разработки систем не мог быть непрерывным, так как проектная информация находилась во множестве различных документальных источников, которыми пользовались специалисты разных предметных областей, зачастую находящихся в различных организациях, географически удаленных друг от друга. В связи с этим возникало много проблем в обеспечении согласованности и актуальности документов, подлежащих рассмотрению.

Системная инженерия дает возможность структурировать процесс разработки и интегрировать все предметно-ориентированные проектные группы в единый процесс разработки, позволяя избежать недопонимания или проблем интеграции в рамках различных дисциплин. При этом системная инженерия учитывает специфические потребности и проектные решения в контексте ЖЦ изделия.

Согласно стандарту ISO/IEC TR 24748–1:2010 [16], для описания ЖЦ изделий используют модели как с последовательным прохождением



Рис. 3. Схема V-образного процесса проектирования

дением стадий, так и с итерационным и рекурсивным. Причем параллельное прохождение стадий или их прохождение в разном порядке может привести к формам ЖЦ с неодинаковыми характеристиками.

Несмотря на все богатство и разнообразие возможных форм ЖЦ, при моделировании за основу удобно брать типовые модели ЖЦ, такие как последовательная, инкрементная и V-образная (рис. 3), а также их комбинации.

Системная инженерия поддерживает архитектурно-ориентированный подход, в основу которого положены следующие требования:

- разделение функциональных аспектов и логических решений;
- функции определяются требованиями и распределяются по логической архитектуре;
- использование при необходимости уже существующей логической архитектуры, т. е. реализация проектирования путем управления конфигурациями на основе базового варианта;
- принятие оптимальных решений на всех этапах проектирования с применением различных моделей эффективности системы.

Процесс системной инженерии [17], использующий эти подходы, состоит из пяти базовых

видов деятельности, реализуемых в соответствии выбранными моделями ЖЦ изделия. Схема базовой деятельности в контексте V-процесса системной инженерии, реализованная в среде 3DExperience, показана на рис. 4.

Базовые виды деятельности описывают пять стадий создания систем:

- определение или постановка проблемы:
  - анализ потребностей заинтересованных сторон;
  - идентификация сервисов, предоставляемых системой для удовлетворения потребностей;
  - идентификация требований к системе;
- поиск альтернатив решения:
  - определение (и повторное использование) компонентов системы, функций, интерфейсов;
  - определение архитектуры системы;
- выбор наилучшей альтернативы решения (спецификации системы) путем анализа различных критериев эффективности;
- реализация решения — конструирование системы;
- интеграция решений (комплексирование), верификация и валидация (моделирование по-



Рис. 4. Схема базовой деятельности в контексте V-процесса системной инженерии, реализованная в среде 3DExperience

### Табличное представление архитектуры RFLP

Функциональные требования					
Требования первого уровня	Требования второго уровня	Функции, обеспечивающие требования	Логические элементы, выполняющие функции	Физические элементы, реализующие логические	Контроль/испытания

ведения, контроль/испытания, проверка на соответствие стандартам).

Одной из известных методологий реализации процессов системной инженерии является RFLP (Requirements, Functions, Logical, Physical). Методология системной инженерии RFLP основана на использовании четырех архитектурных представлений системы в виде:

- совокупности требований (первый уровень);
- совокупности функций (второй уровень);
- схемы логических элементов (третий уровень);
- конструкции, т. е. физических компонентов (четвертый уровень).

При нисходящем проектировании реализуются два подхода — от общего к частному и функциональный. При восходящем проектировании происходит интеграция решений, их верификация (путем испытаний) и валидация (посредством выполнения трассировки) на соответствие требованиям.

**Опыт реализации в учебном процессе.** В рамках направления «Модельно-ориентированная разработка космических систем» на кафедре «Космические системы и ракетостроение» ведутся работы в области системной инженерии, управления процессами ЖЦ сложных наукоемких изделий и его поддержки программными системами управления разработкой изделий на основе методологии системной инженерии RFLP. Дополнительно разрабатываются собственные решения [18, 19].

