

МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ РАЗРАБОТКА ПРОИЗВОДСТВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В КОНТЕКСТЕ ИЗДЕЛИЙ В АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ВУЗАХ

А. А. Кабанов

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Российская Федерация*

Работа продолжает серию публикаций, посвященных большой теме формирования сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды в аэрокосмических ВУЗах. На этот раз рассматривается одна из наименее представленных в настоящее время в учебных заведениях составляющих этой среды – направление модельно-ориентированной разработки ракетно-космических производств. Приведено обоснование актуальности и необходимости изучения предмета в современных условиях, причем не только для специалистов, обучающихся по программам подготовки специализаций производственно-технологического профиля, но и также проектно-конструкторского профиля. Особое внимание уделено параллельной разработке изделий в контексте систем их производства и разработке производств в контексте изготавливаемых изделий. Выделены группы моделей, используемых в рамках модельно-ориентированной совместной разработки изделий и их производств, а также типы моделируемых процессов производства. Изложены теоретические и методические основы разработанного подхода к освоению учебных дисциплин направления, основанные на опыте разработки моделей машиностроительных производств ракетно-космических предприятий. Приведены структура и содержание дисциплин. Проанализирован опыт внедрения в учебный процесс, в том числе на примере выполненных студентами практических заданий. Представленные результаты могут быть адаптированы и использованы в других отраслях машиностроения с дискретным типом производства.

Ключевые слова: модельно-ориентированная разработка, ракетно-космическое производство, цифровое производство, подготовка специалистов.

Введение

Как это ни парадоксально, но в сфере аэрокосмического производства сегодня наблюдается, по сути, возврат к серийному или даже массовому типу производства. Обусловлено это тем, что в отрасли произошла смена парадигмы способов решения задач в космическом пространстве с использованием технических средств. Теперь для решения одной и той же задачи создается не один уникальный крупный сложный космический аппарат (КА), а множество малых простых КА, часто объединенных в сеть. По данным, приведенным в [1], завод SpaceX во Флориде по производству спутников Starlink выпускает по четыре спутника в день! По оценкам того же источника к 2030 году на орбите уже будет порядка 100 тысяч КА, что

будет обеспечено 5-кратным увеличением числа запусков по сравнению с 2010-ми годами, т. е. в прямую это отразится на числе (и соответствующем объеме производства) необходимых для этого ракет-носителей (РН).

Концепция создания РН также претерпела кардинальные изменения в сторону модульности конструкции, многоразовости, сокращения времени повторного запуска [2; 3]. Это, в свою очередь, отразилось и на ключевых компонентах РН – двигателях. Вместо больших, мощных и высоконагруженных двигателей используются в большем количестве менее производительные, но с увеличенным ресурсом и с кратным увеличением серийности и объемов производства. Даже создаваемые в настоящее время транспортные космические системы тяжелого класса по традиционным принципам, типа SLS, по видимому, уступят место модульным системам типа Starship [4].

✉ drdt@mail.ru

Кратко и емко содержание наблюдаемых принципиальных изменений с точки зрения производства можно охарактеризовать как переход от модели «все – для изделия» к модели «все – для производства». В подтверждение этому можно привести использование чисто производственных практик, например, принципов бережливого производства в проектировании и конструировании, и появлении наряду с понятием lean-производство понятий lean-носитель, lean-спутник и т. д. [3; 5]. Опыт разработки моделей аэрокосмических производств отечественных предприятий [7–9] также неоднократно показывал, что наибольшие резервы по повышению эффективности производства находятся, в первую очередь, в плоскости конструкторско-технологических решений, а потом уже организационно-технических. Таким образом, ранее сформулированный автором принцип «как только создан проект конструкции изделия, он почти полностью предопределяет систему его производства» [9; 10] в современных условиях работает в обратную сторону – «облик эффективного бережливого производства предопределяет конструкцию изделия».

В силу сказанного, в сегодняшних условиях разработка изделия в контексте его производства является острой необходимостью. Точно также, разработка производства должна выполняться в контексте изделия, но не на базе статичной документации, которая ранее передавалась для освоения изделия на производстве, а на базе связанного совместного модельного представления как изделия, так и производственной системы. Именно с последним связано то, что этот элемент отсутствовал в подготовке специалистов-разработчиков

как со стороны проектантов производственных систем, так и со стороны проектантов изделий, и не представлен в соответствующих ВУЗах.

Работа по настоящему направлению обращена на устранение указанных недостатков. Далее приведены полученные на настоящее время результаты этой работы, используемые для подготовки специалистов ракетно-космической отрасли в рамках формирования сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды в аэрокосмических вузах [11].

1. Методы, используемые модели, содержание дисциплины

Входом для процесса модельно-ориентированной разработки промышленных производств изделий ракетно-космических систем (РКС) (направление 2, рис. 1) являются результаты, полученные в ходе реализации направления 1 «Модельно-ориентированная разработка РКС» и представленные в виде комплекса связанных моделей, среди которых в настоящее время наиболее часто используются модели, описывающие архитектуру разрабатываемого изделия (состав изделия), маршрутное описание процессов изготовления изделия и его компонентов. В случае использования существующих производственных мощностей, эти модели дополняются моделями, содержащими архитектуру производства (его организационную и пространственную структуры), спецификации производственных ресурсов в привязке к архитектуре, геометрические примитивы производственных ресурсов и их окружения.

