

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ**

УДК 004.9:004.82

**Смена парадигмы разработки инновационной продукции:
от разрозненных НИОКР к цифровым проектам
полного жизненного цикла**

А. А. Романов

д. т. н., профессор

АО «Российские космические системы»

e-mail: romanov@spacecorp.ru

Аннотация. В статье рассмотрены проблемные вопросы разработки инновационной продукции космического приборостроения. Предложены возможные варианты уменьшения сроков разработки на основе внедрения технологий системного инжиниринга: управление проектами, переход на проекты полного жизненного цикла (ЖЦ), использование автоматизированных технологий параллельного проектирования (concurrent engineering), разработка, изготовление и испытания инновационной продукции. Применение указанных подходов приводит и к увеличению производительности труда разработчиков.

Главное преимущество подобного подхода состоит в отказе от традиционного разбиения работ на самостоятельные НИР и ОКР, а также применение сквозной цифровой документации от стадии формулирования требований до завершения испытаний созданных изделий перед запуском в космос.

Показано, что существенное сокращение сроков разработки возможно при использовании подходов технологии «Космос по запросу» (Operative Response Space), в последние годы весьма эффективно внедряемой европейской и американской авиакосмической промышленностью.

Ключевые слова: системный инжиниринг, полный жизненный цикл, параллельное проектирование, автоматизация проектирования, цифровое предприятие

**Paradigm Shift in the Development of Innovative Products:
from Disparate R&D to Full Life Cycle Digital Projects**

A. A. Romanov

doctor of engineering science, professor

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: romanov@spacecorp.ru

Abstract. This article considers the problematic issues of the development of innovative products of space device engineering. Possible ways for reducing the development time are suggested based on the introduction of system engineering technologies: project management, transition to full life cycle projects, use of automated technologies of concurrent engineering, development, manufacturing and testing of innovative products. The application of these approaches leads to an increase in developer productivity.

The main advantage of this approach is the abandonment of the traditional division of works into independent research and development activities, as well as the use of end-to-end digital documentation from the stage of formulation of requirements to the completion of tests of the created products before their space launch.

It is shown that a significant reduction in development time is possible with the use of the "Operative Response Space" approach, which has been very effectively implemented by the European and American aerospace industry in the recent years.

Keywords: system engineering, full life cycle, parallel design, design automation, digital enterprise

Введение

Достаточно давно бывший директор по исследованиям и разработкам компании ЗМ доктор Джефф Николсон произнес фразу, являющуюся сегодня одним из законов бизнеса: «Исследование — это преобразование денег в знания. Инновации — это преобразование знаний в деньги» [1]. Данное утверждение самодостаточно и имеет очень глубокий смысловой подтекст, поскольку однозначно разъясняет, что процесс создания инновационной продукции представляет собой единую цепочку: сначала получение новых знаний и только потом — появление нового продукта. Поскольку получение новых знаний есть результат осуществления научных исследований, очевидно, что данный этап является неотъемлемой частью общего комплекса работ по разработке и созданию сложных технических систем. Причем инновационный продукт, доведенный до коммерческого использования, часто обеспечивает финансирование для создания новых изделий.

В соответствии с определением, приведенным в работе [2], «научно-технологический задел — это совокупность имеющихся в наличии новых результатов интеллектуальной деятельности в сфере науки и техники, критических и прорывных технологий, освоение и реализация которых в промышленном производстве (в том числе в результате коммерческой реализации на рынках научно-технологической продукции) ведет к повышению эффективности функционирования отраслей промышленности и освоению в производстве новых технических систем (изделий)». Иными словами, появление инновационной продукции невозможно без опережающего научно-технического задела (НТЗ).

В последнее время в ракетно-космической промышленности проводятся активные преобразования, направленные на повышение производительности труда и улучшение качества продукции. Для этого создаются отраслевые интегрированные структуры, концентрирующие ресурсы на решении задач, поставленных Федеральной космической программой.

При этом происходит переосмысление принципов организации работ путем внедрения подходов системного инжиниринга, закрепленных

в принятом в 2005 г. стандарте [3], идентичном международному стандарту ИСО/МЭК 15288:2002 (ISO/IEC 15288:2002 «System engineering — System life cycle processes»). Указанный стандарт определяет процесс разработки, создания, изготовления, испытаний, эксплуатации и утилизации как единый и неразрывный механизм создания инновационной продукции от возникновения идеи до утилизации изделия, отработавшего полный срок активного существования. Однако для внедрения подобного подхода необходим переход всех предприятий отрасли на новый механизм управления — принцип проектного управления.

К сожалению, в существующих условиях реализация механизма создания продукции с использованием подхода управления проектами полного ЖЦ затруднена ввиду отсутствия нормативно-правовой базы, регламентирующей порядок его применения. Это в первую очередь связано с существующей практикой выполнения работ по контрактам на разработку и создание инновационной продукции в отрасли.

Рис. 1 иллюстрирует указанное несоответствие. По-видимому, данное обстоятельство возникло из-за того, что существовавшая ранее аббревиатура НИОКР (научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы), полностью соответствующая западной аббревиатуре R&D (Research and Development), на каком-то этапе распалась на две независимые составляющие: НИР и ОКР, зачастую выполняемые разными коллективами по разным техническим заданиям, не направленным на создание конкретного конечного изделия.

Работы по эксплуатации созданных изделий также финансируются независимо. Это привело к тому, что управление единым проектом исчезло и без его восстановления внедрение механизма управления проектами полного ЖЦ представляется затруднительным. Кроме того разрыв исследовательской и проектной части разработки инновационной продукции часто ведет к завышенным затратам и отсутствию поддержки создания новых технологий.

Второй проблемный вопрос состоит в том, что глобальное ускорение научно-технического прогресса привело к несоответствию сроков обновления элементной компонентной базы (закон Мура —

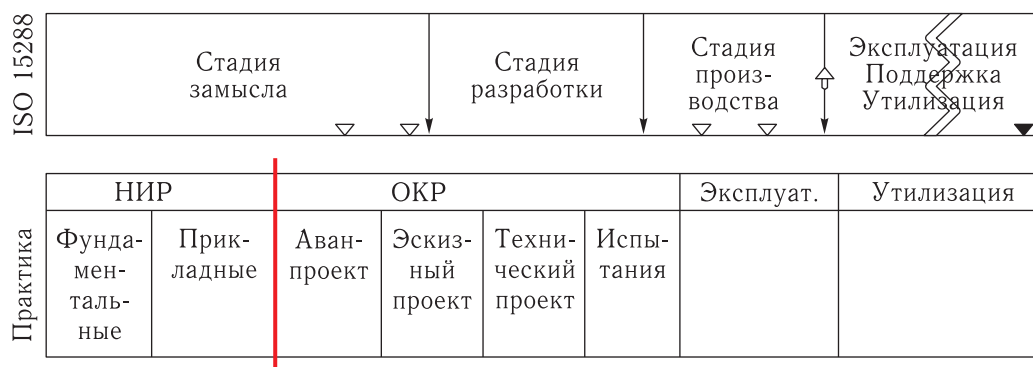


Рис. 1. Соответствие фаз ЖЦ по ГОСТ 15288 и существующей практики

обновление 1 раз в 2 года), сроков разработки и существования новых технологий (3–5 лет), а также сроков разработки инновационной продукции, особенно в космической отрасли (5–10 лет). Совершенно очевидно, что без синхронизации перечисленных процессов, обеспечивающих разработку и создание новой техники, очень трудно обеспечивать конкурентоспособность. Понятно, что здесь в ряду решаемых задач необходимо рассматривать и обеспечение отрасли кадрами соответствующей квалификации, в совершенстве владеющими современными подходами к разработке.

