

Модельно-ориентированный системный инжиниринг как основа обеспечения разработки и создания перспективных космических систем и комплексов

Н. В. Рябогин, к. т. н., доцент, ryabogin_nv@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Г. А. Ерохин, к. т. н., доцент, Erohin_GA@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Е. Б. Пронина, pronina.eb@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Ю. Кошелев, koshelev.ay@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Предложен анализ развития методов математического моделирования, в том числе с учетом развития инструментов моделирования, процессов и систем в ракетно-космической технике. Сформулированы методы исследования и описания сложных систем в применении к процессу их моделирования и прогнозирования. Проанализирован переход от математического моделирования процессов к системному подходу и системному инжинирингу. Продемонстрирован естественный переход к модельно-ориентированному системному инжинирингу в условиях развития вычислительной техники. Обозначена необходимость применения систем автоматизации проектирования при использовании подходов модельно-ориентированного системного инжиниринга. Представлена перспективная технология проектирования сложных систем — «цифровой двойник» и приведены основные направления ее применения.

Ключевые слова: математическое моделирование систем, системный анализ, модельно-ориентированный системный инжиниринг, системный инжиниринг, вычислительная техника, цифровые модели, цифровые двойники

Model-Based Systems Engineering as a Basis for Development and Creation of Promising Space Systems and Complexes

N. V. Ryabogin, Cand. Sci. (Engineering), assistant professor, ryabogin_nv@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

G. A. Erokhin, Cand. Sci. (Engineering), assistant professor, Erohin_GA@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

E. B. Pronina, pronina.eb@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. Yu. Koshelev, koshelev.ay@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper offers an analysis to develop mathematical modeling methods taking into account the development of modeling tools, processes, and systems for rocket and space technology. The methods of research and description of complex systems in application to the process of their modeling and forecasting are formulated. The paper analyses the transition from mathematical modeling of processes to a systems approach and systems engineering. The natural transition to model-based systems engineering under conditions of computer engineering development is demonstrated. Necessity to apply design automation systems when using approaches of model-based systems engineering is emphasized. The advanced technology to design complex systems — a "digital twin" is presented and main directions of its application are given.

Keywords: mathematical system modeling, systems analysis, model-based systems engineering, systems engineering, computer engineering, digital models, digital twins

Введение

Развитие авиации, становление ракетно-космической техники, ядерной энергетики и других наукоемких отраслей привели к усложнению технических устройств и систем, которые в этих отраслях создаются и активно используются. Их проектирование, построение и внедрение, как и экспериментальная отработка, стали требовать больших временных затрат и материальных ресурсов. На фоне прорыва в совершенствовании вычислительной техники возникли объективные предпосылки для становления и быстрого развития математического моделирования как эффективного инструментария для проектирования, расчетно-теоретического сопровождения, оптимизации и других проектных исследований. В настоящее время возможности вычислительной техники в совокупности с программными продуктами позволяют пройти полный путь от идеи до реализации изделий ракетно-космической техники без использования традиционных «бумажных» технологий. Одновременно с этим вероятность положительной реализации идеи повышается за счет возможностей моделирования различных процессов, протекающих в создаваемом изделии. Так же, как появление вычислительной техники определило появление дисциплины моделирования процессов, развитие возможностей вычислительной техники определило появление междисциплинарного модельно-ориентированного системного инжиниринга. В настоящей работе рассмотрен процесс перехода от математического моделирования простейших процессов на первых ЭВМ до создания цифровых двойников систем и проведения детального моделирования функционирования космических комплексов.

Модели процессов и систем

Математическое моделирование процессов — естественный способ изучения свойств и поведения любой системы, в том числе и космической, а идея моделирования проста и в то же время интуитивно привлекательна. Она дает пользователю возможность экспериментировать с системами в тех случаях, когда делать это на реальном объекте практически невозможно и нецелесообразно. Несмотря

на то что моделирование основывается на теории вычислительных систем, на математике и вычислительных методах, теории вероятности и математической статистике, оно во многом остается интуитивным [1]. По сути происходит замена исходного объекта его моделью и дальнейшее исследование этого объекта с помощью модели. В таком случае модель является образом системы, исследование которого служит средством для получения информации о системе [2–7].

О том, как устроен мир, мы начинаем задумываться, если сталкиваемся с удивившим нас новым явлением или вдруг неожиданно приходим к результату, настолько отличающемуся от ожидавшегося. Строгое обоснование модели строения мира, приводящей в закономерное соответствие факты, могут привести только специалисты. Необходим очень высокий уровень подготовленности в каждой области [1, 3, 4, 6].