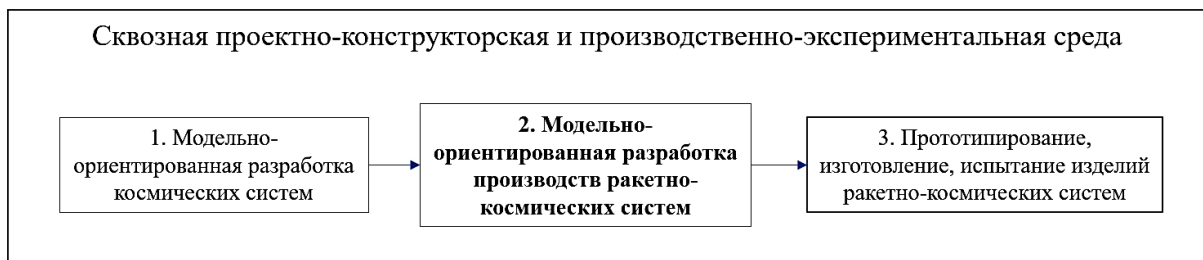


Рис. 1. Контекст направления 2 «Модельно-ориентированная разработка производств ракетно-космических систем» в рамках создания сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды

Выходом процесса является наиболее рациональная конфигурация производственной системы изготовления изделия и/или его компонентов, далее передаваемая для выполнения работ по прототипированию, изготовлению, испытанию изделий, а также систем их производства.

Описание вида используемых моделей уместно выполнять в разрезе основных объектов моделирования систем производства (рис. 2):

- собственно, само изделие и его компоненты;

- процессы производства;
- ресурсы производства;
- бизнес-процессы [12].

Перечисленные объекты связаны между собой как внутри типов объектов, так и между различными типами объектов. Связи между различными типами объектов осуществляются через объект типа «процесс», являющимся центральным с точки зрения модельного представления.

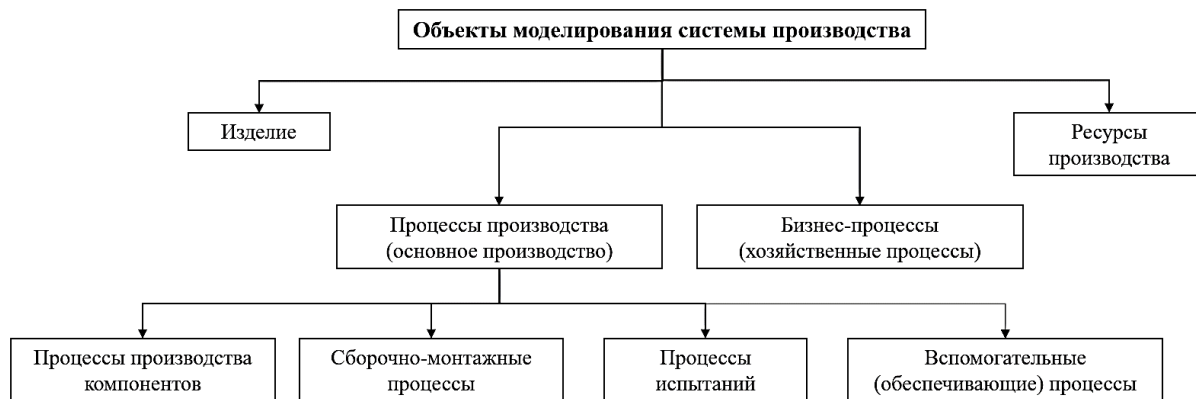


Рис. 2. Объекты моделирования систем производства

Среди процессов производства, обуславливающих специфику способов ведения производственной деятельности и, как следствие, используемых моделей для их описания, выделяют процессы изготовления компонентов изделий (в англоязычной литературе используется термин *fabrication*), процессы изготовления изделий (англ. *manufacturing*) и собственно производство (англ. *production*), к которому относят все процессы, в т. ч. обеспечивающие, необходимые для выпуска заданного объема продукции в заданные сроки.

Модельная поддержка указанных видов процессов осуществляется комплексом моделей, который условно можно разбить на две большие группы (рис. 3):

- модели частных процессов изготовления – модели 1-й группы (численно моделиру-

ются физико-химические процессы изготовления деталей: формообразование, покрытие, термообработка и др.; для сборочно-монтажных процессов изготовления узлов и агрегатов моделируется порядок выполнения сборочных операций с учетом пространственного расположения с использованием статических, кинематических и динамических геометрических моделей);

- комплексные модели процессов изготовления изделия в целом – модели 2-й группы (моделируется сеть связанных процессов, при этом, как правило, фиксируются только временные и пространственные характеристики отдельных процессов/операций, без отражения их физической основы).

В рамках моделей 1-й группы ведется конструкторско-технологическая отработка процессов



Рис. 3. Виды моделей, используемых для моделирования процессов

типа *fabrication* и *manufacturing*. Это всегда моделирование одного изделия, не множества. В классификации, принятой в [13], эти модели относят к цифровым двойникам производства II-го типа (DT-2, сокращенно от англ. *digital twin* – цифровой двойник).

В рамках моделей 2-й группы выполняется производственная отработка процессов типа *production*, в ходе которой определяется принципиальная возможность изготовления изделий заданного количества в заданные сроки в условиях данного производства, а также эффективность такого производства. При этом уровень эффективности определяется результатами моделирования 1-й группы, что отражается на структуре процесса

изготовления изделия и на длительности выполнения работ по отдельным операциям, передаваемых в качестве исходных данных для моделей 2-й группы. Посредством этого осуществляется стык моделей 1-й и 2-й групп, что и составляет суть связки «изделие–производство». Следует отметить, что модели данного вида часто «выпадают» из поля рассмотрения цифровых двойников производства, связанных с изделием [13], здесь цифровые двойники производства ограничены моделями 1-й группы, т. к. в них есть непосредственная связь с физическим процессом изготовления изделия.

