

УДК 629.7:519.876.5:65.011.46

Цифровое моделирование и имитирование систем аэрокосмического производства с целью управления операционной эффективностью

Digital modeling and simulation of aerospace manufacturing systems to manage operational efficiency

Рассмотрено применение технологий цифрового моделирования в решении задач управления операционной эффективностью производств в аэрокосмической отрасли. Приведены характеристика и содержание понятия операционной эффективности в контексте решаемых задач. Предложено управление операционной эффективностью на основе отработки решений на цифровых двойниках производственных систем. Цифровое описание систем аэрокосмического производства и их поведения во времени выполнено с использованием методов имитационного моделирования в рамках агентного моделирования и системной динамики. Обоснованы преимущества выбранных методов, показаны области применения. С их использованием разработаны специализированные программные средства создания цифровых двойников производственных систем, адаптированные под условия и специфику аэрокосмических производств, позволяющие создавать модели оцениваемых производств в автоматическом режиме. Показан переход от операционных производственных показателей, значения которых формируются в ходе выполнения имитационных экспериментов, к финансово-экономическим показателям. Приведен механизм интеграции цифровых моделей производственных систем и инструментов финансово-экономического моделирования. Указаны инструменты целенаправленного управления операционной эффективностью с использованием методологии развертывания функций качества. Предложены подходы по декомпозиции задачи моделирования производств на разных уровнях детализации рассмотрения производства, указаны

The application of digital modeling technologies in solving the problems of managing the operational efficiency of production in the aerospace industry is considered. The characteristics and content of the concept of operational efficiency in the context of the tasks being solved are given. The management of operational efficiency based on the development of solutions on digital twins of production systems is proposed. A digital description of aerospace production systems and their behavior in time was performed using simulation methods in the framework of agent-based modeling and system dynamics. The advantages of the chosen methods are substantiated, the areas of application are shown. With their use, specialized software tools for creating digital twins of production systems have been developed, adapted to the conditions and specifics of aerospace industries, allowing you to create models of estimated industries in automatic mode. The transition from operational performance indicators, the values of which are formed in the course of simulation experiments, to financial and economic indicators is shown. The mechanism of integration of digital models of production systems and financial and economic modeling tools is given. The tools for targeted management of operational efficiency using the methodology of quality functions deployment are indicated. Approaches to the decomposition of the problem of production modeling at different levels of detail of the consideration of production are proposed, objects corresponding to the levels, restrictions and necessary data for modeling are indicated. Practical typical examples of modeling results and options for their use for aerospace enterprises are presented. An assessment of the effect of the introduction of digital

соответствующие уровням объекты, ограничения и необходимые данные для моделирования. Представлены практические типовые примеры результатов моделирования и вариантов их использования для предприятий аэрокосмической отрасли. Выполнена оценка эффекта от внедрения цифрового моделирования производств в операционную деятельность.

Ключевые слова: аэрокосмические производства, цифровые двойники, имитационное моделирование, операционная эффективность, финансово-экономическое моделирование.

modeling of production in operational activities was carried out.

Keywords: aerospace manufacturing, digital twins, simulation, operational efficiency, financial and economic modeling.



**КАБАНОВ
АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

к.т.н., руководитель проекта,
АО «Организация «Агат»

**KABANOV
ALEXANDER**

Ph.D (Engineering), Project Manager, JSC "Organization "Agat"



МОХОВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

Руководитель проекта, АО «Организация
«Агат»

МОКНОВ МИХАИЛ

Project Manager, JSC "Organization "Agat"



ФЕДОРОВ ИЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВИЧ

к.т.н., доцент, главный эксперт,
АО «Организация «Агат»

FEDOROV ILYA

Ph.D (Engineering), Associate professor, Chief expert,
JSC "Organization "Agat"

Введение

Технологии цифрового моделирования с успехом применяются для повышения эффективности производств высокотехнологичных отраслей промышленности: в атомном машиностроении, судостроении, а также в аэрокосмической отрасли [1,2,3,4]. С их помощью решают задачи анализа текущего состояния производственных систем и прогнозирования их поведения в будущем. Известны примеры системного

внедрения на уровне производственных объединений. Так в АО «ОДК» с 2019 г. имитационное моделирование производств используют на корпоративном уровне для решения задач оценки инвестиционных проектов, проектов по развитию производственной системы [5,6]. Как правило, такое использование носит проектный характер. Если говорить об операционной эффективности, то здесь важно, в первую очередь, обеспечить непрерывный процесс реализации деятельности. Для

этого на многих предприятиях отрасли созданы и функционируют подразделения операционной эффективности, особенностью которых является неизбежная кросс-функциональная направленность службы. Поддержка этой деятельности не всегда может быть выполнена действующими системами промышленной автоматизации предприятия. Потому актуальными являются две задачи:

1) разработка методов и инструментов поддержки принятия решений в части операционной эффективности;

2) внедрение разработанных инструментов в существующий IT-ландшафт предприятия, с целью оперативного и постоянного мониторинга эффекта от разрабатываемых мероприятий.

