

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

На правах рукописи

Мартынец Екатерина Романовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ
ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ**

2.5.22. – Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к.э.н., доцент Левенцов В.А.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Основные подходы к разработке изделий машиностроения	14
1.1 Теоретические подходы к организации процессов разработки изделий машиностроения.....	14
1.2 Процесс разработки изделий машиностроения.....	25
1.3 Технология разработки цифровых двойников как технология процесса разработки изделий	34
1.4 Цифровые платформенные решения для разработки и применения цифровых двойников изделий	41
Выводы по главе	44
Глава 2. Процессная модель разработки изделий машиностроения.....	47
2.1 Процессная модель разработки изделий с применением технологии разработки цифровых двойников	47
2.2 Математическая модель оценки времени разработки изделий при подходе с применением технологии разработки цифровых двойников	55
Выводы по главе	73
Глава 3. Методика совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников	75
3.1 Описание элементов методики совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников.....	75
3.2 Алгоритм процесса разработки изделия при внедрении технологии разработки цифровых двойников	120
Выводы по главе	132
Глава 4. Практико-ориентированный подход к совершенствованию процесса разработки изделий на основе технологии разработки цифровых двойников	136

4.1 Описание беспилотного летательного аппарата «Снегирь-1», разработанного с применением технологии цифровых двойников	136
4.2 Практическое внедрение методики совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии разработки цифровых двойников	141
Выводы по главе	153
Заключение	154
Список литературы.....	158
Приложение А	186

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной темы диссертационного исследования.

Машиностроение – одна из ключевых отраслей экономики и народного хозяйства Российской Федерации, при этом разработка продукции машиностроения, как правило, требует концентрации множества ресурсов: трудовых, временных, финансовых и др. Это связано в первую очередь с тем, что изделия машиностроения обладают наукоемкостью, высоким уровнем сложности и мультидисциплинарностью протекающих процессов. Совершенствование организации производства машиностроительных предприятий наиболее эффективно за счет внедрения технологии разработки цифровых двойников на системообразующих предприятиях, особенно в крупнейших промышленных регионах, таких как Москва, Санкт-Петербург, Самарская область, Свердловская область, Республика Татарстан, Республика Башкортостан, Ярославская область, Тульская область, Нижегородская область, Пермский край, Удмуртская Республика, Архангельская область, Челябинская область, Томская область, Красноярский край и др.

Согласно статистике, продукция машиностроения составляет более 14% выпускаемых изделий в России, при этом данный показатель с каждым годом растет и опережает рост в других отраслях экономики [1]. В связи с этим повышается актуальность совершенствования процессов разработки продукции машиностроения и управления производством в промышленных регионах страны.

Текущая геополитическая ситуация, экономическое положение и масштабы санкционного давления формируют политические, экономические, технологические вызовы, стоящие перед государством. В рамках ответа на возникающие условия нового уклада с учетом особенностей международного взаимодействия и формирующихся предпосылок мирового экономического кризиса требуется на государственном уровне принятие ряда стратегически значимых планов развития промышленности, определяющих цели и задачи промышленного сектора на ближайшие годы, включая внедрение цифровых

технологий.

В частности, государственная повестка раскрыта в рамках следующих документов: Стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, относящейся к сфере деятельности Министерства промышленности и торговли Российской Федерации [2], перечень национальных целей развития Российской Федерации [3], Концепция технологического развития на период 2030 года [4], Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации [5].

Как указано в Концепции технологического развития на период до 2030 года (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р), устойчивое социально-экономическое развитие страны, сохранение и развитие производственного и технологического потенциала в условиях санкционного давления со стороны недружественных стран однозначно требует наличия в Российской Федерации всей совокупности производственных, технологических, кадровых и финансовых возможностей для выпуска высококачественной высокотехнологичной продукции, обеспечивающей удовлетворение базовых потребностей экономики и общества [4]. Отмечается, что приоритетные проекты технологического суверенитета в ключевых отраслях экономики охватывают весь цикл исследований и разработок, выпуск опытных образцов и создание серийного производства с использованием критических и сквозных технологий, а также создание сервисов для эксплуатации продукции на всем ее жизненном цикле.

В обновленном Федеральном законе от 28 декабря 2024 г. № 523-ФЗ о технологической политике в Российской Федерации также введено определение технологического лидерства, которое предполагает разработку отечественных технологий и продукции, превосходящих зарубежные аналоги по своим характеристикам [6]. В свою очередь, в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 7 ноября 2023 г. № 3113-р впервые в нормативно-правовом поле введено понятие «цифровой сертификации» [2], реализация которой напрямую связана с проведением цифровых (виртуальных) испытаний

объектов и систем.

В связи с этим актуализируются научные и прикладные исследования, направленные на формирование эффективного подхода к разработке изделий машиностроения в целях достижения конкурентоспособности производства и национальных целей развития государства.

Текущие подходы к разработке характеризуются множеством итераций по доводке изделия до конструкции, соответствующей требованиям заказчика и сбалансированной по всем показателям, в том числе уровню качества и технологичности. При этом, как показывает практика, временные и финансовые затраты на разработку изделий с применением несовершенных методов проектирования превышают запланированные значения, что свидетельствует о недостаточной результативности обозначенного подхода [7–9].

Актуальные направления исследований в области разработки изделий высокотехнологичной промышленности сфокусированы на трансформации ключевых процессов, обеспечивающих выпуск продукции, за счет наукоемких передовых цифровых и производственных технологий, позволяющих преодолеть тенденции, связанные с усложнением производимой продукции и повышением уровня технологичности процессов производства [10]. Быструю разработку конкурентоспособной продукции и ее качественный выпуск, соответствие множеству требований со стороны заказчика, снижение затрат на разработку новой продукции, а также быстрое внесение изменений в конструкцию на ранних стадиях разработки обеспечивает технология цифровых двойников [11; 12]. Применение цифровых двойников изделий в промышленности является развитием парадигмы компьютерного моделирования и цифрового инжиниринга изделий.

Таким образом, обозначенные выше тенденции усложнения процессов промышленности, развертывания цифровой трансформации, государственная повестка и имеющиеся значительные ресурсные ограничения обуславливают выбор темы исследования, подтверждают ее актуальность и обеспечивают задел для решения фронтальных научно-технических задач промышленности, в том числе в прогрессивно развивающейся отрасли беспилотных авиационных систем.

Степень разработанности темы исследования.

Теоретической и методологической основой исследования послужили работы российских и зарубежных ученых по организации процессов разработки и конструкторской подготовки предприятия, использованию цифровых технологий, а также документы стандартизации. Материалы исследования основаны как на существующем опыте отечественных и зарубежных авторов в области внедрения цифровых технологий, включая цифровых двойников, так и на научно-исследовательских проектах, реализуемых инжиниринговыми подразделениями крупнейших отечественных корпораций.

Среди отечественных авторов, уделяющих внимание вопросам качества и результативности организации процессов производства, управления производством и совершенствования технической (научно-исследовательской, конструкторской и технологической) подготовки производства, в том числе с применением передовых технологий, можно выделить следующих: Ю.Д. Амиров, Д.В. Антипов, О.И. Антипова, В.Ю. Анцев, Л.В. Барташев, М.Л. Башин, В.Н. Васильев, С.А. Васин, В.В. Глухов, В.Б. Гокун, В.В. Гурин, Н.Л. Зайцев, Т.А. Егорова, Д.Ю. Иванов, И.Н. Иванов, А.И. Ильин, В.В. Кириловский, Ю.С. Ключков, В.Н. Козловский, Б.И. Кузин, В.А. Левенцов, В.Н. Мосин, Д.И. Панюков, Е.В. Плахотникова, К.Ф. Пузыня, Н.А. Саломатин, Н.А. Сафронов, Л.М. Сеница, О.В. Стоянова, О.Г. Туровец, Р.А. Фатхутдинов, А.И. Хаймович, И.Н. Хаймович и др. Также можно выделить труды зарубежных авторов по данному направлению, в частности, Т. Питерса, В. Дж. Стивенсона, Б. Твисса, Р. Уотермена, Г. Тагути (автор концепции робастного проектирования) и др.

Фокусировка практической применимости результатов исследования приводится на отрасль беспилотной авиации. Среди отечественных авторов и авиаконструкторов, внесших неоценимый вклад в развитие теоретических вопросов проектирования в области авиастроения, можно выделить следующих: О.К. Антонов, В.А. Барвинок, В.В. Бойцов, А.Г. Братухин, В.В. Володин, В.В. Воробьев, И.В. Голубев, Н.В. Горячев, В.Г. Дмитриев, С.М. Егер, А.А. Лебедев, Н.К. Лисейцев, В.Ф. Мишин, В.С. Моисеев, В.Н. Новиков,

М.И. Павлушенко, М.А. Погосян, Е.Г. Подружин, В.Н. Рожков, О.С. Самойлович, Д.Ю. Стрелец, Е.В. Тарасов, С.П. Тимошенко, К.Д. Туркин, М.Н. Фетисов и др. Также можно отметить зарубежных авторов, таких как И. Моир, Дж. Андерсон, Д. Раймер, Дж. Лейшман, Т.Х.Г. Мегсон, Х. Глауэрт, П. Дж. Сваттон, А. Кунду, Г. Пэдфилд, В. Дункан и др.

Среди авторов, развивших теорию инженерного анализа, численных методов и вычислительной механики, стоит выделить следующих: О. Зенкевич, Р. Галлагер, Р. Курант, Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье, О.М. Белоцерковский, Н.С. Бахвалов, А.Н. Тихонов, А.А. Самарский, И.И. Блехман, Г.Ю. Пановко, А.Д. Мышкис, А.Н. Крылов, В.А. Пальмов, А.И. Боровков, Ю.Я. Болдырев и др.

В области технологии цифровых двойников следует выделить основоположника концепции Майкла Гривса. Следом за Майклом Гривсом и исследователями NASA (Дж. Викерсом, Э. Глессгеном, М. Шафто, М. Конроем, Р. Дойлом, Р. Пьясчиком, Д. Старджелом и др.) к изучению концепции цифровых двойников подключились исследователи из ведущих китайских университетов. Значительный вклад внесен также австрийскими специалистами В. Критцингером, М. Карнером, Г. Трааром, Я. Хеньесом, В. Зином и др. Среди отечественной литературы исследования в области цифровых двойников появились в конце 2010-х годов. К отечественным авторам, внесшим вклад в развитие технологии цифровых двойников, необходимо отнести А.И. Боровкова, проректора по цифровой трансформации СПбПУ, и его научный коллектив, научную школу; кроме того, можно выделить труды А.Н. Прохорова и М.Н. Лысачева, Д.И. Пряхиной и других.

Цель диссертационного исследования – повышение результативности процесса разработки изделий машиностроительного предприятия за счет применения технологии разработки цифровых двойников. В рамках исследования предполагается обоснование результативности применения технологии цифровых двойников в промышленности с точки зрения временных, финансовых и ресурсных затрат.

К задачам диссертационного исследования относятся следующие задачи:

- Провести анализ основных подходов к процессам разработки, проведению конструкторской подготовки производства;
- Разработать процессную модель разработки изделий с применением технологии разработки цифровых двойников;
- Разработать математическую модель оценки времени разработки при традиционном подходе и подходе с применением технологии разработки цифровых двойников;
- Разработать методику совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии разработки цифровых двойников;
- Разработать алгоритм создания изделия машиностроения с применением технологии разработки цифровых двойников;
- Оценить результативность разработки новой продукции машиностроения с применением технологии разработки цифровых двойников на примере разработки беспилотного летательного аппарата.

Объектом диссертационного исследования являются процессы разработки изделий. **Предмет диссертационного исследования** составляют методы и подходы к повышению результативности процессов разработки изделий.

При реализации задач диссертационного исследования получена следующая **научная новизна**:

- 1) Разработана процессная модель разработки изделий, учитывающая применение технологии цифровых двойников и отражающая эффект применения технологии цифровых двойников в разрезе длительности процессов разработки изделий (п. 25 паспорта специальности).
- 2) Разработана математическая модель оценки длительности процессов разработки, которая учитывает ограничения, характерные для ключевых отраслей машиностроения, и отличается фокусировкой на применении технологии цифровых двойников. Дорогостоящие итерации, связанные с перепроектированием конструкции изделия и проведением натурных испытаний, минимизируются за счет разработки цифрового двойника изделия, а также проведения множества цифровых (виртуальных) испытаний и моделирования

технологических процессов изготовления изделия (п. 25 паспорта специальности).

3) Разработана методика совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии разработки цифровых двойников, содержащая 5 показателей результативности – длительность, затраты, трудоемкость, соответствие требованиям разработки и соответствие требованиям технического задания. Применение методики с учетом пяти показателей результативности будет способствовать уменьшению длительности и затрат на реализацию проекта по разработке изделия, обеспечению результативности организации процесса разработки продукции машиностроения и комплексной оценке полученных результатов, а также обеспечению сбалансированных характеристик изделия (п. 19 паспорта специальности).

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в развитии научно-методологических подходов и принципов теории организации производства в части освоения новой продукции за счет разработки и применения технологии разработки цифровых двойников с учетом всех стадий жизненного цикла изделия.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке научно-практических методов и рекомендаций к разработке изделий машиностроения с применением технологии цифровых двойников, которые могут быть апробированы на ведущих отечественных предприятиях машиностроения. Практическое значение имеют процессная модель разработки изделий, методику совершенствования процесса разработки изделий и алгоритм создания изделия машиностроения с применением технологии разработки цифровых двойников. Внедрение разработанной методики в деятельность предприятий промышленности будет способствовать обеспечению высокого уровня цифровой трансформации целых отраслей промышленности, в частности общего машиностроения.

В рамках диссертационного исследования применены **общенаучные и специализированные методы**, среди которых теоретический анализ подходов к оценке и организации процессов разработки продукции; методы сравнения, синтеза, дедуктивно-индуктивные методы, систематизации и структурирования

данных; методы математического анализа, процессного и квалитетического подхода; методы теории алгоритмов и графические инструменты; методы оценки результативности освоения новой продукции, методы экспертных оценок и проч.

Теоретической и методологической основой исследования послужили работы российских и зарубежных ученых по организации процессов разработки и конструкторской подготовки предприятия, использованию цифровых технологий, а также документы стандартизации. Материалы исследования основаны как на существующем опыте отечественных и зарубежных авторов в области внедрения цифровых технологий, включая цифровых двойников, так и на научно-исследовательских проектах, реализуемых инжиниринговыми подразделениями крупнейших отечественных корпораций.

В основу предлагаемой методики заложены основные положения национального стандарта ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» и прикладные задачи, связанные с результативностью применения технологии, в том числе на основе опыта деятельности Инжинирингового центра СПбПУ и ряда высокотехнологичных предприятий промышленности, составляющих партнерскую сеть СПбПУ.

В ходе работы получены следующие **положения, выносимые на защиту**:

- Процессная модель разработки изделий при подходе с применением технологии разработки цифровых двойников;
- Математическая модель оценки времени разработки при подходе с применением технологии разработки цифровых двойников;
- Методика совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии разработки цифровых двойников в разрезе пяти показателей результативности – длительность, затраты, трудоемкость, соответствие требованиям разработки и соответствие требованиям к изделию;
- Алгоритм создания изделия машиностроения с применением технологии разработки цифровых двойников в разрезе блоков основных процессов разработки изделий.

Основные положения работы соответствуют **паспорту специальности научных работников 2.5.22.** – Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства и охватывают направления исследования, предусмотренные паспортом:

п. 19 «Разработка и реализация принципов производственного менеджмента, включая подготовку и совершенствование форм управления и организации производства»;

п. 25 «Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике».

Степень достоверности и апробация результатов.

Высокая степень достоверности и обоснованности научных результатов диссертационного исследования подтверждается проведенным анализом научных трудов и материалов по теме исследования, отсутствием противоречий положениям организации производства, примененными в работе методами и инструментами. Полученные результаты работы опубликованы в ведущих изданиях, нашли отражение в монографиях и экспертно-аналитических работах, опубликованных в соавторстве с экспертами из научного коллектива профессора А.И. Боровкова.

Результаты исследования представлены в рамках всероссийских и международных конференций и форумов. В их числе: Международная научно-практическая конференция «Цифровые двойники: создание, применение, эффективность» в 2022 году (г. Москва), Вторая Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств» в 2022 году (г. Санкт-Петербург), International Scientific Conference Global Challenges of Digital Transformation of Markets (GDTM 2022) в 2022 году (г. Санкт-Петербург), Четвертый и Пятый международный форум «Передовые цифровые и производственные технологии» в 2022 и 2023 году (г. Санкт-Петербург), III Всероссийская учебно-научная

конференция «I&Q project: управление инновациями в условиях цифровой трансформации» в 2024 году (г. Санкт-Петербург), «Качество образования и устойчивое развитие – основа международного сотрудничества»: конференция СПбПУ в рамках программы Петербургского Международного экономического форума в 2024 году (г. Санкт-Петербург), Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Цифровой инжиниринг: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств» в 2024 году (г. Санкт-Петербург), XIII Intl. Conf. NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS NSN'2024 “Construction materials. Strength and structural mechanics” в 2024 году (г. Санкт-Петербург), VI Международный форум «Передовые цифровые и производственные технологии» в 2024 году (г. Санкт-Петербург), X Всероссийская научно-практическая Интернет-конференция «Актуальные проблемы менеджмента качества, стандартизации и метрологии» в 2025 году (г. Белгород), V национальная научно-практическая конференция с международным участием «Цифровой инжиниринг и организация наукоемких производств» в 2025 году (г. Санкт-Петербург), Международная научно-техническая конференция имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» в 2025 году (г. Самара) и на других мероприятиях.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

1.1 Теоретические подходы к организации процессов разработки изделий машиностроения

Машиностроительная отрасль играет ключевую роль в экономике, поскольку обеспечивает выпуск машин, конструкций, сложной техники. Как правило, продуктом машиностроения является высокотехнологичное изделие, то есть продукт, при создании которого были использованы наукоемкие технологии и инновационные решения. Высокотехнологичная продукция обладает высокой сложностью системы, уникальными характеристиками в части функциональных возможностей, производительности и других ключевых параметров. Кроме того, высокотехнологичные отрасли промышленности характеризуются высокой долей интеллектуального труда при их разработке.

Изделие – это предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению в организации (на предприятии) по конструкторской документации [13]. Одной из фундаментальных характеристик изделия является описание его жизненного цикла, то есть совокупности всех этапов, явлений и процессов, определяемой временем существования изделия начиная от возникновения замысла заканчивая выводом из эксплуатации и утилизацией [14].

Основные стадии жизненного цикла изделия содержат разработку, производство и эксплуатацию изделия. Описание стадий жизненного цикла представлено в классической литературе по организации производства, а также в ряде национальных стандартов, посвященных вопросам создания, изготовления, эксплуатации, обслуживания и утилизации продукции [14–20].

Жизненный цикл изделия является давно изученным и проработанным вопросом. Для обеспечения комплексности и системности оценки эффективности каждого этапа жизненного цикла изделия ряд авторов предлагает внедрение информационных систем, направленных на интеграцию данных обо всех процессах жизненного цикла [21]. Данный класс систем принято обозначать CALS-технологиями (Continuous Acquisition and Lifecycle Support), или ИПИ

(Информационная поддержка жизненного цикла изделий) [22]. Основу CALS-технологий составляют CAD-, CAM-, CAE-, PDM- и ERP-решения. Подробнее системы управления жизненным циклом, а также другие эффективные системы управления процессами предприятия рассмотрены в параграфах 1.3 и 1.4.

Формирование ключевого облика изделия проходит на стадии разработки, поскольку на этой стадии определяются ключевые требования к изделию, цели разработки и дальнейшего производства, функциональность разрабатываемого продукта и др. Как показывает практика, внесение изменений на поздних стадиях приводит к значительному увеличению затрат [8; 23]. Кривая стоимости внесения изменений с учетом времени была предложена в 1981 году американским ученым Барри Боэм (Barry Boehm) [24] и затем нашла свое отражение в концепции и подходах к управлению проектами (в частности, в руководстве PMBOK®) [25; 26], подходах к организации системного инжиниринга NASA, INCOSE, Siemens и других промышленных предприятий [27; 28].

В связи с этим данное исследование сфокусировано на стадии разработки изделий как на важнейшей стадии жизненного цикла, в рамках которой целесообразно осуществлять внедрение технологий и инноваций в целях минимизации возможных потерь и затрат.

Разработка изделия – это комплекс опытно-конструкторских работ по обоснованию концепции, проектированию, изготовлению, испытаниям и внедрению в серийное производство новых объектов и образцов техники в соответствии с утвержденными планами и тактико-техническим заданием заказчика [29]. Среди основных целей конструирования изделий машиностроения можно выделить обеспечение улучшенных эксплуатационных характеристик, высокого уровня качества и надежности систем при низких сроках их освоения. Процессы разработки предполагают освоение нового или модернизированного / усовершенствованного изделия, новой техники, сложных машин. Процессы проектирования и разработки изделия направлены на определение будущих характеристик продукции, оценку затрат используемых ресурсов, обеспечение и оценку качества продукции.

По результатам анализа литературы и нормативно-технической документации можно выделить задачи процессов разработки, которые включают:

- Формирование общего представления об изделии – объекте разработки (формирование идеи, концепции);
- Определение регулирующих, нормативно-правовых и нормативно-технических документов в ходе проработки объекта разработки (анализ перечня международных, национальных или отраслевых нормативно-технических документов, стандартов, технических регламентов, требований к безопасности, которые необходимо учесть в процессе разработки и производства изделия, а также обеспечение соответствия им на стадии эксплуатации);
- Проведение анализа аналогов объекта разработки для выявления бенчмарков и лучших практик, в том числе в целях внесения изменений в облик изделия;
- Проведение научно-исследовательских работ для определения целесообразности и технической возможности разработки объекта;
- Определение основных характеристик объекта разработки и составление технического задания на разработку, которое в том числе учитывает требования к технологическим процессам изготовления продукции и служит основой для матрицы требований и целевых показателей к изделию, формирование матрицы требований (необходимые, желаемые, кастомизированные показатели на основе технического задания, опыта и компетенций инженеров, а также предшествующих этапов);
- Проведение планирования этапов дальнейшей разработки и производства объекта разработки;
- Проведение цифрового проектирования и моделирования объекта разработки, протекающих физико-механических и технологических процессов для выявления особенностей физической реализации объекта разработки; при усовершенствованном подходе в рамках данного этапа формируется цифровая модель изделия и создается основа цифрового двойника;

- Организация и проведение натурных и прочих необходимых испытаний объекта разработки (в том числе квалификационные, приемочные, сертификационные и другие испытания в соответствии с ГОСТ 16504–81 [30]);
- Утверждение комплекта конструкторской и технологической документации, в некоторых случаях проведение сертификации изделия и регистрации в соответствующих органах.

Для обеспечения учета имеющихся условий и ограничений предприятия проводится конструкторская подготовка производства (КПП) – совокупность технологических и организационных процессов, обеспечивающих готовность производства к выпуску спроектированного изделия в установленные сроки проекта с учетом заданных требований к продукту, качеству и уровню затрат. Важнейшей задачей конструкторской подготовки производства выступает создание возможностей приспособления разработанной конструкции нового продукта к возможностям производства, на котором в дальнейшем будет производиться данное изделие. При этом немаловажным аспектом является сохранение заложенных в конструкцию качественных и функциональных показателей, а также соблюдение требований и ограничений процессов разработки. Именно поэтому передовые научно-исследовательские центры, проектно-технологические институты, конструкторские бюро и специализированные лаборатории становятся ключевыми площадками для проектирования и разработки прорывных продуктов.

К методам и инструментам проектирования можно отнести:

- Методы анализа и синтеза;
- Эвристические методы, основанные на проектировании изобретений;
- Синтез методами анализа, который подразумевает проработку решений по определенной стратегии с применением сравнения показателей качества и эксплуатации;
- Системы автоматизированного проектирования, которые являются программным продуктом, в функциональные возможности которого заложено моделирование и проектирование объектов, определение их количественных и

качественных показателей;

- Цифровые платформенные решения, объединяющие несколько методов разработки и обеспечивающие единое пространство и управление данными, и др.

Отдельное внимание необходимо уделить вопросам проектирования летательных аппаратов, поскольку именно на примере летательного аппарата в данном исследовании представлена оценка результативности применения технологии цифровых двойников (см. главу 4).

Среди отечественных авторов и авиаконструкторов, внесших неоценимый вклад в развитие теоретических вопросов проектирования в области авиастроения, можно выделить следующих: О.К. Антонов [31], В.А. Барвинок [32], В.В. Бойцов [33], А.Г. Братухин [34–36], В.В. Володин [37], В.В. Воробьев [38], И.В. Голубев [39–41], Н.В. Горячев [42], В.Г. Дмитриев [43], С.М. Егер [44; 45], А.А. Лебедев [46; 47], Н.К. Лисейцев [44; 45], В.Ф. Мишин [44], В.С. Моисеев [48], В.Н. Новиков [49], М.И. Павлушенко [50], М.А. Погосян [51], Е.Г. Подружин [52], В.Н. Рожков [53], О.С. Самойлович [45], Д.Ю. Стрелец [51; 54], Е.В. Тарасов [55], С.П. Тимошенко [56], К.Д. Туркин [57], М.Н. Фетисов [58] и др. Также можно отметить зарубежных авторов, таких как И. Моир [59], Дж. Андерсон [60], Д. Раймер [61], Дж. Лейшман [62], Т.Х.Г. Мегсон [63], Х. Глауэрт [64], П. Дж. Сваттон [65], А. Кунду [66], Г. Пэдфилд [67], В. Дункан [68] и др. Часть значимых нормативно-правовых и нормативно-технических документов в области авиастроения представлена в параграфе 4.1.