Напротив, в подавляющем большинстве случаев [14–18], при решении частных задач, циф-

ровые двойники производства рассматриваются вне контекста изделия, принимая на вход данные об изготавливаемых изделиях и соответствующих процессах как фиксированные, что существенно ограничивает возможность получения действительно близкой к оптимальной конфигурации производства.

Поэтому в данной работе обе группы моделей рассматриваются совместно. В перспективе появятся модели и соответствующие инструментальные средства, позволяющие выполнять оценку в рамках единой модели, но пока мы ограничены существующими математическим и методическим аппаратом и, в еще большей степени, вычислительными мощностями, необходимыми для решения задачи большой размерности и выполнения многокритериальной оптимизации. Сегодня ведутся активные работы на пути к этому [19; 20], проводятся образовательные семинары, в том числе, в студенческой среде [21].

Сказанное особенно актуально для производств ракетно-космической отрасли, характеризующихся большой номенклатурой производимых изделий, большим числом составных компонентов изделий, сложностью и нелинейностью процессов производства [9]. С учетом этих особенностей и современных условий в рамках формирования сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды в Московском авиационном институте разработана и преподается новая дисциплина, получившая название «Управление производственными потоками». Управление рассматривается в 2-х аспектах:

- управление в контексте изделия на этапе конструкторско-технологического проектирования изделия с использованием, преимущественно, моделей 1-й группы;
- управление в контексте производства на этапах эксплуатации существующего производ-

ства или его модернизации, а также создания нового производства с использованием, преимущественно, моделей 2-й группы.

Курс построен следующим образом. Вводный блок посвящен основам моделирования машиностроительных производств и месту, которое они занимают в концепции современного производства «Индустрия 4.0». Далее изучаются характеристики и особенности машиностроительных производств ракетно-космической отрасли. Предметом третьего блока является концептуальная модель (модель описания предметной области) производственной системы, представленная тремя доменами: домен изделия, домен процессов производства изделия, домен ресурсов производства. После этого рассматриваются потоки в производстве, а также их связи с внешним контуром цепи поставок [22], затрагиваются вопросы с позиций получившей в настоящее время широкое распространение смежной прикладной области под названием «производственная логистика». Блок «Моделирование производств» посвящен разработке и использованию прагматических моделей (т. е. моделей, предназначенных для получения конкретных результатов) машиностроительных производств с использованием современных программных средств цифрового моделирования. Методически отдельно рассматриваются подразделы по разработке и исследованию моделей.

Завершающими являются разделы по проектированию производственных потоков с учетом стадий жизненного цикла (ЖЦ) как изделия, так и производственной системы, и управлению производственными потоками, в том числе с использованием современных промышленных систем автоматизации производства класса ERP, APS, MES, SCADA, SIM [23].

Обзорное представление курса приведено в табл. 1.

Таблица 1

Содержание дисциплины «Управление производственными потоками»

№	Раздел дисциплины	Краткое содержание раздела
1	Вводный блок	
1.1	Основы моделирования машиностроительных производств	Цели и задачи моделирования производств; объекты моделирования: изделия, процессы, ресурсы; моделирование в контексте этапов жизненного цикла изделия
1.2	Индустрия 4.0. Цифровые двойники изделия, производства. Цифровое производство. Фабрики будущего	Цифровой двойник изделия; цифровой двойник производства; виды цифровых двойников; концепция «Индустрия 4.0»; использование цифровых двойников изделия и производства в области планирования и управления производственными потоками
2	Характеристика производств ракетно-космической отрасли	
2.1	Характеристика дискретного машиностроительного производства	Дискретное производство; производство наукоемкой продукции; единичное, малосерийное производство

2.2	Характеристика процессов дискретного машиностроительного производства	Процессы изготовления компонентов изделий (<i>fabrication</i>); процессы изготовления изделий (<i>manufacturing</i>); производство (<i>production</i>)
3	Описание концептуальной модели производственной системы	
3.1	Описание и представление изделий производства	Изделия; виды изделий; компоненты изделий; составы изделий
3.2	Описание и представление процессов производства	Процессный подход; нотации описания процессов; составы процессов
3.3	Описание и представление ресурсов производства	Ресурсное представление; нотации описания ресурсов; составы ресурсов
4	Потоки в производстве	
4.1	Производственный поток	Понятие потока; характеристики; материальный поток; поток работ; информационный поток
4.2	Логистика в производстве	Цепи поставок, производственная логистика, управление цепями поставок
5	Моделирование производств	
5.1	Содержание процесса моделирования, методы (парадигмы) моделирования	Виды моделирования; системно-динамическое, дискретно-событийное, агентное моделирование; системная динамика
5.2	Программные системы (пакеты) моделирования	Средства моделирования широкого профиля; средства моделирования производств
5.3	Разработка моделей машиностроительных производств	Этапы разработки моделей производств
5.4	Исследование моделей машиностроительных производств	Этапы исследования моделей производств; разработка планов экспериментов; постановка и выполнение экспериментов с моделями производств
6	Проектирование производственных потоков и производств	
6.1	Проектирование производственных потоков	Планирование и проектирование производственных потоков; этапы проектирования; проектирование потоков на разных стадиях жизненного цикла изделия и производственной системы
6.2	Проектирование ракетно-космических производств	Проектирование ракетно-космических производств и проектирование потоков в производстве; проектирование на разных стадиях жизненного цикла изделия
7	Управление потоками и производством	
7.1	Управление производственными потоками	Управление производственными потоками; методы управления; принципы управления
7.2	Управление производством	Управление производством; уровни управления; методы управления
7.3	Системы управления производством на базе моделей машиностроительных производств	Классы систем управления производством; MOM; APS; MES; SCADA; SIM

Практическая часть дисциплины посвящена разработке прагматических моделей производственных систем в контексте изделия для разных типов процессов (*fabrication*, *manufacturing*, *production*), для разных видов изделий (разного уровня укрупнения: деталь, сборочная единица (узел, агрегат, система), изделие в целом), для разных типов потоков изделий (поток единичного изделия, поток изделий одного наименования; по-

ток номенклатуры изделий в объеме программы выпуска), для разных видов производственных подразделений (разного уровня укрупнения: производственная ячейка, участок, линия, цех, производство, завод) с использованием различных сред моделирования.