Цифровое моделирование и имитирование производственных систем. Методы

С учетом особенностей, отмеченных во введении к настоящей статье, среди методов цифрового моделирования для поддержки рассматриваемой деятельности в наибольшей степени подходят методы имитационного моделирования по следующим причинам:

- создается цифровой аналог действующего производства (цифровой двойник), наиболее близкий по структуре физическому, позволяющий безопасно и незатратно отработать решения по разрабатываемым мероприятиям повышения операционной эффективности с последующим их внедрением на реальном производстве;

- быстро изменяющиеся условия современного производства, необходимость в реализации мероприятий по адаптации, предполагают большое количество соответствующих конфигураций производства, для формализации описания и перевод в цифровой вид которых, другими математическими методами требуется существенно больше трудовых и временных ресурсов.

Из методов имитационного моделирования, в работе используются метод агентного моделирования и системная динамика. С помощью агентного моделирования создаются детальные модели, в которых учитываются специфические особенности и условия аэрокосмических производств на основе соответствующего воспроизведения поведения объектов системы производства. Системная динамика позволяет строить модели с абстрактным, агрегированным представлением системы производства (потoki производства,

накопители), для определения основных зависимостей в системе, оценки принципиальных решений, а также для разработки необходимых управляющих воздействий на систему.

Учитывая сложность аэрокосмического производства, в рамках которого в производстве могут одновременно находиться до нескольких тысяч единиц ДСЕ (деталей и сборочных единиц), а количество деталей-операций достигать сотней тысяч и более, а также требования комплексного рассмотрения производственных цепочек в рамках сети кооперации предприятий, возникает необходимость в декомпозиции задачи моделирования на уровни. Предлагаемые уровни декомпозиции рассматривают производство на разных уровнях его организационной структуры. Соответствующие им объекты, ограничения и данные моделирования приведены в табл. 1.

Результаты моделирования, получаемые для каждого из уровней, а также варианты их использования, будут приведены далее.

Содержание управления операционной эффективностью

Под управлением операционной эффективностью в настоящей работе с опорой на труды [7,8] понимается целенаправленное управление распределением производственных ресурсов. Управление включает планирование на основе анализа, координацию в ходе исполнения и контроль реализации. Целенаправленный характер управления предполагает, что во-первых, известны целевые ориентиры, выраженные в соответствующих показателях и уровнях их значений, во-вторых, управление осуществляется согласно предварительно разработанной стратегии управления. Основными контролируемыми параметрами, в части производства, выступают запасы (незавершенное производство), производственные циклы, пропускная способность, производительность, загрузка производственных ресурсов, время выполнения заказов. При этом, неразрывно в связке с ключевой операционной деятельностью – производством, рассматриваются маркетинг, экономика и финансы. Управление операционной эффективностью не затрагивает изменение технологического базиса производства и направлено на оптимизацию текущей деятельности без существенной перестройки системы производства. Хотя по результатам этой работы зачастую выдаются рекомендации по наиболее ключевым направлениям модернизации