Использование инструментов промышленных платформ PLM-класса (типа 3DEXperience), реализующих подобные методологии, требует от обучающихся широкого спектра навыков применения инструментария PLM-систем. Эти навыки студенты могут получить только к 4–5 курсу, поэтому для преподавания базового курса по системной инженерии в его практической части используются различные табличные представления архитектуры системы.

В рамках практической части базового курса студенты выполняют реферат на тему примене-

ния методологии RFLP для проектирования агрегата изделия РКТ, в котором, используя табличные представления архитектуры системы (см. таблицу), реализуют базовую деятельность V-процесса системной инженерии.

Проектирование начинают с формирования спецификации требований к системе. Функциональные требования вырабатываются на основе ее миссии в контексте реализации [20]. Например, в ГОСТ Р 50736–95 «Антенно-фидерные устройства систем сухопутной подвижной радиосвязи» в разделе 5 «Технические требования» есть требования назначения (функциональные) и остальные (нефункциональные), предъявляемые к надежности, стойкости, транспортированию, хранению и др.).

Исходя из назначения, у антенно-фидерной системы КА может быть только одно функциональное требование — принимать и передавать радиосигналы. Все остальные требования будут нефункциональными: к работе антенны в составе конкретного типа спутника, к стандартизации и унификации составных частей, количеству циклов разворачивания и пр.

На этапе функционального проектирования для каждого требования формируется система функций, в результате реализации которых требования выполняются. В столбце «Функции, обеспечивающие требования» (см. таблицу) должны быть указаны функции, у которых есть преобразование потока на входе в поток на выходе.

Так, для обеспечения функционального требования «Принимать и передавать радиосигналы» антенно-фидерная система должна выполнять ряд технических функций: принимать, преобразовывать, усиливать, передавать сигнал и пр. Эти функции будут записаны в столбце таблицы «Функции, обеспечивающие требования» представления архитектуры, в ячейке, соответствующей этому функциональному требованию.

Нефункциональные требования могут быть обеспечены решениями логического уровня архитектуры (элементами с определенными функциональными параметрами), а также кон-



кретными конструктивными решениями (элементами физической архитектуры), например, насосом с определенными габаритными размерами, посадочными местами, диаметрами входных и выходных патрубков.

Эти требования целесообразно записать в отдельной таблице без столбца «Функции, обеспечивающие требования», так как они не обеспечиваются функциями системы. Для сокращения площади таблицы в разделе функционального анализа можно привести свою таблицу функциональной спецификации: в первом столбце представить функции системы, во втором («Чем обеспечивается») — логические элементы системы.

Например, для реализации нефункциональных требований антенно-фидерная система должна иметь определенные узлы стыковки с КА, средства защиты от внешних воздействий, степень преемственности и пр. Таким образом, в соответствующих ячейках таблицы нефункциональных требований будут записаны логические или физические элементы.

В разделе логической архитектуры вместе с таблицей студенты приводят схемное описание структуры логических элементов в любой выбранной нотации. Здесь также можно представить и отдельную таблицу логических элементов, где в столбце «Чем обеспечивается» будут показаны конкретные конструктивные решения — чертежи, 3D-модели.

В разделе физической архитектуры должны быть представлены конкретные конструктивные решения, реализующие логические элементы системы или напрямую нефункциональные требования.

В последнем разделе описания V-процесса студенты приводят перечень испытаний для подтверждения выполнения указанных в спецификации требований. В этом разделе они разрабатывают программу испытаний (список испытаний), которые предполагается реализовать. Эти испытания связывают с требованиями: каждое испытание должно проводиться для подтверждения выполнения системой какого-либо требования.

На каждом уровне можно указывать альтернативные варианты обеспечения требований: функции, логические и физические элементы, из которых оптимальные выбираются на основе заранее заданного массива критериев. В реферате студентам достаточно использовать только качественные оценки этих критериев.