Цель настоящей работы — выявление путей ускорения сроков разработки сложных технических систем и формулировка рекомендаций по внедрению процессов системного инжиниринга, обеспечивающих переход к «цифровому», а затем и «умному» предприятию будущего».

Управление проектом полного жизненного цикла

Термин «цифровое предприятие» был впервые предложен в книге Being Digital директора MIT Media Lab Николаса Негропonte (Nicholas Negroponte) в 1995 г., тем не менее его активное использование началось с начала 2010-х. Сегодня существует множество трактовок данного термина, однако для целей данной статьи используем определение, данное в работе [4]: «Цифровое предприятие (Digital Enterprise) — организация, которая использует информационные технологии в качестве конкурентного преимущества во всех сферах своей

деятельности: разработке, производстве, обеспечивающих бизнес-процессах, маркетинге и взаимодействии с клиентами».

В развитие ГОСТ Р ИСО 15288 в 2014 г. в Российской Федерации был принят стандарт ГОСТ 56135-2014 «Управление жизненным циклом продукции военного назначения», в котором закреплена схема управления жизненным циклом создания сложных технических систем (рис. 2). В соответствии с ГОСТ этапы ЖЦ включают: создание научно-технического задела, разработку аванпроекта, разработку технического проекта, изготовление, эксплуатацию и утилизацию.

Несмотря на то, что рассматриваемый ГОСТ регулирует управление ЖЦ создания продукции военного назначения (ПВН), многие его положения весьма уместны и при разработке продукции гражданского и двойного назначений.

В табл. 1 подробно представлены все этапы ЖЦ по ГОСТ Р 56135 [5], которые необходимо внедрять в состав отраслевой нормативной документации.

Рассмотрим далее типовые сроки разработки, изготовления, испытаний и запуска с учетом летно-конструкторских испытаний космической техники на примере графика разработки малого КА (рис. 3) [6].

Отметим, что рассматриваемый срок для российских разработок представляется весьма оптимистичным, но даже он с учетом реально возникающих потребностей, например военных потребителей или спасателей из МЧС, видится чрезмерным [7].

Так, при проектировании время, затрачиваемое на разработку, создание и испытания космической

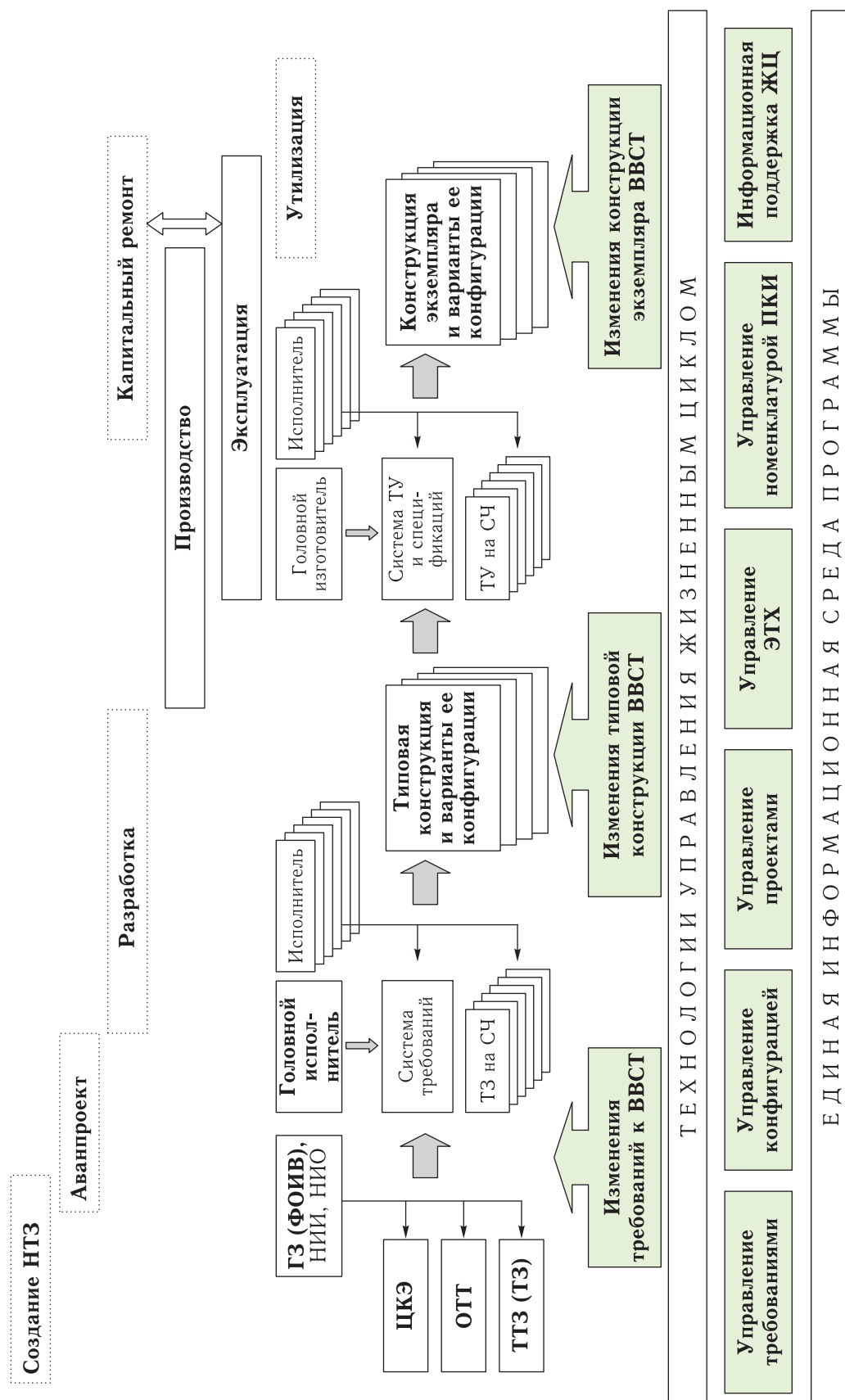


Рис. 2. Схема управления ЖЦ продукции по ГОСТ Р 56135: ВВСТ — вооружение, военная и специальная техника, ОТТ — общие технические требования, ЭТХ — эксплуатационно-технические характеристики, ПКИ — покупное комплектующее изделие, ТТЗ — тактико-техническое задание, ЦКЭ — целевой критерий эффективности