Проведенный литературный обзор, помимо исследования подходов к организации процессов разработки изделий машиностроения, в том числе летательных аппаратов, также сфокусирован на вопросах организации производства и технической подготовки производства.

Так, среди отечественных авторов, уделяющих внимание вопросам качества и результативности организации процессов производства, управления производством и совершенствования технической (научно-исследовательской, конструкторской и технологической) подготовки производства, в том числе с

применением передовых технологий, можно выделить следующих: Ю.Д. Амиров [69], Д.В. Антипов [70–81], О.И. Антипова [71; 82; 83], В.Ю. Анцев [84–86], Л.В. Барташев [87], М.Л. Башин [88], В.Н. Васильев [89], С.А. Васин [90], В.В. Глухов [91–93], В.Б. Гокун [94], В.В. Гурин [95], Н.Л. Зайцев [96], Т.А. Егорова [97], Д.Ю. Иванов [98; 99], И.Н. Иванов [100; 101], А.И. Ильин [102], В.В. Кириловский [103], Ю.С. Клочков [104; 105], В.Н. Козловский [83; 106; 107], Б.И. Кузин [108], В.А. Левенцов [91; 93], В.Н. Мосин [109], Д.И. Панюков [83; 110; 111], Е.В. Плахотникова [112], К.Ф. Пузыня [113], Н.А. Саломатин [114], Н.А. Сафронов [115], Л.М. Синица [116], О.В. Стоянова [117], О.Г. Туровец [118; 119], Р.А. Фатхутдинов [120], А.И. Хаймович [121–123], И.Н. Хаймович [82; 124–127] и др. [128–134] Также можно выделить труды зарубежных авторов по данному направлению, в частности, Т. Питерса [135], В. Дж. Стивенсона [136], Б. Твисса [137], Р. Уотермена [135], Г. Тагути (автор концепции робастного проектирования) [138] и др.

Главной целью и результатом разработки является формирование конструкторской документации (иногда называют проектно-конструкторской документацией) с учетом требований к ее полноте, комплектности и своевременности. Критерием достижения этой цели является сведение до минимума затрат и сроков разработки при сохранении высокого качества, что обеспечит конкурентоспособность разрабатываемой продукции. Как правило, конструкторская документация содержит широкий перечень электронных конструкторских документов, к которым также относятся математические и компьютерные модели изделия [139–141].

Конструкторская подготовка производства является частью технической подготовки производства, которая, помимо конструкторской, включает также последующие этапы подготовки – технологическую и организационную подготовку производства для непосредственного изготовления продукции.

Конструкторская подготовка производства осуществляется в соответствии с Единой системой конструкторской документации (ЕСКД). ЕСКД в общем случае

включает разработку технического задания, эскизного, технического и рабочего проекта. Представленный перечень технических документов необходим при освоении принципиально нового наукоемкого высокотехнологичного изделия, в то время как при усовершенствовании существующей продукции некоторые этапы могут быть пропущены. Важно отметить, что на стадии конструкторской подготовки производства необходимо соблюдать принципы стандартизации и унификации, которые:

- Устанавливают регламентированные и актуальные для конкретного периода требования к продукции, нормы и методы;
- Уменьшают многообразие изготавливаемых деталей и узлов посредством использования проверенных решений и научно-технического задела, накопленного в предыдущих проектах.

Здесь же важно упомянуть необходимость нормирования процессов разработки. Под нормами труда в Трудовом кодексе Российской Федерации понимают нормы выработки, времени, нормативы численности и другие нормы, которые устанавливаются в соответствии с достигнутым уровнем техники, технологии, организации производства и труда [142].

Так, для процессов разработки утвержден ряд документов, содержащих нормативы времени на разработку документации [143]. В частности, в одном из документов приведены нормативы времени на разработку чертежа общего вида в зависимости от размеров чертежа и количества показателей технологичности разрабатываемого изделия, а также нормативы времени на разработку сборочного чертежа в зависимости от количества деталей, входящих в сборку [144].

Схожее исследование представлено в работе [145], где рассмотрены вопросы трудоемкости и стоимости всех этапов жизненного цикла изделия с фокусировкой на стадии производства. В исследовании В.П. Махитько и других авторов, в свою очередь, представлен обзор методов расчета трудоемкости с учетом сложности изделий, преемственности конструкций, серийности производства и прочих факторов [146]. Также следует выделить ГОСТ Р ИСО 10303–239–2008 [147], в котором представлена классификация сложности

изделий в зависимости от сложности и трудоемкости поддержки изделия на стадии эксплуатации.

Кроме того, в регламентах зафиксированы нормативы времени на разработку гидравлической, пневматической, кинематической схем и др. Важно отметить существующие нормативы времени на подготовку, проведение и оформление расчетов – в случае, если изделие обладает более чем 40 показателями технологичности, норматив подготовки и оформления расчета составляет 9,2 часа, норматив проведения расчета – 10,2 часов [144]. При этом приведенные нормативы времени не привязаны к конкретной отрасли применения.

В данной работе в главах 1–3 рассматривается общее машиностроение без привязки к специализации, поскольку предлагаемая методика применима к различным отраслям машиностроения, однако результаты внедрения методики приведены для такой отрасли специализированного машиностроения как авиастроение с фокусировкой на беспилотных летательных аппаратах.

Некоторые отечественные авторы указывают на необходимость применения инструментов компьютерного моделирования и внедрения автоматизированных систем в различных отраслях промышленности в целях совершенствования процессов организации производства [148–161]. Так, в публикации [148] рассматриваются возможности применения инструментов имитационного моделирования для реструктуризации производственных мощностей АО «Объединенная двигателестроительная корпорация». В публикации [157] представлена схема информационной поддержки деятельности предприятия и уделено внимание вопросам применения систем моделирования.

Учитывая современный уровень развития вычислительной техники и повсеместное применение CAD- и CAE-систем, предлагаемые методы совершенствования конструкторской подготовки являются довольно зрелым и проработанным вопросом.

При этом появление первых систем автоматизированного проектирования (CAD) относится к 1950-м годам [162], системы инженерного анализа и компьютерного инжиниринга (CAE) появились немного позднее –

в 1970-е годы, когда на рынок вышла первая программная система инженерного анализа Ansys. С этого момента началось становление программных систем, нашедших большой отклик среди инженеров. Массовое распространение CAD- и CAE-решений относится к началу 2000-х годов, когда применение компьютеров стало повсеместным и начало применяться не только для узких исследовательских целей.

Сформулируем основные характеристики систем автоматизированного проектирования – CAD (Computer-Aided Design). Ключевая задача данного класса систем – создание, модификация и анализ чертежей, 2D и 3D моделей, а также подготовка конструкторской и технологической документации на изделие. Функционально данные системы обеспечивают:

- Масштабирование, вращение, перемещение объектов, визуализацию;
- Размещение отверстий, разрезов, сечений, проставление размеров, допусков;
- Создание сборок из отдельных деталей, определение связей и ограничений между деталями;
- Создание спецификаций, управление данными, версиями документов, совместным доступом;
- Обеспечение импорта и экспорта данных, поддержку разных форматов, интеграцию с другими классами систем и др.

Другой класс систем, не менее важный для процессов разработки изделий – системы компьютерного инжиниринга (CAE, Computer-Aided Engineering), направленные на решение научно-технических проблем за счет применения инженерного анализа, математического и компьютерного моделирования [163]. Одним из ключевых методов инженерного анализа является метод конечных элементов [164–168].

Функционально данные системы обеспечивают:

- Создание конечно-элементной сетки, определение граничных условий и нагрузок, применение численных методов;
- Анализ прочности, деформаций, теплопередачи, аэрогидродинамики,

вибраций, ударное разрушение;

- Оптимизацию конструкций, поиск оптимальной геометрии;
- Моделирование технологических процессов – литья, штамповки, сварки и др.;
- Визуализацию результатов моделирования, проведение верификации и валидации результатов;
- Импорт данных из CAD-систем, создание конечно-элементной сетки на основе CAD-модели и др.

Среди авторов, развивших теорию инженерного анализа, численных методов и вычислительной механики, стоит выделить следующих: О. Зенкевич [165; 168], Р. Галлагер [164], Р. Курант [169], Л.Г. Лойцянский [170], А.И. Лурье [170], О.М. Белоцерковский [171; 172], Н.С. Бахвалов [173], А.Н. Тихонов [174], А.А. Самарский [166; 167], И.И. Блехман [175], Г.Ю. Пановко [175], А.Д. Мышкис [175], А.Н. Крылов [176], В.А. Пальмов [177], А.И. Боровков [178; 179], Ю.Я. Болдырев [22; 180–182] и др. Кроме того, можно выделить следующих отечественных авторов, внесших вклад в практику применения систем автоматизированного проектирования и CALS-технологий: Г.К. Горанский [183], В.А. Камаев [184], В.П. Корячко [185], А.Ф. Колчин [186], И.П. Норенков [187] и другие.

Третий класс систем, значимых для разработки изделий и подготовки производства – САМ-системы для разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ (Computer-Aided Manufacturing), которые предназначены для разработки программ для оборудования с ЧПУ за счет преобразования геометрических моделей детали, полученных из CAD-систем [163].

Функциональные задачи САМ-систем включают:

- Импорт геометрических моделей детали из CAD-форматов;
- Определение последовательности операций обработки для последующего изготовления детали;
- Выбор подходящего инструмента из библиотеки инструментов;
- Определение траектории движения инструмента для обеспечения

заданной формы и качества поверхности изготавливаемой детали, предотвращения дефектов;

- Определение параметров обработки, таких как скорость подачи материала, скорость вращения инструмента и проч.

Таким образом, совокупность обозначенных классов инженерного программного обеспечения направлена на создание геометрии деталей и конструкторской документации (этапы проектирования с применением CAD-систем), анализ и инженерные расчеты конструкций изделия (этапы моделирования с применением CAE-систем), разработку управляющих программ для станков с ЧПУ (технологическая подготовка с применением CAM-систем) [188]. Современное развитие цифровых технологий способствует масштабной трансформации инженерного программного обеспечения и интеграции отдельных классов систем на единой платформе в целях формирования цифровой цепочки разработки и производства изделий. Подробнее об этом – в параграфе 1.4.

Кроме того, исследования в области повышения эффективности производственных систем определяют зрелость рассматриваемой темы и высокий интерес к развитию научно-методологической базы теории производственного менеджмента и управления качеством с применением современных инженерно-технологических инструментов. Цифровая трансформация, развитие Индустрии 4.0 и передовые производственные технологии предъявляют новые требования к управлению организацией производства. Это ведет к появлению новых подходов как в целях адаптации существующих инструментов к новой реальности, так и в целях формирования новых инструментов, что формирует значительный потенциал для исследований в обозначенной области и подтверждает актуальность исследования.

Так, цифровая трансформация играет важную роль в развитии мировой экономики, при этом одним из ключевых драйверов цифровой трансформации является промышленность, в первую очередь – машиностроение. И наоборот, тенденции цифровой трансформации и повышение требований к

машиностроительным предприятиям вынуждают последних обращаться к наиболее актуальным и эффективным инструментам.

Согласно результатам опроса российских экспертов – представителей промышленных компаний, главными эффектами от реализации цифровой трансформации эксперты видят сокращение длительности разработки и производства продукции (81,1% опрошенных), снижение финансовых затрат на разработку и производство (56,8% респондентов), а также увеличение прозрачности бизнес-процессов (51,4% опрошенных) [189].

В соответствии с этим процессы разработки должны в первую очередь соответствовать реальным запросам промышленности с учетом всех современных тенденций. Одним из основных трендов IV промышленной революции и ключевых компонентов цифрового инжиниринга является внедрение технологии цифровых двойников в промышленность [163].

Однако, как свидетельствуют результаты анализа учебной, научно-методологической и исследовательской литературы, в современной отечественной теоретической и прикладной системе научных знаний и методик практически отсутствуют комплексные подходы к разработке и производству высокотехнологичной промышленности за счет создания цифровых двойников. Большинство исследований носят отрывочный характер, зачастую не подкрепляются научной терминологией и доказательными теориями.

В связи с этим данное исследование сфокусировано на систематизации опыта и подхода к организации процессов разработки изделий с применением инструментов математического моделирования и инженерного анализа, цифрового инжиниринга и платформенных решений, которые в комплексе с технологией цифровых двойников многократно повышают результативность освоения изделия.

1.2 Процесс разработки изделий машиностроения

Как наглядно представлено на рисунке 1.1, при традиционных подходах к проектированию и моделированию наблюдаются высокие временные и финансовые затраты. Разработка конструкторской документации при данном подходе предполагает многократное прохождение цикла разработки –

исследование, проектирование и моделирование, выход на опытное производство и натурные испытания, непрохождение испытаний, возвращение к этапу проектирования и моделирования для доработки, другими словами, «доводки» разрабатываемого изделия до требуемых характеристик и параметров [7–9; 11; 12; 190; 191]. Тем самым кратно возрастают затраты процесса разработки – требуются затраты на производство и испытания опытных образцов, оплату труда инженеров-конструкторов, инженеров-расчетчиков и проч. [7; 192]

Конечно, инженеры сталкиваются с давлением руководства, вынуждающим минимизировать число доработок систем, избежать дорогостоящих задержек и проч. Как выявлено в работе [193], возникновение проблем и затрат в процессе разработки изделия приводит к необходимости отказа от внесения изменений в конструкцию.

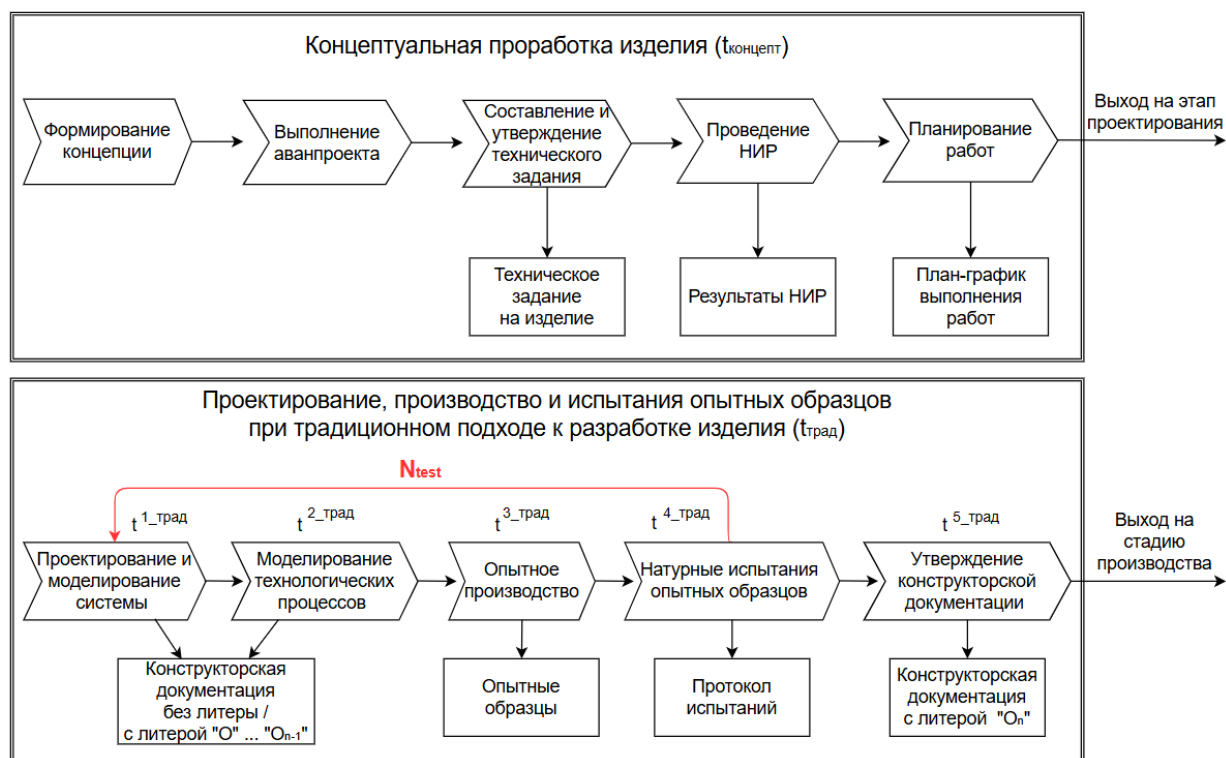


Рисунок 1.1 – Процессная модель стадии разработки изделия при традиционном подходе

Источник: разработано автором [11; 12]

Кроме того, значительно увеличивается длительность стадии разработки изделия, в связи с чем могут возникать переносы сроков передачи конструкторской документации в производство. Согласно существующей практике, проекты по

разработке более чем в половине случаев задерживают не менее, чем на 1 год от планируемого срока [194].

Тем самым увеличивается общее время разработки изделия за счет каждого элемента следующей триады: time to decision (время принятия решения) + time to solution (время разработки конструкции) + time to market (время вывода продукции на рынок / реализации).

Таким образом, в качестве основных характеристик традиционного подхода к разработке можно выделить:

- Высокие временные и финансовые затраты процессов разработки [188];
- Большое число итераций, связанных с проведением дорогостоящих натурных испытаний и «доводкой» изделия до требуемых характеристик [188];
- Разрозненность применяемых в процессе проектирования и моделирования программных систем инженерного анализа, как правило, не сопряженных между собой;
- Разрозненность данных об изделии, высокое влияние человеческого фактора и опыта инженера;
- Высокая сложность интеграции результатов, полученных разными инженерами в разных отделах (согласно статистике, около 30% рабочего времени инженера уходит на передачу данных [195]).

На рисунке 1.1 представлена процессная модель разработки изделия при традиционном подходе, сформированная на основе нотации цепочки добавленной стоимости VAD (Value-Added Chain), предложенной Майклом Портером [196–198]. Элементы нотации цепочки добавленной стоимости (также называют поток создания ценности) включают группу процессов, продукты по результатам процесса и связь между элементами.

Приведенная на рисунке 1.1 схема последовательности процессов разбита на две составляющих:

- Концептуальная проработка изделия, обозначенная как $t_{\text{концепт}}$ в части продолжительности процессов и предшествующая непосредственно этапам

проектирования;

- Проектирование, производство и испытания опытных образцов при традиционном подходе к разработке изделия, обозначенная как $t_{\text{трад}}$ в части продолжительности процессов (длительность каждого процесса обозначена дополнительно $t^{1\text{-трад}} \dots t^{5\text{-трад}}$ и рассмотрена подробнее в параграфе 2.2) и предшествующая стадии производства.

Важными элементами представленной процессной модели разработки изделия при традиционном подходе выступают элементы, связанные с продуктами процессов. Так, результатом процесса составления и утверждения технического задания является само техническое задание на изделие, которое переходит на следующие этапы; результатами проведения научно-исследовательских работ (НИР) являются результаты НИР, как правило, оформленные в виде отчета в соответствии с ГОСТ 7.32–2017. Результатами процессов планирования работ выступает план-график выполнения работ, содержащий основные сроки реализации проекта по разработке изделия и указание ответственных.

Результатом проектирования и моделирования системы, моделирования технологических процессов выступает конструкторская документация на изделие с соответствующей литерой. Так, в соответствии с ГОСТ 2.103–2013 конструкторская документация обозначается без литеры при первом выходе на опытное производство образцов, причем по результатам предварительных и приемочных испытаний она может быть скорректирована [17]. На повторное опытное производство скорректированная конструкторская документация обозначается литерой «О», затем при повторном прохождении цикла – литерой «О₁», затем – литерой «О₂» и так далее до получения итоговой конструкторской документации с литерой «О_п», где p – число итераций по доработке конструкторской документации по результатам приемочных испытаний. Именно получение итоговой конструкторской документации с литерой «О_п» является завершающим этапом рассматриваемой группы процессов и позволяет перейти к стадии производства, которая в данном исследовании подробно не рассматривается.

Следует отметить, что при традиционном подходе могут применяться весь перечень технологий цифрового проектирования и моделирования – CAD-, CAM-, CAE-, PLM-, PDM-системы, однако отсутствие интегрированных инструментов не позволяет в полной мере реализовать преимущества применения данных систем.

Также по результатам опытного производства создаются опытные образцы для проведения последующих испытаний, по результатам натурных испытаний – результаты, как правило, оформленные в виде протокола испытаний в соответствии с ГОСТ Р 58973–2020 «Оценка соответствия. Правила к оформлению протоколов испытаний» [199].

Важно выделить элемент, обозначающий повторение цикла и переход от натурных испытаний обратно к проектированию и внесению изменений в конструкцию и конструкторскую документацию, обозначенный красным цветом на процессной модели. Повторение цикла объясняется тем, что доработка опытного образца по результатам испытаний требует перепроектирования изделия, то есть внесения изменений в конструкцию и корректировку документации, после чего необходимо повторное проведение опытного производства и натурных испытаний опытных образцов для подтверждения соответствия продукции заявленным требованиям [11; 163]. При этом число итераций может превышать десятки и сотни, что обозначено N_{test} . Именно число итераций по перепроектированию N_{test} преимущественно определяет длительность стадии разработки и, соответственно, затраты разработки изделия, что зачастую характеризует превышение плановых затрат и практически не создает добавленной ценности продукта, за исключением небольшого прироста показателей соответствия требованиям [11]. В связи с этим данный подход можно оценить как неэффективный с точки зрения таких показателей как длительность, затраты и результативность, поскольку затраты на доведение изделия до соответствия требованиям чрезмерно возрастают, при этом приближение к требуемому уровню происходит слишком медленно.

Также следует отметить, что процессная модель может быть дополнена или уточнена в соответствии со спецификой отрасли, особенностями организации, циклом проекта и пр. Подробнее длительность процессов разработки изделия

представлена в параграфе 2.2.

Также в ходе исследования сформирован алгоритм разработки изделия при традиционном подходе к разработке (см. рисунок 1.2). На алгоритме определенным цветом выделены блоки процессов, объединенные по причине взаимозависимости и решения определенной задачи процесса разработки.

Так, выделены подготовительные процессы, процессы планирования, процессы проектирования и моделирования, а также процессы опытного производства и натурных испытаний.

Традиционный подход к разработке в блоке процессов проектирования и моделирования (в этом блоке процессов, как рассмотрено далее, заключаются ключевые различия в сравнении с предлагаемым в работе подходом) содержит процессы, связанные с закупками, формированием программы испытаний, непосредственно проектированием и моделированием изделия (в том числе с применением программных систем), формированием конструкторской документации для опытного производства (документации без литеры в соответствии с ГОСТ 2.103–2013 [17]).

Далее при традиционном подходе следует этап опытного производства, включающий изготовление опытных образцов, проведение натурных испытаний и анализ результатов, по итогам чего принимается решение о необходимости доработки конструкции и вносятся соответствующие изменения. На данном этапе в соответствии с ГОСТ 2.103–2013, как правило, возникает необходимость корректировки конструкторской документации и присвоение документам литеры «О» [17]. Как отмечено ранее, прохождение данного цикла приводит к нескольким десяткам итераций по доработке конструкции, «доведении» до требуемых характеристик, по итогам чего формируется конструкторская документация с литерой «О_п» в зависимости от n -числа итераций, которая затем передается на производство.

На рисунке 1.2 данный блок работ выделен красной рамкой, обозначающей потери.



Рисунок 1.2 – Алгоритм разработки изделия при традиционном подходе к разработке

Источник: разработано автором [200]

В соответствии с концепцией Производственной системы Toyota (TPS, Toyota Production System), одной из самых эффективных систем бережливого производства, выделено 7 основных видов потерь (муда), среди них – муда выпуска дефектной продукции, или муда исправления [201; 202]. Важно отметить, что Производственная система Toyota сфокусирована преимущественно на организации производства, однако применение данного подхода на стадии разработки можно объяснить следующим. Как рассмотрено в [200], вероятность возникновения некоторых видов дефектов и недостаточный уровень качества продукции относительно желаемого уровня закладывается на стадии разработки. В связи с этим принципиально важно обеспечивать и отслеживать уровень качества и соответствие требованиям на ранних этапах, что будет способствовать раннему выявлению возможных потерь.

В соответствии с вышесказанным потери, связанные с исправлением, могут возникнуть уже на стадии разработки, а точнее в рамках процессов проектирования и моделирования при недостаточно эффективном подходе к разработке (без формирования матрицы требований для отслеживания изменений в конструкции и оценки соответствия требованиям, без углубленного и эффективного применения технологий цифрового проектирования и моделирования) и проведению натурных испытаний, что объясняется чрезмерно высоким количеством итераций (шагов) по перепроектированию.

Таким образом, потери представляют собой любое мероприятие или процесс, которое не приносит дохода, не добавляет ценности продукту, а лишь увеличивает затраты. Безусловно, нельзя полностью устранить процесс проведения натурных испытаний, однако можно организовать его таким образом, чтобы минимизировать число итераций (шагов), оптимизировать процесс разработки изделия в части соответствия требованиям заказчика, в связи с чем не будет требоваться множество итераций по перепроектированию или мероприятий по устранению несоответствий и дефектов.

Обозначенное выше свидетельствует о низкой эффективности традиционного подхода, поскольку наступают риски неудовлетворения

требований к изделию, нарушения сроков и бюджета проекта, а также возникает вероятность неучета тех или иных целевых показателей, критически важных для данной конструкции и сфер применения изделия. Становится ясным, что решение данной задачи – разработка новой наукоемкой конкурентоспособной продукции за минимальные сроки – требует применения современных инструментов, направленных на совершенствование процессов производства в новых условиях.