Элементы моделирования использовались с самого начала появления точных наук. Появление ЭВМ стало очевидным толчком для развития методов моделирования процессов: моделирования взрывов, процессов ядерного распада и синтеза, движения ракет и искусственных спутников Земли. С развитием ЭВМ моделирование стало не только инструментом изучения объектов, но и инструментом создания новых объектов.

Имитационное моделирование — один из самых мощных инструментов анализа, которыми располагают люди, ответственные за разработку и функционирование сложных процессов и систем [8–11]. Имитационное моделирование включает в себя экспериментальную и прикладную методологии и позволяет:

- описать поведение систем;
- построить теории и гипотезы, которые могут объяснить наблюдаемое поведение систем;
- использовать эти теории для предсказания поведения систем.

Согласно [4, 12], модели можно разделить по типу представления:

- физические (натурные) модели,
- масштабированные модели,
- аналоговые модели,

- управленческие модели,
- моделирование на ЭВМ,
- математические модели.

Аналоговыми моделями являются модели, в которых свойство реального объекта представляется некоторым другим свойством аналогичного по поведению объекта. Задача решается путем замены одного свойства другим, после чего полученные результаты надо истолковать применительно к исходным свойствам объекта. Аналоговая ЭВМ, в которой изменение напряжения в сети определенной конфигурации может отображать решение дифференциальных уравнений, является превосходным примером аналоговой имитационной модели. До появления мощных цифровых вычислителей аналоговые вычислители широко применялись в авиационной и ракетной технике для оперативной обработки различной информации и последующего формирования сигналов управления [4].

Различные методы анализа одного процесса могут привести к созданию различающихся описаний реальных космических систем. Тем не менее описание любых систем для целей имитационного моделирования, как правило, состоит из двух этапов: статического и динамического представлений. На первом этапе формирования статического представления устанавливаются признаки существования подсистем. На втором этапе происходит описание изменений состояний системы и последовательности переходов между состояниями. Состояния космической системы определяют набор соответствующих свойств системы [3, 5–7, 13, 14].

Одним из методов описания изменения состояний космических систем может быть описание через диаграммы состояний современных графических средств системного анализа, что позволяет наглядно описывать архитектуру системы, состояния и определение переходов между этими состояниями. Метод позволяет наглядно описывать ключевые стадии и режимы работы систем, адекватно отражать возможные переходы между режимами и значительно улучшает как разработку программ и методик испытаний, так и их отработку [6, 7, 13, 14]. Подходящим для задач разработки моделей можно считать язык System Modeling Language (SysML), развиваемый как расширение UML в целях разработки, анализа и верификации сложных динамиче-

ских систем. SysML является графическим языком моделирования, который реализует анализ, спецификацию, разработку и проверку сложных систем [15, 16].

Язык SysML представляет собой набор из диаграмм различного назначения, объединенных в группы по назначению: структурные, поведенческие (диаграммы деятельности, последовательности, состояния, вариантов использования), диаграммы требований. Диаграммы состояний и действий SysML могут быть использованы для описания логики смены режимов работы системы и действий в условиях отказов [13]. Выделение элементов системы подобным образом позволяет разработчику или группе разработчиков реализовывать и отлаживать соответствующий автономный элемент, используя упрощенные имитационные математические модели.

Описание любой системы неразрывно связано с использованием системного подхода. Системный подход заключается в том, что исследованию подвергается система в целом, а не отдельная ее часть. Очевидно, что результирующее поведение системы отличается от суммы взаимодействия отдельных частей системы. При проектировании архитектуры систем и комплексов решается задача создания иерархической структуры, включающей системы, подсистемы и отдельные модули. Параллельно должна быть решена задача обеспечения испытаний и эксплуатации. В этом случае от качества построения архитектуры комплекса зависит эффективность контроля работы, обнаружения и парирования нештатных ситуаций.

Возрастающая сложность космических систем, сложность их наземной отработки и необходимость описания этой сложности приводят к тому, что системный подход становится необходимым методом исследования. Космические системы сегодня представляют собой сложные многокомпонентные комплексы, содержащие в себе как аппаратные, так и программные средства, при разработке которых необходимо применение механизмов системного инжиниринга [3–5, 8–11, 13, 17–23].

Космические системы обладают сложной многоуровневой структурой. В связи с этим разработка частей системы более высокого уровня включает разработку частей системы нижних уровней.