При формировании спецификации требований важно не путать требования с их реализацией (логической или физической). Так, в некорректном требовании «Передача энергии от генератора к антенне (в передающем режиме) или от антенны к приемнику (в режиме приема)» уже присутствуют логические компоненты системы — приемник и генератор.

Приемник и генератор выполняют некоторые функции, которые обеспечивают требования. Эти элементы сразу отражаются в требовании, минуя определения функций, т. е. уже здесь система должна иметь приемник и генератор. Такое происходит, когда систему разрабатывают на основе аналога, у которого заранее известно, что входит в его состав. Здесь необходимо привить обучающимся не только методологически обоснованный подход к формированию корректной спецификации требований, но и навыки системного мышления.

Например, в методологии RFLP нельзя мешать архитектурные слои системы, так как они взаимно обусловлены связями реализации, благодаря которым всегда можно понять, откуда в конструкции появился тот или иной элемент, и что нужно в нем контролировать или испытывать, анализируя требование, которое он обеспечивает.

Возвращаясь к примеру с проектированием антенно-фидерной системы, после разработки спецификации требований и на основе функциональных требований студенты определяют функции системы, которые записывают в таблицу представления архитектуры в столбце «Функции, обеспечивающие требования».

Для функционального требования понадобится выполнить ряд функций по приему, передаче, преобразованию энергии, контролю, регулированию и т. п. Между этими функциями можно установить связи по входу–выходу, управлению и ресурсам.

Так, появляется функциональная спецификация, которая определяет то, что должна делать система, чтобы обеспечить заданные к ней требования. Логическую структуру антенно-фидерной системы разрабатывают как совокупность логических устройств, у которых нет конструкции, а есть только параметры функционирования. Причем каждая функция обеспечена работой одного или нескольких таких устройств. При проектировании логических устройств следует учитывать нефункциональные требования, например, необходимый

коэффициент полезного действия преобразования.

После разработки логической структуры, когда становится понятно, как выполняются функции, можно приступать к конструированию антенно-фидерной системы, т. е. воплощению логических элементов в физических объектах, имеющих аспект формы и материала. Здесь также следует учитывать нефункциональные требования (к центровке, габаритным размерам, максимальной массе, стандартизации и унификации и др.).

**Анализ опыта реализации, результаты.** Безусловно, реализация программ обучения методическим основам системной инженерии [21] и технологиям автоматизированного проектирования на основе моделей требует серьезной подготовки студентов по целому ряду дисциплин, в которых должны быть представлены информационные технологии, обеспечивающие процессы системной инженерии, такие как управление проектными данными, требованиями, конфигурациями и связанными изменениями.

Преподавателями кафедры «Космические системы и ракетостроение» установлено, что студенты только на пятом курсе готовы к освоению практического курса по системной инженерии, позволяющего им решать задачи дипломного проектирования на принципиально ином инженерном уровне.

С начала второго курса студенты в рамках учебно-исследовательской деятельности собирают материалы по типовым изделиям РКТ, на основании которых на шестом курсе выполняют дипломное проектирование.

С весеннего семестра второго курса студенты проходят обучение по дисциплине «Информационное моделирование инженерных объектов», где они получают знания и навыки по разработке различных видов моделей, используемых при решении задач проектирования изделий РКТ, знакомятся с системами твердотельного компьютерного моделирования (CAD-системами) и методологией построения цифровых моделей узлов и агрегатов изделий РКТ.

На третьем курсе в рамках изучения дисциплины «Информационная поддержка производства изделий РКТ» студенты получают знания по информационным технологиям, обеспечивающим процессы разработки изделий РКТ,

знакомятся со стандартом обмена данными об изделии ISO10303, изучают основы информационного моделирования предметной области на языке EXPRESS, получают навыки работы с системами управления проектными данными и ЖЦ изделия (PDM- и PLM-системами).

На четвертом курсе в рамках дисциплины «Технологические САПР» студенты изучают системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), получают навыки работы с САМ-системами. В рамках курсового проектирования они выполняют задание по разработке САПР ТП на основе связанных таблиц решения [19], а также по формированию единого информационного пространства управления данными конструкторско-технологического проектирования средствами отечественной системы PDM Step Suite, разработанной НИЦ «Прикладная логистика».