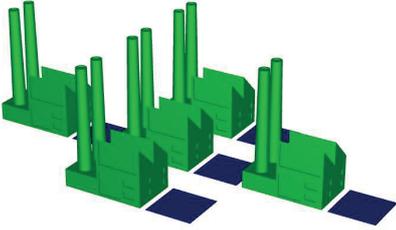
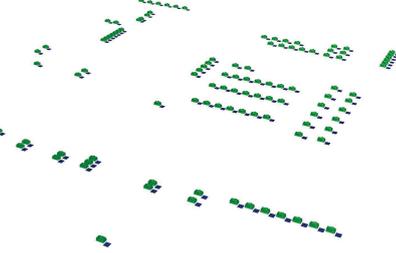
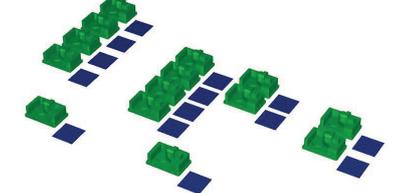
Уровни моделирования производств	Характеристика уровня моделирования	Объекты моделирования, ограничения, данные
1	2	3
<p>Стратегический</p> 	<p>Наиболее укрупненный уровень моделирования, точность определяется корректным назначением циклов и мощностей производства</p>	<p>Единица мощности – завод или самостоятельное, как правило, предметно-замкнутое производство Единица процесса – процесс производства товарного изделия Ограничения, данные – циклы производства товарных изделий, количество (объем) мощности по производству товарного изделия</p>
<p>Тактический</p> 	<p>Средний (по оценкам) уровень моделирования, точность повышена за счет более детального (по компонентам изделия) учета циклов и мощностей</p>	<p>Единица мощности – цех / участок или самостоятельный технологический передел; Единица процесса – процесс производства компонента (на уровне цеха); Ограничения, данные – циклы производства агрегатов и узлов изделий, количество (объем) мощности по производству компонентов</p>
<p>Оперативный</p> 	<p>Наиболее точный уровень моделирования, точность определяется значениями трудоемкости операций, точностью описания рабочих центров и условий их работы и др.</p>	<p>Единица мощности – участок или рабочее место; Единица процесса – технологическая операция; Ограничения, данные – технологические циклы операций, состав и количество ресурсов: оборудование, персонал, оснастка и др.</p>

Табл. 1. Уровни моделирования: объекты, ограничения, данные



Рис. 1. Концептуальная модель управления операционной деятельностью

производства. Концептуальная модель управления приведена на рис. 1.

Для описания этой модели традиционно используют аппарат системной динамики, впоследствии также применяющийся и для анализа систем производства [9]. Система представляется в виде потоков и накопителей. Выделяют следующие основные потоки в операционной деятельности [10]:

1) поток заказов (поступление заказов на продукцию и преобразование их в потребности и заявки на сырье и материалы, рабочую силу, основные средства, производственные задания);

2) поток материальных ресурсов (движение потоков поставляемых материалов, интенсивность запуска и выпуска производства, отгрузка готовой продукции);

3) поток денежных средств (движение платежей, уровень денежных средств на счете);

4) поток рабочей силы (процессы найма, обучения и увольнения рабочих);

5) поток основных средств (темпы ввода и выбытия производственных мощностей);

6) информационный поток (обмен информацией).

Иницирующим в системе является поток заказов, для исполнения которых соответствующим образом распределяются, координируются и контролируются потоки производственных ресурсов (материальные, денежные, рабочая сила, основные средства), а управление производится на основе анализа данных информационных потоков с выдачей управляющих инструкций для достижения заданных целей управления.

Указанный подход полезен для выявления основных факторов влияния в операционной деятельности. Однако указанного представления недостаточно для разработки технических мероприятий и анализа производственного процесса с точки зрения физических источников эффекта. В этом случае используют дискретно-событийный или агентный подход. В решении практических задач приходится комбинировать эти два подхода.

Специализированные инструментальные средства моделирования производств

В АО «Организация «Агат» на основе методов агентного моделирования для создания и исследования моделей аэрокосмических производств разработана и зарегистрирована Система Динамического Моделиро-

вания (СДМ) [11]. Система позволяет связать технические показатели производства с финансово-экономическими. В рамках рассматриваемого контекста СДМ используется для решения задач повышения операционной эффективности предприятий Госкорпорации «Роскосмос», оценки инвестиционных проектов. Система предназначена для создания динамических моделей дискретных машиностроительных производств, а также планирования, моделирования и анализа производственно-логистических процессов предприятий машиностроения и Корпорации в частности. Система снабжена блоком экономических расчетов, дополняющим основной блок расчета показателей производства.

Отличительными особенностями программной системы СДМ являются:

1) широкие возможности для эффективного использования в системе lean-производства и повышению операционной эффективности производственных систем. Исследование факторов влияния на операционные и финансово-экономические показатели одновременно в одной модели.

2) широкие возможности для анализа гибких производств или производств с высокой степенью турбулентности (модернизация, переконфигурация производств), т.е. для случаев, где аналитические алгоритмы не дают результата или требуют длительной настройки.