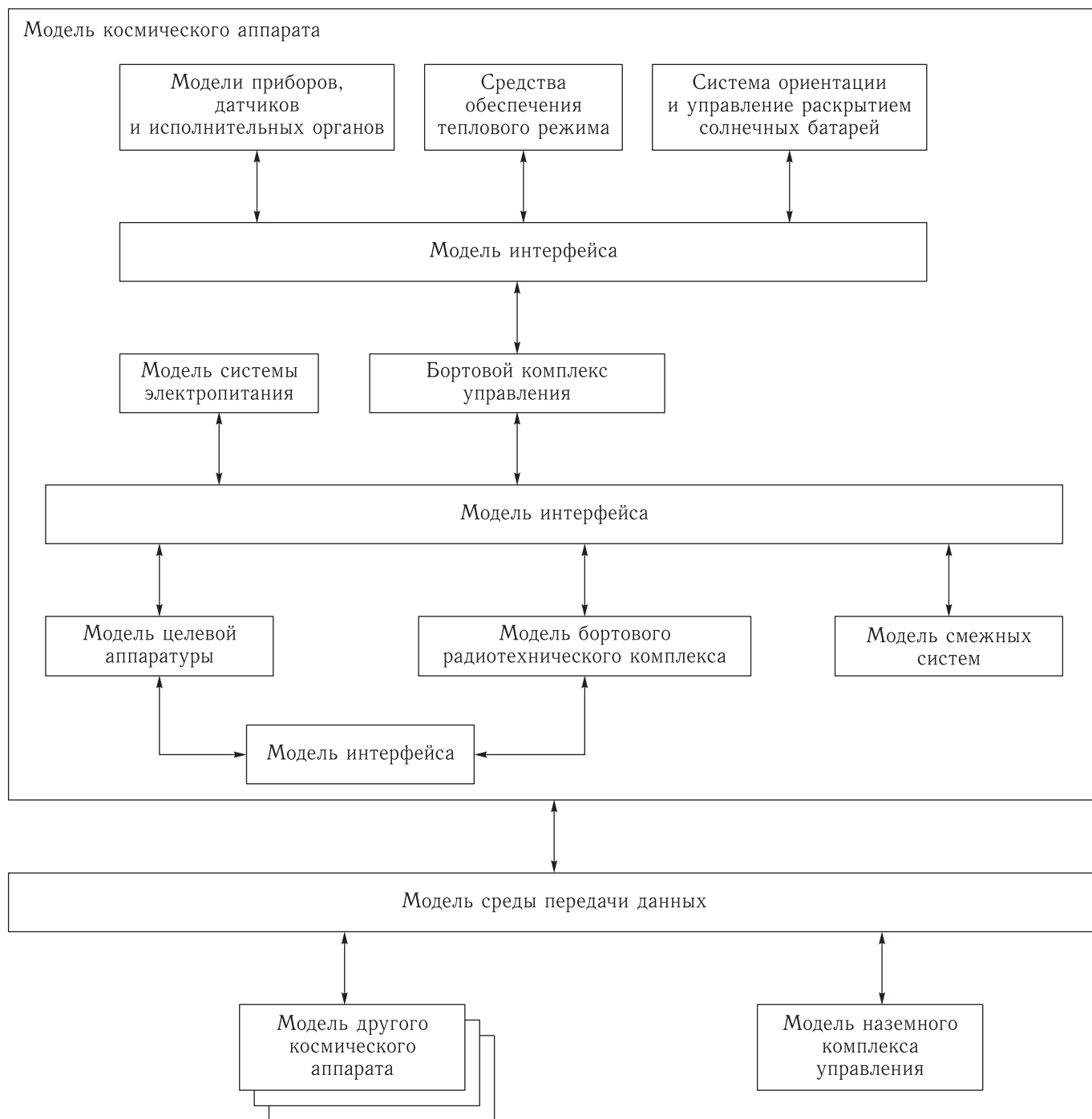


Рис. 1. Модели, необходимые для отработки бортового комплекса управления

Следует отметить, что для получения полноценного описания, анализа и отработки космических систем необходим ряд моделей смежных систем и устройств, с которыми они взаимодействуют. Так, например, для отработки бортового комплекса

управления космического аппарата необходим ряд моделей, приведенных на рис. 1. При этом в модели приборов, датчиков и исполнительных органов (рис. 2) входят модели звездных датчиков, системы навигации и времени, датчиков измерения угловых