Опыт Rockwell Automation, американского разработчика систем промышленной автоматизации (ранее – разработчик авиакосмических и оборонных систем), показывает, что фактическая продолжительность этапов проекта часто отличается от запланированной [203], поскольку проектирование и моделирование, а также проведение контрольных испытаний, как правило, длятся дольше, чем были запланированы, как представлено на рисунке 1.3. Это объясняется вынужденным повторением цикла вследствие неудовлетворения всем заявленным требованиям. При этом внедрение цифровых технологий, в частности технологий проведения цифровых (виртуальных) испытаний, обеспечит соответствие планируемым срокам реализации проекта и позволит не выйти за рамки дедлайна. Обозначенные выше процессы подробнее представлены в процессной модели в параграфе 2.1.



Рисунок 1.3 – Соответствие планируемой и фактической длительности процессов разработки

Источник: составлено автором по материалам Rockwell Automation [203]

Таким образом, применение компьютерного моделирования является базовым инструментом процесса разработки изделия, что, однако, не позволяет избежать итераций по перепроектированию, в связи с чем сфокусируемся на более эффективной технологии разработки изделий – технологии цифровых двойников.

1.3 Технология разработки цифровых двойников как технология процесса разработки изделий

Наиболее близким к настоящему времени этапом развития (эволюции) вычислительных инструментов выступает формирование цифрового инжиниринга – это подход, в основе которого лежит разработка и применение цифровых двойников изделий. Данное научно-технологическое направление развивается в мире, по разным оценкам, с начала 1980–2000-х годов, в России становление началось примерно с середины 2010-х годов, что свидетельствует о новизне научной проблемы.

При поиске в открытых источниках по запросу «цифровой двойник» (Digital Twin) можно найти множество понятий-синонимов, также концепцию цифровых двойников подменяют более упрощенными подходами [163]. Наличие множества понятий свидетельствует о неустоявшейся терминологии, существовании разных подходов к рассмотрению этого понятия, а также о формировании большого количества решений в этой области различными брендами, преимущественно разработчиками инженерного программного обеспечения, поскольку каждый из них пытается выделить на рынке свой продукт, используя свою систему понятий [163].

Однако возникла концепция цифровых двойников, конечно, раньше. По мнению основоположника концепции Майкла Гривса, предпосылки к возникновению данной концепции появились еще в древнем мире, поскольку физические двойники (объекты реального мира) всегда изучались человечеством на примере абстрактных, физических моделей, прототипов и других форм отображения [204].

При этом, как отмечает автор концепции, наиболее частое упоминание конкретного примера первого физического двойника – это спасательная операция

космического аппарата «Аполлон-13», проведенная коллективом NASA в 1970 году [205]. В данной операции с применением наземного тренажера смоделирован алгоритм устранения аварии в топливном баке космического аппарата, выполнявшего миссию в космосе, по результатам которого удалось корректно провести диагностику причин происшествия и безопасно вернуть коллектив на Землю.

Тем не менее, по мнению автора концепции, данный пример – лишь демонстрация возможностей симуляторов (тренажеров) и физического моделирования объектов, что не отражает глубину концепции цифровых двойников [206].

Изначально Майкл Гривс в конце 20-го – начале 21-го века проводил исследования в области управления жизненным циклом изделий [131; 132; 204; 206–214]. Описание концепции, близкое к текущему видению, представлено Гривсом впервые в 2002 году [207] – автор раскрыл понятие цифрового двойника в качестве инструмента проектирования объекта в виртуальном пространстве, дублирующего реальный физический объект. При этом физический и виртуальный объекты связаны (объединены) двунаправленным потоком информации и данных.

Следом за Майклом Гривсом и исследователями NASA (Джоном Викерсом, Эдвардом Глессгеном, Майклом Шафто, Майклом Конроем, Ричардом Дойлом, Робертом Пьясчиком, Дэвидом Старджелом и др. [215–217]) к изучению концепции цифровых двойников подключились исследователи из ведущих китайских университетов. В частности, в список самых цитируемых публикаций по теме цифровых двойников входят следующие публикации авторов, аффилированных в китайских университетах, которые по цитируемости обошли публикации основоположника концепции Майкла Гривса:

- Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data [218];
- Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art [219];
- Qi Q., Tao F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing

and Industry 4.0: 360 Degree Comparison [220];

- Tao F., Zhang M. Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing [221];
- Lu Y., Liu C., Wang K.I.-K., Huang H., Xu X. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues [222].

Также важно выделить одну из наиболее цитируемых в мире статей по тематике цифровых двойников – статью Вернера Критцингера, Маттиаса Карнера, Георга Траара, Яна Хенъеса, Вильфреда Зина, содержащую литературный обзор классификаций цифровых двойников в производстве [223; 224]. Как правило, наибольшую популярность набирают статьи, посвященные результатам поисковых исследований, например в области нормативно-правового и нормативно-технического ландшафта по тематике цифровых двойников [225], и литературных обзоров, например, [226; 227].

Отдельное направление исследований в области цифровых двойников реализует Консорциум цифровых двойников (Digital Twin Consortium), систематизирующий различные направления исследований по данной тематике и визуализирующий взаимосвязь отдельных инструментов и платформенных функциональных возможностей, направленных на реализацию цифровых двойников. Например, для визуализации различий между уровнями и типами отдельных моделей, составляющих основу цифровых двойников, Консорциум представил таблицу с критериями выполнения тех или иных задач каждым типом модели [228]. Адаптированный перевод материалов Консорциума с обозначенными критериями представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Критерии функциональности для отдельных типов модели

Критерии	Тип (класс) моделей				
	CAD-модель	CAE-модель	Информационная модель	Цифровой двойник	Система цифровых двойников
Фиксированное виртуальное отображение	✓	—	—	✓	✓

Расчетное виртуальное отображение / Моделирование и прогнозирование	—	✓	—	✓	✓
Построение на основе данных (Синхронизация для возможности использования)	—	—	✓	✓	✓
Синхронизированность (включая обратные связи и управление)	—	—	✓	✓	✓
Интеграция систем	—	—	✓	—	✓

Источник: составлено автором по материалам Digital Twin Consortium [228]

Среди отечественной литературы исследования в области цифровых двойников появились в конце 2010-х годов. К отечественным авторам, внесшим вклад в развитие технологии цифровых двойников, необходимо отнести Боровкова А.И., проректора по цифровой трансформации СПбПУ, и его научный коллектив, научную школу [163; 229–232]; кроме того, можно выделить труды А.Н. Прохорова и М.Н. Лысачева [233], Д.И. Пряхиной [234] и других [235–238].

Наиболее полное описание истории развития концепции цифровых двойников и составляющих технологии представлено в монографии «Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности», составленной коллективом авторов из Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого под руководством А.И. Боровкова [163].

В 2021 году утвержден национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [239].

Согласно национальному стандарту ГОСТ Р 57700.37–2021 цифровой двойник изделия – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями [239].

В процессе разработки цифрового двойника изделия создается многоуровневая система требований – это иерархическая система взаимосвязанных структур данных, содержащих формализованные требования к изделию и его

составным частям [239].

Согласно национальному стандарту внедрение технологии цифровых двойников на стадии разработки изделия позволит улучшить качество проектирования изделия, обеспечить выполнение технических и тактико-технических требований, сократить число и повысить результативность проводимых испытаний опытного образца и проработку технической документации изделия на технологичность [239].

Разработка цифрового двойника изделия обеспечивает рациональное сочетание всех показателей проектируемого изделия и, как следствие, высокий уровень качества разрабатываемой продукции [11; 12]. В соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 возможно снижение объемов испытаний за счет проведения достаточного числа цифровых (виртуальных) испытаний (см. рисунок 1.4) [239].

Проведение больших объемов цифровых испытаний, а также отслеживание уровня соответствия требованиям с применением матрицы обеспечивают управление требованиями, изменениями, конфигурацией, что также становится возможным благодаря платформенным решениям (подробнее в параграфе 1.3).

Достижение обозначенных эффектов может быть подтверждено рядом примеров из отечественной практики высокотехнологичной промышленности. Технология цифровых двойников способствовала снижению временных и финансовых затрат, повышению эффективности процессов в ряде проектов, реализованных предприятиями АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (АО «ОДК», входит в Госкорпорацию «Ростех») [240], Госкорпорации «Росатом» [241], ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация» (ПАО «ОАК», входит в Госкорпорацию «Ростех») [242] и другими предприятиями [163; 188; 243–246].

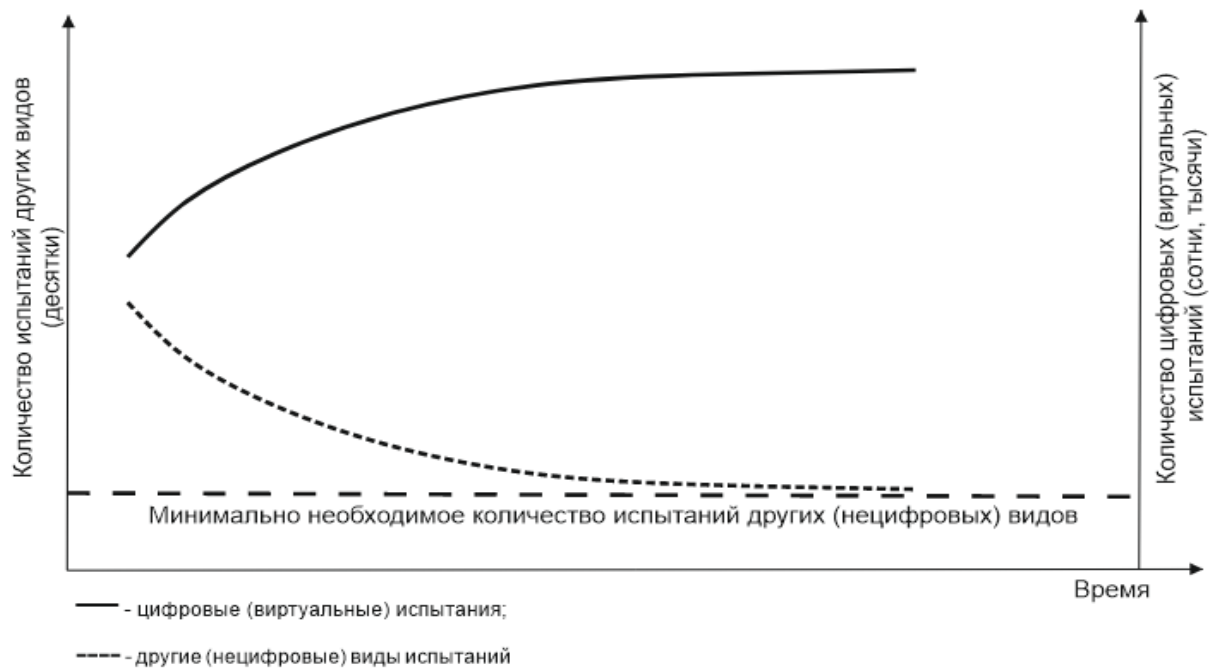


Рисунок 1.4 – Снижение объемов испытаний за счет проведения достаточного числа цифровых (виртуальных) испытаний

Источник: ГОСТ Р 57700.37–2021 [239]

Кроме того, в 2024 году утвержден предварительный национальный стандарт ПНСТ 928–2024 [247], разработанный в области авиадвигателестроения на основе и в развитие национального стандарта 57700.37–2021, что подтверждает высокую практическую применимость технологии в сложнейших технических системах.

Согласно подходу научного коллектива А.И. Боровкова, технология разработки цифровых двойников выступает и инструментом разработки (за счет применения технологий цифрового проектирования и моделирования), и результатом разработки, то есть конечным результатом процесса разработки наряду с конструкторской документацией на изделие.

Результативность технологии цифровых двойников подтверждается также отраслевыми исследованиями. Например, в исследовании Mediafly, проведенном при поддержке разработчиков Ansys и PTC, выявлено, что проведение моделирования на ранних этапах (предварительное моделирование) обеспечивает снижение трудовых и финансовых затрат на 26% и 30% соответственно, снижение финансовых затрат на натурные испытания на 19%, снижение затрат на внесение

изменений в техническое задание на 33% (см. рисунок 1.5) [248].

Высокую эффективность моделирования отмечали также специалисты ESI Group, согласно которым проведение цифровых (виртуальных) испытаний позволяет сократить общее время разработки изделия на 75% и уменьшить количество вносимых изменений на 74% [249]. Схожие расчеты приводят и другие эксперты в различных отраслях [250–252].

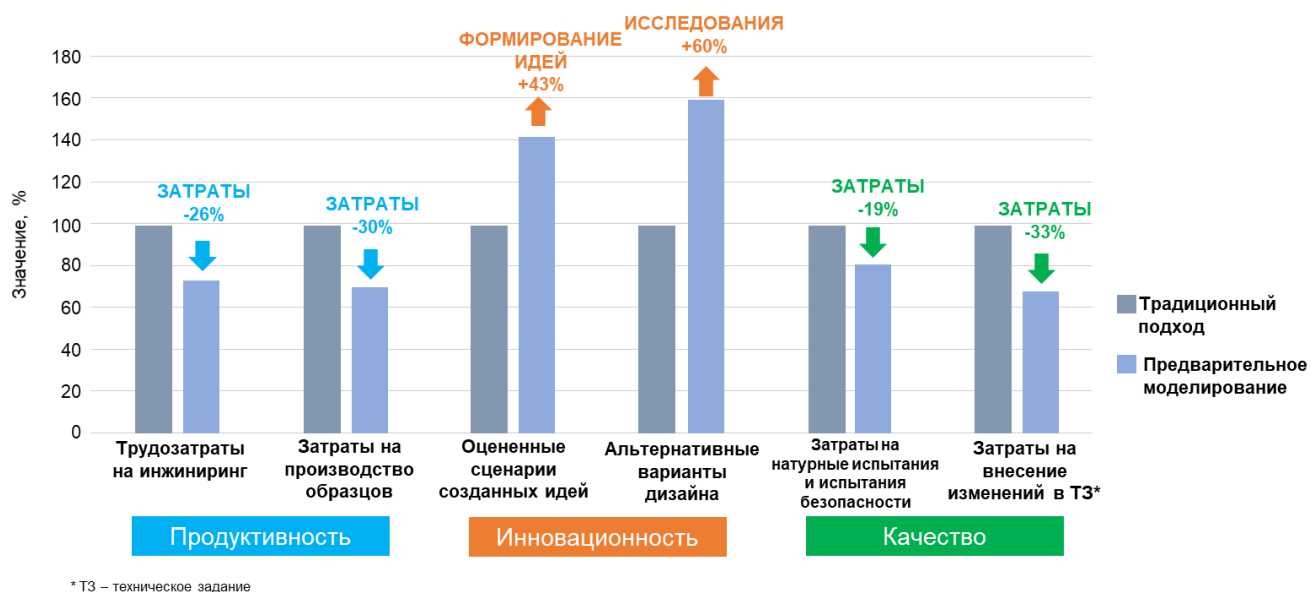


Рисунок 1.5 – Возвратность инвестиций (ресурсов) при проведении предварительного моделирования

Источник: составлено автором по материалам Mediafly, Ansys, PTC [248]

Таким образом, в отечественной и зарубежной научной литературе уделяется внимание вопросам эффективности технологии разработки цифровых двойников, однако мало развиты методики применения технологии и инструменты оценки эффективности результатов применения, что служит доказательством актуальности и научной значимости проводимого исследования.

В соответствии с вышесказанным, а также на основе результатов других исследований [7; 11; 132; 134; 163; 188; 219; 233; 243–246; 253] подтверждается высокая эффективность применения технологии разработки цифровых двойников. Однако внедрение цифровых двойников в высокотехнологичной промышленности затруднено из-за отсутствия универсальных методик их построения, нехватки подробных отраслевых стандартов, ограниченного

количества типовых решений.

1.4 Цифровые платформенные решения для разработки и применения цифровых двойников изделий

Одним из компонентов CALS-технологий являются технологии управления данными и жизненным циклом изделий – PDM- и PLM-системы. Как отмечают исследователи Tech Clarity, пользователи тратят до 30% рабочего времени на поиск нужных данных, что снижает производительность и эффективность [254].

Технологии управления данными об изделии (Product Data Management, PDM) направлены на обеспечение совместного доступа к данным, управление ими, управление жизненным циклом изделий, при этом изделия рассматриваются как сложные технические системы [163]. PDM-системы позволяют выполнять следующие функции:

- Организация, хранение, отслеживание документов, контроль совместного доступа к ним, отслеживание актуальности, при этом возможна работа с любыми типами документов, начиная от чертежей, отчетов и спецификаций заканчивая моделями изделия;
- Управление структурой изделия, часто называемой BOM (Bill of Materials), в том числе с учетом уровней состава изделия, количества компонентов, материалов, требований к кибербезопасности и др.;
- Управление изменениями и конфигурациями, в том числе за счет запросов, процессов утверждения, версионирования, проектного менеджмента, оценки рисков и др.;
- Интеграция с системами CAD, CAM, CAE, PLM, ERP и другими системами предприятия для обеспечения актуальности и достоверности информации, а также принятия обоснованных управленческих решений.

Внедрение PDM-систем является стратегическим решением, которое может принести ряд преимуществ в долгосрочной перспективе. PDM-системы являются неотъемлемой частью систем управления жизненным циклом (PLM, Product Lifecycle Management).

PLM-системы являются частью стратегического подхода организации и используются для создания, управления, использования описания и характеристик изделия [163; 255]. PLM-системы охватывают более широкий спектр бизнес-процессов:

- Управление требованиями, в том числе процессы сбора и определения требований и показателей, отслеживание изменений, контроль качества и проч. [163; 255];
- Управление проектами, продуктами, продуктовыми линейками [255];
- Возможность интеграции с различными системами, направленными на управление производством (например, MES – Manufacturing Execution System) [163; 255] для планирования и оптимизации производственных ресурсов, запасов и т.д.;
- Отслеживание процессов обслуживания изделия, включая планирование технического обслуживания, управление запасными частями и расходными материалами [255].

Внедрение PLM-систем позволяет быстрее выводить продукцию на рынок, обеспечивать оптимизацию процессов и повышать их эффективность.

Развитие вычислительных систем, широкое распространение численных методов, тенденции формирования комплексных платформенных решений для интеграции множества процессов в едином пространстве способствовали появлению систем управления процессами и данными компьютерного моделирования (SPDM, Simulation Process and Data Management) [163; 256].

SPDM-системы являются, как правило, платформой, на которой возможны процессы управления конфигурацией данных моделирования, совместная работа инженерных команд, обеспечивается прослеживаемость данных, прозрачность процессов разработки и прочего [163; 243; 256–258]. Основная цель данных систем – упрощение работы с расчетными вариантами, процессами моделирования изделий, за счет формирования взаимосвязи между программами препроцессинга, системами инженерного анализа и программами постпроцессинга, тем самым обеспечивая связь между входными данными и результатами моделирования [259].

Бизнес-функции и задачи SPDM-систем включают:

- Управление данными и процессами моделирования, в том числе управление изменениями, обеспечение контроля совместного доступа и безопасности, управление задачами [256];
- Повышение воспроизводимости результатов за счет создания шаблонов (стандартов), автоматизации этапов (например, генерации сетки, запуска решателя или постобработки) [256];
- Интеграцию с различными системами, включая CAE-системы, для автоматизации передачи данных, поддержку разных форматов данных;
- Управление и оптимизацию вычислительных ресурсов, планирование и мониторинг загрузки серверов, управление очередями;
- Визуализацию данных, формирование отчетности, выявление закономерностей, управление базами данных и т.д.

Данный класс систем является наиболее эффективным для реализации технологии цифровых двойников и принятия обоснованных инженерных решений.

Одной из первых SPDM-систем является SDM-система (Simulation Data Management) автомобилестроительной компании BMW под названием CAE Bench, представленная в 2000 году [260].

Эффективность системы для моделирования неоднократно отмечалась лидерами отрасли, в том числе экспертами NAFEMS, международной некоммерческой организации в области инженерного анализа и численного моделирования [243; 260–263]. При этом показательным является значительный рост числа цифровых испытаний, накопленных на платформе управления процессами и данными моделирования CAE Bench [243; 261].

Отечественный рынок инженерных программных систем развивается менее быстрыми темпами в сравнении с мировым [264; 265], однако в России ведутся собственные разработки систем управления данными моделирования.

В частности, Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ развивает цифровую платформу по разработке и

применению цифровых двойников CML-Bench[®], подробный обзор платформы и результатов выполнения проектов с применением цифровых двойников приведены в материалах [163; 188; 243–246; 266; 267].

Также в данном направлении работают компании ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», развивая продукт ЛОГОС.Платформа, ООО «ФИДЕСИС», ООО «ТЕСИС» и ряд других компаний, предлагающих системы инженерного анализа, цифрового проектирования и моделирования.

Не менее важно отметить ERP-системы (Enterprise Resource Planning), также входящие в CALS-технологии. ERP-системы являются интегрированными системами управления предприятием, которые предполагают комплексное планирование ресурсов, прогнозирование потребностей, хранение информации как о продукции, так и о процессах предприятия. ERP-системы предоставляют инструменты для эффективного финансового планирования и управления, кадрового учета и управления персоналом.

Таким образом, CALS-технологии являются мощной методологической и инструментальной поддержкой информационного пространства предприятия, обеспечивают снижение затрат, автоматизацию и оптимизацию процессов, эффективность управления данными и ресурсами. Внедрение данных программных систем, развертывание инженерного программного обеспечения в рамках инвестиционных проектов – одновременно тренд и необходимость для поддержания конкурентоспособности предприятия.

Выводы по главе

1) Конструкторская подготовка производства направлена на разработку инновационной продукции, обеспечение технологической и экономической возможности изготовления новой продукции. На данном этапе закладываются ключевые характеристики изделия, параметры производительности, качества и конкурентоспособности, при этом формируются требования к оптимальности ресурсов, трудовых и финансовых затрат, срокам вывода продукции на рынок.

2) Цифровая трансформация – не только масштабный тренд, но и производственная необходимость, вынуждающая промышленность внедрять

множество цифровых технологий для поддержания конкурентоспособности и реализации поставленных Правительством задач.

3) Традиционные подходы к разработке изделий характеризуются высокими временными и финансовыми затратами, что связано с множеством итераций по доработке продукта.

Разработанная процессная модель разработки изделия при традиционном подходе демонстрирует, что доработка опытного образца по результатам испытаний требует перепроектирования изделия, повторного проведения опытного производства и испытаний опытных образцов, при этом количество итераций может превышать десятки и сотни.

Именно эти процессы в большинстве своем определяют длительность стадии разработки и затраты разработки изделия, что зачастую характеризует превышение плановых затрат, формирует временные потери и отдалает вывод продукции на рынок. Кроме того, отмечается сложность интеграции полученного множества данных по результатам проектирования и моделирования, в том числе между разными инженерами, что подтверждает неэффективность традиционных подходов к разработке.

4) Актуальным направлением совершенствования процессов разработки является внедрение цифрового инжиниринга, основополагающей технологией которого является технология разработки цифровых двойников.

В отечественной литературе данное направление представлено национальным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения». Современные исследования по данной тематике проводятся как зарубежными, так и отечественными учеными, однако разработано ограниченное число универсальных прикладных методик, обеспечивающих полноту функциональных возможностей и эффективность внедрения технологии.

5) Достижение преимуществ технологии невозможно без внедрения программных решений, составляющих инструментарий технологии цифровых двойников, среди них – CAD-, CAM-, CAE-, PDM-, PLM-, SPDM-системы.

Приведенные инструменты обеспечивают создание, верификацию, валидацию, поддержание цифрового двойника на протяжении всего жизненного цикла изделия, а также интеграцию с другими передовыми производственными технологиями и инструментами для получения наибольшей эффективности.

ГЛАВА 2. ПРОЦЕССНАЯ МОДЕЛЬ РАЗРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

2.1 Процессная модель разработки изделий с применением технологии разработки цифровых двойников

В целях формирования процессной модели разработки изделий проанализированы процессы, сопутствующие реализации разработки высокотехнологичной продукции. В ходе исследования выделены основные стадии жизненного цикла изделия, приведены факторы, воздействующие на стадии жизненного цикла, сформирован перечень ресурсов, применяемых на каждой стадии [11].

Как рассмотрено в главе 1, основные стадии жизненного цикла изделия включают разработку, производство и эксплуатацию. Основные этапы обозначенных стадий жизненного цикла приведены в соответствии с результатами анализа действующих в Российской Федерации стандартов и нормативно-технической документации, в которой приводится описание стадий жизненного цикла изделий, продукции, объектов [163], а также обзора литературы. Также учтен опыт реализации научно-исследовательских проектов Инжиниринговым центром «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ.

В частности, проведен анализ элементов на входе и выходе каждой стадии. Стадия, связанная с разработкой изделия, предполагает формирование полного комплекта конструкторской и технологической документации, необходимого для перехода к стадии производства. Комплект документов в соответствии с ГОСТ 2.103–2013 «Единая система конструкторской документации. Стадии разработки» может включать электронные модели деталей и сборочных единиц (ДСЕ), систему чертежей, электронную структуру изделия, эксплуатационные и ремонтные документы и пр. [17] В соответствии с практикой предприятий промышленности стадия производства предполагает создание изделия, готового к процессам эксплуатации; стадия эксплуатации оканчивается изделием, находящимся в состоянии готовности к утилизации, или непосредственно утилизацией.

Дополнительно выделены вспомогательные процессы, среди которых – управление проектами, персоналом, закупками, оценка уровня качества, мероприятия, направленные на обслуживание инфраструктуры, мероприятия по техническому обслуживанию на этапе эксплуатации и др. [11] Основные результаты анализа элементов на входе и выходе, а также используемых ресурсов и оказываемых воздействий представлены на рисунке 2.1. Совершенствование процессов разработки, производства и эксплуатации необходимо реализовать с учетом указанных на рисунке 2.1 элементов.