Таблица 1. Этапы ЖЦ

Стадия ЖЦ	Назначение	Критерии принятия решений о переходе к следующей стадии
Создание НТЗ (см. примечание)	Определение требований к перспективному образцу ПВН и путей выполнения этих требований (новых схем, технологий, материалов и т. п.), идентификация главных рисков, оценка реализуемость замысла в разумные сроки с приемлемыми затратами	Готовность к окончанию стадии и началу разработки определяется соответствием сформированных требований к ПВН и НТЗ поставленным целям, включая наиболее перспективные направления создания ПВН
Формирование концепции образца ПВН (аванпроект) (см. примечание)	Разработка аванпроекта путем углубленных исследований, экспериментов и инженерных проработок на основе ранее созданного НТЗ для обоснования технических решений и подготовки проекта ТТЗ на образец ПВН, демонстрация принципиальной реализуемости и экономической целесообразности предлагаемых научно-технических решений для достижения поставленных целей	Готовность к окончанию стадии и началу полномасштабного проектирования определяется наличием согласованной позиции заинтересованных сторон в отношении практической возможности и экономической целесообразности реализации предлагаемых научно-технических решений или нецелесообразности создания данного образца ПВН в силу высоких рисков
Разработка (см. примечание)	Конструирование, моделирование и технологическая обработка изделия (эскизное, техническое, рабочее проектирование), постройка и испытания опытных образцов	Готовность к окончанию стадии и началу производства определяется наличием согласованной позиции заинтересованных сторон в отношении боевой и технико-экономической эффективности разработанной ПВН, приемлемости для практического использования в заданных целях или нецелесообразности запуска в серийное производство в силу высоких рисков для успешной реализации ЖЦ
Производство	Изготовление необходимого числа серийных экземпляров ПВН принятой конструкции, а также необходимых для производства и эксплуатации ПВН оснастки и средств обеспечения эксплуатации	Готовность к началу производства определяется наличием утвержденных РКД и необходимых данных, образующих электронное и(или) иное описание утвержденной типовой конструкции ПВН, завершением подготовки производства, а также соответствием располагаемых кадровых, финансовых и иных ресурсов потребностям для серийного производства ПВН. Готовность к окончанию стадии производства определяется наличием согласованной позиции заинтересованных сторон в отношении качества и эффективности серийно выпускаемых ПВН и целесообразности продолжения серийного производства
Эксплуатация	Использование ПВН по назначению, включая ввод в эксплуатацию и целевое применение; кроме того, на стадии эксплуатации осуществляют техническое обслуживание и ремонт, а при необходимости выполняют модификацию (модернизацию) ПВН	Готовность к началу эксплуатации определяется наличием необходимого числа образцов ПВН, отвечающих согласованным требованиям, завершением подготовки эксплуатации, а также соответствием располагаемых кадровых, финансовых и иных ресурсов потребностям для начала эксплуатации.

Окончание табл. 1

Стадия ЖЦ	Назначение	Критерии принятия решений о переходе к следующей стадии
		Готовность к окончанию стадии эксплуатации определяется наличием согласованной позиции заинтересованных сторон в отношении качества и эффективности серийно выпускаемой ПВН и целесообразности продолжения ее эксплуатации
Капитальный ремонт (при необходимости)	Для отдельных видов сложной ПВН может быть предусмотрен капитальный ремонт как особый этап эксплуатации или даже отдельная стадия ЖЦ, когда использование такой ПВН по назначению прекращается	Готовность к началу капитального ремонта определяется наличием утвержденных ремонтных документов и данных, завершением подготовки ремонтного производства, а также соответствием располагаемых кадровых, финансовых и иных ресурсов потребным для капитального ремонта ПВН. Готовность к окончанию капитального ремонта определяется наличием согласованной позиции заинтересованных сторон в отношении целесообразности дальнейшего ремонта стареющего парка серийно выпускаемой ПВН
Утилизация (см. примечание)	Вывод из эксплуатации, демилитаризация и применение по иному назначению либо уничтожение для вторичного использования имеющихся в составе ПВН изделий и материалов, завершение предоставления услуг по послепродажному обеспечению эксплуатации со стороны поставщика ПВН, при необходимости могут выполняться работы по диверсификации или утилизации средств обеспечения эксплуатации данного вида ПВН	Готовность к началу утилизации определяется наличием необходимого числа образцов ПВН, соответствующих согласованным условиям для вывода из эксплуатации и утилизации, завершением подготовки утилизации, а также соответствием располагаемых кадровых, финансовых и иных ресурсов потребным для начала утилизации данного типа ПВН. Готовность к окончанию утилизации определяется наличием согласованной позиции заинтересованных сторон в отношении прекращения использования ПВН и плана работ по завершению соответствующей программы, включая порядок передачи создаваемых в результате утилизации ресурсов в другие программы (проекты)
Примечание. Часть стадий имеет место только в случае создания или утилизации образца ПВН в интересах или с участием иностранного заказчика		

Анализ потребностей	Анализ альтернатив	Конкурсные процедуры	SRR	PDR	CDR	Разработка (платформы + ПН + наземная система + пусковая система) + планирование + руководство	AI&T	Запуск ЛКИ	Всего	Общее время, дни
90	90	30	60	90	90	330	120	30	930	

Рис. 3. Длительность этапов ЖЦ разработки малого КА в США

техники, меняется от сегодняшних сроков 2–10 и более лет до 6–9 мес. Время, необходимое для установки КА на РН, запуска и развертывания космической системы, от сегодняшних 3–12 и более месяцев сокращается до нескольких часов от момента получения запроса на развертывание.



Рис. 4. Концепция ORS

И наконец, время, необходимое для доставки информационного продукта конечному потребителю, сегодня составляет от нескольких часов до нескольких дней. По требованиям к оперативно адаптируемым КС результаты их применения должны быть доступны в реальном времени в соответствии с темпом изменения ситуации на театре военных действий (непрерывно/секунды).

Указанные жесткие требования могут быть реализованы при внедрении методологии, называемой в зарубежной литературе «Космос по запросу» (Operative Response Space — ORS) [8]. Справедливости ради отметим, что подход использования готовых к запуску и хранящихся в арсенале КА и РН успешно применялся в бывшем СССР. Так, известно, что во время конфликта вокруг Фолклендских островов в 1982 г. за 69 дней были запущены 29 КА [9], но затем, в силу причин экономического характера, подобная практика практически сошла на нет. Сегодня развитию данного подхода в космической отрасли мешает малая серийность производимой продукции и отсутствие широкой унификации бортовой и наземной аппаратуры.

Концепция ORS (рис. 4) основана на реализации трех основных подходов [10].

Подход 1 использует существующие КС для оперативно возникающих целевых задач. Время реализации решения, предложенного в рамках подхода 1, — от нескольких минут до часов от поступления задания.

Подход 2 использует заранее изготовленные или новые дополнительные возможности, обеспечивающие оперативную эксплуатацию, дополнение или переконфигурирование необходимых КС посредством быстрой сборки, интегрирования, испытаний и запуска дешевых малоразмерных КА. Временные ограничения — от нескольких дней до недель с момента возникновения потребности.

Подход 3. В некоторых случаях обойтись использованием возможностей подходов 1 и 2 не представляется возможным, поэтому необходимо осуществить быструю разработку и развертывание новых КС. Срок реализации подхода 3 с демонстрацией эксплуатационных возможностей составляет от нескольких месяцев до 1 года. Достижение таких жестких сроков возможно только для случаев, когда необходима ограниченная разработка новых элементов или модернизация унифицированных. Для гарантированной реализации подхода за 1 год критически важным является упреждающее финансирование работ.



Рис. 5. Сокращение сроков развертывания миссии ORS (подход 2)

Отметим, что одним из важнейших элементов концепции является наличие группы системных аналитиков, в задачу которых входит анализ эксплуатационных потребностей заказчика и разработка предложений по возможному решению возникающих целевых задач. Именно эта группа специалистов определяет, какой из подходов должен быть выбран для решения оперативно возникшей проблемы, чтобы обеспечить адекватный «отклик на запрос».

Подход 1 не нуждается в особых комментариях, поскольку он предполагает использование уже развернутых и эксплуатируемых космических средств. Главной задачей в этом случае представляется оперативное перепланирование съемки, обеспечивающее перенацеливание целевой аппаратуры на интересующие районы.

Для подхода 2 задачей аналитиков является предложение оптимальной конфигурации КС для решения конкретной задачи, поскольку характеристики аппаратуры, находящейся на хранении, хорошо известны. Сокращение сроков развертывания, которое достигается в этом случае, иллюстрируется рис. 5.