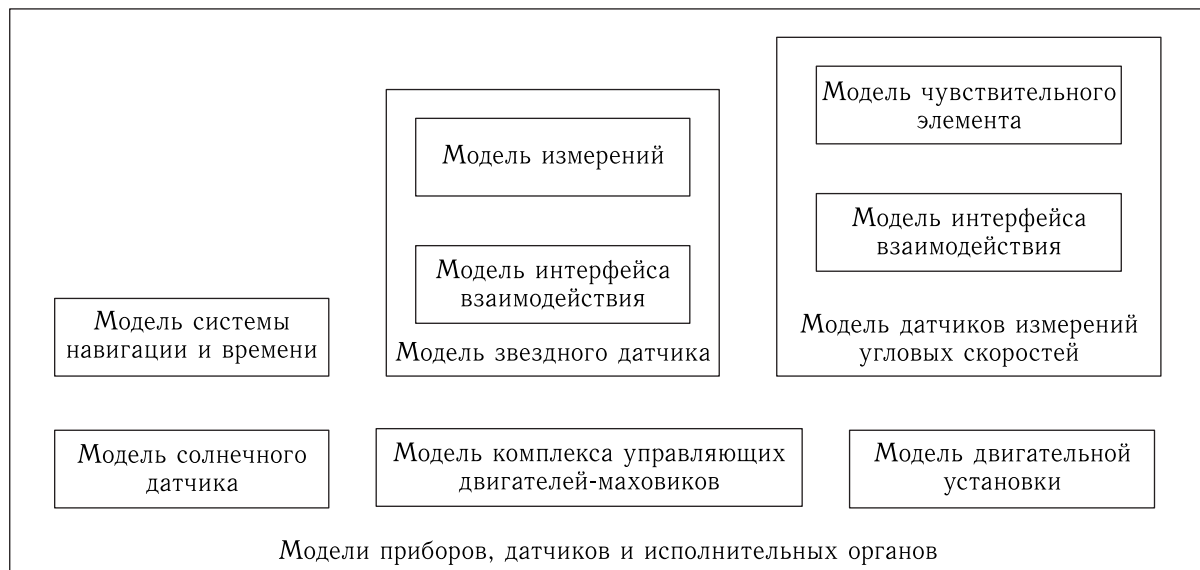


Рис. 2. Состав моделей приборов, датчиков и исполнительных органов

скоростей, солнечных датчиков, комплекса управляющих двигателей-маховиков, двигательной установки. При этом модель звездного датчика включает модель интерфейса взаимодействия и модель измерений, а модель датчиков измерения угловых скоростей состоит из модели чувствительного элемента и модели интерфейса взаимодействия.

Разработанные модели должны использоваться для моделирования других космических аппаратов, в составе которых применены компоненты с соответствующими моделями. Также разработанные модели являются и основой для анализа достижимости требуемых характеристик при предпроектном анализе.

Системный инжиниринг

Системный инжиниринг (СИ) и управление проектами (УП) — важные компоненты на этапах проектирования, разработки и производства таких сложных систем, как космические системы и комплексы. Впервые СИ возник как отдельная инженерная дисциплина в 1950-х годах при активном освоении космоса. Классического (однозначного) определения СИ в литературе нет. Усредняя существующие определения в контексте настоящей статьи, будем рассматривать СИ как междисциплинарный

подход к проектированию, разработке и проверке интегрированного и сбалансированного набора системных решений для продуктов и процессов, которые удовлетворяют заданным требованиям [20–26].

Системная инженерия, как отмечается в [23], «охватывает научные и инженерные подходы, связанные с разработкой, производством, проверкой, развертыванием, эксплуатацией, поддержкой и утилизацией системных продуктов и процессов; разрабатывает необходимое оборудование, процедуры и данные для обучения пользователей; определяет и сопровождает управление конфигурацией системы; разрабатывает структуры разбивки работ и ведомости работ; предоставляет информацию для принятия управленческих решений».

Как следует из приведенного выше определения, системная инженерия является итеративным процессом, в котором участвуют специалисты различных предметных областей. Такой процесс обеспечивает техническое управление на всех этапах жизненного цикла космической системы или комплекса от формирования требований до завершения ее эксплуатации. В ходе этого процесса «решения по проектированию сбалансированы с заданными требованиями наряду с ограничениями, налагаемыми технологиями, бюджетами и графиками» [23].