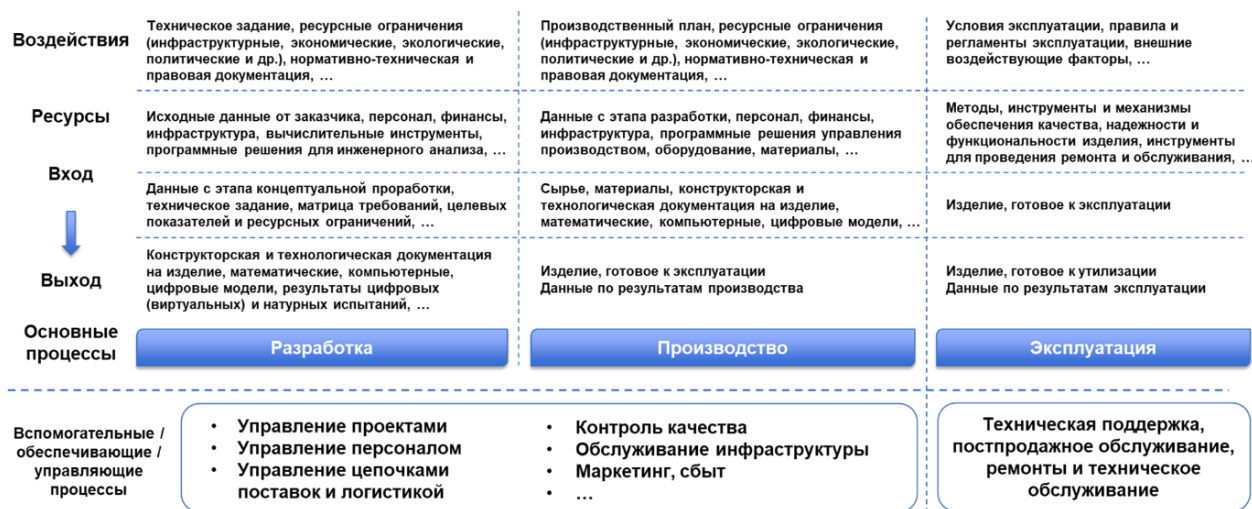


Рисунок 2.1 – Типовые элементы стадий жизненного цикла изделия

Источник: разработано автором [11]

Фокусировка дальнейшего исследования включает обзор процессов стадии разработки, поскольку, как показывает практика, именно на этой стадии может возникать множество непредвиденных затрат, как рассмотрено в главе 1. Кроме того, в главе 1 определено, что внедрение технологии цифровых двойников в процессы разработки может трансформировать подход к разработке и привести положительные эффекты в части снижения длительности и затрат проекта за счет снижения числа опытных образцов и проводимых натурных испытаний.

В соответствии с этим сформирована процессная модель стадии разработки изделия при подходе с применением технологии цифровых двойников с учетом потенциальных преимуществ применения технологии. На рисунке 2.2 представлена процессная модель разработки изделия при усовершенствованном подходе, сформированная на основе нотации цепочки добавленной стоимости

VAD (Value-Added Chain), предложенной Майклом Портером [196–198].

Выбор данного типа нотации обусловлен задачей визуально представить основные процессы разработки, которые формируют ценность и результативность проводимых работ. Большинство рассмотренных популярных нотаций, таких как BPMN 2.0 (Business Process Model and Notation), Basic Flowchart, EPC (Event-Driven Process Chain) и др., направлены преимущественно на отражение конкретных шагов по реализации бизнес-процессов, предполагают включение участников процесса, детализацию процессов и их вложенность, что не являлось задачей исследования. Аналогично под задачи исследования не подошла нотация IDEF0 (Integrated Definition), преимущества которой раскрываются при соподчиненности объектов и предметном анализе логических отношений между процессами.

Важно отметить, что в концепции систем управления качеством процессный подход считается эффективным инструментом управления качеством, позволяет организациям улучшить описание процессов деятельности и повысить их результативность.

В рассматриваемом усовершенствованном подходе концептуальная проработка изделия, обозначенная $t_{\text{концепт}}$, совпадает с соответствующим этапом при традиционном подходе (см. параграф 1.1). Этап проектирования, производства и испытаний опытных образцов при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников, длительность которого обозначена $t_{\text{ЦД}}$, является последующим этапом после концептуальной проработки и предшествующим этапом стадии производства. Длительность каждого процесса данного подхода обозначена $t^{1\text{-ЦД}} \dots t^{10\text{-ЦД}}$ соответственно.

Важно отметить, что на данном этапе формирование конструкторской документации с литерой «О_п» предполагает взаимосвязанное мультидисциплинарное моделирование в соответствии с подходом модельно-ориентированного системного инжиниринга, которые лежат в основе технологии цифровых двойников.



Рисунок 2.2 – Процессная модель стадии разработки изделия при подходе с применением технологии цифровых двойников

Источник: разработано автором [11; 12]

Для получения конструкторской документации с применением цифровых двойников необходимо пройти следующие процессы:

- разработка САД-моделей подсистем, составляющих изделие;
- формирование матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений к изделию;
- разработка (корректировка) САЕ-моделей подсистем, составляющих изделие, с применением методов инженерного анализа;
- проведение цифровых (виртуальных) испытаний подсистем, составляющих изделие;
- разработка единой цифровой модели системы (изделия);
- моделирование технологических процессов изготовления деталей и сборочных единиц, составляющих изделие;
- проведение цифровых (виртуальных) испытаний системы (изделия).

Важным звеном на данном этапе является итерационность, то есть повторение шагов, связанных с разработкой САЕ-моделей подсистем и проведением цифровых испытаний. Как показывает практика выполнения Инжиниринговым центром СПбПУ научно-исследовательских работ по заказу высокотехнологичных предприятий, число цифровых (виртуальных) испытаний может составлять от нескольких сотен до нескольких тысяч, при этом, как правило, минимум одно цифровое (виртуальное) испытание требуется для оценки соответствия одному целевому показателю, зафиксированному в матрице требований, чем определяется минимальное число проводимых цифровых испытаний. Следовательно, на процессной модели целесообразно отразить повторяемость цифровых (виртуальных) испытаний для каждого прорабатываемого варианта конструкции и каждого прорабатываемого элемента подсистемы, что обозначено M_{sim} – число итераций (шагов) по перепроектированию подсистемы изделия по результатам цифровых испытаний.

Именно тщательная проработка изделия, формирование матрицы требований к изделию, итерационное проведение моделирования с учетом подсистем изделия позволяет до выхода на опытное производство провести оценку

соответствия изделия требованиям к нему и определить целесообразность перехода к производству и испытаниям. Другими словами, инженеры могут в цифровом пространстве провести необходимые испытания и определить, стоит ли переходить к опытному производству и удастся ли пройти натурные испытания с первого раза, что в противном случае приведет к повышению затрат на разработку изделия.

Это позволяет достичь минимального количества изменений, вносимых в конструкцию по результатам натурных испытаний, тем самым дорогостоящие итерации, связанные с перепроектированием конструкции изделия и проведением повторных натурных испытаний, минимизируются [11; 163], что повышает результативность процесса разработки. При этом возможно получение сбалансированного варианта исполнения конструкции изделия, соответствующей всем требованиям к изделию, в том числе требованиям к уровню качества продукции [268]. Также технология цифровых двойников обеспечивает упорядочивание процессов формирования конструкторской документации за счет прозрачности и отслеживаемости процессов.

Соответственно, переход к опытному производству и натурным испытаниям опытных образцов отличается от аналогичного этапа при традиционном подходе тем, что возврат на предыдущий этап проектирования повторяется значительно меньшее число раз, что обозначено M_{test} .

Таким образом, приведенная процессная модель содержит новые связи и изменения в структуре организационных процессов, способствующие устранению недостатков традиционного подхода к разработке изделий. Результаты исследования, представленные в виде процессной модели, демонстрируют получение возможного эффекта при внедрении технологии цифровых двойников.

Внедрение технологии требует вложения инвестиций в целях организации процессов применения цифровых двойников, подготовки вычислительных ресурсов, приобретения инженерного программного обеспечения, обеспечения высококвалифицированного персонала для проведения численных расчетов или привлечения стороннего исполнителя для этих целей. Однако данные инвестиции позволят многократно применить технологию цифровых двойников в аналогичных

проектах по разработке изделия, а также сократить затраты на повторное опытное производство и проведение повторных испытаний, что является более перспективным подходом.

Анализ процессной модели позволяет сформировать сравнительную модель традиционного подхода (на рисунке 2.3 традиционный подход обозначен отрезком красного цвета) и подхода с применением технологии цифровых двойников (обозначен отрезком зеленого цвета) на основе применения метода сравнения с помощью описания и наблюдения. Демонстрация потенциального эффекта в части длительности процессов при внедрении технологии цифровых двойников представлена на рисунке 2.3 – увеличивается длительность цифрового проектирования и моделирования, при этом моделирование происходит более результативно, вследствие чего уменьшается длительность опытного производства и натурных испытаний до минимального. Это связано с увеличением инженерных расчетов в процессе разработки изделия, которые составляют основу цифровых (виртуальных) испытаний и проводятся в рамках концепции цифрового проектирования и моделирования, а также с учетом возможностей параллельного проектирования и платформенных решений [163].

Тем самым возникает экономия затрат по времени, что обозначено областью зеленого цвета на сравнительной модели. Данная модель имеет упрощения – концептуальная проработка принята равной при обоих подходах, длительность каждой итерации по моделированию и итерации по опытному производству и натурным испытаниям принята равной при каждом случае, однако она может отличаться по причине накопления знаний и опыта на предыдущих шагах.

Кроме того, стоит отметить возможное влияние технологии цифровых двойников и на последующие стадии жизненного цикла изделия. Так, тщательное моделирование процессов изготовления изделия и учет требований к качеству изделия может способствовать повышению качества производственного процесса, снижению ошибок и дефектов при производстве, а также повышению контроля на стадии производства, в связи с чем производственный цикл при подходе с внедрением технологии цифровых двойников может занять меньше времени в

сравнении с традиционным подходом.

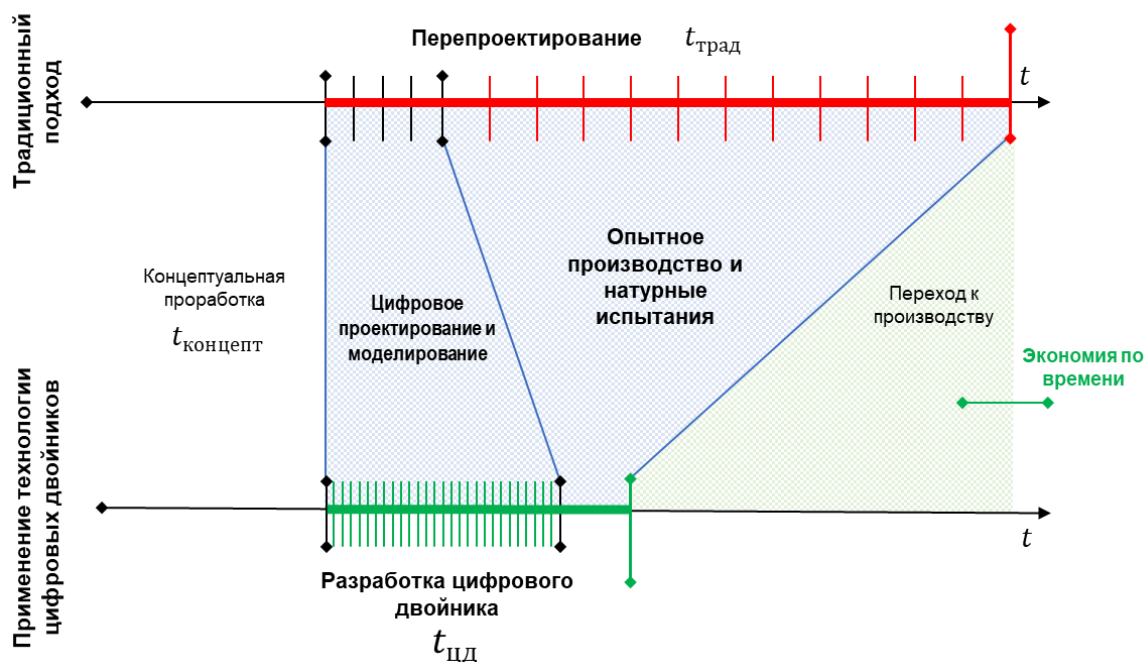


Рисунок 2.3 – Сравнительная модель традиционного подхода к разработке изделий и подхода с применением технологии цифровых двойников

Источник: разработано авторами [12]

Также возможно влияние на стадию эксплуатации – проработка технических и тактико-технических требований, целевых показателей к изделию [10; 190; 253; 269; 270], моделирование возможных сценариев отказа, нарушений условий эксплуатации и отклонений при различных эксплуатационных режимах позволит обеспечить надежность изделия в процессе эксплуатации, скорректировать условия эксплуатации и провести расчеты ресурса изделия, что может привести к увеличению срока службы.

Аналогичным образом возможно увеличение срока службы изделия при формировании двусторонних информационных связей с изделием (обратных связей), за счет чего возможно прогнозирование работы изделия и отслеживание текущего состояния изделия в режиме реального времени, а также выдача управляющих воздействий от цифрового двойника к изделию.

В Инжиниринговом центре СПбПУ применяется подход к разработке изделий на основе национального стандарта ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие

положения» с применением цифровой платформы CML-Bench[®], что рассмотрено в публикациях [188; 243–246; 267].

2.2 Математическая модель оценки времени разработки изделий при подходе с применением технологии разработки цифровых двойников

Приведенные процессные модели стадии разработки изделия при традиционном подходе (параграф 1.2) и при подходе с применением технологии цифровых двойников (параграф 2.1) возможно раскрыть через математическое описание длительности каждого из процессов. Такое описание позволяет отразить закономерности, связанные с последовательностью этапов и зависимостью от числа итераций по перепроектированию и повторным испытаниям опытных образцов, что влияет на увеличение длительности разработки.

Для описания и применения математической модели оценки времени (длительности) разработки изделия необходимо пройти через ряд этапов, которые в общем виде включают:

- сбор и анализ данных о длительности и результатах отдельных процессов, которые могут быть получены статистически на основе имеющихся данных в технических журналах мониторинга, измерений, событий, операций и системах данных, а также экспериментально в ходе выполнения проекта по разработке изделия;
- оценку параметров математической модели, сведение отдельных значений в группы в соответствии с параметрами и элементами модели;
- расчет совокупности параметров математической модели, анализ результатов и оценку возможных мероприятий по оптимизации полученных значений длительности разработки.

Отслеживание параметров математической модели и анализ первопричин увеличения длительности будет способствовать оптимизации элементов цепочки добавленной стоимости и устранению колебаний, возникающих вследствие воздействия внешних факторов.

При построении математической модели длительности цикла разработки при традиционном подходе примем следующие обозначения (2.1):

$t_{p_трад}$ – суммарная длительность процессов разработки изделия при традиционном подходе; $t_{p_трад}$ в соответствии с процессной моделью раскладывается на две составляющие – $t_{концепт}$ и $t_{трад}$;

$t_{концепт}$ – длительность процесса концептуальной проработки изделия;

$t_{трад}$ – суммарная длительность процессов проектирования, производства и испытаний опытных образцов при традиционном подходе к разработке изделия.

Тогда:

$$t_{p_трад} = t_{концепт} + t_{трад} \quad (2.1)$$

Далее $t_{трад}$ можно раскрыть через 5 ключевых этапов $t^{n_трад}$, представленных в процессной модели (рисунок 2.2) – проектирование и моделирование системы, моделирование технологических процессов, опытное производство, натурные испытания и утверждение конструкторской документации:

$t^{1_трад}$ – длительность процесса, связанного с проектированием и моделированием системы, при традиционном подходе к разработке изделия;

$t^{2_трад}$ – длительность процесса, связанного с моделированием технологических процессов изготовления системы, при традиционном подходе к разработке изделия;

$t^{3_трад}$ – длительность процесса, связанного с производством опытных образцов, при традиционном подходе к разработке изделия;

$t^{4_трад}$ – длительность процесса, связанного с натурными испытаниями опытных образцов, при традиционном подходе к разработке изделия;

$t^{5_трад}$ – длительность процесса, связанного с утверждением конструкторской документации, при традиционном подходе к разработке изделия [271].

При этом следует отметить, что длительность разных итераций (циклов, шагов) по перепроектированию может отличаться в связи с тем, что на последующих этапах учитываются накопленные на предыдущих этапах результаты, то есть внесение изменений на последующих этапах происходит, как правило, не для всей системы, а для отдельных подсистем. Вследствие этого сокращается длительность проработки системы в целом, длительность

налаживания и технологической подготовки повторного опытного производства и др. По этой причине следует ввести индекс, обозначающий порядковый номер проводимого натурного испытания и соответственно всех предшествующих этому испытанию процессов:

$t_i^{1\text{-трад}}$ – длительность процесса, связанного с проектированием и моделированием системы, при традиционном подходе к разработке изделия с учетом порядкового номера i -цикла;

$t_i^{2\text{-трад}}$ – длительность процесса, связанного с моделированием технологических процессов изготовления системы, при традиционном подходе к разработке изделия с учетом порядкового номера i -цикла [270];

$t_i^{3\text{-трад}}$ – длительность процесса, связанного с производством опытных образцов, при традиционном подходе к разработке изделия с учетом порядкового номера i -цикла;

$t_i^{4\text{-трад}}$ – длительность процесса, связанного с натурными испытаниями опытных образцов, при традиционном подходе к разработке изделия с учетом порядкового номера i -цикла;

i – порядковый номер натурного испытания опытного образца, где 1 – это первый цикл проектирования и последующих процессов вплоть до проведения натурных испытаний;

N_{test} – число итераций (шагов) по перепроектированию изделия по результатам натурных испытаний при традиционном подходе к разработке изделия [271].

Тогда порядковый номер натурного испытания опытного образца принадлежит следующему множеству индексов: $i = [1; N_{test}]$.

Процесс утверждения конструкторской документации проходит один раз, после прохождения всех циклов по перепроектированию, в связи с чем не целесообразно вводить индекс для данного элемента длительности процесса. Тогда математическая модель оценки времени (длительности) разработки изделия при традиционном подходе (2.2) [271]:

$$t_{mpad} = \sum_{i=1}^{N_{test}} (t_i^{1-mpad} + t_i^{2-mpad} + t_i^{3-mpad} + t_i^{4-mpad}) + t^{5-mpad} \quad (2.2)$$

При применении приведенной математической модели стоит учесть, что в модели приняты упрощения, одно из которых заключается в применении линейной функции длительности, которая может недостаточно точно отражать фактическую длительность проекта. Например, в случае реализации проекта с привлечением сторонних организаций или подрядчиков, с учетом принадлежности к наукоемкой отрасли, вследствие возникновения макроэкономических условий, не учтенных ранее, или другого события, нарушающего линейную последовательность процесса разработки, следует обращаться к более точным, однако более трудоемким моделям, описывающим процессы длительности, например, регрессионным моделям с описанием влияния случайных факторов [272; 273].

Таким образом, данная модель применима в том случае, когда возможна оценка длительности процессов разработки изделия и при этом не возникло случайных событий, оказавших значительное влияние на результат.

Как показано в параграфе 1.2, недостатком традиционного подхода является высокая длительность разработки изделия в связи с большим числом проводимых натурных испытаний, число которых равно N_{test} , вследствие чего рекомендуется оптимизация процессов разработки за счет воздействия на число проводимых цифровых испытаний и снижения тем самым числа натурных испытаний.

Рассмотрим данную задачу и представим математическую модель оценки времени (длительности) разработки изделия при подходе с применением технологии цифровых двойников, для чего примем следующие обозначения (2.3):

$t_{p_цд}$ – длительность процессов разработки изделия при подходе с применением технологии цифровых двойников; по аналогии с $t_{p_трад}$ и в соответствии с процессной моделью (рисунок 2.2), $t_{p_цд}$ раскладывается на две составляющие – $t_{концепт}$ и $t_{цд}$;

$t_{концепт}$ – длительность процесса концептуальной проработки изделия; данный параметр математической модели принят равным для традиционного и для

усовершенствованного подхода;

$t_{\text{ЦД}}$ – суммарная длительность процессов проектирования, производства и испытаний опытных образцов при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников [271];

$$t_{p_ЦД} = t_{\text{концепт}} + t_{\text{ЦД}} \quad (2.3)$$

Раскроем $t_{\text{ЦД}}$ через ключевые этапы $t^{n_ЦД}$ согласно процессной модели (рисунок 2.2) – CAD-моделирование, формирование матрицы требований к изделию, разработка и корректировка САЕ-моделей подсистем, цифровые испытания подсистем, разработка цифровой модели системы, моделирование технологических процессов, цифровые испытания системы, опытное производство, натурные испытания и утверждение конструкторской документации:

$t^{1_ЦД}$ – длительность процесса, связанного с разработкой CAD-моделей изделия, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников;

$t^{2_ЦД}$ – длительность процесса, связанного с формированием матрицы требований к изделию, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников;

$t^{3_ЦД}$ – длительность процесса, связанного с разработкой и корректировкой САЕ-моделей подсистем, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников;

$t^{4_ЦД}$ – длительность процесса, связанного с проведением цифровых испытаний подсистем, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников;

$t^{5_ЦД}$ – длительность процесса, связанного с разработкой цифровой модели системы, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников;

$t^{6_ЦД}$ – длительность процесса, связанного с проведением моделирования технологических процессов, при подходе к разработке изделия с применением

технологии цифровых двойников;

$t^{7-ЦД}$ — длительность процесса, связанного с проведением цифровых испытаний системы, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников;

$t^{8-ЦД}$ — длительность процесса, связанного с проведением опытного производства, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников;

$t^{9-ЦД}$ — длительность процесса, связанного с проведением натурных испытаний опытных образцов, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников;

$t^{10-ЦД}$ — длительность процесса, связанного с утверждением конструкторской документации, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников [271].

По аналогии с математической моделью при традиционном подходе для математической модели с применением технологии цифровых двойников необходимо ввести индекс для обозначения порядкового номера проводимых натурных испытаний (введение индексов для процессов $t^{1-ЦД}$ и $t^{2-ЦД}$ не является целесообразным, так как эти процессы предшествуют циклу по перепроектированию; описание индексов $t^{3-ЦД}$ и $t^{4-ЦД}$ рассмотрено отдельно и приведено далее; введение индекса для процесса $t^{10-ЦД}$ не целесообразно по причине того, что утверждение конструкторской документации проходит после прохождения циклов по перепроектированию):

$t_j^{5-ЦД}$ — длительность процесса, связанного с разработкой цифровой модели системы, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников с учетом порядкового номера j -цикла;

$t_j^{6-ЦД}$ — длительность процесса, связанного с проведением моделирования технологических процессов, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников с учетом порядкового номера j -цикла;

$t_j^{7-ЦД}$ — длительность процесса, связанного с проведением цифровых

испытаний системы, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников с учетом порядкового номера j -цикла;

$t_j^{8-ЦД}$ – длительность процесса, связанного с проведением опытного производства, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников с учетом порядкового номера j -цикла;

$t_j^{9-ЦД}$ – длительность процесса, связанного с проведением натурных испытаний опытных образцов, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников с учетом порядкового номера j -цикла;

j – порядковый номер натурального испытания опытного образца, где 1 – это первый цикл проектирования и последующих процессов вплоть до проведения натурных испытаний;

M_{test} – число итераций (шагов) по перепроектированию изделия по результатам натурных испытаний при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников [271].

Также определим диапазон значений индекса j : $j = [1; M_{test}]$.

Аналогично следует ввести индекс, обозначающий порядковый номер проводимых цифровых испытаний подсистем, поскольку данный процесс является итерационным и предполагает цикличное внесение изменений в САЕ-модели:

k – порядковый номер цифрового испытания отдельной подсистемы в рамках j -цикла;

M_{sim} – число итераций (шагов) по перепроектированию подсистемы изделия по результатам цифровых испытаний при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников.

Тогда определим диапазон значений индекса k : $k = [1; M_{sim}]$.

В связи с этим у одного j -цикла может быть M_{sim} цифровых испытаний подсистем:

$t_{jk}^{3-ЦД}$ – длительность процесса, связанного с разработкой и корректировкой САЕ-моделей подсистем, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников с учетом k -номера цифрового испытания j -цикла

разработки;

$t_{jk}^{4_ЦД}$ – длительность процесса, связанного с проведением цифровых испытаний подсистем, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников с учетом k -номера цифрового испытания j -цикла разработки.

Кроме того, число самих разрабатываемых подсистем, составляющих систему изделия, как правило, больше 1, в связи с чем следует ввести дополнительный параметр:

l – порядковый номер разрабатываемой подсистемы изделия; $l > 1$;

$t_{jlk}^{3_ЦД}$ – длительность процесса, связанного с разработкой и корректировкой САЕ-моделей l -подсистемы, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников с учетом k -номера цифрового испытания j -цикла разработки;

$t_{jlk}^{4_ЦД}$ – длительность процесса, связанного с проведением цифровых испытаний l -подсистемы, при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников с учетом k -номера цифрового испытания j -цикла разработки.