3) эффективность для исследования производств на начальных стадиях жизненного цикла (ЖЦ), т.е. там, где применение промышленных систем затруднено отсутствием информационного обеспечения или устоявшейся модели производства (проектирование производств и систем их управления).

4) сочетание в одном решении преимущества систем класса SIM (SIM – simulation, имитационное моделирование) и APS (Advanced Planning & Scheduling – усовершенствованное планирование, класс автоматизированных систем планирования производства уровня предприятия) / MES (Manufacturing Execution System – исполнительные системы производства, класс систем планирования и управления производством цехового уровня). Позволяет планировать производство аналитическими методами и верифицировать качество производственных расписаний, в том числе из сторонних систем на имитационной модели производства.

5) низкий порог входа в освоении и владении

системой. Автоматическое создание модели производства без программирования, автоматическое графическое отображение технологических маршрутов, интерактивная трехмерная визуализация производственных объектов на планировке и др.

б) моделирование хода реализации производства в трехмерном представлении в динамике с учетом диапазона длительностей выполнения работ, вероятностных рисков «провала» по мощностям, недопоставки и др.

В настоящее время происходит смена парадигмы организации и устройства производства главным отличительным признаком которой является проектный характер производства (что в еще большей степени актуально для аэрокосмических производств – часто уникальных изделий) с максимальной гибкостью по его адаптации и с минимальными затратами. Указанные особенности производств нового поколения, наряду с усложнением производимой продукции, приводят к вычислительной сложности оценки и управления такими производствами, следствием которой является декомпозиция управления на уровни (ERP, APS, MES) и применение комплекса различных автоматизированных систем.

В то же время традиционные системы управления производством, созданные десятилетия назад, функционируют на базе модели в основе которой лежит серийный, поточный характер производства продукции

в рамках фиксированной конфигурации производства.

В силу этих особенностей аналитические методы расчета и оценки перспективных производств, основанные на постоянстве одной модели, уступают имитационным методам – производство оценивается по результатам реализации виртуального эксперимента.

Однако имитационные методы моделирования имеют ограничение: высокая вычислительная сложность, необходимость в большом количестве экспериментов для нахождения приемлемого решения.

Для устранения указанного ограничения инструментарий СДМ дополнен аналитическим «движком» для получения опорного базового сценария производства. В сочетании с гибкостью создания и настройки сценариев решение СДМ является перспективным средством исследования современных аэрокосмических производств.

СДМ позволяет дополнить промышленные решения по автоматизации предприятия и расширить возможности по анализу производственной деятельности. Перечень возможностей приведен на рис. 2.

Для разработки моделей производств на основе системной динамики используются свободно распространяемые инструментальные средства общего профиля, адаптируемые под специфику аэрокосмической отрасли.

Вопросы интеграции цифровых моделей производств с целью их непрерывного использования будут рассмотрены далее.

Цифровой двойник производства на базе СДМ	Цифровой двойник производства на базе APS/MES	Цифровой двойник производства на базе CAPP, PLM
<ul style="list-style-type: none"> • ЦД в статическом и динамическом представлении • 2D, 3D визуализация производства на планировке • расчет и 2D визуализация производственных графиков • синхронный расчет производственных и финансовых показателей • верификация исходных данных модели производства • модель производства – min адаптация • верификация производственных графиков (2 метода) 	<ul style="list-style-type: none"> • ЦД в статическом представлении • _____ • _____ • расчет и 2D визуализация производственных графиков • расчет производственных показателей, экономические – отдельный модуль • _____ • _____ • модель производства – min адаптация • _____ • _____ 	<ul style="list-style-type: none"> • ЦД в статическом и динамическом представлении • 2D, 3D визуализация производства на планировке • _____ • _____ • расчет производственных показателей, экономические – программирование • _____ • _____ • модель производства – требует настройки и программирования • _____ • _____

Рис. 2. Дополнительные возможности цифрового моделирования на базе СДМ в сравнении с промышленными решениями