Первым этапом в процессе СИ является разработка требований к целевому продукту на основе анализа предпроектных исследований. На этом этапе «системный инженер пытается дополнительно вывести, уточнить и определить требования заказчика, включая определение количественных характеристик, которыми должна обладать космическая система или комплекс. Такие работы нацелены на выявления взаимосвязи между требованиями, их приоритетами, угрозами, условиями применения, ограничениями» [23] и показателями эффективности.

Второй этап процесса СИ — функциональный анализ. Целью этого этапа является декомпозиция общих системных требований на требования к отдельным подсистемам. Такие свойства разрабатываемой космической системы, как тестируемость, простота производства, применяемость, ремонтпригодность, становятся отдельными переменными в рамках процесса системного инжиниринга. Особое внимание уделяется обеспечению адресации всех внутренних и внешних интерфейсов. С помощью обратной связи требования, сформированные на этом этапе, синхронизируются с общими требованиями на первом этапе.

Следующий этап — этап синтеза космической системы — охватывает действия, в ходе которых сформулированные к ней требования удовлетворяются через выработанные на предыдущих этапах проектные решения. Совокупность проектных решений определяет архитектуру разрабатываемой системы, которая соответствует функциональным требованиям, полученным на этапе функционального анализа. Также через обратную связь эти решения сопоставляются с функциональным распределением, для того чтобы гарантировать выполнение функций и удовлетворение требований. На каждом этапе используют различные методы верификации для проведения проверки соответствия проекта требованиям, к ним относятся такие методы как экспертиза, натурные и полунатурные испытания, моделирование и анализ.

В результате выполнения всего процесса должен быть получен проект, который отвечает потребностям, содержащимся в исходных требованиях и установленных заказчиком. При этом проект обычно «документируется в базе данных, архитек-

туре системы, элементе конфигурации системы или спецификации.

При выполнении этапов процесса СИ широко используются методы системного анализа, которые обеспечивают баланс процессов анализа требований, функционального анализа и синтеза с требованиями для их выполнения временных и материальных затрат» [23], соблюдением графика выполнения работ и возможными рисками. Таким образом, постоянный контроль и анализ принимаемых проектных решений призваны гарантировать, что полученная в результате космическая система является реализуемой, выполняет предъявленные к ней требования и эффективной в эксплуатации.

Из вышеизложенного может быть сделан вывод, что системный инжиниринг является средством для успешной реализации проектов [25]. В нем рассматриваются различные аспекты создания космических систем, начиная с замысла и заканчивая утилизацией. Применяемый в системном инжиниринге механизм управления требованиями формализует аспекты системы и назначает критерии выполнения требований. В таком случае при формализации требований к космической системе на различных стадиях проектирования каждое требование может быть сопровождено соответствующей моделью. Тогда процесс системного инжиниринга может быть преобразован в процессы управления моделями составных частей, аспектов системы [20, 21, 26].

Модельно-ориентированный системный инжиниринг

Модельно-ориентированный системный инжиниринг является особой технологией проектирования и сопровождения различных систем, объединяющей в себе методы как моделирования, так и визуализации представления данных. Достоинства данного подхода проектирования отмечены в большом количестве работ [27–30].

Модельно-ориентированный системный инжиниринг базируется на применении различных моделей на всех этапах жизненного цикла системы, используемых для решения большого круга задач, таких как представление спецификаций требований,

обеспечение выполнений требований к системе, ее проектирование, получение прототипа системы, в том числе физического, для анализа, тестирования и верификации системы. Основной целью описания космической системы в виде моделей является объединение всей имеющейся информации об объекте и получение полноценного представления о результатах проекта. Процесс проектирования космической системы ориентирован на выявление целостности системы и ее подсистем, иерархичности ее строения — подчиненности ее внутренних элементов, определение организационной структуры и взаимосвязей между внутренними элементами системы, а также использование для описания как системы, так и ее отдельных элементов множества моделей. Кроме этого, применение модельно-ориентированного системного инжиниринга позволяет объединять и координировать работу всех участников проектирования систем различной специализации.

На начальном этапе проектирования любой системы определяются требования к ней (выпускается ТЗ или спецификация требований). Для получения представления о реализуемости, согласованности, полноте предъявляемых требований модельно-ориентированный системный инжиниринг предполагает построение системной модели — модели объекта проектирования. На дальнейших этапах разработки продолжается эволюция данной модели: ее уточнение и расширение по мере формирования новых описаний элементов космической системы и системы в целом. Таким образом, растет точность модели и в конечном счете приводит к получению прототипа проектируемой системы. Из-за непрерывного тестирования и верификации модели (и принимаемых проектных решений) ошибки выявляются на более ранних этапах разработки по сравнению с традиционным подходом к проектированию систем, что повышает качество проектирования и уменьшает риск невыполнения сроков разработки.