Тогда формула для математической модели оценки времени (длительности) разработки изделия при подходе с применением технологии цифровых двойников (2.4) [271]:

$$t_{ЦД} = t^{1_ЦД} + t^{2_ЦД} + \sum_{j=1}^{M_{test}} \left(\sum_{k=1}^{M_{sim}} (t_{jlk}^{3_ЦД} + t_{jlk}^{4_ЦД}) + t_j^{5_ЦД} + t_j^{6_ЦД} + t_j^{7_ЦД} + t_j^{8_ЦД} + t_j^{9_ЦД} \right) + t^{10_ЦД} \quad (2.4)$$

В приведенных формулах для математических моделей (2.2, 2.4) важно учесть фактор, за счет которого возможна оптимизация длительности процессов без потери уровня качества как процесса разработки, так и разрабатываемого изделия – число натурных испытаний при усовершенствованном подходе много меньше числа натурных испытаний при традиционном подходе (2.5):

$$M_{test} \ll N_{test} \quad (2.5)$$

Отдельным ограничением математической модели длительности процессов

разработки выступают ограничения, вызванные сроком реализации проекта:

$t_{ЦД} \leq t_{max}$, где t_{max} – максимально возможная длительность выполнения проекта в соответствии с заданными сроками.

Также важно отметить существующие ограничения максимального числа итераций по перепроектированию по результатам натурных испытаний, а также ограничения по минимальному числу натурных испытаний для прохождения сертификации в отдельных областях машиностроения, которые в каждом отдельном проекте заданы дополнительно:

$M_{test} \leq M_{test}^{max}$, где M_{test}^{max} – заданное максимально возможное число натурных испытаний с учетом имеющихся ресурсов на предприятии;

$M_{test} \geq M_{test}^{min}$, где M_{test}^{min} – заданное минимально возможное число натурных испытаний для прохождения сертификации в отрасли машиностроения применительно к данному типу изделия.

Перечень отраслей машиностроения накладывает ограничения по числу испытаний. Среди основных отраслей машиностроения в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2023 года №603 «Об утверждении приоритетных направлений проектов технологического суверенитета и проектов структурной адаптации экономики Российской Федерации <...>» выделим авиастроение, автомобилестроение, железнодорожное, нефтегазовое, сельскохозяйственное, специализированное машиностроение, станкоинструментальную промышленность и тяжелое машиностроение, судостроение, энергетическое машиностроение, а также ряд других отраслей [256; 274].

Таким образом, ограничения математической модели длительности процессов разработки изделий машиностроения при внедрении технологии цифровых двойников включают (2.6):

$$\begin{cases} t_{ЦД} \leq t_{max} \\ M_{test} \ll N_{test} \\ M_{test} \leq M_{test}^{max} \\ M_{test} \geq M_{test}^{min} \end{cases} \quad (2.6)$$

Таким образом, целевая функция математической модели оценки времени (длительности) разработки изделия при подходе с применением технологии цифровых двойников может быть описана следующим образом (2.7) [271]:

$$t_{\text{ИД}} = t^{1-\text{ИД}} + t^{2-\text{ИД}} + \sum_{j=1}^{M_{\text{test}}} \left(\sum_{k=1}^{M_{\text{sim}}} (t_{jlk}^{3-\text{ИД}} + t_{jlk}^{4-\text{ИД}}) + t_j^{5-\text{ИД}} + t_j^{6-\text{ИД}} + t_j^{7-\text{ИД}} + t_j^{8-\text{ИД}} + t_j^{9-\text{ИД}} \right) + t^{10-\text{ИД}} \rightarrow \min \quad (2.7)$$

$$M_{\text{test}} \rightarrow \min$$

$$M_{\text{sim}} \rightarrow \text{opt}$$

Важные допущения и ограничения в данной математической модели также включают:

- 1) Длительность процесса опытного производства может изменяться в зависимости от параметров доступности ресурсов и производственных мощностей, что не учитывается в математической модели;
- 2) Отсутствие оценки рисков, связанных с наступлением непредвиденных событий, нарушением цикличности работы, техническими неполадками и проч.;
- 3) Отсутствие учета отраслевой специфики, особенностей разрабатываемой конструкции и ее элементов, уровня зрелости используемых технологий, компетенций персонала и др., в связи с чем длительность процессов может колебаться для разных типов продукции машиностроения и разных предприятий.

В связи с вышесказанным возможно добавление ε – случайной величины, направленной на учет влияния внешних воздействующих факторов, увеличивающих длительность разработки изделия, однако не учтенных в явном виде при реализации конкретного процесса разработки (2.8):

$$t_{\text{ИД}} = t^{1-\text{ИД}} + t^{2-\text{ИД}} + \sum_{j=1}^{M_{\text{test}}} \left(\sum_{k=1}^{M_{\text{sim}}} (t_{jlk}^{3-\text{ИД}} + t_{jlk}^{4-\text{ИД}}) + t_j^{5-\text{ИД}} + t_j^{6-\text{ИД}} + t_j^{7-\text{ИД}} + t_j^{8-\text{ИД}} + t_j^{9-\text{ИД}} \right) + t^{10-\text{ИД}} + \varepsilon \rightarrow \min \quad (2.8)$$

Кроме того, не учитывается возможность проведения параллельных работ, например при цифровом моделировании подсистем или технологических процессов, что также является допущением математической модели.

Дополнительно следует привести возможные зависимости длительности отдельных процессов от числа M_{sim} (напомним, что это число итераций (шагов) по

перепроектированию подсистемы изделия по результатам цифровых испытаний при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников):

- Влияние на процесс разработки САД-моделей будет отсутствовать (равным 0) или оказано в минимальном объеме, например, в случаях, когда по результатам проведения цифровых испытаний потребуется внести корректировки в САД-модели, что, однако, является крайне редким фактором;

- Влияние на процесс формирования матрицы требований можно считать незначительным, поскольку требования, как правило, зафиксированы заказчиком, однако возможны уточнения целевых показателей изделия, так как по итогам процессов моделирования матрица требований должна быть сбалансирована, что рассмотрено в параграфе 3.1;

- Влияние на разработку САЕ-моделей является существенным, что может быть описано логарифмической моделью, поскольку увеличение числа проведенных цифровых (виртуальных) испытаний с каждым циклом снижает необходимость в последующей существенной корректировке САЕ-моделей (2.9):

$$t_{jlk}^{3-ЦД} = a^{3-ЦД} + b^{3-ЦД} * \ln k \quad (2.9)$$

где $a^{3-ЦД}$ – параметр или константа, описывающая базовую длительность процесса разработки САЕ-моделей l -подсистемы без учета накопленного опыта по результатам моделирования, то есть когда проходит первый цикл моделирования подсистем – $k = 1$;

$b^{3-ЦД}$ – параметр или коэффициент, определяющий скорость уменьшения длительности (замедления) процесса разработки САЕ-моделей l -подсистемы в зависимости от эффективности разработки моделей и по мере накопления опыта, при этом $b < 0$.

- Влияние на проведение цифровых (виртуальных) испытаний подсистем является существенным по причине того, что чем больше циклов цифровых испытаний, тем больше времени и трудовых ресурсов требуется

суммарно на весь процесс цифровых испытаний. Однако длительность отдельного испытания будет несущественно зависеть от числа этих испытаний, то есть длительность отдельных цифровых испытаний примерно равна (постоянна) и может незначительно колебаться, например, при высокой нагрузке вычислительной инфраструктуры. Длительность всех цифровых испытаний подсистем можно суммарно описать через линейную зависимость (2.10):

$$t_{jlk}^{4_ЦД} = l * M_{sim} * t^{4_ЦД_ед} \quad (2.10)$$

где $t^{4_ЦД_ед}$ – средняя длительность одного цифрового (виртуального) испытания подсистемы, если для каждой l -подсистемы в каждый k -цикл проводится хотя бы одно испытание.

- Влияние на разработку цифровой модели системы, моделирование технологических процессов и проведение цифровых испытаний системы является незначительным. Это объясняется тем, что переход на данные этапы предполагает завершение циклов цифровых испытаний подсистем, и оказываемое воздействие на данные процессы преимущественно связано с качеством результатов цифровых испытаний подсистем и отлаженностью единой системы моделей, а не с числом проведенных цифровых испытаний. Однако стоит отметить, что в некоторых случаях все же возможно влияние, например, чем больше число цифровых испытаний подсистем, тем меньше число цифровых испытаний системы;

- Влияние на опытное производство и натурные испытания невелико и, вероятно, отрицательно, поскольку проработка подсистем в цифровом пространстве может оказать воздействие на длительность натурных испытаний в части ее уменьшения;

- Влияние на утверждение конструкторской документации не оказывается, поскольку к данному процессу осуществляется переход только в том случае, когда изделие проработано и может быть отправлено в серийное производство, следовательно, необходимый объем цифровых испытаний уже проведен.

Аналогично можно представить возможные зависимости длительности

отдельных процессов от числа M_{test} (напомним, что это число итераций (шагов) по перепроектированию изделия по результатам натурных испытаний при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников):

- Влияние на процесс разработки CAD-моделей не оказывается, поскольку данный процесс предшествует циклу по перепроектированию;
- Влияние на процесс формирования матрицы требований можно считать незначительным (минимальным), возможно лишь некоторое изменение целевых показателей в случае внесения изменений по результатам испытаний;
- Влияние на разработку CAE-моделей и на проведение цифровых (виртуальных) испытаний подсистем является существенным в том случае, если возникает потребность в последующем проведении множества натурных испытаний, что, однако, противоречит поставленным условиям задачи;
- Влияние на разработку цифровой модели системы и проведение моделирования технологических процессов аналогично является потенциально значимым при большом числе натурных испытаний и при необходимости более детальной проработки цифровой модели системы;
- Влияние на проводимые цифровые испытания системы практически не оказывается, поскольку результаты проведенных ранее натурных испытаний предварительно учтены на предыдущих процессах;
- Влияние на длительность опытного производства можно описать через линейную зависимость – чем больше циклов по проведению перепроектирования и повторных натурных испытаний, тем равнозначно больше циклов опытного производства (2.11):

$$t_{jk}^{8-ЦД} = M_{test} * t^{8-ЦД-ед} \quad (2.11)$$

где $t^{8-ЦД-ед}$ – средняя длительность налаживания опытного производства и проведения технологических операций при изготовлении отдельного опытного образца.

- Влияние на длительность проведения натурных испытаний является очевидно существенным, если оценивать суммарную длительность натурных

испытаний по всем j -циклам, однако влияние на длительность отдельного натурального испытания не оказывается;

- Влияние на утверждение конструкторской документации не оказывается – к данному процессу осуществляется переход только в том случае, когда изделие проработано и может быть отправлено в серийное производство, то есть необходимый объем натурных испытаний проведен.

Для наглядности применения предложенной математической модели приведем расчеты длительности цикла разработки изделия машиностроения с применением технологии цифровых двойников. Примем, что концептуальная проработка изделия составила 5 рабочих дней, разработка САД-моделей – 15 рабочих дней, формирование матрицы требований – 15 рабочих дней.

Цикл по перепроектированию M_{test} проходил 3 раза. В первом цикле перепроектирования M_{test} итерации по разработке САЕ-моделей и цифровым испытаниям подсистем M_{sim} составили 4 единицы, во втором случае – 3 единицы, в третьем случае – 1 единицу. Разработка САЕ-моделей и цифровые испытания подсистем включали анализ 5 подсистем ($l = 5$).

Длительность каждого цикла разработки САЕ-моделей и проведения цифровых испытаний для подсистем изделия, длительность процессов при перепроектировании (включая разработку цифровой модели, моделирование технологических процессов, цифровые испытания системы, опытное производство и натурные испытания) приведены в таблице 2.1. Утверждение конструкторской документации составило 10 рабочих дней.

Для простоты расчетов примем 1 рабочий день равным 8 часам. При этом предположим, что произошло влияние случайных факторов, например, задержка поставки сырья для опытного производства при втором цикле перепроектирования, в связи с чем 2 рабочих дня предприятие не могло приступить к производству опытных образцов после прохождения всех предыдущих этапов.

Таблица 2.1 – Значения параметров для примера расчета длительности разработки изделия

Наименование процесса	Количество циклов M_{test} (при необходимости), $j = [1; 3]$	Количество циклов M_{sim} (при необходимости), $k = [1; 4]$ при $j = 1$, $k = [1; 3]$ при $j = 2$, $k = 1$ при $j = 3$	Длительность (часы) с учетом l -подсистемы (при необходимости)
$t_{\text{концепт}}$ концептуальная проработка изделия	–	–	40
$t^{1-ЦД}$ разработка САД-моделей изделия	–	–	120
$t^{2-ЦД}$ формирование матрицы требований	–	–	120
$t^{3-ЦД}$ разработка и корректировка САЕ-моделей подсистем	$M_{test} = 1$	$M_{sim} = 1$	1 подсистема = 3 2 подсистема = 4 3 подсистема = 2 4 подсистема = 3 5 подсистема = 4
		$M_{sim} = 2$	1 подсистема = 2 2 подсистема = 3 3 подсистема = 1 4 подсистема = 3 5 подсистема = 3
		$M_{sim} = 3$	1 подсистема = 1 2 подсистема = 1 3 подсистема = 0 4 подсистема = 2 5 подсистема = 1
		$M_{sim} = 4$	1 подсистема = 0 2 подсистема = 0 3 подсистема = 0 4 подсистема = 1 5 подсистема = 1
$t^{4-ЦД}$ цифровые испытания подсистем	$M_{test} = 1$	$M_{sim} = 1$	1 подсистема = 2 2 подсистема = 3 3 подсистема = 1 4 подсистема = 2 5 подсистема = 3
		$M_{sim} = 2$	1 подсистема = 1 2 подсистема = 1 3 подсистема = 0,5 4 подсистема = 2 5 подсистема = 1,5

Наименование процесса	Количество циклов M_{test} (при необходимости), $j = [1; 3]$	Количество циклов M_{sim} (при необходимости), $k = [1; 4]$ при $j = 1$, $k = [1; 3]$ при $j = 2$, $k = 1$ при $j = 3$	Длительность (часы) с учетом l -подсистемы (при необходимости)
		$M_{sim} = 3$	1 подсистема = 0,5 2 подсистема = 0,5 3 подсистема = 0 4 подсистема = 1 5 подсистема = 0,5
		$M_{sim} = 4$	1 подсистема = 0 2 подсистема = 0 3 подсистема = 0 4 подсистема = 0,5 5 подсистема = 0,5
$t^{5-ЦД}$ разработка цифровой модели системы	$M_{test} = 1$	—	15
$t^{6-ЦД}$ моделирование технологических процессов	$M_{test} = 1$	—	40
$t^{7-ЦД}$ цифровые испытания системы	$M_{test} = 1$	—	30
$t^{8-ЦД}$ опытное производство	$M_{test} = 1$	—	40
$t^{9-ЦД}$ натурные испытания	$M_{test} = 1$	—	30
$t^{3-ЦД}$ разработка и корректировка САЕ-моделей подсистем	$M_{test} = 2$	$M_{sim} = 1$	1 подсистема = 3 2 подсистема = 3 3 подсистема = 1 4 подсистема = 1 5 подсистема = 0
		$M_{sim} = 2$	1 подсистема = 3 2 подсистема = 1 3 подсистема = 0 4 подсистема = 1 5 подсистема = 0
		$M_{sim} = 3$	1 подсистема = 1 2 подсистема = 0 3 подсистема = 0 4 подсистема = 0 5 подсистема = 0
$t^{4-ЦД}$ цифровые	$M_{test} = 2$	$M_{sim} = 1$	1 подсистема = 3 2 подсистема = 2

Наименование процесса	Количество циклов M_{test} (при необходимости), $j = [1; 3]$	Количество циклов M_{sim} (при необходимости), $k = [1; 4]$ при $j = 1$, $k = [1; 3]$ при $j = 2$, $k = 1$ при $j = 3$	Длительность (часы) с учетом l -подсистемы (при необходимости)
испытания подсистем			3 подсистема = 1 4 подсистема = 1 5 подсистема = 0
		$M_{sim} = 2$	1 подсистема = 2 2 подсистема = 2 3 подсистема = 0 4 подсистема = 1 5 подсистема = 0
		$M_{sim} = 3$	1 подсистема = 0,5 2 подсистема = 0 3 подсистема = 0 4 подсистема = 0 5 подсистема = 0
$t^{5-ЦД}$ разработка цифровой модели системы	$M_{test} = 2$	—	10
$t^{6-ЦД}$ моделирование технологических процессов	$M_{test} = 2$	—	20
$t^{7-ЦД}$ цифровые испытания системы	$M_{test} = 2$	—	25
$t^{8-ЦД}$ опытное производство	$M_{test} = 2$	—	40
$t^{9-ЦД}$ натурные испытания	$M_{test} = 2$	—	30
$t^{3-ЦД}$ разработка и корректировка САЕ-моделей подсистем	$M_{test} = 3$	$M_{sim} = 1$	1 подсистема = 1 2 подсистема = 2 3 подсистема = 1 4 подсистема = 0 5 подсистема = 0
$t^{4-ЦД}$ цифровые испытания подсистем	$M_{test} = 3$	$M_{sim} = 1$	1 подсистема = 2 2 подсистема = 3 3 подсистема = 0,5 4 подсистема = 0 5 подсистема = 0
$t^{5-ЦД}$ разработка цифровой модели системы	$M_{test} = 3$	—	8

Наименование процесса	Количество циклов M_{test} (при необходимости), $j = [1; 3]$	Количество циклов M_{sim} (при необходимости), $k = [1; 4]$ при $j = 1$, $k = [1; 3]$ при $j = 2$, $k = 1$ при $j = 3$	Длительность (часы) с учетом l -подсистемы (при необходимости)
$t^{6-ЦД}$ моделирование технологических процессов	$M_{test} = 3$	–	8
$t^{7-ЦД}$ цифровые испытания системы	$M_{test} = 3$	–	20
$t^{8-ЦД}$ опытное производство	$M_{test} = 3$	–	40
$t^{9-ЦД}$ натурные испытания	$M_{test} = 3$	–	30
$t^{10-ЦД}$ утверждение конструкторской документации	–	–	80
ε задержка поставки сырья	–	–	16

Источник: составлено автором

Для упрощения и наглядности проводимых расчетов проведем оценку длительности отдельных $t^{3-ЦД}$ и $t^{4-ЦД}$:

$$t^{3-ЦД} = (3+4+2+3+4) + (2+3+1+3+3) + (1+1+2+1) + (1+1) = 35 \text{ при } M_{test} = 1;$$

$$t^{4-ЦД} = (2+3+1+2+3) + (1+1+0,5+2+1,5) + (0,5+0,5+1+0,5) + (0,5+0,5) = 20,5 \text{ при } M_{test} = 1;$$

$$t^{3-ЦД} = (3+3+1+1) + (3+1+1) + 1 = 14 \text{ при } M_{test} = 2;$$

$$t^{4-ЦД} = (3+2+1+1) + (2+2+1) + 0,5 = 12,5 \text{ при } M_{test} = 2;$$

$$t^{3-ЦД} = 1+2+1 = 4 \text{ при } M_{test} = 3;$$

$$t^{4-ЦД} = 2+3+0,5 = 5,5 \text{ при } M_{test} = 3.$$

Далее рассчитаем общую длительность разработки изделия с учетом условий, приведенных в таблице 2.1:

$$\begin{aligned} t_{p-ЦД} &= 40 + 120 + 120 + (35 + 20,5 + 15 + 40 + 30 + 40 + 30) + \\ &+ (14 + 12,5 + 10 + 20 + 25 + 40 + 30) + (4 + 5,5 + 8 + 8 + 20 + 40 + 30) + 80 + 16 = \\ &= 260 + 210,5 + 151,5 + 115,5 + 96 = 833,5 \end{aligned}$$

Единицей измерения длительности разработки изделия выступают часы.

Таким образом, длительность разработки изделия при подходе с применением технологии цифровых двойников при обозначенных в таблице 2.1 условиях составила 833,5 часов, или $\approx 104,2$ рабочих дня, то есть ≈ 21 неделю при 5-дневном графике работы предприятия.

Оценка времени (длительности) процессов разработки изделия с применением приведенных математических моделей обеспечит своевременный анализ и оценку возможностей последующей оптимизации процесса разработки в целях повышения результативности разработки.

Выводы по главе

1) Для обеспечения высокой результативности процессов разработки высокотехнологичных изделий машиностроения необходимо внедрять передовые цифровые и производственные технологии, которые обеспечат соответствие требованиям к изделию в минимальные сроки. Одной из таких технологий выступает технология разработки цифровых двойников. Традиционный подход к разработке изделий подразумевает ряд дорогостоящих итераций, связанных с проведением натурных испытаний и доводкой изделия, что увеличивает длительность разработки.

2) Разработанная процессная модель стадий разработки изделия при подходе с применением цифровых двойников демонстрирует возможности совершенствования процессов разработки изделия по результатам анализа приоритетов в управлении жизненным циклом изделия. Так, дорогостоящие итерации, связанные с перепроектированием конструкции изделия и проведением натурных испытаний, минимизируются за счет разработки цифрового двойника изделия, а также проведения множества цифровых (виртуальных) испытаний и моделирования технологических процессов изготовления изделия [11]. В результате исследования сформирована сравнительная модель традиционного подхода и подхода с применением цифровых двойников к организации процессов разработки изделия, содержащая наглядное отображение преимуществ цифровых двойников.

3) Разработанные процессные модели (рисунок 1.1 и 2.2) тесно связаны с

длительностью отдельных этапов разработки изделия. В связи с этим разработана математическая модель оценки времени разработки изделий при традиционном подходе и подходе с применением технологии разработки цифровых двойников [271; 275]. В рамках математической модели целевой функцией выступает снижение времени на разработку высокотехнологичного изделия. Ключевыми элементами математической модели выступают показатели, связанные с числом итераций по производству и испытаниям опытных образцов, а также числом итераций по проведению цифровых (виртуальных) испытаний и разработке моделей подсистем изделия [271]. Именно эти показатели позволяют достичь целевой функции по снижению длительности разработки.

4) Научной новизной исследования является разработанная процессная модель организации разработки изделия, отличающаяся учетом применения технологии разработки цифровых двойников и демонстрирующая возможность снижения длительности процессов разработки, а также математическая модель оценки времени разработки изделий при подходе с применением технологии разработки цифровых двойников.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

3.1 Описание элементов методики совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников

3.1.1 Общие положения методики совершенствования процесса разработки изделий с учетом внедрения технологии разработки цифровых двойников

Как было отмечено ранее, традиционный процесс разработки изделий подразумевает прохождение ряда итераций (шагов), направленных на перепроектирование изделия [11; 192], вследствие чего возникают переносы (задержки) сроков передачи конструкторской документации на последующие этапы.

Результативность процесса разработки в соответствии с предлагаемой методикой совершенствования процесса разработки изделий машиностроения оценивается с позиции 5 целевых показателей [10; 11; 275; 276]:

- Длительность процесса разработки изделия (t) [11; 271];
- Затраты процесса разработки изделия (S) [7; 192];
- Трудоемкость процесса разработки изделия (L) [275];
- Соответствие требованиям процесса разработки в разрезе требований к ресурсам и требований к эффективности процессов ($СТР$) [275];
- Соответствие требованиям технического задания на изделие ($ТЗ$), другими словами, соответствие требованиям матрицы требований ($СТЗ$) [275].

Приведенные в перечне целевые показатели методики могут быть раскрыты через целевые функции. Обеспечение заявленных показателей результативности направлено на совершенствование процессов разработки, оптимизацию затрат, повышение производительности работы инженерных подразделений, сокращение времени вывода продукции на рынок, а также обеспечение заявленных требований и необходимого уровня качества.

Далее укрупненно рассмотрены целевые показатели, приведена методика

оценки, обеспечения рассматриваемых показателей и удовлетворения целевым функциям в соответствии с этапами процессов разработки, затем в соответствующих подразделах через математическое описание раскрыт каждый целевой показатель отдельно.

Показатель «Длительность процесса разработки (t)» может быть раскрыт через показатели, представленные в главе 2:

$t_{p_цд}$ – суммарная длительность процессов разработки изделия с применением технологии цифровых двойников;

M_{sim} – число итераций (шагов) по перепроектированию подсистемы изделия по результатам цифровых испытаний при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников. Чем больше цифровых испытаний, тем выше уровень адекватности разрабатываемых моделей и выше вероятность соответствия требованиям [271; 275]. Однако в то же время трудовые, финансовые и временные затраты на разработку возрастают, в связи с этим показатель M_{sim} стремится к оптимальному числу проведенных цифровых испытаний изделия при соблюдении оптимальности затрат организации процессов моделирования ($M_{sim} \rightarrow opt$) и с учетом ограничений отрасли машиностроения;

M_{test} – число итераций (шагов) по перепроектированию изделия по результатам натурных испытаний при подходе к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников. Чем больше натурных испытаний, тем выше вероятность прохождения сертификационных и приемочных испытаний [271; 275]. Однако в то же время возрастают финансовые и временные затраты на разработку изделия, в связи с чем показатель M_{test} отражает оптимальное (в лучшем случае – минимальное) число натурных испытаний при соблюдении оптимального объема затрат на организацию процессов испытаний и вывода продукции на рынок ($M_{test} \rightarrow min$), а также ограничения по минимальному числу испытаний в отрасли.

Показатель «Затраты процесса разработки изделия (S)» определяется через ряд величин, которые включают объем затрат на заработную плату инженерных кадров и количество инженеров-конструкторов, инженеров-расчетчиков,

инженеров-технологов, системных инженеров; объем затрат на приобретение, поддержку и обновление инженерного программного обеспечения и цифровых инструментов, необходимых для разработки изделия; объем затрат на изготовление и испытания опытных образцов изделий с учетом числа итераций по перепроектированию изделия; затраты на НИОКР и сертификацию; прочие затраты, которые необходимы для организации процесса разработки изделий [7; 277]. Ключевым показателем, на который возможно повлиять без потери качества процесса разработки, выступает число итераций по перепроектированию изделия, в связи с чем число опытных образцов стремится к минимально возможному значению, что позволит снизить финансовые затраты на разработку. Подробнее описание затрат процесса разработки изделий представлено в параграфе 3.1.5.