Опыт апробации подхода к обучению по специальным дисциплинам с применением комплексного моделирования космических систем, при котором происходит последовательное освоение методов и программных инструментов моделирования согласно их уровню сложности, подтвердил его эффективность в учебном процессе.

Что касается средств начального уровня, несмотря на то, что они позиционируются как игровые платформы, этот опыт подтверждает и международная практика [22, 23]. В России также известны положительные примеры, реализуемые в программах, например, Летних космических школ [24].

Непосредственное использование средств профессионального уровня без предварительной подготовки неэффективно, что обусловлено высоким порогом входа в освоении методического и программного обеспечения, а также требованиями к высокой квалификации.

Применение средств широкого профиля студентами самостоятельно еще более затруднено, так как предполагает разработку модели предметной области. Студенты готовы к этому только на старших курсах обучения.

## Выводы

1. Практика обучения студентов кафедры «Космические системы и ракетостроение» показала, что при реализации учебного процесса по этому направлению основной методической проблемой является необходимость разнесения

по времени преподавания теоретических основ системного подхода инженерной деятельности, являющегося базовым при введении в специальность, и практического курса по методологии и инструментам системной инженерии, который требует определенного задела знаний у студентов.

2. Существуют сложности с обеспечением учебных лабораторий программно-аппаратными средствами, необходимыми для выполнения практических занятий, курсовых и лабораторных работ. Это связано не только с очевидными финансово-организационными проблемами, но и с необходимостью использования ПО отечественных вендоров. В части технологий CAD/CAM/PDM отечественные информационные системы в целом обладают достаточным уровнем зрелости для развития у

студентов необходимых компетенций. Однако в инструментальной поддержке методологий системной инженерии пока нет равноценной замены ПО зарубежных вендоров. В частности, методология RLFP обеспечивается только средствами системы PLM-класса 3DEXperience компании Dassault Systemes. Возможной альтернативой являются методологии, построенные на использовании моделей на языке SysML [25], информационная поддержка которых обеспечена некоторыми свободно распространяемыми программными приложениями (Papyrus, Capella, Modelio). Однако использование моделей SysML требует разработки и внедрения в программы обучения специалистов дополнительных дисциплин по информационному моделированию на языках UML и SysML.

## Литература

- [1] Косяков А., Свит У.Н., Сеймур С.Дж. и др. *Системная инженерия. Принципы и практика*. Москва, ДМК Пресс, 2014. 624 с.
- [2] Левенчук А. *Системноинженерное мышление*. Москва, Ridero, 2018. 398 с.
- [3] Батоврин В.К. Образование в системной инженерии — проблемы подготовки специалистов для создания конкурентоспособных систем. *Открытое образование*, 2010, № 6, с. 164–172.
- [4] *INCOSSE: веб-сайт*. URL: <http://incose.org> (дата обращения: 01.03.2022).
- [5] Кабанов А.А., Федоров И.А., Дацюк И.В. Подходы к формированию сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды в образовательных учреждениях аэрокосмического профиля. *Королевские чтения*, 2022. URL: <https://korolev.bmstu.press/preprints/1697/> (дата обращения: 25.03.2022).
- [6] Проведение безопасных и эффективных квалификационных испытаний космических систем. *siemens.com: веб-сайт*. URL: <https://bit.ly/33APSsd> (дата обращения: 15.12.2021).
- [7] Ключников В.Ю., Романов А.А. Концептуальное проектирование космических систем на основе Lean-принципов. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2019, т. 6, № 3, с. 42–56, doi: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2019.6.3.42.56>
- [8] How Ansys and AGI products fit together. *youtube.com: веб-сайт*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=XHgGxzO0Xso> (дата обращения: 01.12.2021).
- [9] Балухто А.Н., Соколов Б.В., Карсаев О.В. Облачная платформа iWebsim как средство имитационного моделирования космических систем. *Тр. 10 всерос. науч.-практ. конф. ИММОД-2021*. Санкт-Петербург, ЦТСС, 2021, с. 95–104.
- [10] *Orbiter: веб-сайт*. URL: <https://www.orbitersim.com> (дата обращения: 01.06.2021).
- [11] *General Mission Analysis Tool (GMAT): веб-сайт*. URL: <http://gmatcentral.org/> (дата обращения: 01.06.2021).
- [12] Зухба Р.Д., Куракин П.В., Малинецкий Г.Г. и др. Система моделирования «КОСКОН» как инструмент поддержки принятия решений в космической отрасли. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2015. № 113. 36 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-113>
- [13] Овчинников М.Ю., Ткачев С.С., Ролдугин Д.С. и др. Программный комплекс для прецизионного моделирования орбитального и углового движения искусственных спутников Земли. *Управление движением и навигация летательных аппаратов. Сб. тр. XVII Всерос. сем.* Ч. 1. Москва, МФТИ, 2013, с. 121–123.