Содержание практической части и примеры программных систем для разработки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Содержание практической части дисциплины «Управление производственными потоками»

№	Практическое задание	Примеры программных систем
1	Разработка модели процесса механической обработки детали (<i>fabrication</i> : процессы токарной, фрезерной, шлифовальной обработки и др.) в программных системах моделирования	<ul style="list-style-type: none"> • СПРУТ Технология: SprutCAM • Autodesk: FeatureCAM • Dassault Systemes: CATIA CAM, SolidWorks CAM • Siemens Industry Software: NX CAM
2	Разработка модели сборочно-монтажного процесса производства узла (<i>manufacturing/assembly</i> : процессы сборки, монтажа, ремонта и др.) в программных системах моделирования	<ul style="list-style-type: none"> • Autodesk: AutoCAD, Inventor Fusion • Dassault Systemes: DELMIA Industrial Engineer, Plant Layout Designer, Process Simulation Analyst, Simulation Engineer, Process Planner, Shop Floor Equipment • Siemens Industry Software: NX Assembly Path Planning, Tecnomatix
3.1	Разработка модели полного цикла производства (<i>production</i>) детали 1-го наименования в объеме 1000 шт. в программных системах моделирования	<ul style="list-style-type: none"> • Средства имитационного моделирования широкого профиля: AnyLogic, Arena, Enterprise Dynamics, ExtendSim, Flexsim, NetLogo, Promodel Optimization Suite, SAS Simulation Studio, Simio, Simul8, Witness
3.2	Разработка модели полного цикла производства (<i>production</i>) узла/агрегата/системы/изделия в объеме 1000 шт. в программных системах моделирования	<ul style="list-style-type: none"> • Средства имитационного моделирования производств: Autodesk Material Flow Analysis, DELMIA QUEST, DELMIA IEN, Tecnomatix Plant Simulation
3.3	Разработка модели полного цикла производства (<i>production</i>) в объеме программы выпуска изделий в программных системах моделирования	

2. Опыт реализации при подготовке специалистов ВУЗа

По состоянию на сегодняшний день модельно-ориентированная разработка производств РКС пока представлена в объеме дисциплины «Управление производственными потоками», которая преподается на кафедре «Космические системы и ракетостроение» МАИ для студентов 3-го курса уже на протяжении 3-х лет и частично – в объеме дисциплины «Технологические САПР» (п. 1 практической части табл. 2).

Проектирование и управление производственной системой ведется в контексте изделия. К началу данного курса студентами в рамках учебно-исследовательской работы уже выбран объект исследования – узел или агрегат изделия ракетно-космической техники (РКТ). Кроме этого, для одной из деталей объекта выполнено конструкторско-технологическое проектирование и разработан операционный технологический процесс механической обработки. На базе этого в ходе 6-го семестра выполняется практическое задание по п. 3.1 табл. 2, в процессе выполнения которого студенты разрабатывают концептуальную модель производства по изготовлению детали своего объекта и, далее на ее основе, прагматическую модель, адаптированную под возможности вы-

бранного программного обеспечения. Таким образом, для одной и той же концептуальной модели производственной системы изготовления детали в группе студентов реализуется набор разных прагматических моделей, представленных в соответствующих программных средствах. Примеры практических работ студентов с использованием универсальных пакетов моделирования и специализированных программных инструментов представлены на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

Другие разделы практической части (соответствующие пп. табл. 2) требуют более серьезной подготовки студентов, а также исходного материала для разработки более сложных производственных систем по изготовлению сборочных изделий и изделий в целом, что выполняется и нарабатывается в ходе дальнейшего обучения по смежным дисциплинам. Поставленная таким образом подготовка приобретает сквозной характер, охватывая последовательно все стадии ЖЦ изделия и имеющая, уже начиная с начальных курсов обучения, прикладной пример (проект), финальная часть которого завершается на дипломном проектировании.

Анализ практических работ студентов показывает, что наибольшие трудности у них вызывают разделы, связанные с разработкой концептуальных моделей производственных систем. Это значит, что должно быть усилено направление сквозной подготовки в области онтологического

инжиниринга направления 1 (рис. 1, [11]). Кроме того, длительное время занимает освоение того или иного выбранного программного обеспечения для построения моделей. Тем не менее, за семестр, даже в отсутствии достаточной базовой подготовки, студенты успевают не только построить модели производств для изготовления своей детали,

но и осуществляют их оптимизацию путем постановки виртуальных экспериментов. В ближайшей перспективе планируется использовать эти результаты для натурного моделирования производственных систем в дополнение к прототипированию изделий РКТ, уже реализуемого в рамках 1-го направления [11].