Обращает на себя внимание общий срок развертывания новой миссии в 7 дней, который может быть достигнут при подобном подходе.

Непрерывное проектирование — новая философия разработки сложных технических систем

Знаменитый физик Стивен Хокинг (Stephen Hawking) однажды сказал: «Разум — это способность адаптироваться к изменениям». Для современных предприятий, создающих технические системы с постоянно возрастающей сложностью, необходимы новые пути, обеспечивающие высокое качество выпускаемой продукции в условиях постоянно возникающих изменений в требованиях и проектной документации. Философия непрерывного инжиниринга представляет собой именно такой путь, сравнительно недавно предложенный компанией IBM для реализации проектов полного жизненного цикла.

Непрерывный инжиниринг представляет собой уникальную возможность для проектных органи-

заций по ускорению разработки инновационной продукции для использования в постоянно усложняющихся технических системах, востребованных на современных рынках. Причем непрерывный инжиниринг — это не простое повсеместное замещение существующих методов и технологий системного проектирования, таких как гибкое или бережливое проектирование, это, скорее, переосмысление ключевых навыков, необходимых для решения новых возникающих инженерных задач [10]. Другими словами, непрерывный инжиниринг — это способность предприятия ускорить поставку сложной взаимодополняющей продукции, помогающая инженерам ускорять обучение через использование процессов управления полным жизненным циклом, включающих управление стоимостью, качеством и рисками.

Три основополагающих принципа непрерывного инжиниринга включают: стратегию повторного использования ранее разработанных изделий, стирание границ по доступу к проектной документации в смежных областях проектирования и постоянную верификацию как требований, так и проектных решений.

Стратегию повторного использования ранее разработанных изделий можно очень просто объяснить старинной русской мудростью: создавая новое, не изобретай велосипед. Часто уже отработанное техническое решение, воплощенное в изделие, использованное на практике, даже если оно представляется более сложным, чем возможное новое решение, может быть повторно использовано в новой разработке с гарантированным результатом. Ведь это изделие прошло полный цикл испытаний и уже подтвердило свою работоспособность в реальной системе. В то же время новая разработка может содержать новые ошибки, на выявление которых уйдет дополнительное время и будут отвлечены дополнительные ресурсы.

Традиционные подходы к проектированию постоянно эволюционируют, тем не менее, в зависимости от прикладной области — проектирование механических сооружений, проектирование электронной техники или разработка программного обеспечения — доступ к ранее разработанной документации для участников из смежных областей сильно ограничен. Снятие искусственных барьеров

ко всей доступной проектной информации позволит выявить большое количество существующих хороших технических решений, предложенных в разное время для создания подобных технических систем.

И, наконец, постоянная верификация требований и предлагаемых технических решений также подтверждается правилом: семь раз отмерь — один раз отрежь!

Таким образом, непрерывный инжиниринг не является непрерывным в том смысле, что он никогда не заканчивается. Более того, он концентрируется на необходимости постоянного переосмысления, перепроектирования и обновления изделий и систем. Он в принципе помогает инженерам работать в правильной манере, которая для них профессионально комфортна: с легким доступом ко всем инструментам проектирования, данным, а также необходимым знаниям, чтобы делать свою работу максимально хорошо. Применение указанных подходов непрерывного проектирования в создании сложной наукоемкой инновационной продукции позволяет значительно повысить производительность труда разработчиков, уменьшить время разработки, снизить стоимость и смягчить риски.

Параллельное проектирование и автоматизация разработки

До недавнего времени основным принципом проектирования сложных технических систем, включая космические, оставалось последовательное проектирование, как правило, описываемое моделью «Водопад» [11]. Дополнение к проектированию процессов изготовления и испытаний выражают так называемой Vee-диаграммой, представленной на рис. 6. При этом типичная проблема последовательного проектирования (ПП) состоит в том, что максимальное количество ошибок возникает из-за недостаточно проработанных требований к системе, включенных в ТЗ на разработку. Опыт NASA и компании IDC утверждает, что почти 80 % ошибок вносится в проект на этапе формирования требований и соответственно более 80 % проектов заканчиваются плачевно только из-за неудовлетворительного формирования требований, их анализа и управления.

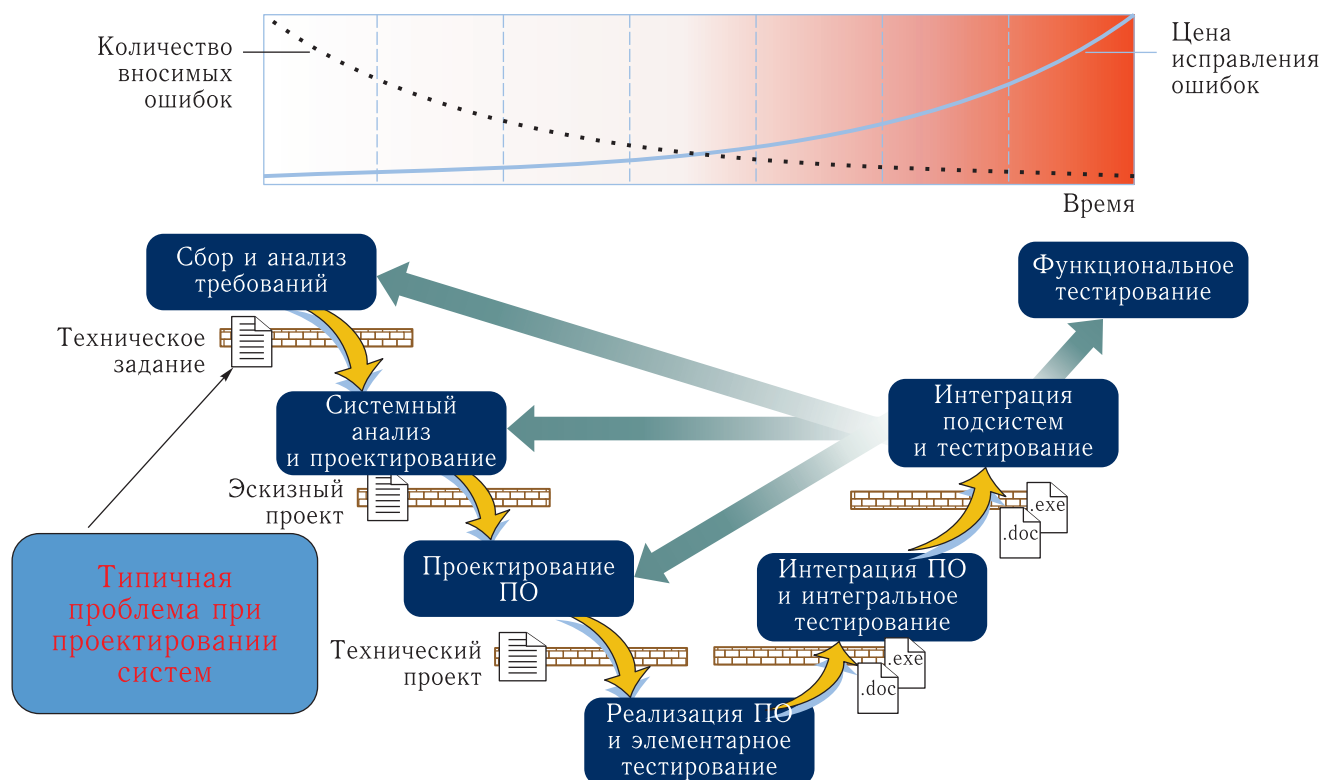


Рис. 6. Процесс создания технических систем, основанный на проектной документации

Существенное сокращение времени разработки происходит за счет исключения из процесса переделок, перепроверок и новой разработки прототипа, что достигается выявлением ошибок и их исправлением на стадии концептуального проектирования (рис. 7).