- [14] Имитационное моделирование динамических систем на базе платформы iWebsim. *iwebsim.ru: веб-сайт*. URL: <https://iWebsim.ru> (дата обращения: 29.03.2022).
- [15] OWL Protégé: веб-сайт. URL: <http://protege.stanford.edu/> (дата обращения: 16.03.2022).
- [16] ISO/IEC TR 24748–1:2010. *Systems and software engineering. Life cycle management. Part 1. Guide for life cycle management*. URL: [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=50502](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=50502) (дата обращения: 28.11.2021).
- [17] *INCOSE systems engineering handbook v.3.2*. URL: <https://www.incose.org/docs/default-source/ProductsPublications/se-handbook-version-3-2-2-table-of-contents.pdf?sfvrsn=4> (дата обращения: 20.03.2022).
- [18] Кабанов А.А. Программно-информационный комплекс поддержки процессов разработки изделий ракетно-космической техники. *16-я Межд. конф. Авиация и космонавтика – 2017*. Москва, Люксор, 2017, с. 220–221.
- [19] Федоров И.А. Процесс создания автоматизированной системы с использованием аппарата таблиц решений. *Труды МАИ*, 2012, № 53. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29733&eng=N>
- [20] Buede D.M. *The engineering design of systems*. Wiley, 2009. 536 p.
- [21] Кожевников Д.Е., Королев А.С., Сазонов Б.В. Компетентностная модель и роль системного инженера в управлении жизненным циклом объекта атомной отрасли. *Мат. 4 науч.-практ. конф. Актуальные проблемы системной и программной инженерии*. Москва, НИУ ВШЭ, 2015, с. 1–15.
- [22] Caldwell R. *Kerbal Space Program is a great tool for teaching aerospace and physics*. URL: <https://www.ncssm.edu/learning-innovations/2016/07/15/kerbal-space-program-is-a-great-tool-for-teaching-aerospace-and-physics> (дата обращения: 31.03.2022).
- [23] Терехов Ф. Космические симуляторы: от первопроходцев до наших дней. *Русский космос*, 2021, № 5, с. 72–77.
- [24] Полет к Луне на космическом корабле «Федерация» по двухпусковой схеме [Электронный ресурс]. URL: <https://1greywind.livejournal.com/555044.html?ysclid=la2fxjw5gu606005928> (дата обращения: 17.11.2019).
- [25] OMG Specification. *OMG System Modeling Language (OMG SysMLTM) Specification. V1.1 formal/2008-11-01*. November 2008. URL: <https://www.omg.org/spec/SysML/1.1/PDF>