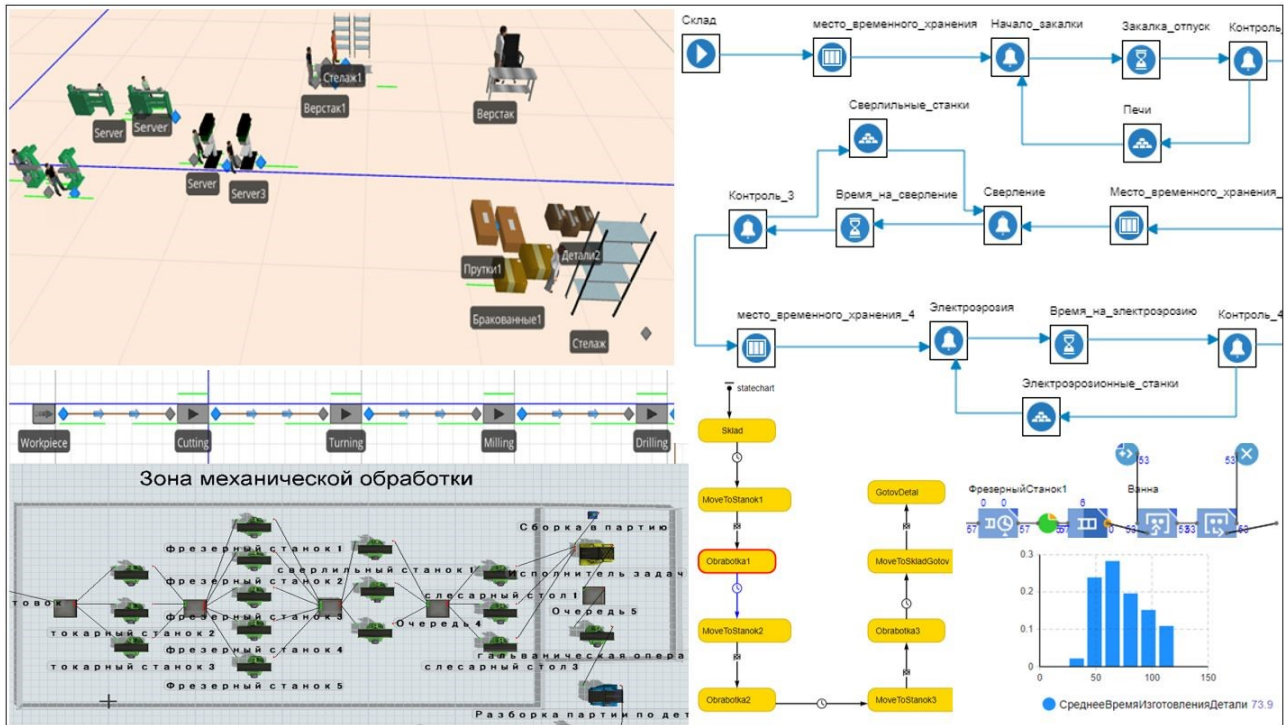


Рис. 4. Примеры фрагментов производственных моделей, разработанных в системах моделирования широкого профиля: Simio, iWebsim 2.0 (вверху); FlexSim, AnyLogic (внизу)

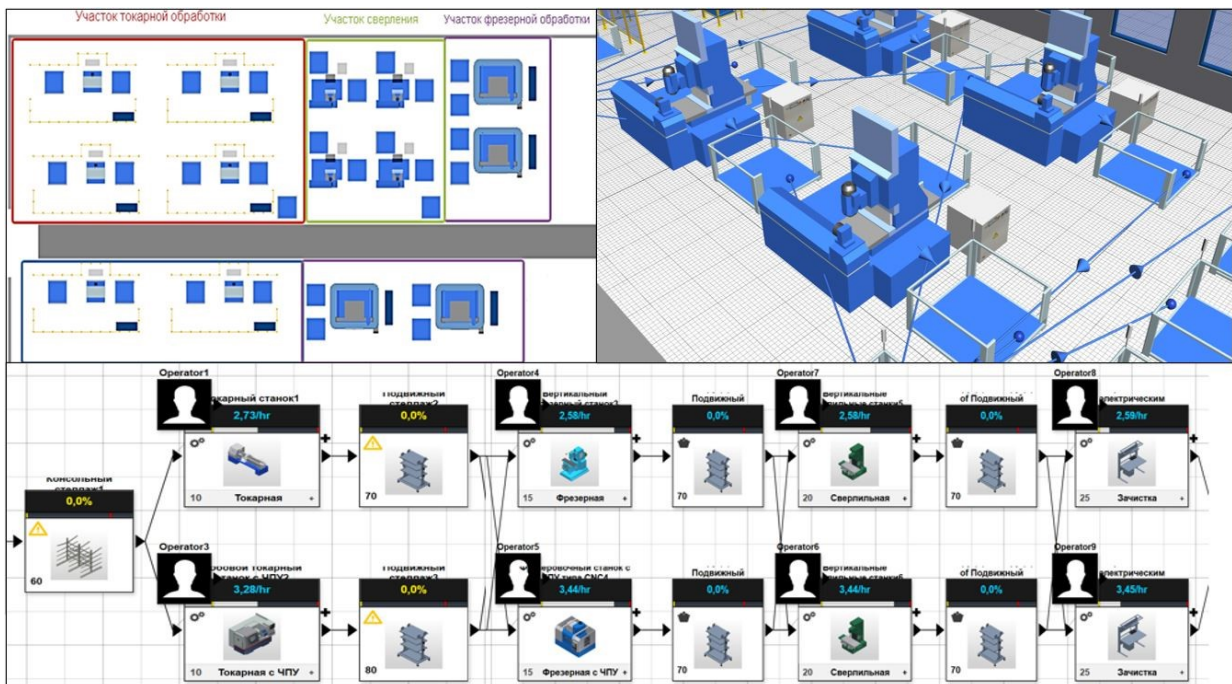


Рис. 5. Примеры фрагментов производственных моделей, разработанных в специализированных системах моделирования производств: Tecnomatix Plant Simulation (вверху), Autodesk Factory Design Utilities (внизу)