Стоит отметить, что применение модельно-ориентированного системного инжиниринга при проектировании космических систем невозможно без использования автоматизированных систем проектирования (САПР), обеспечивающих среду проектирования и разработки, единую базу хранения созданных описаний системы, тестирования и верификации созданных артефактов, взаимосвязи между

моделями, элементами и т. д., планирования процессов разработки, контроля выполнения работ и др.

Такая САПР может объединять в себя системы различного назначения, взаимодействующие между собой. Для САПР программного обеспечения (ПО), помимо среды разработки, необходимо как минимум наличие следующих дополнительных систем: управления требованиями, планирования работ, контроля версии, планирования испытаний, средств отработки и контроля документации [31–36].

Цифровые двойники: реформа процессов жизненного цикла разработки и производства инновационной продукции

Технология цифровых двойников является развивающейся и в настоящее время находится на пике завышенных ожиданий, по данным цикла зрелости новых технологий (Hype Cycle for Emerging Technologies), составленного компанией Gartner в 2018 году. Плато продуктивности (Plateau of Productivity), зрелость технологии будет достигнута только через 5–10 лет [37].

Термин «цифровой двойник» был введен Майклом Гривзом [38]. Согласно предложенной им концепции, цифровой двойник объединяет реальное и виртуальное пространства, при этом в виртуальном пространстве содержится вся информация, собранная в реальном пространстве о данном объекте или процессе, а также всеобъемлющее его физическое описание, которое должно быть «практически неотличимо от своего физического аналога» [39]. Также М. Гривзом были введены еще дополнительные понятия и их определения в области цифровых двойников:

- прототипом цифрового двойника (digital twin prototype, DTP) является прототип, который используется для создания экземпляра цифрового двойника. В большинстве случаев в состав такого прототипа входит подробная высокоточная модель. При этом прототип не включает в себя результаты измерений и отчеты, поступающие от специального физического устройства;