## References

- [1] Kossiakoff A., Biemer S.M., Seymour S.J. et al. *Systems engineering principles and practice*. Wile, 2011. 560 p. (Russ. ed.: *Sistemnaya inzheneriya. Printsipy i praktika*. Moscow, DMK Press Publ., 2014. 624 p.)
- [2] Levenchuk A. *Sistemnoinzhenernoe myshlenie* [System engineering way of thinking]. Moscow, Ridero Publ., 2018. 398 p. (In Russ.).
- [3] Batovrin V.K. Education in system engineering: problems of training specialists in field of competitive systems development. *Otkrytoe obrazovanie* [Open Education], 2010, no. 6, pp. 164–172. (In Russ.).
- [4] *INCOSE: website*. URL: <http://incose.org> (accessed: 01.03.2022). (In Russ.).
- [5] Kabanov A.A., Fedorov I.A., Datsyuk I.V. [Approaches to formation of transparent design, working and experimental medium in educational aerospace institutions]. *Korolevskie chteniya* [Korolev Readings], 2022. URL: <https://korolev.bmstu.press/preprints/1697/> (accessed: 25.03.2022). (In Russ.).
- [6] *Provedenie bezopasnykh i effektivnykh kvalifikatsionnykh ispytaniy kosmicheskikh sistem* [Carrying out of safe and effective qualification tests of space systems]. *siemens.com: website*. URL: <https://bit.ly/33APSsd> (accessed: 15.12.2021). (In Russ.).
- [7] Klyushnikov V.Yu., Romanov A.A. Conceptual design of space systems based on lean principles. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems], 2019, pp. 6, no. 3, pp. 42–56, doi: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2019.6.3.42.56> (in Russ.).
- [8] How Ansys and AGI products fit together. *youtube.com: website*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=XHhgXzO0Xso> (accessed: 01.12.2021).

- [9] Balukhto A.N., Sokolov B.V., Karsaev O.V. [iWebsim cloud platform as a tool for space system simulation]. *Tr. 10 vseros. nauch.-prakt. konf. IMMOD-2021* [Proc. 10 Russ. Sci.-Pract. Conf. IMMOD-2021]. Sankt-Petersburg, TsTSS Publ., 2021, pp. 95–104. (In Russ.).
- [10] *Orbiter: website*. URL: <https://www.orbitersim.com> (accessed: 01.06.2021).
- [11] *General Mission Analysis Tool (GMAT): website*. URL: <http://gmatcentral.org/> (accessed: 01.06.2021).
- [12] Zukhba R.D., Kurakin P.V., Malinetskiy G.G. et al. The simulation system 'COSCON' as a tool for decision support in the space industry. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha* [KIAM Preprint]. 2015. no. 113. 36 p. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-113> (in Russ.).
- [13] Ovchinnikov M.Yu., Tkachev S.S., Roldugin D.S. et al. [Software complex for precision modeling of orbital and angular motion of Earth artificial satellites]. *Upravlenie dvizheniem i navigatsiya letatel'nykh apparatov. Sb. tr. XVII Vseros. sem. Ch. 1* [Motion Control and Navigation of Aircraft. Proc. XVII Russ. Sem. P. 1]. Moscow, MFTI Publ., 2013, pp. 121–123. (In Russ.).
- [14] *Imitatsionnoe modelirovanie dinamicheskikh sistem na baze platformy iWebsim* [Imitation modeling of dynamic systems based on iWebsim platform]. *iwebsim.ru: website*. URL: <https://iWebsim.ru> (accessed: 29.03.2022). (In Russ.).
- [15] *OWL Protégé: website*. URL: <http://protege.stanford.edu/> (accessed: 16.03.2022).
- [16] ISO/IEC TR 24748–1:2010. *Systems and software engineering. Life cycle management*. Part 1. Guide for life cycle management. URL: [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=50502](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=50502) (accessed: 28.11.2021).
- [17] *INCOSE systems engineering handbook v.3.2*. URL: <https://www.incose.org/docs/default-source/ProductsPublications/se-handbook-version-3-2-2-table-of-contents.pdf?sfvrsn=4> (accessed: 20.03.2022).
- [18] Kabanov A.A. [Program and information complex supporting process for development of rocket and space equipment products]. *16-ya Mezhd. konf. Aviatsiya i kosmonavtika – 2017* [16<sup>th</sup> Int. Conf. Aviation and Cosmonautics - 2017]. Moscow, Lyuksor Publ., 2017, pp. 220–221. (In Russ.).
- [19] Fedorov I.A. Process of creation of the automated system with use of the decision tables. *Trudy MAI*, 2012, no. 53. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29733&eng=N> (in Russ.).
- [20] Buede D.M. *The engineering design of systems*. Wiley, 2009. 536 p.
- [21] Kozhevnikov D.E., Korolev A.S., Sazonov B.V. [Competence-based model and role of system engineer in control on life cycle of a nuclear industry object]. *Mat. 4 nauch.-prakt. konf. Aktual'nye problemy sistemnoy i programmnoy inzhenerii* [Proc. 4<sup>th</sup> Sci.-Pract. Conf. Actual Problems of System and Software Engineering]. Moscow, NIU VShE Publ., 2015, pp. 1–15. (In Russ.).
- [22] Caldwell R. *Kerbal Space Program is a great tool for teaching aerospace and physics*. URL: <https://www.ncssm.edu/learning-innovations/2016/07/15/kerbal-space-program-is-a-great-tool-for-teaching-aerospace-and-physics> (accessed: 31.03.2022).
- [23] Terekhov F. Space simulators: from pioneers to present. *Russkiy kosmos*, 2021, no. 5, pp. 72–77. (In Russ.).
- [24] Polet k Lune na kosmicheskom korable Federatsiya po dvukhpuskovoy skheme [Elektronnyy resurs]. URL: <https://1greywind.livejournal.com/555044.html?ysclid=la2fxjw5gu606005928> (accessed: 17.11.2019). (In Russ.).
- [25] OMG Specification. *OMG System Modeling Language (OMG SysMLTM) Specification*. V1.1 formal/2008-11-01. November 2008. URL: <https://www.omg.org/spec/SysML/1.1/PDF>