Заключение

Как было показано во введении, в современных условиях требования производства определяют облик изделия в гораздо большей степени, чем это было раньше. Поэтому подготовка инженеров-создателей ракетно-космической техники должна выполняться в контексте производства, равно как и инженеров-создателей ракетно-космических производств – в контексте изделий. Показано, что сегодня существует математическое и программное обеспечение, пока еще в разрозненном виде, но которое позволяет путем интеграции отдельных их элементов реализовать связь изделие–технология–производство, хотя пока еще в большей степени только в прямом направлении. В этом отношении на кафедре «Космические системы и ракетостроение» МАИ ведется подготовка специалистов проектно-конструкторского и производственно-

технологического профиля по направлению модельно-ориентированной разработки производств РКТ. Разработаны и преподаются новые дисциплины: «Технологические САПР», «Управление производственными потоками». Приведены основы теоретического, методического обеспечения и содержание дисциплины «Управление производственными потоками». Предложены механизмы интеграции выделенных 2-х групп моделей цифровых двойников производств для реализации контекстной разработки «изделие–производство», «производство–изделие». Выполнен анализ результатов работ студентов по практической части дисциплины, отмечены трудности, возникающие при освоении предмета дисциплины. Предназначено для ВУЗов, осуществляющих подготовку специалистов для ракетно-космической промышленности и отраслей, связанных с ней по разработке как изделий, так и производств.

Список литературы

- [1] Red Heaven: China sets its sights on the stars (part 3) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thespacereview.com/article/4355/1> (дата обращения: 17.05.2022).
- [2] Red Heaven: China sets its sights on the stars (part 2) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thespacereview.com/article/4352/1> (дата обращения: 17.05.2022).
- [3] Ключников В. Ю. Lean-носитель – основа системы транспортного обеспечения начального этапа индустриализации космоса // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 3 (96). С. 38–51. doi: 10.30981/2587-7992-2018-96-3-38-51.
- [4] Red Heaven: China sets its sights on the stars (part 1) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thespacereview.com/article/4347/1> (дата обращения: 17.05.2022).
- [5] Ключников В. Ю., Романов А. А. Концептуальное проектирование космических систем на основе Lean-принципов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2019. Т. 6. Вып. 3. С. 42–56. doi: 10.30894/issn2409-0239.2019.6.3.42.56.
- [6] Grigor'ev S. N., Dolgov V. A., Krasnov A. V., Kabanov A. A., Andreev N. S. A method of technologic audit of technical re-equipment projects in aircraft production enterprises // Russian Aeronautics (Iz VUZ). 2015. vol. 58. pp. 244–250. doi: 10.3103/S106879981502018X.
- [7] Кabanov A. A. Проектирование изделий с учетом организационно-технических возможностей дискретного машиностроительного производства // Труды МАИ. 2015. № 80.
- [8] Анализ пропускной способности производственных систем машиностроительных предприятий с использованием DELMIA» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.3ds.com/fileadmin/EVENTS/3DEXPERIENCE-Customer-FORUMS/RUSSIA/Netnet.pdf> (дата обращения: 23.01.2016).
- [9] Кabanov A. A. Проектирование изделий ракетно-космической техники на основе использования системы «изделие–технология–производство»: дисс. ... канд. техн. наук: 05.07.02. М., 2016. 287 с.
- [10] Кabanov A. A. Объектная модель анализа изделий ЛА с учетом явления наследования для оценки и управления эффективностью производственных систем дискретного машиностроения в ходе их организационно-технического проектирования и модернизации // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 161–168.
- [11] Кabanov A. A., Федоров И. А., Дацюк И. В. Подходы к формированию сквозной проектно-конструкторской и производственно-экспериментальной среды в образовательных учреждениях аэрокосмического профиля // Материалы XLVI Академических чтений по космонавтике. 2022. Т. 3. С. 255–259.
- [12] Lu Ya., Morris KC, Frechette S. Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems. USA : National Institute of Standards and Technology, 2016. 39 p.
- [13] Боровков А., Рябов Ю., Марусев В. «Умные» цифровые двойники – основа новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения // Трампин к успеху. 2018. № 13. С. 12–16.
- [14] Анализ стратегий управления при переходе к серийному производству самолетов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anylogic.ru/resources/case-studies/analysis-of-management-strategies-for-the-aircraft-production-ramp-up/> (дата обращения: 20.05.2022).