Показатель «Трудоемкость процесса разработки изделия (L)» раскрывается через интеграцию взаимодействия инженеров-конструкторов, инженеров-расчетчиков, инженеров-технологов, в том числе за счет организации работы системных инженеров, обеспечивающих процесс разработки изделия с учетом подхода модельно-ориентированного системного инжиниринга. Подробнее про оценку трудоемкости разработки изделий представлено в параграфе 3.1.2.

Показатель «Соответствие требованиям процесса разработки ($СТР$)» подразумевает соответствие требованиям к ресурсной обеспеченности предприятия ($СТР^{P0}$) для организации процесса разработки, а также соответствие показателям эффективности и качества процесса разработки по результатам формирования конструкторской документации ($СТР^{ЭК}$) [190]. Подробнее про соответствие требованиям разработки изделий представлено в параграфе 3.1.3.

Показатель «Соответствие требованиям технического задания на изделие ($СТЗ$)» сфокусирован на балансировке всех требований и целевых показателей, предъявляемых к изделию, за счет декомпозиции системы требований и детальной проработки каждой подсистемы в процессе проектирования и моделирования [10]. Подробнее про соответствие требованиям технического задания представлено в параграфе 3.1.4.

В рамках методики предлагается внедрение технологии цифровых

двойников при соблюдении целевых показателей методики и выполнении целевых функций. Для реализации методики предлагается выполнение алгоритма создания цифрового двойника (см. параграф 3.2), в котором обозначены ключевые этапы процесса разработки с применением цифровых двойников, а также приведены ответственные лица, деятельность которых будет способствовать получению ожидаемых эффектов.

Графическое отображение методики совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников представлено на рисунке 3.1 с позиции необходимых инструментов и ресурсов, последовательности действий, целевых показателей результативности, имеющихся ограничений отрасли машиностроения, реализуемых принципов и теорий управления качеством, а также соответствия этапам жизненного цикла изделия на стадии разработки. Каждый аспект методики представлен подробнее в отдельных параграфах.

В рамках реализации предлагаемого алгоритма методика предполагает регулярную оценку и обеспечение ключевых показателей результативности в соответствии с группами процессов, выделенными на рисунке 2.2 и раскрытыми в алгоритме (см. рисунок 3.7, 3.8).

Так, на каждом этапе целесообразно *оценивать* и *обеспечивать* определенный перечень показателей:

1. Планирование предполагает оценку длительности (t), затрат (S) и трудоемкости (L) данного процесса для включения в общий показатель длительности разработки изделия, а также оценку соответствия требованиям разработки (общий уровень $СТР$), при этом должно быть обеспечено соответствие требованиям разработки в части ресурсной обеспеченности $СТР^{P0}$ и в части эффективности и качества $СТР^{ЭК}$, поскольку на данном этапе формируются возможности для достижения целевых показателей на последующих этапах;



Рисунок 3.1 – Методика совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников

Источник: разработано автором

2. Проектирование и моделирование предполагает оценку длительности (t), затрат (S) и трудоемкости (L) данного процесса, оценку уровня соответствия требованиям технического задания ($CTЗ$) и соответствия требованиям разработки (общий уровень $СТР$), а также достижение целевых показателей M_{sim} , L , $СТР^{P0}$ и $СТР^{ЭК}$, $\Delta CTЗ$ (показатели рассмотрены подробно в соответствующих подразделах);

3. Опытное производство и натурные испытания предполагают оценку длительности (t), затрат (S) и трудоемкости (L) данного процесса, оценку уровня соответствия требованиям технического задания ($CTЗ$) и соответствия требованиям разработки (общий уровень $СТР$), а также достижение целевых показателей M_{test} , L , S , $СТР^{P0}$ и $СТР^{ЭК}$;

4. Утверждение конструкторской документации (КД) предполагает оценку длительности (t), затрат (S) и трудоемкости (L) данного процесса, оценку уровня соответствия требованиям технического задания ($CTЗ$), оценку общего уровня соответствия требованиям разработки ($СТР$).

Таким образом, ключевые показатели результативности могут быть разбиты на две группы – показатели, которые необходимо оценивать на рассматриваемом этапе, и целевые показатели, которые могут быть обеспечены на данном этапе за счет выполнения шагов алгоритма (см. таблицу 3.1).

Таблица 3.1 – Оценка и обеспечение целевых показателей методики в разрезе основных этапов разработки

Наименование этапа / наименование показателя	Длительность (t)		Затраты (S)		Трудоемкость (L)		Соответствие требованиям процесса разработки ($СТР$)		Соответствие требованиям технического задания ($CTЗ$)	
	Оценка	Обеспе- чение	Оценка	Обеспе- чение	Оценка	Обеспе- чение	Оценка	Обеспе- чение	Оценка	Обеспе- чение
Планирование	✓	–	✓	–	✓	–	✓	✓ ($СТР^{P0}$, $СТР^{ЭК}$)	–	–
Проектирование и моделирование	✓	✓ (M_{sim})	✓	–	✓	✓	✓	✓ ($СТР^{P0}$, $СТР^{ЭК}$)	✓	✓ ($\Delta CTЗ$)
Опытное производство и натурные испытания	✓	✓ (M_{test})	✓	✓	✓	✓	✓	✓ ($СТР^{P0}$, $СТР^{ЭК}$)	✓	–
Утверждение конструкторской документации (КД)	✓	–	✓	–	✓	–	✓	–	✓	–

Источник: разработано автором

Расчет всех показателей на каждом рассматриваемом укрупненном процессе схематично отображен на рисунке 3.2.

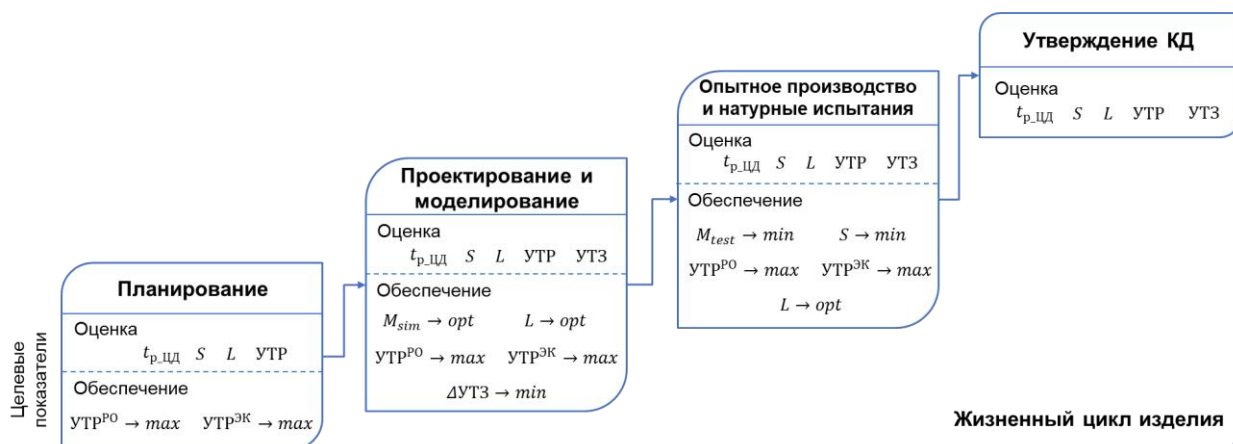


Рисунок 3.2 – Целевые показатели, рассчитываемые в рамках методики совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников

Источник: разработано автором [276]

Таким образом, в соответствии с заявленными показателями результативности цель разработки цифрового двойника заключается в проектировании изделия под заданные временные t и финансовые S затраты с учетом трудоемкости процессов разработки L и требований к процессу разработки $СТР$ для соответствия требованиям к продукции $СТЗ$.

3.1.2 Показатель трудоемкости процесса разработки изделия с учетом внедрения технологии цифровых двойников

Как отмечено выше, трудоемкость процесса разработки напрямую влияет на результативность разработки цифрового двойника по причине существующей тенденции усиления сочетания ролей инженера-конструктора (И-К), инженера-расчетчика (И-Р) и инженера-технолога (И-Т), а также расширением роли инженеров-расчетчиков и масштабированием деятельности системного инженера (СИ) [163; 278].

Смешение ролей предполагает масштабную трансформацию кадрового ландшафта инженерных подразделений, возникновению которой способствует повсеместная цифровизация и увеличение объема инженерных расчетов в процессе

разработки изделия. По этой причине возникла необходимость реорганизации инженерных служб и внедрения в процесс разработки системных инженеров, в задачи которых входит обеспечение работы инженеров в формате параллельного взаимодействия с применением модельно-ориентированного системного инжиниринга при разработке изделия [275].

Параллельная работа инженеров подразумевает осуществление обмена информацией между инженерами в формате «И-К ↔ И-Р ↔ И-Т», то есть регулярный обмен данными между всеми инженерами, задействованными в проекте. При этом системный инженер ведет, как правило, деятельность ментора-интегратора, осуществляет разделение задач между специализациями инженерных подразделений и самими инженерами, формирует единую структуру изделия и вехи проекта, в соответствии с которыми осуществляется дальнейшая разработка изделия. Системный подход тем самым обеспечивает учет множества требований к изделию, а также позволяет формировать единую цифровую модель изделия в соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021, которая объединяет результаты вычислений для каждой подсистемы и каждого компонента конструкции.

Данный подход предлагается взамен традиционного подхода, когда обмен информацией между инженерными подразделениями и ответственными лицами происходил в итерационном формате «К → Р → Т → К → ... → Т».

В традиционном подходе по итогам длительной проведенной работы один инженер осуществлял передачу результатов проекта другому, что, как правило, вызывало множество итераций, частый возврат к предыдущим стадиям и «доводку» [8] изделия до требуемых характеристик, по аналогии с «доводкой» изделия по результатам натурных испытаний. Согласно статистике, более 30% рабочего времени инженера-конструктора занимает организация процесса передачи данных [195].

Для устранения данных недостатков, помимо внедрения системных инженеров в деятельность разработки, предлагается внедрение платформенных решений, таких как SPDM-система [243], и методов системного инжиниринга. Данные технологии и инструменты обеспечат регулярное бесперебойное

взаимодействие инженеров-расчетчиков, инженеров-конструкторов и инженеров-технологов в процессе реализации проекта, а также эффективное вовлечение системного инженера для координации и слаженности работы в процессе проекта по разработке изделия. За счет этого возможно уменьшение времени, связанного с передачей информации и возвращением на предыдущие этапы разработки в целях «доводки» изделия.

Для математического описания показателя трудоемкости процесса разработки изделия с учетом внедрения технологии цифровых двойников примем следующие обозначения:

L – показатель, равный трудоемкости процесса разработки изделия с учетом внедрения технологии цифровых двойников;

C – число инженеров-конструкторов (И-К), привлеченных к процессу разработки изделия;

$L_c^{\text{конст}}$ – показатель, равный трудоемкости работы c -инженера-конструктора в процессе разработки изделия;

$$c = [1; C];$$

P – число инженеров-технологов (И-Т), привлеченных к процессу разработки изделия;

$L_p^{\text{техн}}$ – показатель, равный трудоемкости работы p -инженера-технолога в процессе разработки изделия;

$$p = [1; P];$$

E – число инженеров-расчетчиков (И-Р), привлеченных к процессу разработки изделия;

$L_e^{\text{расч}}$ – показатель, равный трудоемкости работы e -инженера-расчетчика в процессе разработки изделия;

$$e = [1; E];$$

SE – число системных инженеров (СИ), привлеченных к процессу разработки изделия;

$L_{se}^{\text{СИ}}$ – показатель, равный трудоемкости работы se -системного инженера в

процессе разработки изделия;

$$se = [1; SE];$$

H – число руководителей проекта и направлений (РП), привлеченных к процессу разработки изделия;

$L_h^{\text{рук}}$ – показатель, равный трудоемкости работы h -руководителя в процессе разработки изделия;

$$h = [1; H];$$

A – число проектных менеджеров (ПМ), привлеченных к процессу разработки изделия;

$L_a^{\text{проект}}$ – показатель, равный трудоемкости работы a -проектного менеджера в процессе разработки изделия;

$$a = [1; A];$$

D – число специалистов по программированию (Пр), привлеченных к процессу разработки изделия;

$L_d^{\text{прог}}$ – показатель, равный трудоемкости работы d -программиста в процессе разработки изделия;

$$d = [1; D];$$

W – число рабочих и операторов (Р), привлеченных к процессу разработки изделия в части опытного производства;

$L_{w_j}^{\text{опыт}}$ – показатель, равный трудоемкости работы w -рабочего в процессе разработки изделия в части организации и проведения опытного производства на конкретном j -цикле по перепроектированию ($j = [1; M_{test}]$, подробнее про циклы (итерации, шаги) по перепроектированию см. в главе 2);

$$w = [1; W];$$

X – число инженеров-испытателей (И-И), привлеченных к процессу разработки изделия в части натурных испытаний;

$L_{x_j}^{\text{исп}}$ – показатель, равный трудоемкости работы x -инженера-испытателя в процессе разработки изделия в части организации и проведения натурных испытаний на конкретном j -цикле по перепроектированию;

$$x = [1; X].$$

Отдельно стоит отметить, что трудоемкость работы инженера-расчетчика рассчитывается через две составляющие (3.1):

$$L_e^{расч} = \sum_{m=1}^M (t_{e_m}^{расч} + t_{e_m}^{переход}) \quad (3.1)$$

где M – число математических, компьютерных и цифровых моделей изделия, разработанных e -инженером-расчетчиком в процессе разработки изделия с применением технологии цифровых двойников;

$t_{e_m}^{расч}$ – длительность процесса разработки отдельных m -математических, компьютерных и цифровых моделей изделия, разработанных e -инженером-расчетчиком;

$t_{e_m}^{переход}$ – длительность процесса перехода отдельных m -математических, компьютерных и цифровых моделей изделия, разработанных e -инженером-расчетчиком, от одного инженера-расчетчика к другому инженеру.

При применении программно-технологической (цифровой) платформы для разработки цифрового двойника длительность передачи моделей между инженерами близка или равна нулю $t_{e_m}^{переход} \rightarrow 0$, тогда (3.2):

$$L_e^{расч} = \sum_{m=1}^M t_{e_m}^{расч} \quad (3.2)$$

Таким образом, суммарную трудоемкость процесса разработки изделия при внедрении технологии цифровых двойников можно описать следующим образом (3.3):

$$L = \sum_{c=1}^C L_c^{конст} + \sum_{p=1}^P L_p^{техн} + \sum_{e=1}^E L_e^{расч} + \sum_{se=1}^{SE} L_{se}^{CH} + \sum_{h=1}^H L_h^{рук} + \sum_{a=1}^A L_a^{проект} + \sum_{d=1}^D L_d^{прог} + \sum_{w=1, j=1}^{W, M_{test}} L_{w_j}^{оньм} + \sum_{x=1, j=1}^{X, M_{test}} L_{x_j}^{исп} \rightarrow opt \quad (3.3)$$

Единицей измерения трудоемкости разработки изделия выступают человеко-часы. Оценку трудоемкости процессов разработки необходимо осуществлять на протяжении всего цикла разработки для получения объективного суммарного результата.

На этапах проектирования и моделирования, опытного производства и натурных испытаний значение трудоемкости необходимо свести к минимально

возможному (оптимальному) значению ($L \rightarrow opt$) при сохранении или достижении заданного уровня качества. Оптимизация трудоемкости в процессах проектирования и моделирования может быть достигнута за счет привлечения системных инженеров, применения эффективных инженерных программных систем, таких как CAD- и CAE-системы, внедрения платформенных SPDM-решений, обеспечивающих минимальные трудозатраты на передачу данных, интеграцию между системами и пр., а также за счет регулярного анализа уровня адекватности получаемых результатов.

На этапе опытного производства и натурных испытаний достижение оптимального значения трудоемкости может быть достигнуто при условии внедрения технологии цифровых двойников в целях предварительного моделирования и инженерного анализа требуемых характеристик продукции, а также за счет автоматизации сбора и анализа данных по результатам натурных испытаний, сравнения данных с полученными результатами цифровых испытаний и уменьшения циклов по перепроектированию изделия при выполнении всех требований к нему.

3.1.3 Показатель соответствия требованиям процесса разработки изделия с учетом внедрения технологии цифровых двойников

В качестве объекта исследования выступают процессы разработки, которые в соответствии с ГОСТ Р 15.000–2016 предполагают освоение нового или модификацию, модернизацию, совершенствование существующего изделия [15].

Задачи процесса разработки изделия, кратко представленные в параграфе 1.1, служат основой для формирования требований к процессам разработки. На основе проведенного анализа в ходе исследования установлено, что требования процесса разработки могут быть сгруппированы в две основные группы, отличающиеся друг от друга с позиции обеспечения процесса (группа *а*) и результата (группа *б*):

а) требования к ресурсной обеспеченности предприятия, в рамках которых выделены основные требования к ресурсам, материально-техническому и кадровому оснащению предприятия, необходимым для технической организации

процесса разработки изделия;

б) требования к процессам разработки с точки зрения эффективности и качества, в рамках которых выделены показатели, соответствие которым необходимо по итогам утверждения конструкторской документации и которые демонстрируют результативность процесса разработки.

Кроме того, отдельно могут быть рассмотрены требования с точки зрения обеспечения факторов конкурентоспособности предприятия, таких как соотношение «цена – качество», эффективность процессов предприятия и пр. [279]

На основании поставленных в процессе разработки задач, а также для формирования системы требований к ресурсной обеспеченности, эффективности и качеству процессов разработки в целях достижения высокой результативности процесса разработки определены комплексные показатели процесса разработки I и II уровней, которые в дальнейшем могут быть детализированы на более низкий уровень единичных показателей (см. таблицу 3.3, представлена в конце параграфа) в соответствии с системным подходом.

Основные требования к организации разработки изделия с точки зрения ресурсной обеспеченности процесса разработки (рисунок 3.3) составляют 4 группы показателей [275].

Оценка соответствия требованиям к процессу разработки проходит с применением квалитетических и экспертных методов, методология оценки подробнее представлена далее.

Раскроем обозначенные группы показателей ресурсной обеспеченности:

1. Требования к материально-технической оснащенности, проектно-технологической, инженерной инфраструктуре (Hardware и Software) [275];

1.1. Наличие актуального верифицированного и валидированного специализированного инженерного программного обеспечения, обладающего высоким уровнем адекватности (подробнее о CAD-, CAM-, CAE-системах см. [163; 264; 265; 275; 280; 281]);



*MBSE (Model-Based Systems Engineering) – модельно-ориентированный системный инжиниринг
КД – конструкторская документация

Рисунок 3.3 – Схема взаимосвязей и взаимозависимости требований к ресурсной обеспеченности процессов разработки изделия при внедрении технологии цифровых двойников

Источник: разработано автором [275]

1.2. Наличие платформенного решения (например, программно-технологической платформы в соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 [239]), обеспечивающего эффективный обмен данными, их надежное хранение и управление ими, интеграцию и взаимодействие между инженерным программным обеспечением (подробнее о PLM-, PDM-, SPDM-системах см. [163; 188; 243–246; 281–283]);

1.3. Оборудованные инженерные рабочие места;

1.4. Оборудованная опытно-промышленная и испытательная площадка;

1.5. При необходимости – наличие вычислительных мощностей (высокопроизводительных вычислительных систем), центров обработки и хранения данных и других объектов инфраструктуры [275];

2. Требования к персоналу (Brainware [163]);

2.1. Мультидисциплинарная команда инженеров-конструкторов (И-К), инженеров-расчетчиков (И-Р), инженеров-технологов (И-Т), системных инженеров (СИ), обладающих компетенциями в области цифрового проектирования и моделирования, инженерного анализа [180], знаниями системного цифрового инжиниринга [180], компетенциями в разработке и эксплуатации цифровых двойников, а также опытом выполнения НИР и НИОКР в данной отрасли в разрезе областей наук и предметных областей (гидроаэродинамика, механика деформированного твердого тела и др.) [275];

2.2. Административная команда, включающая руководителей проектов и направлений, проектных менеджеров, обладающих компетенциями в области проектного менеджмента, знаниями в части внедрения и организации системной работы, эффективного процесса разработки систем и др. [275];

2.3. Команда по направлению программирования, обладающая компетенциями в обеспечении функционирования программно-инженерного стека, включая работу программно-технологической (цифровой) платформы, инженерного программного обеспечения, а также знаниями в адаптации программных средств под особенности процессов предприятия [275];

2.4. Команда по организации и проведению производства опытных образцов и последующих натурных испытаний продукции, которая включает рабочих, операторов, инженеров-испытателей, обладающих знаниями специфики производимой и испытуемой продукции, характеристик, обозначенных в нормативно-технической документации в части допусков и пределов, особенностей технологических процессов изготовления образцов, свойств сырья и материалов, используемых для опытных образцов, а также обладающих компетенциями в проведении испытаний и метрологических измерений, и др. [275];

3. Требования к технологиям;

3.1. Функциональная возможность формирования матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений [10; 163; 190; 253; 269; 270],

содержащей основные требования к изделию, соответствие которым обеспечивает выполнение технического задания и требуемый уровень надежности, качества, функциональности и ресурса продукции [275] (подробнее о соответствии требованиям к изделию см. в параграфе 3.1.4);

3.2. Обеспечение системного подхода к разработке на основе модельно-ориентированного системного инжиниринга [163; 275; 284];

3.3. Технологии проведения цифровых (виртуальных) испытаний на основе разработанных математических и компьютерных моделей высокого уровня адекватности в соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 [239] (подробнее про уровень адекватности см. в параграфе 3.1.6);

3.4. Технологии разработки цифровых двойников, включая технологии обеспечения применения цифровых двойников на всех стадиях жизненного цикла – разработки, производства, эксплуатации [275];

3.5. Возможность организации процессов сбора и обработки потоков данных, поступающих от изделия в процессе натурных испытаний, технологических процессов и производственных операций, а также в процессе эксплуатации (данные от физического изделия к цифровому двойнику); возможность организации обратных корректирующих (управляющих) воздействий от цифрового двойника, размещенного на программно-технологической платформе, к функционирующему изделию (информация от цифрового двойника обратно к изделию) с помощью исполнительных механизмов; другими словами, возможность формирования двусторонних информационных связей между цифровым двойником и изделием с применением инструментов интернета вещей [163; 275];

4. Требования к документации (конструкторской, технологической, эксплуатационной, ремонтной, сертификационной) [275];

4.1. Полнота, точность, актуальность, достоверность разработанной документации, что отражает эффективность процесса разработки и отсутствие необходимости дальнейших корректировок документации;

4.2. Соответствие документации профильным стандартам и нормативно-

техническим документам, при этом оценивается как соответствие стандартам на комплектность документов (например, ГОСТ 2.102–2013 [285]), так и отраслевым стандартам; также отраслевыми экспертами дополнительно могут быть сформированы требования применительно к конкретным наукоемким изделиям высокотехнологичной промышленности.

Стоит отметить, что результативность процесса в части формирования конструкторской документации, как правило, подтверждается в ходе технологической и метрологической экспертизы, а также нормоконтроля. Однако в данном исследовании процессы формирования конструкторской и технологической документации подробно не рассматриваются.

Взаимосвязь и взаимозависимость требований к ресурсному обеспечению процессов разработки наглядно отображены на рисунке 3.3. Соответствие данной системе требований к ресурсной обеспеченности должно быть обеспечено до начала процесса разработки цифрового двойника (на этапе планирования, как отображено на рисунке 3.2, а также в части матрицы требований – на этапе проектирования), что обеспечит достижение целевых показателей процесса разработки в разрезе длительности, финансовых затрат и трудоемкости, а также будет способствовать формированию полной и достаточной конструкторской документации и соответствию требованиям к изделию.

Уровень соответствия требованиям к ресурсной обеспеченности (3.4) оценивается экспертным путем за счет присвоения каждому требованию численного значения от 0 до 1 (на основе подхода, представленного в [286]):

$$\text{СТР}^{\text{P0}} = \sum_{r=1}^R \text{СТР}_r^{\text{P0}} \rightarrow \max \quad (3.4)$$

где СТР^{P0} – комплексный показатель соответствия требованиям к ресурсной обеспеченности предприятия из группы a , $\text{СТР}^{\text{P0}} > 0$;

СТР_r^{P0} – показатель соответствия r -требованию II уровня к ресурсной обеспеченности предприятия из группы a ;

$$\text{СТР}_r^{\text{P0}} \in [0; 1];$$

R – число требований II уровня к ресурсной обеспеченности предприятия из группы a .

Значения группы a целесообразно оценивать на протяжении всего цикла разработки, однако первостепенное внимание должно быть уделено на этапе планирования для обеспечения результативности. $СТР^{PO} \rightarrow \max$ на всех этапах за исключением этапа утверждения конструкторской документации.