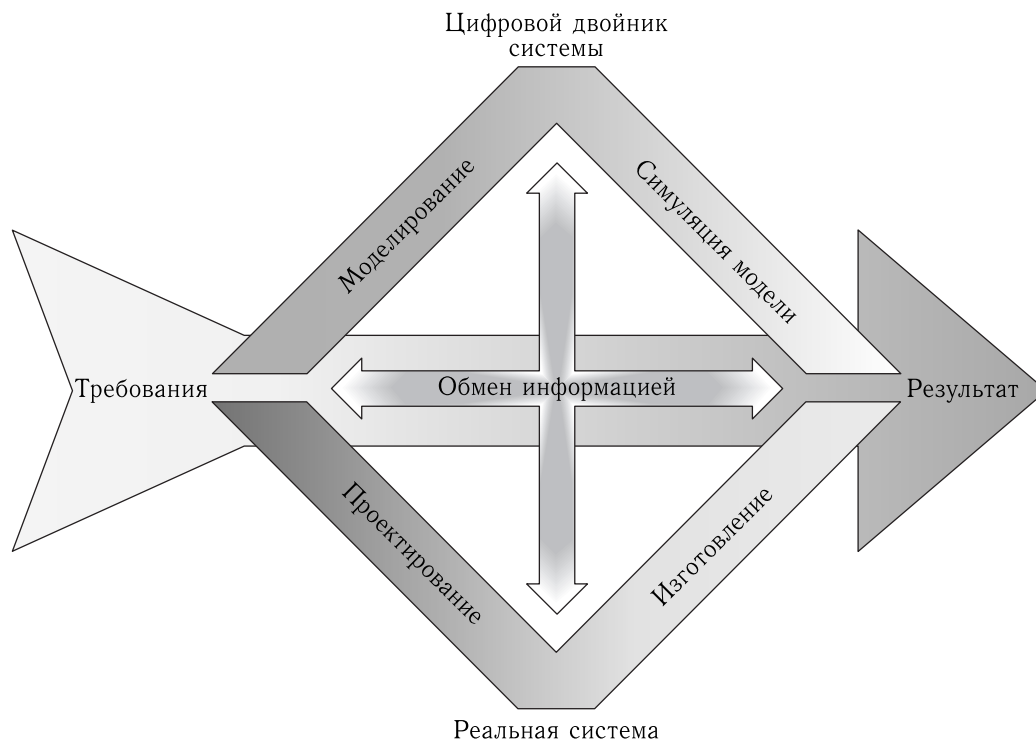


Рис. 3. Жизненные циклы реальной системы и цифрового двойника

- экземпляром цифрового двойника (digital twin instance, DTI) является цифровой двойник, в котором содержится информация о настройках модели, управляющих параметрах, данные с датчиков и хронологические сведения для конкретного изделия, устройства или процесса. При помощи такого экземпляра может быть спрогнозировано состояние конкретного двигателя в конкретном истребителе;
- цифровыми двойниками (digital twin aggregate, DTA) является группа цифровых двойников, которые могут не обладать независимой уникальной структурой данных, но составляющие экземпляры цифрового двойника могут запрашивать и обмениваться данными друг с другом;
- средой цифровых двойников (digital twin environment, DTE) является интегрированное мультифизическое и многомасштабное окружение, предназначенное для работы с цифровыми двойниками.

В сущности цифровые двойники предназначены не только для хранения информации об изде-

лии и процессе его разработки, но и для обеспечения возможности определения рисков и предсказания последствий принятия тех или иных решений или возникновения неисправностей, осуществляемых за счет хранения накопленного опыта создания и эксплуатации различных изделий. То есть применение цифровых двойников позволит наиболее эффективно применять накопленный опыт при выполнении работ по проектированию космических систем и комплексов и их сопровождению.

Цифровой двойник обладает собственным жизненным циклом, который при этом является двойником, зеркальным отражением жизненного цикла создания космической системы. Жизненные циклы реальной системы и ее цифрового двойника представлены на рис. 3.

Заключение

В настоящее время возможности вычислительной техники в совокупности с программными продуктами позволяют пройти полный путь от идеи до получения реализации космической системы

или комплекса без использования бумажных технологий. Выросли возможности моделирования различных процессов, протекающих в изделии. Развитие системного инжиниринга, модельно-ориентированного системного инжиниринга и цифровых двойников тесно связано с возможностями вычислительной техники. Резкий скачок технологий дал существенный прирост производительности компьютеров, что, в свою очередь, позволило повысить сложность и вложенность математических моделей и создало цифровых двойников. Таким образом, возник мощный виртуальный инструментарий, позволяющий в короткие сроки реализовывать сложные, в том числе и космические, системы. Процесс прототипирования при использовании технологий модельно-ориентированного системного инжиниринга существенно сократился во времени и все больше переходит в цифровое пространство. Прототипирование на основе цифровых двойников позволяет ликвидировать ошибки проектирования еще на стадии моделирования, тем самым существенно повышая вероятность реализации проекта и сокращая объем натурных испытаний. Демонстрируется необходимость применения методов системного инжиниринга и модельно-ориентированного системного инжиниринга для разработки космических систем и комплексов. Продemonстрирована дальнейшая перспектива применения методов модельно-ориентированного системного инжиниринга.

Список литературы

1. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
2. Неуймин Я. Г. Модели в науке и технике: история, теория и практика. Ленинград: Наука, 1984. 190 с.
3. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 320 с.
4. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука. Пер. с англ.; под ред. Е. К. Масловского. М.: Мир, 1978. 420 с.
5. Пупков К. А., Коньков В. Г. Интеллектуальные системы (Исследование и создание). М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 345 с.
6. Коварцев А. Н. Методы и средства визуального параллельного программирования. Автоматизация программирования. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 168 с.
7. Кознов Д. В. Программная инженерия и визуальное моделирование: воспитание культуры работы с информацией // Программная инженерия, 2015, № 10. С. 3–11.
8. Eickhoff J. Simulating Spacecraft Systems. Immenstaad: Springer, 2009. 359 p.
9. Бровкин А. Г., Бурдыгов Б. Г., Гордийко С. В. и др. Бортовые системы управления космическими аппаратами / Под ред. А. С. Сырова. М.: Изд-во МАИ-Принт, 2010. 304 с.
10. Микрин Е. А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 336 с.
11. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» / Под ред. д.т.н. А. Н. Кирилина. Самара: ИД «Агни», 2011. 280 с.
12. Van Gelder A. Some New Results in Pseudo-Random Number Generation // Journal of the Association for Computing Machinery, 1967, vol. 14, № 4. P. 785–792.
13. Рябогин Н. В., Шатский М. А., Косинский М. Ю. и др. Применение языка SysML в задачах разработки и отработки программного обеспечения бортовых комплексов управления космическими аппаратами // Программная инженерия, 2016, т. 7, № 8. С. 373–382.
14. Калентьев А. А., Тюгашев А. А. Использование графических языков в жизненном цикле бортового программного обеспечения космических аппаратов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2010, № 2. С. 248–259.
15. Иванов Д. Ю., Новиков Ф. А. Основы моделирования на UML. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 249 с.
16. Friedenthal S., Moore A., Steiner R. A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language. Morgan Kaufmann, 2009, 630 p.
17. Фортескью П., Суайнерд Г., Старк Д. Разработка систем космических аппаратов М.: Альпина Паблишер, 2015. 765 с.