## Информация об авторах

**КАБАНОВ Александр Александрович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Космические системы и ракетостроение». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: drdt@mail.ru).

**ФЕДОРОВ Илья Александрович** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Космические системы и ракетостроение». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: ilia\_fedorov@mail.ru).

**ДАЦЮК Иван Владимирович** — ассистент кафедры «Космические системы и ракетостроение». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: dotz6f@yandex.ru).

## Information about the authors

**KABANOV Aleksandr Aleksandrovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor of Space systems and Rocket Engineering Department. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoe Shosse, Bldg. 4, e-mail: drdt@mail.ru).

**FEDOROV Ilya Aleksandrovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Space systems and Rocket Engineering Department. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoe Shosse, Bldg. 4, e-mail: ilia\_fedorov@mail.ru).

**DATSUK Ivan Vladimirovich** — Assistant, Department of Space Systems and Rocket Engineering. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoe Shosse, Bldg. 4, e-mail: dotz6f@yandex.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кабанов А.А., Федоров И.А., Дацюк И.В. Содержание и опыт реализации направления модельно-ориентированной разработки ракетно-космических систем в профильных учебных заведениях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 11, с. 78–91, doi: 10.18698/0536-1044-2022-11-78-91

### Please cite this article in English as:

Kabanov A.A., Fedorov I.A., Datsuk I.V. The Content and Experience of Implementing the Direction of Model-Based Development of Rocket and Space Systems in Specialized Educational Institutions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 11, pp. 78–91, doi: 10.18698/0536-1044-2022-11-78-91



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
предлагает читателям учебник

### «Расчет, моделирование и проектирование генераторов низкотемпературной плазмы»

Авторы: Г.К. Клименко, В.В. Кузенов, А.А. Ляпин,  
С.В. Рыжков

Предложен системный подход к разработке конструкции электродугового генератора плазмы — плазмотрона. Приведены примеры конструкций плазмотронов различных схем и назначения. Представлена методика расчета основных характеристик плазмотрона, предложена его универсальная схемная модель.

Для студентов и аспирантов физико-технических специальностей университетов по направлениям подготовки «Высокотехнологические плазменные и энергетические установки» и «Ядерная энергетика и теплофизика».

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>