ПП выполняется путем совместных пленарных заседаний, в которых участвуют представители всех направлений системного инжиниринга, начиная с анализа требований до завершения проектирования. На одно совместное исследование требуются от 6 до 10 заседаний по 4 часа каждое с частотой 1 раз в две недели при координирующей роли лидера команды и участии заказчика.

Часто в процессе ПП реализуется модельно-ориентированный подход к разработке (Model Based Systems Engineering). В работе [12] дано описание технологии параллельного проектирования, применяемой в центре концептуального проектирования компании Аэроспэйс корпорейшн (Aerospace Corporation's Concept Design Center).

Методика параллельного проектирования (СЕМ) представляет собой соединение методов,

а также уроков, извлеченных из предшествующего опыта, существующих правил, алгоритмов и взаимосвязей, разработанных для выполнения концептуального проектирования космических систем. Применение данной методологии позволяет создавать процессы и инструментарий, адаптированные к удовлетворению специфических требований проводимого исследования. Средства, базирующиеся на подходах СЕМ, обеспечивают сквозную увязку проектируемых параметров, итерационные расчеты характеристик и их связь со стоимостными оценками, что делает их идеально подходящими для концептуального проектирования, внедрения новых технологий, а также проведения анализа компромиссных решений для осуществления космической деятельности. Возможность оперативной визуализации всех изменений проекта, доступной всем участникам проектирования и представленных в наглядном виде в компьютере, является одним из существенных преимуществ «цифровизации» разработки и производства инновационной продукции.

Реализация подобной технологии проектирования предполагает размещение всех инженеров,

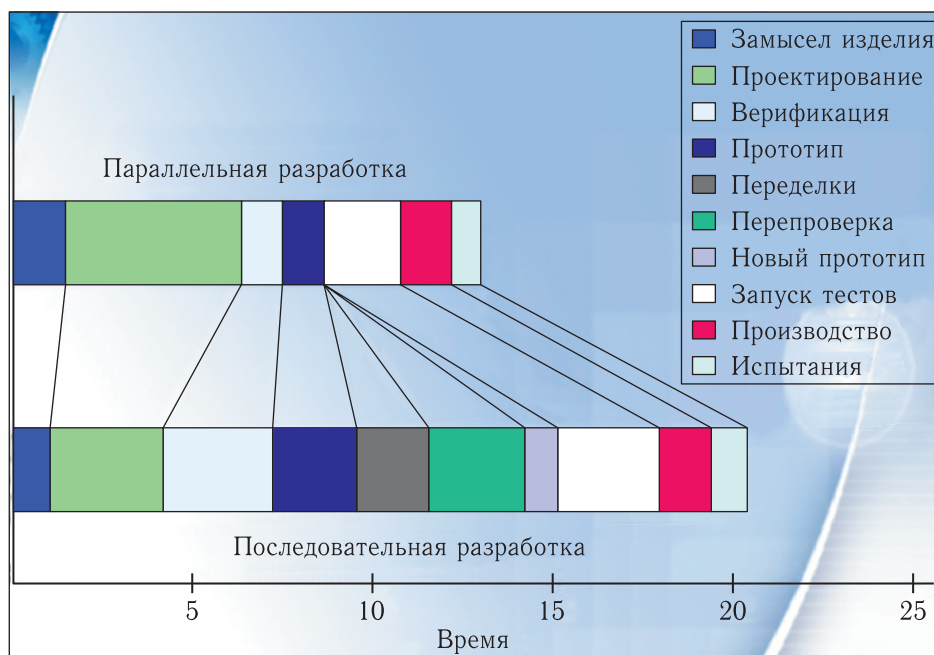


Рис. 7. Сравнение последовательного и параллельного подходов

участвующих в разработке, в одном помещении. Каждый инженер работает со своей моделью подсистемы, связанной с моделями всех других подсистем. Соответственно когда один из инженеров изменяет проектируемые параметры подсистемы, эффект от подобного действия будет немедленно виден всем другим участникам разработки.

Подобный подход стимулирует и ряд других преимуществ. Во-первых, вовлечение участвующих в разработке инженеров непосредственно в процесс позволяет использовать наиболее детализированные модели. Во-вторых, когда один из инженеров изменяет проект своей подсистемы, проявления подобных изменений немедленно ощущаются другими подсистемами. В-третьих, модели остаются в руках опытных инженеров, проектирующих различные подсистемы. Это поддерживает непрерывный интерес и участие всех членов команды, а также рождает ощущение сопричастности, приводящее к расширению проектных возможностей для использования вне проектной команды. В-четвертых, и, возможно, это наиболее важно, в сквозной процесс проектирования постоянно вовлечен заказчик, присутствие которого позволяет инженерам задавать вопросы и решать их непосредственно при возникновении в процессе проекти-

рования. Все проектные решения могут оперативно модифицироваться в соответствии с обратной связью от заказчика, соответственно, главные изменения могут приниматься в реальном масштабе времени. В то же время подобный подход позволяет заказчику более тщательно контролировать заданные направления проектирования и принимать незамедлительные решения по изменениям, основанные на оперативных результатах разработки. Основное преимущество использования методологии параллельного проектирования по сравнению с традиционным подходом состоит в том, что выявление ошибок на ранних стадиях концептуального проектирования обеспечивает перемещение основных проектных изменений на ранние стадии ЖЦ проекта, существенно удешевляя стоимость разработки.

Системный инжиниринг, основанный на моделировании

Для внедрения подходов ORS необходимо пересмотреть существующие методы проектирования сложных технических систем. Новые принципы и методологии проектирования должны обеспечить

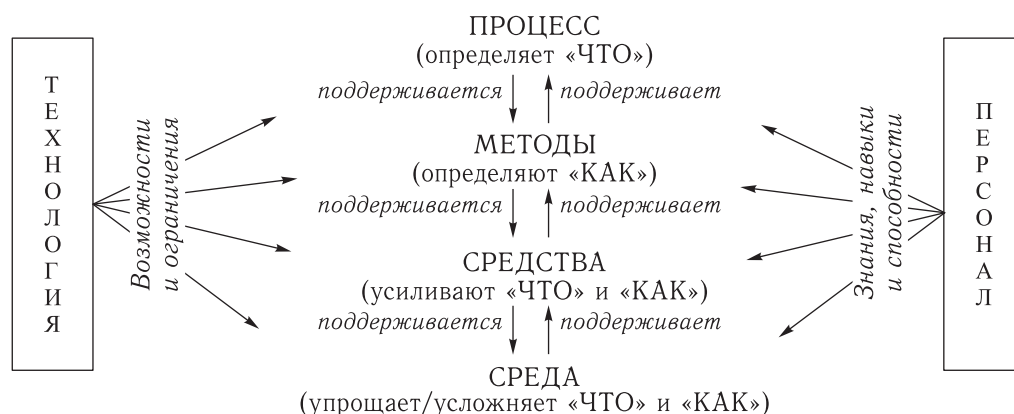


Рис. 8. Влияние на ПМСС используемых технологий и персонала

существенное сокращение сроков выполнения работ.

В последние годы все более широкое распространение находит методология системного инжиниринга, основанная на модельно-ориентированном подходе. Так, в работе [13] представлен обзор методик системного инжиниринга, основанных на моделировании (MBSE) и активно применяемых сегодня различными отраслями промышленности.