В общем виде шкалу оценок значения показателей соответствия требованиям к процессам разработки можно представить в соответствии с диапазонами, приведенными в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Шкала оценок значения показателей соответствия требованиям разработки изделия с применением технологии цифровых двойников

Диапазон значений показателя $СТР^{PO}$	Уровень соответствия требованиям	Краткое описание
0–0,1	Не соответствует	Отсутствует соответствие требованию, реализация процесса разработки изделия с применением технологии цифровых двойников невозможна
0,1–0,3	Критически малый уровень соответствия	Соответствие требованию в малой степени, отклонение от удовлетворительного значения велико, реализация процесса разработки изделия с применением технологии цифровых двойников невозможна
0,3–0,7	Средний уровень соответствия	Частичное соответствие требованию, отклонение от достаточного значения существенно, но не критично, требуются доработки и улучшения для разработки изделия с применением технологии цифровых двойников
0,7–0,9	Достаточный уровень соответствия	Соответствие требованию в достаточной (высокой) степени, однако присутствуют некоторые отклонения, требуется доведение до следующего уровня соответствия для достижения результативности процесса разработки изделия с применением технологии цифровых двойников
0,9–1	Полное соответствие	Соответствие требованию в полной степени, обеспечены ресурсы и технологии для достижения максимально возможной результативности процесса разработки изделия с применением технологии цифровых двойников

Источник: составлено автором

Перейдем к группе показателей b . Требования к эффективности и качеству процессов разработки включают (но не ограничиваются) следующие показатели:

1. Показатели назначения и организационной эффективности процессов разработки, привязанные к целевому назначению разработки в целом – освоению высокотехнологичного изделия;

1.1. Эффективность освоения изделия в разрезе общего представления о результатах реализованного проекта по разработке изделия;

1.2. Эффективность применения методов цифрового проектирования и моделирования, инженерного анализа и инженерного программного обеспечения в процессе разработки изделия, что выражается в высоком уровне адекватности разработанных математических и компьютерных моделей, полученных результатов по итогам цифровых (виртуальных) испытаний;

1.3. Оптимальность используемых в процессе разработки ресурсов, в том числе трудовых, материальных, вычислительных и др.; данный показатель имеет важное значение для оценки качества и эффективности разработки в целом, показатель тесно связан с целевыми показателями в разрезе длительности, затрат и трудоемкости, при этом значение показателя варьируется от задачи к задаче;

1.4. Эффективность планирования процессов разработки, что выражается в оценке уровня проработанности плана и фактического выполнения задач проекта в рамках проектного менеджмента и соблюдения требований к срокам и ресурсам проекта;

1.5. Эффективность прохождения натурных и прочих испытаний в соответствии с ГОСТ 16504–81, необходимых для оценки соответствия требованиям технического задания; по результатам натурных испытаний оценивается возможность вывода продукции на рынок и эффективность освоения изделия;

2. Показатели стандартизации и унификации разрабатываемой продукции, которые подразумевают оценку характеристик изделия, позволяющую сопоставить разработанную конструкцию с имеющимися на рынке продуктами и оценить уникальность разработки;

2.1. Уровень изделия относительно уровня аналогов в разрезе характеристик, таких как стоимость, технические параметры, полнота

функциональных характеристик и др.;

2.2. Эффективность учета нормативно-правовой и нормативно-технической базы, в том числе отраслевых документов и технических регламентов;

2.3. Уровень оригинальности изделия и проработанности в разрезе ремонтпригодности и взаимозаменяемости деталей, функциональной полноты и т.д.;

3. Показатели безопасности процесса разработки и безопасности разработанного изделия;

3.1. Уровень безопасности труда в процессе разработки и в процессе опытного производства;

3.2. Учет экологических характеристик объекта с целью сокращения возможного воздействия на окружающую среду и обеспечения экологической безопасности и устойчивости при производстве и дальнейшей эксплуатации;

3.3. Уровень учета физико-механических свойств объекта и свойств используемого материала в целях производственной, технической, эксплуатационной и экологической безопасности, а также обеспечения адекватности реальным объектам и процессам;

3.4. Уровень соблюдения требований к обеспечению кибербезопасности процессов разработки во избежание кибератак и потенциальной утечки данных;

3.5. Уровень соблюдения требований к обеспечению кибербезопасности изделия в процессе эксплуатации и минимизации уязвимостей программной составляющей продукта;

4. Экономические показатели процесса разработки, тесно связанные с такими целевыми показателями процесса разработки изделия, как затраты и трудоемкость;

4.1. Достаточность количества инженеров-конструкторов, инженеров-технологов, инженеров-расчетчиков, системных инженеров для выполнения проекта в заданные сроки и в рамках заданного бюджета, а также обеспечения полного соответствия требованиям к компетенциям инженерной команды;

4.2. Достаточность количества сотрудников, составляющих

административную команду (руководителей и проектных менеджеров);

4.3. Достаточность количества сотрудников, составляющих команду программистов;

4.4. Достаточность количества сотрудников, привлеченных к организации и проведению производства опытных образцов и последующих натурных испытаний продукции;

4.5. Показатель себестоимости опытных образцов и уровень его соответствия ожидаемому значению;

4.6. Показатель ожидаемой себестоимости изделий при серийном производстве и его уровень относительно себестоимости опытного образца; данный показатель может быть оценен предварительно по результатам разработки изделия или оценен фактически по результатам серийного производства;

5. Показатели технологичности изделия (данный блок показателей тесно связан с выполнением требований к изделию и балансировкой матрицы требований, подробнее в параграфе 3.1.4);

5.1. Эффективность проработанности изделия на технологичность, патентоспособность (уровень техники) и уровень технического исполнения, в том числе с учетом соблюдения требований к изделию, патентной чистоты и проработанности на возможность технической реализации;

5.2. Показатель функциональности изделия в разрезе выполнения всех заявленных в техническом задании функциональных и технических требований к конструкции;

5.3. Корректность требований и целевых показателей к изделию, сформированных в техническом задании и в матрице требований.

По аналогии с группой *a*, данная группа показателей может быть оценена экспертным путем (3.5):

$$\text{СТР}^{\text{ЭК}} = \sum_{q=1}^Q \text{СТР}_q^{\text{ЭК}} \rightarrow \max \quad (3.5)$$

где $\text{СТР}^{\text{ЭК}}$ – комплексный показатель соответствия требованиям в части

эффективности и качества процесса разработки из группы $\bar{b}$, $СТР^{ЭК} > 0$;

$СТР_q^{ЭК}$ – показатель соответствия q -требованию II уровня в части эффективности и качества процесса разработки из группы $\bar{b}$;

$$СТР_q^{ЭК} \in [0; 1];$$

Q – число требований II уровня в части эффективности и качества процесса разработки из группы $\bar{b}$.

Единицей измерения показателя соответствия выступают условные единицы (у.е.) или доли (проценты). Максимально возможное значение $СТР^{ЭК}$ равно единице (максимально возможному значению $СТР_q^{ЭК}$), умноженной на количество оцениваемых показателей (в нашем случае $Q = 22$), следовательно, итоговое значение полученного комплексного показателя следует сравнить со значением, равным 22 у.е., что позволит выявить долю отклонений от желаемого уровня соответствия. Аналогично оценивается текущий и желаемый уровень $СТР^{P0}$, поскольку максимальное значение $СТР_r^{P0} = 1$, при этом число требований $R = 16$, следовательно, сравнение текущего уровня $СТР^{P0}$ необходимо проводить с 16 у.е.

По аналогии с показателями группы a , показатели группы $\bar{b}$ необходимо оценивать на каждом этапе процесса разработки, при этом на всех этапах должно быть обеспечено соответствие тем или иным показателям, то есть $СТР^{ЭК} \rightarrow \max$ на всем цикле разработки.

Шкала оценок значения показателей соответствия требованиям к процессу разработки в общем виде представлена в таблице 3.2. В случае если в процессе оценивания принимают участие разные эксперты, могут быть введены дополнительные обозначения результатов оценки конкретным экспертом, после чего усредняется итоговая оценка показателя соответствия согласно числу экспертов.

Таким образом, приведенные в данном параграфе требования к процессу разработки могут быть сведены в систему требований, представленную в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Система требований к процессу разработки в разрезе ресурсной обеспеченности, эффективности и качества

Комплексный показатель I уровня	Показатель II уровня
<i>а. Требования к ресурсной обеспеченности предприятия</i>	
1. Требования к материально-технической оснащенности, проектно-технологической, инженерной инфраструктуре (Hardware и Software)	1.1. Наличие актуального верифицированного и валидированного специализированного инженерного программного обеспечения, обладающего высоким уровнем адекватности
	1.2. Наличие платформенного решения
	1.3. Оборудованные инженерные рабочие места
	1.4. Наличие оборудованной опытно-промышленной и испытательной площадки
	1.5. Наличие вычислительных мощностей (высокопроизводительных вычислительных систем), центров обработки и хранения данных и др.
2. Требования к персоналу (Brainware)	2.1. Мультидисциплинарная команда инженеров-конструкторов, инженеров-расчетчиков, инженеров-технологов
	2.2. Административная команда
	2.3. Команда по направлению программирования
	2.4. Команда по опытному производству и натурным испытаниям
3. Требования к технологиям	3.1. Возможность формирования матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений [163]
	3.2. Обеспечение системного подхода к разработке на основе модельно-ориентированного системного инжиниринга [163]
	3.3. Технологии проведения цифровых (виртуальных) испытаний
	3.4. Технологии разработки цифровых двойников
	3.5. Возможность организации процессов сбора и обработки потоков данных, двусторонних информационных связей
4. Требования к документации	4.1. Полнота, точность и актуальность документации
	4.2. Соответствие документации стандартам
<i>б. Требования к эффективности и качеству процесса разработки</i>	
1. Показатели назначения и технологичности	1.1. Эффективность освоения изделия
	1.2. Эффективность применения методов цифрового проектирования и моделирования
	1.3. Оптимальность используемых ресурсов
	1.4. Эффективность планирования
	1.5. Эффективность прохождения натурных испытаний
2. Показатели стандартизации и унификации	2.1. Уровень изделия относительно аналогов
	2.2. Эффективность учета нормативно-правовой и нормативно-технической базы
	2.3. Уровень оригинальности изделия
3. Показатели безопасности	3.1. Уровень безопасности труда
	3.2. Учет экологических характеристик объекта
	3.3. Уровень учета физико-механических свойств объекта и свойств используемого материала
	3.4. Уровень кибербезопасности процессов разработки
	3.5. Уровень кибербезопасности изделия в процессе эксплуатации
4. Экономические показатели	4.1. Достаточность количества инженеров-конструкторов, инженеров-технологов, инженеров-расчетчиков, системных

Комплексный показатель I уровня	Показатель II уровня
	инженеров
	4.2. Достаточность количества сотрудников административной команды
	4.3. Достаточность сотрудников команды программистов
	4.4. Достаточность сотрудников для проведения опытного производства и натурных испытаний
	4.5. Показатель себестоимости опытных образцов
	4.6. Показатель ожидаемой себестоимости изделий при серийном производстве
5. Показатели технологичности изделия	5.1. Эффективность проработанности на технологичность и патентоспособность (уровень техники)
	5.2. Показатель функциональности изделия
	5.3. Корректность требований к изделию

Источник: разработано автором

Таким образом, проведенное исследование позволило сформировать перечень комплексных показателей и требований к процессам разработки I и II уровня в разрезе двух групп показателей – ресурсной обеспеченности (группа *а*) и эффективности и качества (группа *б*). С учетом значимости процесса разработки изделия в рамках вывода изделий на рынок целесообразно регулярно осуществлять работы, направленные на оценку соответствия заявленным требованиям к ресурсам и требованиям к эффективности и качеству процесса разработки и далее, при необходимости, проводить работы, направленные на увеличение или достижение оптимальных значений отдельных показателей. Данный инструмент позволяет выявить проблемные зоны и запланировать проведение мероприятий в целях совершенствования процесса разработки с позиции уровня ресурсной оснащенности, эффективности и качества процессов предприятия.

3.1.4 Показатель соответствия требованиям технического задания на изделие при его разработке с учетом внедрения технологии цифровых двойников

В ГОСТ Р ИСО 9000–2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» среди процессов проектирования и разработки указано преобразование требований к изделию в более детальные требования к нему [287]. Данный подход, в соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 и опытом деятельности Инжинирингового центра СПбПУ, воплощен в принципах формирования матрицы требований, целевых показаний и ресурсных ограничений к изделию [163; 188; 239;

243].

Соответствие требованиям технического задания (шире – соответствие требованиям матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений изделия при разработке цифрового двойника) (СТЗ) подразумевает снижение разницы между эталонным и фактическим значением показателя матрицы, то есть проведение балансировки матрицы требований. Под балансировкой матрицы следует понимать детальный анализ численных значений целевых показателей, их взаимного влияния друг на друга при изменении модели конструкции изделия и поиск рационального решения, для которого будут выполнены все требования технического задания [163].

В результате балансировки матрицы достигаются и удовлетворяются все требования, заявленные заказчиком, обеспечиваются высокие показатели надежности и качества разрабатываемой продукции, а также технологичность изделия (подробнее о балансировке матрицы см. [270; 10; 269; 253; 277]). Соответствие требованиям технического задания тесно связано с достижением высокого уровня качества изделия [190].

Среди основных показателей и требований, предъявляемых к изделию, можно выделить стандартные показатели, универсальные для большинства сложных изделий. К ним относятся показатели надежности, долговечности, ремонтпригодности производимого изделия, бесперебойности электротехнической системы [190] и др.

Кроме того, при проектировании изделий машиностроения критически важны геометрические, физико-механические и технические показатели и параметры, вес, прочность, мощность, материалоемкость, энергоемкость [190] и др. Отдельно можно выделить показатель возможности интеграции изделия с другими системами, безопасность эксплуатации и прочие показатели, которые также необходимо обеспечивать для каждого конкретного экземпляра изделия при серийном производстве.

Дополнительно можно выделить показатели, наличие которых влияет на удовлетворенность конечных пользователей продукта, то есть кастомизированные

показатели, которые, однако, оказывают наименьший вклад в уровень качества изделия, особенно изделия машиностроения. Таким образом, показатели и характеристики изделия, требуемые к удовлетворению и которые, как правило, раскрыты в техническом задании на изделие, можно условно разделить на четыре основные группы, представленные в таблице 3.4 – надежность, технические параметры, функциональные свойства и кастомизированные показатели. При формировании системы показателей учтены показатели, представленные в универсальной матрице требований к изделию, разработанной автором [10]. В таблице 3.4 приведены обозначенные группы показателей и их декомпозиция на показатели II уровня. Декомпозиция показателей предполагает применение квалиметрических методов управления качеством.

Таблица 3.4 – Универсальные показатели и требования, предъявляемые к изделию машиностроения

№	Группа показателей (I уровень)	Описание группы показателей	Наименование показателя (II уровень)
1	Показатели надежности	Данная группа показателей формирует характеристики изделия в разрезе надежности разрабатываемой и производимой продукции	Надежность выполнения функций [288]
			Долговечность сохранения свойств, износостойкость
			Безотказность [288]
			Ударопрочность
			Бесперебойность электротехнической системы
			Ремонтопригодность, заменяемость деталей
			Особенности диагностики и технического обслуживания
2	Технические параметры	Данная группа включает показатели, связанные с геометрическими и физико-механическими особенностями изделия, обеспечивающими его внешний облик и процессы, протекающие в изделии	...
			Материалоемкость
			Вес, размер
			Мощность изделия
			Энергоемкость
			Допустимая нагрузка
			Особенности переработки и утилизации компонентов
3	Функциональные свойства	Данная группа показателей напрямую связана с выполнением функциональных задач разрабатываемого и производимого изделия	Экологичность материалов, показатели концентрации вредных веществ
			...
			Функциональная совместимость
			Безопасность эксплуатации
			Соблюдение режимов работы
4	Кастомизированные показатели	Данная группа показателей обеспечивает соответствие изделия потребительским ожиданиям,	Срок службы и условия эксплуатации
			...
			Цвет, форма
			Технический дизайн
			Показатели комфорта

		преимущественно не влияющим на функциональные характеристики и свойства	Унификация с другими продуктами из линейки (при наличии)
			Эргономичность
			...

Источник: разработано автором [10; 190; 253; 269]

Приведенные выше группы показателей поделены условно, при этом перечень показателей и групп показателей может быть дополнен и уточнен в соответствии с типом продукции, отраслевой принадлежностью, особенностями конкретного производства и др. [10; 190]

Для создания цифрового двойника изделия, как рассмотрено в главе 1, разрабатывается многоуровневая система требований и применяются подходы модельно-ориентированного системного инжиниринга. Многоуровневая система требований включает в себя все требования и целевые показатели, которые необходимо достичь (удовлетворить) для разработки изделия высокого уровня качества и соответствия ожиданиям заказчика. Модельно-ориентированный системный инжиниринг позволяет учесть все особенности проектируемой системы в связи с применением системного подхода к разработке, а также позволяет обеспечить тщательную проработку системы в процессе проведения множества цифровых испытаний системы при разработке цифрового двойника.

В рамках ГОСТ Р 57700.37–2021 установлено определение к термину многоуровневая система требований – это иерархическая система взаимосвязанных структур данных, содержащих формализованные требования к изделию и его составным частям [239]. В процессе создания цифрового двойника требования верхних уровней декомпозируются, как правило, на целевые показатели и ресурсные ограничения для нижних уровней. Достижение целевых показателей всех нижних уровней должно обеспечивать соответствие требованиям более высокого уровня [163].

Достижение целевых показателей многоуровневой системы требований обеспечивается за счет проведения цифровых (виртуальных) испытаний системы, ее составных частей и материалов. Как правило, целевые показатели разрабатываемой системы и ее составных элементов вступают друг с другом в противоречие. В результате полученная после проведения всех цифровых

испытаний матрица должна иметь сбалансированные значения целевых показателей, которые изначально «конфликтовали» между собой [8; 163], другими словами, должна быть проведена балансировка матрицы.

Опыт разработки и применения цифровых двойников изделий, решения фронтальных инженерных задач высокотехнологичной промышленности Инжиниринговым центром СПбПУ свидетельствует о том, что вышеуказанная матрица может содержать несколько десятков тысяч показателей и ограничений, которые каскадируются и декомпозируются в общем случае на 8 уровней [289] «сверху вниз», то есть в соответствии с подходом нисходящего проектирования [289].

В процессе разработки изделия с применением системного подхода проводится балансировка показателей системы, что позволяет найти оптимально реализуемое рациональное решение, соответствующее всем требованиям каждого уровня. Для нахождения оптимального состояния проектируемого объекта в ходе исследования разработана математическая модель балансировки системы требований к изделию, заключающаяся в сокращении разницы (отклонения) между текущим значением численного показателя матрицы и его эталонным (заданным, желаемым) значением [270].

Для примера возьмем матрицу, состоящую из трех уровней. Конструкция вложенных матриц может состоять из множества уровней в зависимости от количества требований технического задания, опыта и компетенций системного инженера, осуществляющего проработку матрицы требований на целевые показатели, а также в соответствии со спецификой изделия.

Матрица требований к изделию может быть представлена в виде древовидной структуры, как отображено на рисунке 3.4.

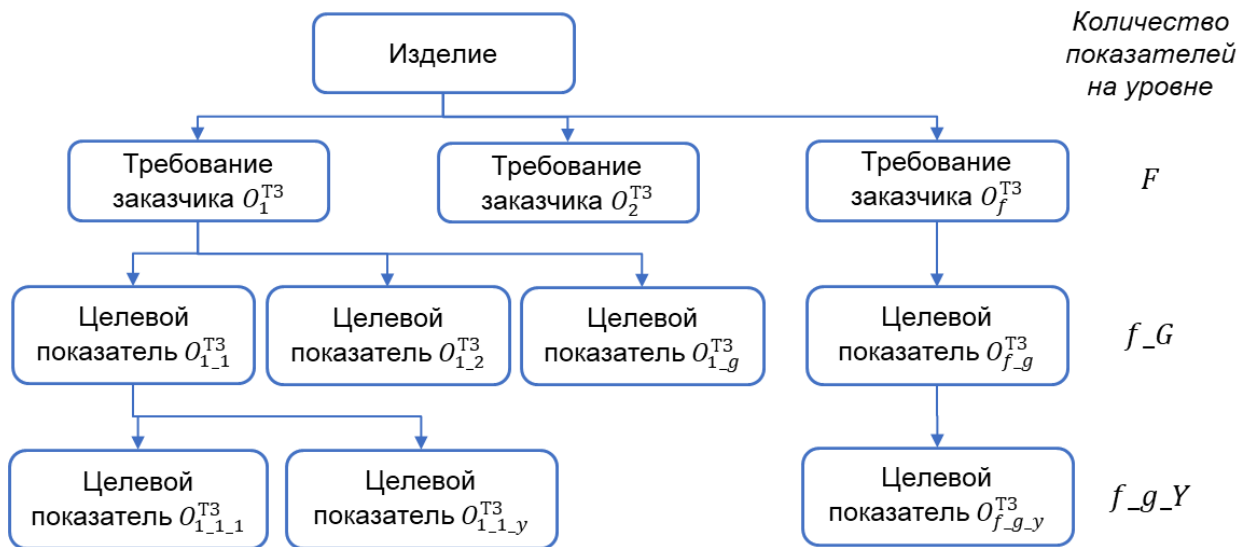


Рисунок 3.4 – Схема древовидной структуры декомпозиции требований к изделию с обозначением показателей

Источник: составлено автором

Примем следующие обозначения математической модели балансировки:

f – порядковый номер требования заказчика к изделию;

$f = [1; F]$;

g – порядковый номер целевого показателя к изделию на I уровне, связанном с номером требования заказчика f ;

$g = [1; f_G]$;

y – порядковый номер целевого показателя к изделию на II уровне, связанном с g -номером целевого показателя для требования заказчика f ;

$y = [1; f_g_Y]$;

O_f^{T3} – значение f -требования заказчика к изделию, соответствующее значению из технического задания;

$O_{f_g}^{T3}$ – значение g -целевого показателя к f -требованию заказчика, сформированное на основе декомпозиции требований заказчика из технического задания;

$O_{f_g_y}^{T3}$ – значение y -целевого показателя к g -целевому показателю f -требования заказчика, сформированное на основе декомпозиции требований заказчика из технического задания;

$O_f^{\text{реш}}$ – значение f -требования заказчика к изделию, полученное в результате формирования цифрового решения конструкции изделия;

$O_{f-g}^{\text{реш}}$ – значение g -целевого показателя к f -требованию заказчика, полученное в результате формирования цифрового решения конструкции изделия;

$O_{f-g-y}^{\text{реш}}$ – значение y -целевого показателя к g -целевому показателю f -требования заказчика, полученное в результате формирования цифрового решения конструкции изделия;

$O_f^{\exists}$ – значение f -требования заказчика к изделию, соответствующее эталонному значению на основании технического задания и (или) проработки системным инженером;

$O_{f-g}^{\exists}$ – значение g -целевого показателя к f -требованию заказчика, соответствующее эталонному значению на основании технического задания и (или) проработки системным инженером;

$O_{f-g-y}^{\exists}$ – значение y -целевого показателя к g -целевому показателю f -требования заказчика, соответствующее эталонному значению на основании технического задания и (или) проработки системным инженером.

Важно отметить, что величины f_G и f_g_Y отличаются в зависимости от того или иного номера f и g . Для каждого $O_f^{\text{ТЗ}}$ существует множество $O_f^{\text{ТЗ}} = \{O_{f-1}^{\text{ТЗ}}, O_{f-2}^{\text{ТЗ}}, \dots, O_{f-g}^{\text{ТЗ}}\}$, и аналогично для каждого $O_{f-g}^{\text{ТЗ}}$ существует множество $O_{f-g}^{\text{ТЗ}} = \{O_{f-g-1}^{\text{ТЗ}}, O_{f-g-2}^{\text{ТЗ}}, \dots, O_{f-g-y}^{\text{ТЗ}}\}$.

Аналогично для каждого $O_f^{\text{реш}}$ существует множество $O_f^{\text{реш}} = \{O_{f-1}^{\text{реш}}, O_{f-2}^{\text{реш}}, \dots, O_{f-g}^{\text{реш}}\}$, для каждого $O_{f-g}^{\text{реш}}$ существует множество $O_{f-g}^{\text{реш}} = \{O_{f-g-1}^{\text{реш}}, O_{f-g-2}^{\text{реш}}, \dots, O_{f-g-y}^{\text{реш}}\}$.

При этом $O_f^{\exists} = 1$, $O_{f-g}^{\exists} = 1$, $O_{f-g-y}^{\exists} = 1$, поскольку в общем случае эталонное значение рассчитывается как $O_f^{\exists} = \frac{O_f^{\text{ТЗ}}}{O_f^{\text{ТЗ}}}$, $O_{f-g}^{\exists} = \frac{O_{f-g}^{\text{ТЗ}}}{O_{f-g}^{\text{ТЗ}}}$, $O_{f-g-y}^{\exists} = \frac{O_{f-g-y}^{\text{ТЗ}}}{O_{f-g-y}^{\text{ТЗ}}}$. $O^{\exists}$ принято для осуществления свертки параметров с целью приведения показателей к единой размерности [277].

Отдельно необходимо ввести значение показателя, отражающего отклонение полученного решения $O_{f-g-y}^{\text{реш}}$ от значения технического задания $O_{f-g-y}^{\text{ТЗ}}$, а также ввести весовые коэффициенты показателей. Введем обозначения:

$\Delta\text{СТЗ}$ – общий уровень отклонений полученных значений показателей разрабатываемого изделия относительно значений показателей технического задания; отклонения должны быть минимальны или отсутствовать, $\Delta\text{СТЗ} \rightarrow \min$;

O_{f-g-y} – значение y -целевого показателя к g -целевому показателю f -требования заказчика, полученное в результате оценки уровня отклонений цифрового решения конструкции изделия от значения технического задания;

V_{f-g-y} – весовой коэффициент y -целевого показателя к g -целевому показателю f -требования заказчика (3.6);

$$\sum_{f=1, g=1, y=1}^{F, f-G, f-g-Y} V_{f-g-y} = 1 \quad (3.6)$$

Тогда отдельное значение показателя отклонения следует рассчитывать на наиболее низком уровне, в нашем случае – на уровне II. Показатель отклонения рассчитывается следующим образом (3.7):

$$O_{f-g-y} = \frac{O_{f-g-y}^{\text{реш}}}{O_{f-g-y}^{\text{ТЗ}}} \quad (3.7)$$

при условии, что $O_{f-g-y}^{\text{ТЗ}} > 0$ [10].