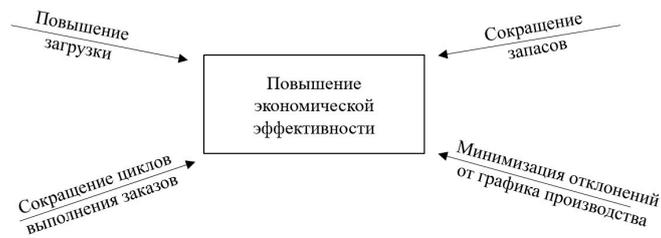


Рис. 3. Базовые показатели операционной деятельности, цели

№	Направления	Задачи	Факторы
1	2	3	4
1	Критерии заказчика	Сокращение времени выполнения заказов Повышение ценности предложения Снижение цены и стоимости эксплуатации	Срок поставки / быстрота реагирования Разнообразие предложения Кол-во и % рекламаций Кол-во и % отклоненных заказов Кол-во и % отклонений от графика Доля рынка Расширение базы заказчиков
2	Финансовые критерии	Улучшение финансового состояния: Платежеспособность; Финансовая устойчивость; Деловая активность	Поток денежных средств: Основные средства; Оборотные средства; Инвестиции; Запасы; Предоплаты (% и сроки предоплаты); Доходы будущих периодов (% и сроки предоплаты)
3	Критерии улучшения процессов	Технологический инжиниринг Выявление и ликвидация узких мест Снижение трудоемкости и вариативности процесса Оптимизация партий запуска Сокращение времени переналадки Оптимизация процессов ТОиР (техническое обслуживание и ремонт оборудования) Оптимизация оргструктуры Балансировка линии	Идентификация узких мест (очереди) Простои плановые/внеплановые Срывы сроков заказов Уровень запасов/заделов Цикл Пропускная способность Поток производства Загрузка мощностей (оборудование/площади/персонал) Трудоемкость Станкоемкость Материалоемкость OEE (Overall Equipment Effectiveness – общая эффективность оборудования)
4	Критерии повышения эффективности персонала	Обучение смежным профессиям Повышение квалификации Регулирование численности	Потребность в персонале Численность/Квалификация Сверхурочные работы/Простои

Табл. 2. Система показателей: направления, задачи, факторы

Связь производственных и экономических показателей. Система показателей

Комплексная оценка производственной деятельности ведется в системе связанных базовых показателей операционной деятельности на рис.3.

С целью учета стратегии в операционной деятельности, разработка системы показателей ведется в русле известной системы ССП (Система сбалансированных показателей) [12]. Ключевые задачи и факторы представлены в табл.2.

Интеграция цифровых моделей производств с инструментами финансово-экономического моделирования предприятий

Для оценки финансовых показателей деятельности предприятий в АО «Организация «Агат» созданы и используются инструменты финансово-экономического моделирования (ФЭМ) предприятий. Для проведения оценки в привязке к операционной деятельности в рамках направления операционной эффективности

ведутся работы по интеграции инструментов ФЭМ с цифровыми моделями операционной деятельности (производство, снабжение, поставка), в том числе с цифровыми моделями производств, реализованных в системе СДМ.

Анализ источников эффектов, анализируемых в рамках комплексной работы моделей, производится по следующим направлениям:

1. изменение выпуска продукции по показателям:
 - а) объем выпуска по годам, шт./г.;
 - б) цикл производства по основным агрегатам и системам (соотношения вовлечения затрат в производство в разрезе статей калькуляции (ПКИ (покупные, комплектующие изделия), материалы, накладные расходы по годам);
 - с) трудоемкость;
 - д) материалоемкость;
2. изменение схемы внутриотраслевой кооперации;

Уровень	Потребители результатов моделирования		Результаты	Практические примеры вариантов использования результатов
1	2		3	4
Стратегический уровень	Директор по производству	Подразделения повышения операционной эффективности	1) Актуальный ранжированный перечень ограничений по оборудованию, персоналу, оснастке, поставке и др. для вариантов производственных программ и для каждого периода производства 2) Апробированные на моделях наборы сценариев и мероприятий под них для решения проблем производства	Подготовка производства под ожидаемый рост/сокращение объемов производства Выработка вариантов решений для устранения последствий сбоя производства Обоснование потребностей в ресурсах для модернизации производства
	ЗГД по экономике и финансам		1) Обоснованные сроки и затраты в поддержку контрактации 2) Валидированные на моделях ТЭО инвестиционных проектов и др. 3) Распределение затрат в разрезе подразделений, изделий и по срокам в поддержку финансово-экономического планирования	Понимание реальных сроков и затрат потенциальных контрактов на этапе контрактации и преддоговорных отношений Валидация ТЭО проектов Принятие решений по приоритетам и времени распределения финансовых ресурсов Операционная эффективность
	Дирекция программ/проектов		1) Согласованные в моделях наборы конфигурации производств под разные варианты реализации программ 2) Расположение и размер центров компетенций производств 3) Разделительная ведомость работ по номенклатуре	Формирование программ развития производственных мощностей холдинга Согласование конструкции, технологии, возможностей производства на этапах проектирования изделий и производств Распределение нагрузки по предприятиям холдинга