При этом методика определяется как набор взаимосвязанных процессов, методов и средств [14]. В этой связи MBSE может быть охарактеризован как набор взаимосвязанных процессов, методов и средств, используемых для поддержки научной дисциплины системного инжиниринга в контексте того, что в ее основу положено моделирование или модельно-управляемый подход.

В упомянутой работе, наряду с другими методологиями, разработанными в NASA's Jet Propulsion Laboratory (JPL) и опубликованными в открытой литературе, также представлены варианты методик MBSE, доступных на коммерческой основе.

Безусловно, реализация любой технологии зависит от среды проектирования, состоящей из проектного окружения, внешних объектов, условий или факторов, влияющих на поведение объектов, отдельных специалистов или групп, с которой связаны и процессы, и методы, и средства проектирования (ПМСС).

Цель проектной среды должна заключаться в интеграции и поддержке применения методов и средств, используемых при разработке проекта.

Таким образом, среда упрощает или усложняет реализацию в проекте процессов и методов (рис. 8).

Одно из ключевых преимуществ методики модельно-ориентированного системного инжиниринга — переход от бумажного проектирования к компьютерному моделированию. Современный подход для обозначения следующего поколения методик, обеспечивающих поддержку разработки изделий на всех стадиях ЖЦ, назван MBSE++.

Рассмотренный в работе [15] подход основан на идее общей модели системы (Total System Model — TSM), служащей цифровым чертежом системы на всех стадиях ЖЦ. Фундаментальные принципы MBSE++ включают использование децентрализованных и гетерогенных (разнородных) моделей и хранилищ данных, набора точно описанных модельных связей и унифицированного представления системы, не зависящего от расположения моделей, а также визуализацию и аналитику для принятия эффективных решений.

В отличие от использования в традиционном проектировании фиксированной архитектуры системы и набора требований в виде набора статичных, разобщенных документов, компьютерная модель системы обеспечивает единственный источник достоверной информации, по которой при необходимости формируются стандартная документация, внешние виды и дефекты системы. При этом единым языком проектирования становится язык моделирования системы (OMG System Modeling Language — SysML), применяемый при создании модели и используемый различными разработчиками программного обеспечения.

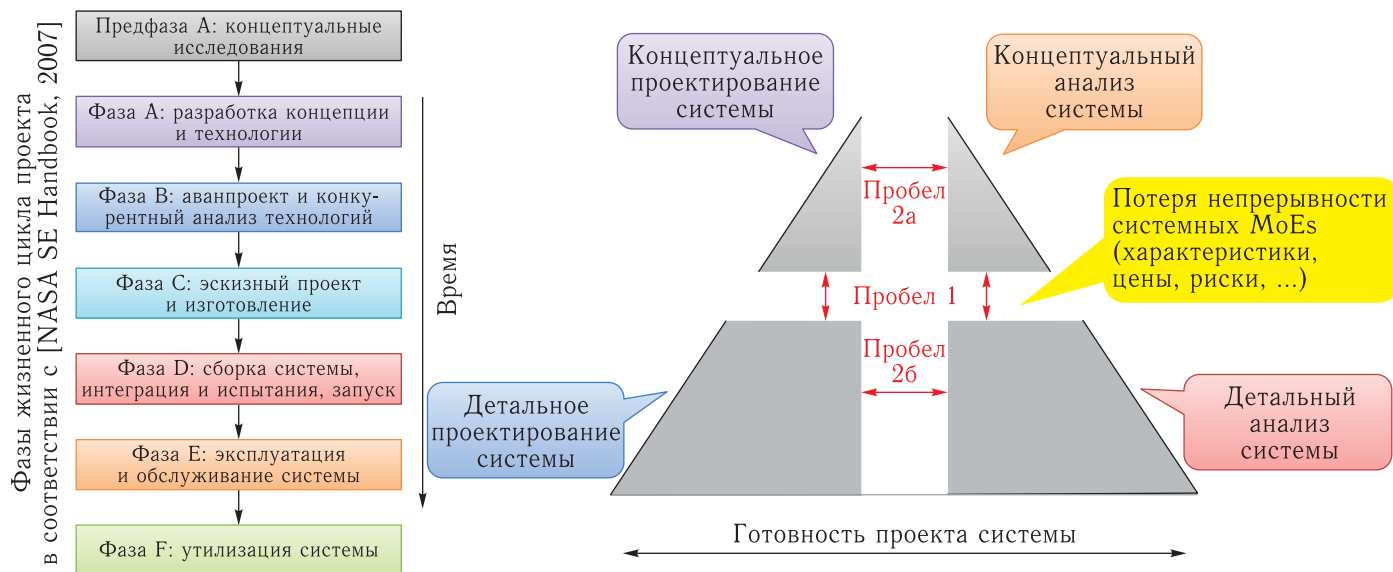


Рис. 9. Пробелы в существующих системах проектирования и анализа сложных систем

К сожалению, внедрение MBSE в реальности столкнулось с рядом проблем. Разработка современных сложных технических систем использует множество моделей: CAD-модели, имитационные модели, структурные части PLM, тексты программ и т. д., что делает концепцию единого источника достоверной информации весьма туманной. Многие авторы осознали необходимость соединения перечисленных моделей в нечто общее, обеспечивающее согласованность с техническим заданием на систему [16, 17].

Благодаря такой системной работе и были созданы подходы третьего поколения системного инжиниринга, названные расширением модельно-ориентированного системного инжиниринга на ЖЦ системы (для краткости — MBSE++).

В работе [16] дано подробное описание среды проектирования, получившей название SLIM (Systems Lifecycle Management). SLIM — это среда совместной разработки следующего поколения сложных систем на базе модельно-ориентированного системного инжиниринга. При этом для представления передовых концептуальных образов системы SLIM использует язык программирования SysML. С помощью этой программной платформы системные инженеры могут управлять автоматизированной верификацией требований, имитацией составных частей системы, компромиссами и опти-

мизацией вариантов, анализом рисков, экспертизой этапов проектирования, верификацией и валидацией системы, а также другими ключевыми задачами системного инжиниринга начиная с самых ранних стадий разработки прямо из модели системы, заданной SysML.

Кроме того, SLIM обеспечивает аналитический инструментарий, независимый от выбора методологии системного инжиниринга, а также представляет собой интегрирующее средство, соединяющее SysML с широким спектром коммерчески доступных изделий (COTS), а также собственными средствами проектирования и моделирования. Позднее название SLIM было преобразовано в торговую марку Syndea, представленную на коммерческом рынке средств автоматизации разработки.

На рис. 9 приведены два типа фундаментальных упущений в доступных сегодня средствах системного проектирования и анализа на примере фаз ЖЦ проектов NASA.

Пробел 1 иллюстрирует потерю непрерывности процесса модельно-ориентированного системного инжиниринга от ранних фаз (замысел и концептуальное проектирование) до фазы детального проектирования (эскизный проект, разработка и поставка). Данное упущение возникает вследствие того, что средства на каждой фазе проекта, используемые при моделировании и анализе

системы, различаются. В некоторых случаях фазы концептуального проектирования сильно зависят от применяемых в них диаграмм и таблиц данных.

В то же время средства, используемые при детальном проектировании, охватывают только те аспекты системы, которые относятся к данной фазе и, следовательно, не являются логическим продолжением системной терминологии, требований, параметров и характеристик, а также результатов их оценки при переходе от одной фазы к другой. Соответственно результаты выполненного проектирования, неопределенность параметров проекта, оценка систематических рисков, а также другие межфазовые параметры и проработки обычно «тонут» в гигантских и трудно обслуживаемых таблицах, документах и собственных разработанных средствах, усугубляя возможности эффективного отслеживания и коммуникаций при переходах между фазами ЖЦ.