- [15] Evaluating different maintenance policies through a digital copy of the manufacturing process [Электронный ресурс]. URL: [https://www.anylogic.ru/upload/conference/2018/presentations/evaluating-different-maintenance-policies-through-a-digital-copy-of-the-manufacturing-process-\(fair-dynamics-et-al\).pdf](https://www.anylogic.ru/upload/conference/2018/presentations/evaluating-different-maintenance-policies-through-a-digital-copy-of-the-manufacturing-process-(fair-dynamics-et-al).pdf) (дата обращения: 20.05.2022).
- [16] Agent Based Turbine Operations & Maintenance [Электронный ресурс]. URL: [https://www.anylogic.ru/upload/conference/2018/presentations/digital-twin-agent-based-turbine-operations-and-maintenance\(atom\)\(decisionlab\).pdf](https://www.anylogic.ru/upload/conference/2018/presentations/digital-twin-agent-based-turbine-operations-and-maintenance(atom)(decisionlab).pdf) (дата обращения: 20.05.2022).
- [17] Истории успеха [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anylogic.ru/upload/pdf/case-studies-brochure-ru.pdf> (дата обращения: 20.05.2022).
- [18] Пилотный проект на одном из предприятий ПАО «ОАК» [Электронный ресурс]. URL: <https://bfg.ai/proekt-oak/> (дата обращения: 20.05.2022).
- [19] Боровков А., Бирбраер Р., Биленко П., Бенклян С., Маневич А., Шуляк А., Зобнин М., Прядильщиков С., Никулин А., Шестаков Д. Руководство по цифровой трансформации производственных предприятий. М. : Autodesk Inc., 2019. 172 с.
- [20] Дударева О. В., Аракчеев Д. В., Дударев Д. Н. Концептуальные аспекты перехода к умному производству в условиях цифровизации // Организатор производства. 2020. Т. 28. № 4. С. 7–15. doi: 10.36622/VSTU.2020.87.64.001.
- [21] Создание цифрового двойника машиностроительного предприятия [Электронный ресурс]. URL: <https://leader-id.ru/events/278854> (дата обращения: 20.05.2022).
- [22] Толуев Ю. И. Задачи имитационного моделирования при реализации концепции Индустрия 4.0 в сфере производства и логистики // Труды Восьмой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017). 2017. С. 57–65.
- [23] Кабанов А. А., Дацюк И. В. Системы управления производством ракетно-космической техники: ERP, APS, MES или SIM? // Материалы XLVI Академических чтений по космонавтике. 2022. Т. 4. С. 128–132.

MODEL-BASED DEVELOPMENT PRODUCTION OF ROCKET AND SPACE SYSTEMS IN THE CONTEXT OF PRODUCTS IN AEROSPACE UNIVERSITIES

A. A. Kabanov

*Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russian Federation*

The work continues a series of publications devoted to the big topic of the formation of an end-to-end design and production-experimental environment in aerospace universities. This time, one of the components of this environment, which is currently least represented in educational institutions, is considered – the direction of model-oriented development of rocket and space industries. The substantiation of the relevance and necessity of studying the subject in modern conditions is given, and not only for specialists studying under the training programs for specializations in the production and technological profile but also for the design profile. Particular attention is paid to the parallel development of products in the context of their production systems and the development of production in the context of manufactured products. Groups of models used in the framework of model-based joint development of products and their production, as well as types of simulated production processes, are identified. The theoretical and methodological foundations of the developed approach to the development of educational disciplines of the direction, based on the experience of developing models of machine-building industries of rocket and space enterprises, are outlined. The structure and content of the disciplines are given. The experience of implementation in the educational process is analyzed, including on the example of practical tasks performed by students. The presented results can be adapted and used in other branches of mechanical engineering with a discrete type of production.

Keywords: model-based system engineering, rocket and space production system, digital production, specialists training.