Тактический уровень	IT-служба	Подразделения повышения операционной эффективности	1) Верифицированные данные IT-систем контура MOM 2) Настроенные IT-системы контура MOM под ограничения и особенности производства (отладка на моделях производства) 3) Рекомендации по использованию IT-систем контура MOM	Верификация данных по номенклатуре, ТП, мощностям производства Повышение качества результатов планирования IT-систем контура MOM (ERP, APS, MES, SCADA) Отладка процессов взаимодействия подразделений контура MOM в части IT
	Технологическая служба (ОГТ)		1) ТП с учетом состояния и загрузки производства 1) Отработанные на моделях процессы и планы конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) 3) Направления по развитию перспективных ТП	Проектирование технологических процессов с учетом возможностей производства (декомпозиция, концентрация операций, закрепление ресурсов, и др.) Приоритизация и управление процессами КТПП Разработка мероприятий и оценка эффектов по рационализации производства
	Планово-дисп. служба (ПДО)		1) Согласованные планы подразделений 2) Рекомендации по порядку запуска и параметрам производства 3) Набор сценариев «что, если» и планы под них 4) Границы устойчивости производства	Согласование и балансировка планов производственных подразделений по номенклатуре и по срокам Определение параметров производства: периодичность, опережения, отложенный запуск; заделы; незавершенное производство; размеры партий; графики производства
Оперативный уровень	Руководители цехов, мастера участков	Подразделения повышения операционной эффективности	1) Распределение производственных заданий с учетом текущей производственной ситуации 2) Рационализация производства	Оперативный контроль и управление производством Определение мероприятий по рационализации производства Оптимизация производственных процессов в рабочих ячейках (синхронизация и согласование действий оператора, манипуляций оборудования, средств автоматизации (автоматические магазины паллет, магазины инструмента, манипуляторы и др.), оснастки, вспомогательных действий, т.ч. наладка вне оборудования и др.

Табл. 3. Возможные результаты и практические примеры вариантов использования результатов моделирования в разрезе структурных подразделений

3. изменение объемов и сроков инвестиций:

а) приоритизация инвестиционных проектов;

б) распределение поступления инвестиционных

средств проектов.

модель производства в СДМ позволяет согласовать и корректно учитывать в ФЭМ внутриотраслевую кооперацию предприятий.

Помимо получения механизма взаимного влияния операционных показателей и финансовых, цифровая

Формирование целевой операционной модели предприятия

Ключевыми, с точки зрения определения целевой операционной модели, помимо самого производства, являются процессы формирования продуктовой линейки (разработка новых изделий, модернизация существующих) и процессы модернизации производства. Связать указанные три группы процессов позволяет известная методология QFD (Quality Function Deployment – Развертывание Функций Качества) [13;14]. Для каждого изделия из номенклатуры, декомпозируются требования к техническим характеристикам и устанавливается их влияние на технологию производства с дальнейшим выходом на требования к целевой конфигурации производства. Оценка вариантов конфигураций, в сравнении с текущим производством, выполняется на основе цифрового моделирования производственной системы. Посредством этого достигается упомянутый выше целенаправленный характер управления операционной эффективностью. Опыт реализации данного подхода для аэрокосмических производств показывает, что зачастую предлагаемые в рамках инвестиционных программ, проекты их

модернизации не соответствуют перспективной программе производства.

Практические типовые примеры результатов моделирования и вариантов их использования для предприятий аэрокосмической отрасли

Ниже в табл. 3 приведены типовые возможные результаты и практические примеры вариантов использования результатов для предприятий аэрокосмической отрасли в разрезе типовых структурных подразделений и уровней моделирования.