Целевая информация, продвигающие корневые аспекты системы, такие как требования и задачи, структура и поведение, характеристики и параметры риска, стоимость, бюджеты энергетики и весов, а также процессы их разработки (отдельные задачи, ресурсы и ключевые события), должны непрерывно обновляться через системное проектирование и разработку фаз, независимо от разнообразных коммерчески доступных средств, используемых для представления и управления этими аспектами. В этой связи возникают несколько вопросов, которые должны быть поставлены перед интегрированными командами системного инжиниринга и управления проектами:

1. Как можно гарантировать, что модели, определенные средствами разработки на ранних и последующих стадиях, представляют одну и ту же систему?

2. Как обеспечить, чтобы требования и характеристики системы, определенные средствами разработки на начальных и более поздних стадиях проекта, относились к одной и той же системе или даже к одному проекту?

3. Как соотнести результаты анализа и оценивания, полученные на ранних стадиях, с теми, которые получены на более поздних фазах?

4. Каким образом распространить результаты изучения компромиссов, неопределенности в пара-

метрах системы, а также оценки систематического риска, полученные на ранних стадиях проекта, на фазы детального проектирования, а также на последующие стадии развертывания и обслуживания системы?

Исчерпывающие ответы на поставленные вопросы позволяют обеспечить сквозную технологию разработки, изготовления, испытаний и эксплуатации созданной системы.

Пробелы 2 отражают разрывы между моделями проектирования и анализа на концептуальной стадии и на стадии детального проектирования. Данные пробелы проявляются в преобразованиях гетерогенной модели вне процессов проектирования и анализа, например между требованиями и структурой, логической и физической структурами, а также структурой и поведением системы. Обычно индивидуальные средства моделирования и имитации отражают только специфические аспекты системы: требования, структуру и поведение и не обеспечивают целостной модели полной системы. Поэтому мероприятия системного инжиниринга могут быть наилучшим способом реализованы при заданных конкретных направлениях потоков данных из точки в точку, преобразованиях модели заказчика, а также программного обеспечения автоматического задания состава работ, что позволяет поддерживать синхронизацию всех аспектов.

Программный продукт SLIM обеспечивает мощную и бесшовную среду проектирования сложных систем, охватывающую организационную структуру, персонал, производственные условия и другие аспекты, дополняющие разработку целевой системы. Рис. 10 иллюстрирует разницу между существующей средой проектирования и множеством независимых областей среды проектирования SLIM, применяемой для разработки сложных систем, которая руководствуется интеграцией разработанной документации или моделей, представляющих различные элементы системы.

Отсутствие специализированных средств концептуального проектирования, в отличие от средств детального проектирования типа CAD и CAE, приводит к необходимости использования разнообразных диаграмм, имеющихся в общедоступных программных продуктах, таких как PowerPoint (Microsoft 2010) и Visio (Microsoft 2010),

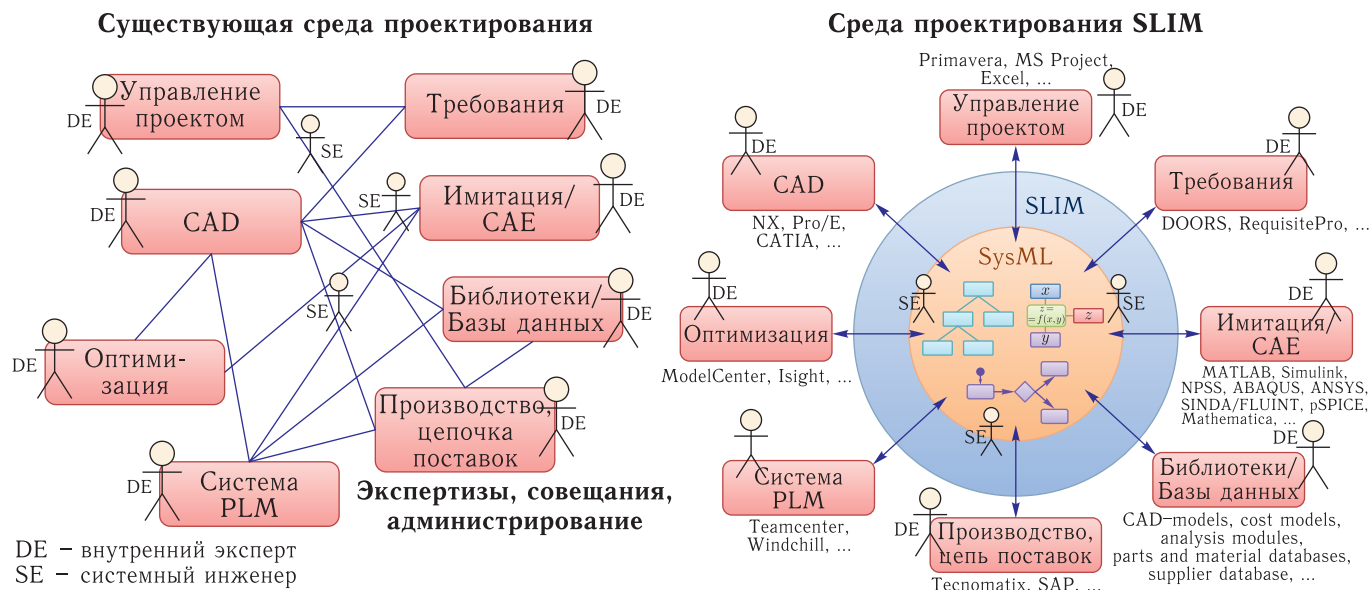


Рис. 10. Сравнение существующего и перспективного подходов к проектированию сложных систем

совместно с табличным представлением информации для численного анализа.

Средства автоматизации выполняемых проектных работ позволяют наилучшим образом обмениваться данными между различными инструментами проектирования. Это позволяет экономить значительные временные и другие ресурсы, затрачиваемые системными инженерами на администрирование «островков» автоматизации при их стыковке с разнородной документацией, а также при подготовке отчетной документации системного проектирования и результатов экспертиз.

Кроме того, среда SLIM поддерживает библиотеки многократно используемых моделей SysML, конструктивно соединенных с исходными моделями проектирования и моделирования. Подобные библиотеки облегчают комплексирование и оптимизацию проектных решений с компромиссным анализом альтернатив на общей модели системы. Так, примеры библиотек для авиационных систем включают объекты проектирования (крыло, фюзеляжи, хвостовые конструкции и аэродинамические поверхности), модели анализа (стоимость, размеры), поведение системы (профили миссии), материалы и конструкционные элементы. Примеры библиотек для цепочек поставок включают: (а) поставщиков, (б) заказчиков, (в) перечень комплектующих изделий, (г) модели стоимости, (д) модели

выбора поставщиков, а также модели оптимизации. Для сложных систем SLIM представляет собой мощную альтернативу инструментарию построения диаграмм и таблиц общедоступного программного обеспечения типа PowerPoint and Spreadsheet engineering, а также языков программирования (таблицы, MATLAB/Simulink, C++, Fortran, Java).

Переход к «цифровому предприятию»

И в завершение главное, ради чего необходимо проводить обсужденные выше нововведения. Автоматизация ради автоматизации какого-либо процесса сама по себе не дает никаких особых преимуществ. Заметный выигрыш появляется только тогда, когда обеспечивается синергия усилий на всех стадиях жизненного цикла.