18. *Griffin Michael D., Reston James R.* French Space vehicle design. VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. 665 p.
19. *Fortescue P., Stark J., Swinerd G.* Spacecraft Systems Engineering. John Wiley & Sons Ltd, 2003. 353 p.
20. *Антонов А. В.* Системный анализ. М.: Высшая школа, 2004. 454 с.
21. *Павлов А. А., Гриша С. Н., Томашевский В. Н. и др.* Основы системного анализа и проектирования АСУ / Под общей редакцией А. А. Павлова. М.: Высшая школа, 1991. 367 с.
22. *Кастри Дж.* Большие системы. Связность, сложность и катастрофы. Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 216 с.
23. *Stem E. D., Boito M., Younossi O.* System engineering and program management trends and costs for aircrafts and guided weapons programs. RAND Corporation, 2006. 199 p.
24. ГОСТ Р 57193-2016. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем (Systems and software engineering. System life cycle processes). Национальный стандарт Российской Федерации. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 октября 2016 г. №1538-ст.; дата введения 2017-01-11. Взамен ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005. М.: Стандартинформ, 2016. 95 с.
25. *Романов А. А.* Прикладной системный инжиниринг. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 555 с.
26. *McCorkle Scott.* The IBM Rational Point of View: The Future Outlook for Systems Engineering // Presentation at INNOVATE'2014 Conference. Amsterdam, September 2014.
27. *Дуг Дж., Маккай Б.* Модельно-ориентированное проектирование систем управления: моделирование и тестирование до реализации в аппаратуре. Пер. Ю. Орлова // Control Engineering Россия, 2013, №5 (47). С. 62–64.
28. *Баранов И. А.* Модельно-ориентированный подход в разработке программных компонент и комплексов СМ1820М. М.: ОАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука», 2012. 11 с.
29. *Агафонов О. А., Вахрушев Д. Э., Прядко С. П., Щукин А. В.* Внедрение модельно-ориентированного подхода к проектированию самолетов // Вестник СГАУ, 2012, №5 (36). С. 44–47.
30. *Журавлев С. С., Рудометов С. В., Окольников В. В., Шакиров С. Р.* Применение модельно-ориентированного проектирования к созданию АСУ ТП опасных промышленных объектов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии, 2018, №4. С. 56–67.
31. *Вахитов А. А., Бушина К. С., Золотухина Е. Б.* Достоинства и недостатки систем по управлению требованиями // Фундаментальные исследования, 2016, №6–1. С. 42–46.
32. *Полькина А.* Аналитический обзор систем управления требованиями // Молодежь и современные информационные технологии. Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 9–13 ноября 2015 г. В 2 т. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. Т. 2. С. 145–146.
33. *Сиротенко Ф. Ф.* Принципы работы и возможности системы управления версиями // Научные технологии в космических исследованиях Земли, 2010, №1. С. 15–17.
34. *Шурыгин В. Н., Сиваченко Д. А.* Системы контроля версий // Вестник МГУП, 2015, №5. С. 103–104.
35. *Кукарцев В. В., Бадарчы С. А.* Сравнение систем контроля версий: Git, Mercurial, CVS и SVN // Синергия наук, 2018, №19. С. 538–548.
36. *Щелькалин М. Ю.* Использование информационных технологий для поддержки разработки бортового программного обеспечения // Труды МАИ, 2016, вып. №88. 27 с. <https://readera.ru/14327609> (Дата обращения 04.08.2020).
37. <https://www.Gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emergingtechnologies-2018/> (Дата обращения 12.08.2020).
38. *Grieves M.* Origins of the Digital Twin Concept. Florida: Institute of Technology, 2016. https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept (Дата обращения 04.08.2020).
39. *Grieves M.* Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. LLC, 2015. https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication (Дата обращения 04.08.2020).