Оценка эффекта от внедрения

Возможные эффекты по результатам разработки и отработки мероприятий операционной эффективности с использованием технологии цифрового моделирования оцениваются в следующих диапазонах:

- 1) сокращение времени выполнения заказов: на 20-30% (своевременное выполнение контракта; оценка сроков и стоимости выполнения контракта);
- 2) увеличение производительности труда: более 20% (эффективная загрузка производственных ресурсов; сокращение простоев и потребности в сверхуроч-

Показатели (KPI)	Единицы измерения	Фактическое значение (пример)	Целевое значение (пример)	Эффект
1	2	3	4	5
Объемы незавершенного производства	млн. руб.	> 200	~ 100	↓ 50%
Цикл производства изделий	мес.	9	6	↓ 30%
Сверхурочные работы	% от общего объема работ	> 50%	~ 5%	↓ 50%
Простои рабочих	% от общей занятости	> 50%	~ 25%	↓ 50%
Пропускная способность	изделий в год	10	20	↑ 50%
Вариативность цикла	ед.	4	~ 1,5	↓ 40%

Табл. 4. Оценка целевых эффектов по показателям (пример)

ных работах);

3) сокращение операционных затрат более 10% (сокращение оборотного капитала; повышение операционной эффективности).

Показатели оценки и целевые значения эффектов по показателям представлены в табл. 4.

Заключение

В заключение следует отметить, что предложенные подходы и обеспечивающие их инструменты управления операционной эффективностью аэрокосмических производств на основе цифрового моделирования: декомпозиция задачи моделирования на уровни; интеграция производственных и финансово-экономических моделей; интеграция ключевых процессов операционной деятельности (производство, формирование продуктовой линейки, модернизация производства) на основе методологии QFD, специализированные программные средства на основе агентного моделирования и системной динамики, проходят этап становления. Полученный опыт реализации подходов показывает, что даже поэтапное их внедрение позволяет существенно повысить эффективность производств.

Список литературы

1. Апанасик О., Бирова К. (2019). Оптимизация потоков производства. САПР и Графика, (5), 4-9. Получено 2022, 28 июня, из <https://sapr.ru/article/25848>
2. Федотов М.В., Девятков Т.В., Плотников А.М., Долматов М.А. (2019). Опыт создания и перспективы развития российского специализированного программного обеспечения для автоматизации моделирования процессов функционирования судостроительных производств и оценки технологической готовности предприятий к реализации перспективных производственных программ. Труды пятой Международной научно-практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2019), Санкт-Петербург, 10 июля 2019 г., 187-190. Получено 2022, 30 июня из <http://simulation.su/uploads/files/default/ikm-mtmts-2019-187-190.pdf>
3. Салаев Р.А., Федоров А.А., Салаева А.В. (2021). Имитационное моделирование процессов агрегатно-сборочного производства. Известия Самарского научного центра РАН, 23(1), 60-66. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-60-66.
4. Щербина И.С. (2013). Имитационное моделирование как метод оценивания ресурсоемкости процесса эксплуатации технологического оборудования ракетно-космических комплексов. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 4(42), 279-284.
5. В ОДК будут применять имитационное моделирование при создании центров специализации российского двигателестроения (2019, Март, 3). Получено 2022, 20 июня, из https://www.uecrus.com/rus/presscenter/odk_news/?ELEMENT_ID=3007
6. Соколов И.Л. (2021, декабрь, 1). Гид по цифровому производству: цифровое имитационное моделирование производственных систем. Управление производством. Получено 2022, 28 июня, из https://up-pro.ru/library/information_systems/automation_project/cifrovoe-imitacionnoe-modelirovanie/
7. Кугаенко А.А. (2010). Экономическая кибернетика. Москва: Вузовская книга.
8. Хопп У.Дж., Спирман М.Л. (2011). Фабричная физика. Лонг-Гроув, Иллинойс: Waveland Press.
9. Стерман Джон. (2000). Динамика бизнеса: системное мышление и моделирование для сложного мира. США: Компании Макгроу-Хилл.
10. Лычкина Н.Н. (2022). Имитационное моделирование экономических процессов. Москва: ИНФРА-М.

11. Мохов, М.Ю., Ильин, И.А., Кабанов, А.А., Жамкова, В.С. (2020). Система динамического моделирования производственно-логистических процессов предприятия (СДМ) (Российская Федерация, свидетельство на программу для ЭВМ №2020664561). Москва: ФИПС, 13.11.2020 Бюл. № 11.
12. Каплан, Р.С., Нортон, Д.П. (2017). Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию. Москва: Олимп-Бизнес.
13. Чайлдс, Питер, Р.Н. (2019). Спецификация. Руководство по проектированию машиностроения, Второе издание. (стр.49-73). Оксфорд: Баттерворт-Хайнеманн. Извлечено из <https://doi.org/10.1016/C2016-0-05252-X>
14. Марк Дж. де Фриз. (2009). Перевод требований заказчика в технические спецификации. Философия технологии и инженерных наук. (стр.489-512). Нидерланды: Издательство North Holland Publishing Co. Извлечено из <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51667-1.50022-7>