Появление цифровой технической документации позволяет совершенно по-новому организовать процессы изготовления и испытаний создаваемой продукции путем организации производственных технологических линий.

При этом производство будущего будет основано на широком применении принципов проектирования в условиях виртуальной реальности, когда автоматизированные участки будут одновременно об-

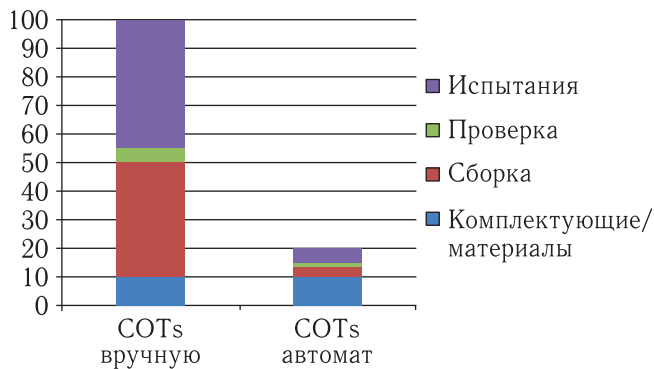


Рис. 11. Относительная стоимость серийной продукции

служиваться как человеческим персоналом, так и роботами, а прототипы изделий и серийные компоненты будут изготавливаться 3D-принтерами. По этому пути уже идут ведущие производители космической техники [18]. Использование подобных производственных линий:

- обеспечивает преимущество эволюции технологии создаваемых компонентов;
- уменьшает возможность поломки производимых приборов SMT из-за ручной пайки;
- уменьшает сроки и стоимость производства;
- обеспечивает изготовление продукции «про запас».

При этом пошаговое изменение себестоимости продукции в сторону уменьшения достигается посредством автоматической набивки и размещения компонентов, автоматической пайки, автоматической проверки смонтированных узлов, автоматических испытаний, а также автоматическими комплексными испытаниями системы на уровне платформы.

Таблица 2. Длительности фаз производства для разных технологий

	Технология производства	Традиционный заказ	COTS вручную	COTS автомат
Длительности фаз производства	Закупка	Недели	Дни	Дни
	Сборка	Недели	Недели	Часы
	Проверка	Дни	Дни	Часы
	Испытания	Недели	Недели	Часы
	Итого:	Месяцы	Недели/месяцы	Дни

В табл. 2 [18] приведены типовые длительности фаз производства при традиционном выполнении заказов, ручного изготовления изделий из коммерчески доступных компонентов (COTS) и автоматизированного производства, а на рис. 11 приведено сравнение себестоимости изготовления продукции вручную и автоматами.

Из приведенных таблицы и рисунка становится очевидным, что время на всех технологических переделах существенно сокращается, а стоимость проведения испытаний, тестирования и сборки уменьшается в разы.

Выводы

В работе представлен обзор возможных путей решения проблемных вопросов разработки инновационной продукции космического приборостроения. Предложены возможные варианты уменьшения сроков разработки на основе внедрения технологий системного инжиниринга: управления проектами, переходом на проекты полного жизненного цикла, использованием автоматизированных технологий параллельного проектирования (concurrent engineering), разработки, изготовления и испытаний инновационной продукции.

Существо основного предлагаемого нововведения состоит в отказе от традиционного разбиения работ на самостоятельные НИР и ОКР.

Внедрение в практику работ космической отрасли методов проектного управления и параллельного проектирования позволяет достигнуть следующих результатов:

1. При использовании подходов ORS и методологии параллельного системного инжиниринга время концептуального проектирования новых космических миссий сокращается до 2 дней.
2. Общее время разработки проекта уменьшается от 30 % до 70 % с 6 мес до 2–3 недель.
3. Стоимость проекта миссии уменьшается в 20 раз.
4. Повышается производительность труда разработчиков — «белых воротничков» от 20 % до 110%: количество проектов, находящихся в разработке, возрастает с 5–6 до 100 проектов в год.

5. Обеспечивается совместная работа системных инженеров, конструкторов и заказчиков.

6. Полномасштабная космическая миссия моделируется в виртуальном пространстве разработки, включая процесс эксплуатации системы.

7. Время выведения изделий на рынок уменьшается от 20 % до 90 %.

8. Качество создаваемой продукции улучшается от 3 до 6 раз.

9. Количество вносимых в проект технических изменений сокращается от 65 % до 90 %.

Список литературы

1. *Geoff Nicholson*. The Keys to Innovation // Presentation at National University of Singapore, 20th March 2013.
2. Война и мир в терминах и определениях // Под общ. ред. Д. Рогозина. М.: ПоРог, 2004. 334 с. (Отредактирован в 2014 г.)
3. ГОСТ Р ИСО 15288 «Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем».
4. Что такое «цифровое предприятие» и как им стать? // Tadviser, 2016. <http://tadviser.ru/a/316577>
5. ГОСТ 56135-2014 Управление жизненным циклом продукции военного назначения. М.: Стандартинформ, 2015.
6. *Charles J. Finley, George Moretti, Apoorva Bhopale*. The 7-Day Solution: How ORS Will Answer The Rapid Call-Up Challenge // 7-th IAA Small Satellite Symposium, April 2007, Berlin, IAA-B7-1002.
7. *Matthew Hoey*. Military space systems: the road ahead // Presentation to the Symposium on «Non-proliferation and Disarmament — The Way Forward» in October 2005.
8. *Thomas Adang and James Gee*. Creating An Agile, All-Space Architecture // Crosslink, Summer 2009. P. 6–11.
9. *Dr. James R. Wertz, Dr. Robert Conger, Dr. Richard Van Allen*. Resilient SmallSat Launch-on-Demand // USGIF Small Satellite Working Group, Microcosm, July, 2016.
10. *Scott McKorkle*. The IBM Rational Point of View: The Future Outlook for Systems Engineering // Presentation at INNOVATE'2014 Conference, Amsterdam, September 2014.
11. *Романов А. А.* Прикладной системный инжиниринг. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 555 с.
12. *Joseph A. Aguilar, Andrew B. Dawdy, Glenn W. Law*. The Aerospace Corporation's Concept Design Center // Crosslink, Winter 2000/2001.
13. *Jeff A. Estefan*. Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies // INCOSE MBSE Focus Group, Rev. A, May 25, 2007.
14. *Martin James N.* Systems Engineering Guidebook: A Process for Developing Systems and Products // CRC Press, Inc.: Boca Raton, FL, 1996.
15. *Manas Bajaj, Dirk Zwemer, Rose Yntema, Alex Phung et al.* MBSE++ — Foundations for Extended Model-Based Systems Engineering Across System Lifecycle // 26th Annual INCOSE International Symposium (IS 2016), Edinburgh, Scotland, UK, July 18–21, 2016.
16. *Bajaj M., Zwemer D., Peak R., Phung A., Scott A. and Wilson M.* Satellites to Supply Chains, Energy to Finance — SLIM for Model-Based Systems Engineering, Part 1: Motivation and Concept of SLIM // 21st Annual INCOSE International Symposium, Denver, CO, June 20–23, 2011.
17. *Fisher A., Nolan M., Friedenthal S., Loeffler M., Sampson M., Bajaj M., VanZandt L., Hovey K., Palmer J. and Hart L.* Model Lifecycle Management for MBSE // INCOSE International Symposium, 2014.
18. *Alex da Silva Curiel, Andrew Cawthorne, James Penson, Martin Sweeting*. Production engineering a low cost video imaging constellation // Presentation to 10th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Berlin, April 2015.