References

- [1] Red Heaven: China sets its sights on the stars (part 3). Available at: <https://www.thespacereview.com/article/4355/1> (accessed 17.05.2022).
- [2] Red Heaven: China sets its sights on the stars (part 2). Available at: <https://www.thespacereview.com/article/4352/1> (accessed 17.05.2022).
- [3] Klyushnikov V. Yu. *Lean-nositel' – osnova sistemy transportnogo obespecheniya nachal'nogo etapa industrializacii kosmosa* [Lean-launch vehicle as the transportation system basis at the early stage of space industrialization] // Magazine VKS, 2018, no. 3 (96), pp. 38–51. doi: 10.30981/2587-7992-2018-96-3-38-51. (In Russian)
- [4] Red Heaven: China sets its sights on the stars (part 1). Available at: <https://www.thespacereview.com/article/4347/1> (accessed 17.05.2022).
- [5] Klyushnikov V. Yu., Romanov A. A. *Konceptual'noe proektirovanie kosmicheskikh sistem na osnove Lean-principov* [Conceptual design of space systems based on Lean Principles] // Rocket-Space Device Engineering and Information Systems, 2019, vol. 6, issue. 3, pp. 42–56. doi: 10.30894/ISSN2409-0239.2019.6.3.42.56. (In Russian)
- [6] Grigor'ev S. N., Dolgov V. A., Krasnov A. V., Kabanov A. A., Andreev N. S. A method of technologic audit of technical re-equipment projects in aircraft production enterprises // Russian Aeronautics (Iz VUZ), 2015, vol. 58, pp. 244–250. doi: 10.3103/S106879981502018X.
- [7] Kabanov A. A. *Proektirovanie izdelij s uchetom organizacionno-tekhnicheskikh vozmozhnostej diskretnogo mashinostroitel'nogo proizvodstva* [Designing products with regard to organizational and technical capabilities of discrete production engineering] // Trudy MAI, 2015, no. 80. (In Russian)
- [8] *Analiz propusknoj sposobnosti proizvodstvennykh sistem mashinostroitel'nykh predpriyatij s ispol'zovaniem DELMIA* [Analysis of the throughput of manufacturing systems of machine -building enterprises using Delmia]. Available at: <http://www.3ds.com/fileadmin/EVENTS/3DEXPERIENCE-Customer-FORUMS/RUSSIA/Hetnet.pdf> (accessed 23.01.2016). (In Russian)
- [9] Kabanov A. A. *Proektirovanie izdelij raketno-kosmicheskoy tekhniki na osnove ispol'zovaniya sistemy «izdelie-tekhnologiya-proizvodstvo»* [Designing of products of rocket and space technology based on the use of the system «product-technology-production»] : PhD thesis, Moscow, 2016, 287 p. (In Russian)
- [10] Kabanov A. A. *Ob'ektnaya model' analiza izdelij LA s uchetom yavleniya nasledovaniya dlya ocenki i upravleniya effektivnost'yu proizvodstvennykh sistem diskretnogo mashinostroeniya v hode ih organizacionno-tekhnicheskogo proektirovaniya i modernizacii* [Object model of analysis of LA products, taking into account the phenomenon of inheritance for evaluating and managing the effectiveness of production systems of discrete engineering during their organizational and technical design and modernization] // Scientific and Technical Volga region Bulletin, 2014, no. 6, pp. 161–168. (In Russian)
- [11] Kabanov A. A., Fedorov I. A., Datsyuk I. V. *Podhody k formirovaniyu skvoznoj projektно-konstruktorskoj i proizvodstvenno-eksperimental'noj sredy v obrazovatel'nykh uchrezhdeniyah aerokosmicheskogo profilya* [Approaches to the formation of through design, design and industrial and experimental environment in educational institutions of aerospace profile] // Materials of XLVI Academic Space Conference, 2022, vol. 3, pp. 255–259. (In Russian)
- [12] Lu Ya., Morris KC, Frechette S. Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems. USA : National Institute of Standards and Technology, 2016. 39 p.
- [13] Borovkov A., Ryabov Yu., Marusev V. *«Umnnye» cifrovye dvojniki – osnova novoj paradigmy cifrovogo proektirovaniya i modelirovaniya global'no konkurentosposobnoj produkcii novogo pokoleniya* [«Smart» digital doubles – the basis of the new paradigm of digital design and modeling of globally competitive products of the new generation] // *Tramplin k uspekhu*, 2018, no. 13, pp. 12–16. (In Russian)
- [14] Analysis of Management Strategies for the Aircraft Production Ramp-up. Available at: <https://www.anylogic.com/resources/case-studies/analysis-of-management-strategies-for-the-aircraft-production-ramp-up/> (accessed 20.05.2022).
- [15] Evaluating different maintenance policies through a digital copy of the manufacturing process. Available at: [https://www.anylogic.ru/upload/conference/2018/presentations/evaluating-different-maintenance-policies-through-a-digital-copy-of-the-manufacturing-process-\(fair-dynamics-et-al\).pdf](https://www.anylogic.ru/upload/conference/2018/presentations/evaluating-different-maintenance-policies-through-a-digital-copy-of-the-manufacturing-process-(fair-dynamics-et-al).pdf) (accessed 20.05.2022).
- [16] Agent Based Turbine Operations & Maintenance. Available at: [https://www.anylogic.ru/upload/conference/2018/presentations/digital-twin-agent-based-turbine-operations-and-maintenance\(atom\)\(decisionlab\).pdf](https://www.anylogic.ru/upload/conference/2018/presentations/digital-twin-agent-based-turbine-operations-and-maintenance(atom)(decisionlab).pdf) (accessed 20.05.2022).
- [17] *Istorii uspekha* [Success stories]. Available at: <https://www.anylogic.ru/upload/pdf/case-studies-brochure-ru.pdf> (accessed 20.05.2022). (In Russian)
- [18] *Pilotnyj projekt na odnom iz predpriyatij PAO «OAK»* [Pilot project at one of the enterprises of PJSC «UAC»]. Available at: <https://bfg.ai/proekt-oak/> (accessed 20.05.2022). (In Russian)
- [19] Borovkov A., Birbraer R., Bilenko P., Benklyan S., Manevich A., Shulyak A., Zobnin M., Spertilshchikov S., Nikulin A., Shestakov D. *Rukovodstvo po cifrovoj transformacii proizvodstvennykh predpriyatij* [Guide to digital transformation of production enterprises]. Moscow, Autodesk Inc., 2019, 172 p. (In Russian)

- [20] Dudareva O. V., Arakcheev D. V., Dudarev D. N. *Konceptual'nye aspekty perekhoda k umnomu proizvodstvu v usloviyah cifrovizacii* [Conceptual aspects of the transition to smart production in the context of digitalization] // Organizer of production, 2020, vol. 28, no. 4, pp. 7–15. doi: 10.36622/VSTU.2020.87.64.001. (In Russian)
- [21] *Sozдание cifrovogo dvojnika mashinostroitel'nogo predpriyatiya* [Creation of a digital double of a machine-building enterprise]. Available at: <https://leader-id.ru/events/278854> (accessed 20.05.2022). (In Russian)
- [22] Toluev Yu. I. *Zadachi imitacionnogo modelirovaniya pri realizacii koncepcii Industriya 4.0 v sfere proizvodstva i logistiki* [Tasks of simulation modeling in the implementation of the concept of industry 4.0 in the field of production and logistics] // Proc. of the Eighth All-Russian Scientific and Practical Conference on simulation and its use in science and industry «Imital modeling. Theory and practice» (IMMOD-2017), 2017, pp. 57–65. (In Russian)
- [23] Kabanov A. A., Datsyuk I. V. *Sistemy upravleniya proizvodstvom raketno-kosmicheskoy tekhniki: ERP, APS, MES ili SIM?* [Systems for the management of the production of rocket and space technology: ERP, APS, MES or SIM?] // Materials of XLVI Academic Space Conference, 2022, vol. 4, pp. 128–132. (In Russian)

Сведения об авторе

Кабанов Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Космические системы и ракетостроение» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).