List of literature

1. Apanasik O., Birova K. (2019). Optimizatsiya potokov proizvodstva [Optimization of production flows]. SAPR i Grafika, (5), 4-9. Retrieved June 28, 2022, from <https://sapr.ru/article/25848>
2. Fedotov M.V., Devyatkov T.V., Plotnikov A.M., Dolmatov M.A. (2019). Opyt sozdaniya i perspektivy razvitiya rossiyskogo spetsializirovannogo programmnoho obespecheniya dlya avtomatizatsii modelirovaniya protsessov funktsionirovaniya sudostroitel nykh proizvodstv i otsenki tekhnologicheskoy gotovnosti predpriyatiy k realizatsii perspektivnykh proizvodstvennykh programm [Experience in creating and development prospects of Russian specialized software for automating the modeling of shipbuilding production processes and assessing the technological readiness of enterprises for the implementation of promising production programs]. Proceedings of the Fifth Conference «Simulation and Complex Modeling of Marine Equipment and Marine Transport Systems» (IKM MTMTS-2019), St. Petersburg, July 10, 2019, 187-190. Retrieved June 30, 2022 from <http://simulation.su/uploads/files/default/ikm-mtmts-2019-187-190.pdf>
3. Salaev R.A., Fedorov A.A., Salaeva A.V. (2021). Imitatsionnoye modelirovaniya protsessov agregatno-sborochnogo proizvodstva [Simulation modeling of assembly production processes] Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 23(1), 60-66. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-60-66.
4. Shcherbina I.S. (2013). Imitatsionnoye modelirovaniye kak metod otsenivaniya resursoyemkosti protsessa ekspluatatsii tekhnologicheskogo oborudovaniya raketno-kosmicheskikh kompleksov [Simulation modeling as a method for estimating the resource intensity of the process of operating the technological equipment of rocket and space complexes]. VESTNIK of Samara University. 4(42), 279-284.
5. V ODK budut primenyat imitatsionnoye modelirovaniye pri sozdanii tsentrov spetsializatsii rossiyskogo dvigatelestroyeniya [The UEC will use simulation when creating centers of specialization for Russian engine building] (2019, March, 3). Retrieved June 20, 2022, from https://www.uecrus.com/eng/presscenter/odk_news/?ELEMENT_ID=3007
6. Sokolov I.L. (2021, December, 1). Gid po tsifrovomu proizvodstvu: tsifrovoye imitatsionnoye modelirovaniye proizvodstvennykh sistem [Digital Manufacturing Guide: Digital Simulation of Manufacturing Systems]. Upravleniye proizvodstvom. Retrieved June 28, 2022, from https://up-pro.ru/library/information_systems/automation_project/cifrovoe-imitacionnoe-modelirovanie/
7. Kugaenko A.A. (2010). Ekonomicheskaya kibernetika [Economic cybernetics]. Moscow: Vuzovskaya kniga.
8. Hopp W.J., Spearman M.L. (2011). Factory Physics. Long Grove, IL: Waveland Press.
9. Sterman John. (2000). Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. USA: The McGraw-Hill Companies.
10. Lychkina N.N. (2022). Imitatsionnoye modelirovaniye ekonomicheskikh protsessov [Simulation modeling of economic processes]. Moscow: INFRA-M.
11. Mokhov M.Yu., Ilyin I.A., Kabanov A.A., Zhamkova V.S. (2020). Sistema dinamicheskogo modelirovaniya proizvodstvenno-logisticheskikh protsessov predpriyatiya (SDM) [System for dynamic modeling of production and logistics processes of an enterprise (SDM)] (Russian Federation, certificate for a computer program No. 2020664561). Moscow: FIPS, 11.13.2020 Bull. No. 11.
12. Kaplan R. S. and D. P. Norton (2017). Balanced scorecard. From strategy to action. Moscow: Olymp Business.
13. Childs Peter R.N. (2019). Specification. Mechanical Design Engineering Handbook, Second Edition. (pp.49-73). Oxford: Butterworth-Heinemann. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/C2016-0-05252-X>
14. Marc J. de Vries. (2009). Translating Customer Requirements into Technical Specifications. Philosophy of Technology and Engineering Sciences. (pp.489-512). Netherlands: North Holland Publishing Co. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51667-1.50022-7>