Тогда формула математической модели балансировки матрицы требований имеет вид (3.8):

$$\Delta\text{СТЗ} = \sum_{f=1, g=1, y=1}^{F, f-G, f-g-Y} (V_{f-g-y} (|O_{f-g-y} - O_{f-g-y}^{\text{ТЗ}}|)) \rightarrow \min \quad (3.8)$$

Важно отметить, что в формуле математической модели балансировки матрицы требований (3.8) введен модуль в целях нивелирования отрицательного значения, получаемого в том случае, когда $O_{f-g-y} < 1$. В обратном случае, когда $O_{f-g-y} > 1$, то есть когда $O_{f-g-y}^{\text{реш}} > O_{f-g-y}^{\text{ТЗ}}$, необходимо провести анализ в зависимости от конкретного оцениваемого показателя, следует ли в данном случае

считать, что $O_{f_g_y} = 1$, поскольку превышение показателя из технического задания является более предпочтительным вариантом, или же следует провести работу по корректировке конструкции изделия, чтобы снизить отклонение $O_{f_g_y}^{\text{реш}}$ от $O_{f_g_y}^{\text{ТЗ}}$, поскольку в данном случае отклонение не является желаемым или отклонение может привести к критическому нарушению балансировки между другими показателями изделия.

Приведенный выше подход к балансировке матрицы требований к изделию подходит для большинства решаемых промышленностью задач в части разработки изделий машиностроения.

Уровень соответствия требованиям технического задания оценивается в первую очередь по результатам моделирования, другими словами, переход к опытному производству и натурным испытаниям должен осуществляться только в результате полного соответствия требованиям технического задания на основе результатов цифрового проектирования и моделирования. Подтверждение соответствия требованиям технического задания осуществляется по результатам натурных испытаний и результат фиксируется в конструкторской документации, другими словами, *СТЗ* оценивается после каждого этапа разработки за исключением этапа планирования. Единицей измерения показателя соответствия выступают условные единицы (у.е.) или доли (проценты).

Таким образом, результативность процесса разработки зависит от показателей, учтенных при декомпозиции системы изделия на подсистемы и имеющих определенную значимость (вес). Применение MBSE при организации процессов разработки позволит сформировать цифровую модель изделия, провести цифровые испытания каждого варианта конструкции изделия и получить рациональное решение с учетом огромного числа параметров за счет балансировки показателей [163]. При этом соответствие требованиям, предъявляемым к изделию, обеспечивает качество и надежность производимой продукции и тем самым гарантирует конкурентоспособность машиностроительного предприятия.

3.1.5 Показатель затрат на разработку изделий при подходе с применением технологии цифровых двойников

Оценка затрат на разработку изделий с применением технологии цифровых двойников, как представлено в методике, является значимым показателем, отражающим результативность внедрения цифрового двойника в процессы проектирования и инженерного анализа. В целях описания элементов, составляющих затраты на разработку изделия, построена математическая модель оценки затрат на разработку изделий с применением технологии цифровых двойников.

Для построения математической модели примем следующие обозначения:

$S^{\text{конст}}$ – среднемесячная заработная плата инженеров-конструкторов (И-К), привлеченных к процессу разработки изделия (включая страховые взносы);

C – число инженеров-конструкторов (И-К), привлеченных к процессу разработки изделия;

$c = [1; C]$;

$t_c^{\text{конст}}$ – количество месяцев, отработанных c -инженером-конструктором (И-К) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия;

$t^{\text{конст}}$ – суммарное количество месяцев, отработанных инженерами-конструкторами (И-К) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия (3.9);

$$t^{\text{конст}} = \sum_{c=1}^C t_c^{\text{конст}} \quad (3.9)$$

$S^{\text{техн}}$ – среднемесячная заработная плата инженеров-технологов (И-Т), привлеченных к процессу разработки изделия (включая страховые взносы);

P – число инженеров-технологов (И-Т), привлеченных к процессу разработки изделия;

$p = [1; P]$;

$t_p^{\text{техн}}$ – количество месяцев, отработанных p -инженером-технологом (И-Т) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия;

$t^{\text{техн}}$ – суммарное количество месяцев, отработанных инженерами-технологами (И-Т) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия (3.10);

$$t^{\text{техн}} = \sum_{p=1}^P t_p^{\text{техн}} \quad (3.10)$$

$S^{\text{расч}}$ – среднемесячная заработная плата инженеров-расчетчиков (И-Р), привлеченных к процессу разработки изделия (включая страховые взносы);

E – число инженеров-расчетчиков (И-Р), привлеченных к процессу разработки изделия;

$$e = [1; E];$$

$t_e^{\text{расч}}$ – количество месяцев, отработанных e -инженером-расчетчиком (И-Р) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия;

$t^{\text{расч}}$ – суммарное количество месяцев, отработанных инженерами-расчетчиками (И-Р) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия (3.11);

$$t^{\text{расч}} = \sum_{e=1}^E t_e^{\text{расч}} \quad (3.11)$$

$S^{\text{СИ}}$ – среднемесячная заработная плата системных инженеров (СИ), привлеченных к процессу разработки изделия (включая страховые взносы);

SE – число системных инженеров (СИ), привлеченных к процессу разработки изделия;

$$se = [1; SE];$$

$t_{se}^{\text{СИ}}$ – количество месяцев, отработанных se -системным инженером (СИ) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия;

$t^{\text{СИ}}$ – суммарное количество месяцев, отработанных системными инженерами (СИ) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия (3.12);

$$t^{\text{СИ}} = \sum_{se=1}^{SE} t_{se}^{\text{СИ}} \quad (3.12)$$

$S^{\text{рук}}$ – среднемесячная заработная плата руководителей проекта и направлений (РП), привлеченных к процессу разработки изделия (включая

страховые взносы);

H – число руководителей проекта и направлений (РП), привлеченных к процессу разработки изделия;

$$h = [1; H];$$

$t_h^{\text{рук}}$ – количество месяцев, отработанных h -руководителем (РП) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия;

$t^{\text{рук}}$ – суммарное количество месяцев, отработанных руководителями (РП) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия (3.13);

$$t^{\text{рук}} = \sum_{h=1}^H t_h^{\text{рук}} \quad (3.13)$$

$S^{\text{проект}}$ – среднемесячная заработная плата проектных менеджеров (ПМ), привлеченных к процессу разработки изделия (включая страховые взносы);

A – число проектных менеджеров (ПМ), привлеченных к процессу разработки изделия;

$$a = [1; A];$$

$t_a^{\text{проект}}$ – количество месяцев, отработанных a -проектным менеджером (ПМ) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия;

$t^{\text{проект}}$ – суммарное количество месяцев, отработанных проектными менеджерами (ПМ) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия (3.14);

$$t^{\text{проект}} = \sum_{a=1}^A t_a^{\text{проект}} \quad (3.14)$$

$S^{\text{прог}}$ – среднемесячная заработная плата специалистов по программированию (Пр), привлеченных к процессу разработки изделия (включая страховые взносы);

D – число специалистов по программированию (Пр), привлеченных к процессу разработки изделия;

$$d = [1; D];$$

$t_d^{\text{прог}}$ – количество месяцев, отработанных d -специалистом по

программированию (Пр) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия;

$t^{\text{прог}}$ – суммарное количество месяцев, отработанных специалистами по программированию (Пр) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия (3.15);

$$t^{\text{прог}} = \sum_{d=1}^D t_d^{\text{прог}} \quad (3.15)$$

$S^{\text{опыт}}$ – среднемесячная заработная плата рабочих и операторов (Р), привлеченных к процессу разработки изделия в части опытного производства (включая страховые взносы);

W – число рабочих и операторов (Р), привлеченных к процессу разработки изделия в части опытного производства;

$$w = [1; W];$$

$t_w^{\text{опыт}}$ – количество месяцев, отработанных w -рабочим или оператором (Р) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия в части опытного производства;

$t^{\text{опыт}}$ – суммарное количество месяцев, отработанных рабочими и операторами (Р) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия в части опытного производства (3.16);

$$t^{\text{опыт}} = \sum_{w=1}^W t_w^{\text{опыт}} \quad (3.16)$$

$S^{\text{исп}}$ – среднемесячная заработная плата инженеров-испытателей (И-И), привлеченных к процессу разработки изделия в части натурных испытаний (включая страховые взносы);

X – число инженеров-испытателей (И-И), привлеченных к процессу разработки изделия в части натурных испытаний;

$$x = [1; X].$$

$t_x^{\text{исп}}$ – количество месяцев, отработанных x -инженером-испытателем (И-И) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия в части натурных испытаний;

$t^{\text{исп}}$ – суммарное количество месяцев, отработанных инженерами-

испытателями (И-И) в привязке к конкретному проекту по разработке изделия в части натурных испытаний (3.17).

$$t^{исп} = \sum_{x=1}^X t_x^{исп} \quad (3.17)$$

С учетом обозначенных выше элементов можно привести формулу затрат на оплату работы сотрудников (3.18):

$$S_{общ}^{сotr} = S^{const} t^{const} + S^{техн} t^{техн} + S^{расч} t^{расч} + S^{СИ} t^{СИ} + S^{рук} t^{рук} + S^{проект} t^{проект} + S^{прог} t^{прог} + S^{опыт} t^{опыт} + S^{исп} t^{исп} \quad (3.18)$$

Дополним затраты на процессы разработки затратами на приобретение инженерного программного обеспечения, научно-исследовательские, сертификационные работы, а также прочими затратами:

$S_z^{ПО}$ – затраты на приобретение или продление лицензии на z-инженерное программное обеспечение, используемое в процессе разработки изделия, а также платформенные решения для обеспечения процесса разработки цифрового двойника;

N_z^{PM} – количество рабочих мест, для которых приобретена или продлена лицензия на z-инженерное программное обеспечение, используемое в процессе разработки изделия;

$$z = [1; Z];$$

$S^{серт}$ – затраты на проведение сертификации изделия (при необходимости);

$S^{НИР}$ – затраты на проведение научно-исследовательских работ и патентных исследований (при необходимости);

$S^{проч}$ – прочие затраты, которые понесло предприятие на стадии разработки изделия и которые не учтены в других показателях; к таким затратам можно отнести затраты на амортизацию оборудования, фонд оплаты труда для административно-управленческого и вспомогательного персонала, коммунальные расходы, транспортные расходы, затраты на командирование, а также другие накладные, общепроизводственные, общехозяйственные и административно-управленческие расходы [7; 192].

Также необходимо учесть затраты на проведение всех необходимых

натурных испытаний:

$S_{j-u}^{обр}$ – затраты на производство и последующее проведение натурных испытаний u -образца в рамках j -цикла по перепроектированию ($j = [1; M_{test}]$, подробнее про циклы (итерации, шаги) по перепроектированию см. в главе 2); затраты на изготовление и проведение испытаний u -образцов может отличаться в разных j -циклах, поскольку, во-первых, может быть накоплен опыт проведения испытаний данного типа изделия, во-вторых, могут требоваться разные условия проведения натурных испытаний и разные параметры переналадки опытного производства, в-третьих, с каждым последующим j -циклом может меняться перечень видов испытаний, меняться количество испытываемых узлов и пр.;

$$u = [1; U].$$

Таким образом, математическую модель оценки затрат на разработку изделия можно описать следующим образом (3.19):

$$S_{цд} = S_{общ}^{comp} + \sum_{z=1}^Z (S_z^{ПО} N_z^{PM}) + \sum_{j=1, u=1}^{M_{test}, U} S_{j-u}^{обр} + S^{септ} + S^{НИП} + S^{проч} \rightarrow \min \quad (3.19)$$

где $S_{цд}$ – затраты на процессы разработки изделия с учетом внедрения технологии цифровых двойников.

Единицей измерения затрат на процессы разработки выступают рубли (руб.) или условные единицы (у.е.) при необходимости.

При этом важно отметить, что проведение опытного производства и натурных испытаний может проводиться силами сторонних организаций, в связи с чем взамен затрат на заработную плату рабочих и операторов (Р), инженеров-испытателей (И-И), затрат на опытные образцы необходимо ввести показатель, обозначающий затраты на проведение опытного производства и натурных испытаний:

$S^{НИ}$ – суммарные затраты на проведение опытного производства и натурных испытаний всех u -опытных образцов всех j -циклов по перепроектированию, включая оплату услуг сторонней организации, затраты на изготовление опытных образцов, сырье и материалы, подготовку и освоение производства, пусковые затраты и др.

При этом отсутствуют затраты на заработную плату рабочих и инженеров-испытателей (3.20):

$$S_{\text{общ}}^{\text{сomp}} = S_{\text{конст}} t_{\text{конст}} + S_{\text{техн}} t_{\text{техн}} + S_{\text{расч}} t_{\text{расч}} + S_{\text{СИ}} t_{\text{СИ}} + S_{\text{рук}} t_{\text{рук}} + S_{\text{проект}} t_{\text{проект}} + S_{\text{прог}} t_{\text{прог}} \quad (3.20)$$

Тогда математическая модель оценки затрат на процессы разработки изделия при проведении опытного производства и натурных испытаний с привлечением сторонних организаций (3.20) может быть записана следующим образом (3.21):

$$S_{\text{ЦД}} = S_{\text{общ}}^{\text{сomp}} + \sum_{z=1}^Z (S_z^{\text{ПО}} N_z^{\text{PM}}) + S^{\text{НИ}} + S^{\text{серт}} + S^{\text{НИР}} + S^{\text{проч}} \rightarrow \min \quad (3.21)$$

Как было отмечено ранее, одной из целевых функций процесса разработки является уменьшение затрат процесса разработки ($S_{\text{ЦД}} \rightarrow \min$). Достижение целевой функции может быть реализовано при оптимальном числе опытных образцов и проведенных натурных испытаний в соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 [239]. Это связано с тем, что не все затраты следует уменьшать, так как, например, сокращение работников или заработной платы, уменьшение количества используемого инженерного программного обеспечения и прочих работ может повлиять на качество изделия и качество разрабатываемых моделей в отрицательную сторону.

При этом становится ясно, что существует линейная зависимость затрат на разработку изделия от числа опытных образцов в том случае, если затраты на изготовление каждого образца являются одинаковыми (фиксированными), а также если принять за независимые переменные все затраты, связанные с оплатой труда, закупкой лицензий инженерного программного обеспечения и проведением дополнительных работ. Однако, как было отмечено выше, общие затраты на изготовление каждого опытного образца зависят как от числа самих образцов (из-за масштабирования производства), так и от числа циклов по перепроектированию.

На рисунке 3.5 продемонстрирована экономия затрат при разработке изделия с учетом внедрения технологии цифровых двойников – зеленым цветом обозначен объем затрат при разработке с применением цифровых двойников, красным цветом – объем затрат при традиционном подходе к разработке. Толстой

зеленой линией нанесена длительность разработки при внедрении цифрового двойника (на основе рисунка 2.3), красной толстой линией нанесена длительность разработки при традиционном подходе.

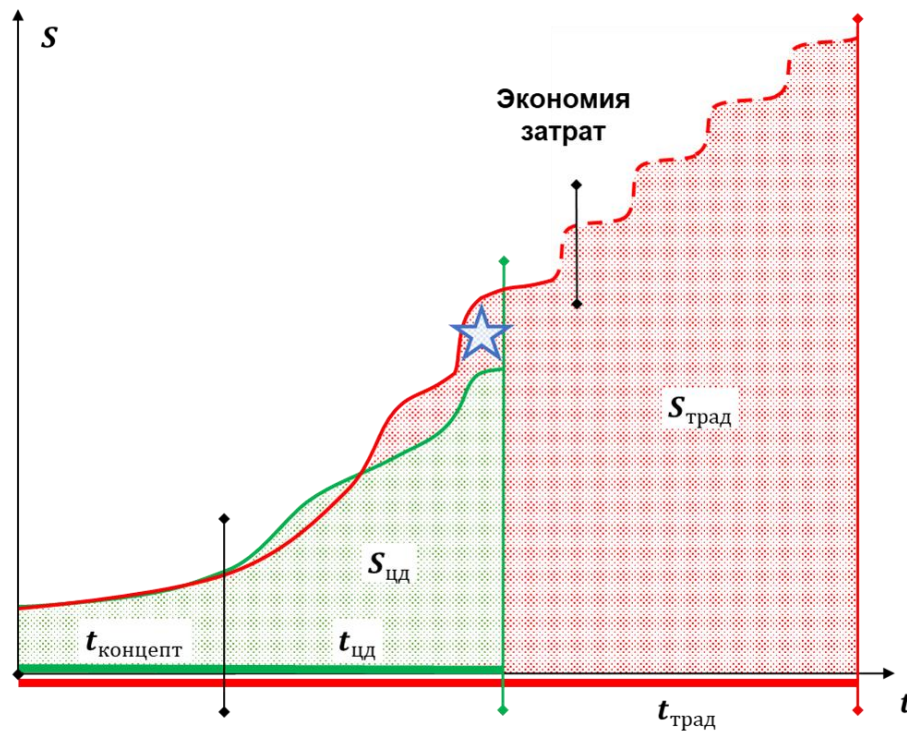


Рисунок 3.5 – Модель экономии затрат при разработке изделий с применением технологии разработки цифровых двойников

Источник: разработано автором [192]

Красными штриховыми линиями обозначено потенциальное число натурных испытаний, которых, как было отмечено ранее, значительно больше, чем при усовершенствованном подходе. Синим цветом обозначен первый цикл натурных испытаний, по результатам которого:

- при традиционном подходе осуществляется переход к перепроектированию и повторным испытаниям;
- при усовершенствованном подходе осуществляется переход к серийному производству по результатам прохождения натурных испытаний с первого (минимально необходимого) раза.

Таким образом подтверждаются заявленные в национальном стандарте ГОСТ Р 57700.37–2021 преимущества и результативность внедрения технологии разработки цифровых двойников в промышленность с точки зрения длительности

разработки изделия, затрат на разработку и уровня качества продукта. Реализация проекта по внедрению технологии цифровых двойников на предприятии может потребовать дополнительных затрат, однако получение потенциальных эффектов при реализации текущего и последующих проектов разработки изделий должно перекрыть затраты на внедрение технологии. Данный вопрос требует отдельного тщательного исследования и в текущей работе не рассматривается.

3.1.6 Целевые функции методики совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников

Приведенные ранее целевые функции процесса разработки изделия с применением технологии цифровых двойников можно свести в итоговую таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – Целевые функции методики совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников

Целевой показатель методики	Целевая функция методики	Формулы математических моделей, описывающие целевую функцию
Длительность процесса разработки изделия (t)	$t \rightarrow \min$ (реализуется за счет $M_{test} \rightarrow \min$) $M_{sim} \rightarrow opt$	$t_{\text{ЦД}} = t^{1-\text{ЦД}} + t^{2-\text{ЦД}} +$ $+ \sum_{j=1}^{M_{\text{test}}} \left(\sum_{k=1}^{M_{\text{sim}}} (t_{jlk}^{3-\text{ЦД}} + t_{jlk}^{4-\text{ЦД}}) + t_j^{5-\text{ЦД}} + t_j^{6-\text{ЦД}} + t_j^{7-\text{ЦД}} + t_j^{8-\text{ЦД}} + t_j^{9-\text{ЦД}} \right) +$ $+ t^{10-\text{ЦД}} + \varepsilon \rightarrow \min$ $\begin{cases} t_{\text{ЦД}} \leq t_{\max} \\ M_{\text{test}} \ll N_{\text{test}} \\ M_{\text{test}} \leq M_{\text{test}}^{\max} \\ M_{\text{test}} \geq M_{\text{test}}^{\min} \end{cases}$ $t_{\text{ЦД}} > 0, t_{\max} > 0$
Затраты процесса разработки изделия (S)	$S \rightarrow \min$	$S_{\text{ЦД}} = S_{\text{общ}}^{\text{comp}} + \sum_{z=1}^Z (S_z^{\text{ПО}} N_z^{\text{PM}}) +$ $+ \sum_{j=1, u=1}^{M_{\text{test}}, U} S_{j-u}^{\text{обп}} + S^{\text{сепм}} + S^{\text{НИР}} + S^{\text{проч}} \rightarrow \min$ $S_{\text{ЦД}} \leq S_{\max}, S_{\text{ЦД}} > 0, S_{\max} > 0$
Трудоемкость процесса разработки изделия (L)	$L \rightarrow opt$	$L = \sum_{c=1}^C L_c^{\text{конст}} + \sum_{p=1}^P L_p^{\text{мехн}} + \sum_{e=1}^E L_e^{\text{расч}} + \sum_{se=1}^{SE} L_{se}^{\text{СИ}} + \sum_{h=1}^H L_h^{\text{рук}} +$ $+ \sum_{a=1}^A L_a^{\text{проект}} + \sum_{d=1}^D L_d^{\text{прог}} + \sum_{w=1, j=1}^{W, M_{\text{test}}} L_{w-j}^{\text{опым}} + \sum_{x=1, j=1}^{X, M_{\text{test}}} L_{x-j}^{\text{учн}} \rightarrow opt$ $L \leq L_{\max}, L > 0, L_{\max} > 0$

Соответствие требованиям процесса разработки (СТР)	$СТР^{PO} \rightarrow \max,$ $СТР^{ЭК} \rightarrow \max$	$СТР^{PO} = \sum_{r=1}^R СТР_r^{PO} \rightarrow \max$ $СТР^{ЭК} = \sum_{q=1}^Q СТР_q^{ЭК} \rightarrow \max$ $СТР^{PO} > 0, СТР^{ЭК} > 0$
Соответствие требованиям технического задания (СТЗ)	$\Delta СТЗ \rightarrow \min$	$\Delta СТЗ = \sum_{f=1, g=1, y=1}^{F, f, G, f, g, Y} (V_{f-g-y} (O_{f-g-y} - O_{f-g-y}^3)) \rightarrow \min$

Источник: разработано автором [290]

Как правило, любой проект по разработке изделия ограничивается тремя составляющими: бюджетом, сроками реализации проекта, имеющимся количеством сотрудников. В связи с этим математически представим обозначенные ограничения, в соответствии с которыми требуется многокритериальная оптимизация целевых показателей результативности (3.22):

$$\begin{cases} t_{ЦД} \leq t_{\max} \\ S_{ЦД} \leq S_{\max} \\ L \leq L_{\max} \end{cases} \quad (3.22)$$

где $t_{\max}$ – максимально возможная длительность выполнения проекта в соответствии с заданными сроками, $t_{ЦД} > 0, t_{\max} > 0$;

$S_{\max}$ – максимально возможный объем затрат на выполнение проекта в соответствии с заданным бюджетом, $S_{ЦД} > 0, S_{\max} > 0$;

$L_{\max}$ – максимально возможная трудоемкость проекта в соответствии с имеющейся численностью сотрудников, привлеченных к реализации проекта, и характеристиками проекта, $L > 0, L_{\max} > 0$.

Как было отмечено ранее, данные ограничения для каждой отрасли промышленности, типа и сложности изделия имеют свою специфику. Для наглядности сформируем сравнительную таблицу с показателями в разрезе временных, финансовых и трудовых затрат в привязке к отраслям применения. Сравнение проведено по двум сценариям – допустимые значения в отрасли при традиционном подходе к разработке, значения при внедрении цифровых двойников и большом числе итераций цифровых (виртуальных) испытаний. В части

отраслевой специфики рассмотрена разработка беспилотного летательного аппарата (данные представлены согласно оценке экспертов в авиастроении) и разработка сельскохозяйственной техники [291] (см. таблицу 3.6). Значения при подходе к разработке с применением цифрового двойника является приемлемым ограничением для отраслевого применения.

Таблица 3.6 – Ограничения целевых функций методики совершенствования процесса разработки изделий на примере разработки БПЛА и разработки сельскохозяйственной техники

Наименование показателя результативности	Единица измерения	Значения при традиционном подходе к разработке	Значения при подходе к разработке с применением цифровых двойников
Разработка беспилотного летательного аппарата			
Испытания БПЛА			
Временные затраты на цикл натурных испытаний $t \rightarrow \min$	мес.	24–36	1–5
Число натурных испытаний $M_{test} \rightarrow \min$	шт.	10–50	1–5
Стоимостные затраты на цикл натурных испытаний $S \rightarrow \min$	млн руб.	100	1
Число привлеченных специалистов $L \rightarrow opt$	чел.	>15	3
Разработка сельскохозяйственной техники			
Временные затраты на цикл натурных испытаний $t \rightarrow \min$	мес.	10–18	2–5
Число натурных испытаний $M_{test} \rightarrow \min$	шт.	20–50	3–10
Стоимостные затраты на цикл натурных испытаний $S \rightarrow \min$	млн руб.	5–50	1–3
Число привлеченных специалистов $L \rightarrow opt$	чел.	>10	3–5

Источник: составлено автором

Приведем оценку зависимости уровня адекватности цифровой модели изделия (содержащей разработанные математические и компьютерные модели изделия) и трудоемкости реализации проекта в части расчетов и инженерного анализа.

Рассмотрим трудоемкость реализации расчетов (разработки САЕ-моделей и проведения цифровых испытаний). Как было приведено выше, $L \rightarrow opt$, при этом напомним:

$L_e^{\text{расч}}$ – показатель, равный трудоемкости работы e -инженера-расчетчика в процессе разработки изделия;

E – число инженеров-расчетчиков (И-Р), привлеченных к процессу разработки изделия;

$$e = [1; E];$$

M – число математических, компьютерных и цифровых моделей изделия, разработанных e -инженером-расчетчиком в процессе разработки изделия с применением технологии цифровых двойников;

$t_{e_m}^{\text{расч}}$ – длительность процесса разработки отдельных m -математических, компьютерных и цифровых моделей изделия, разработанных e -инженером-расчетчиком;

$$L_e^{\text{расч}} = \sum_{m=1}^M t_{e_m}^{\text{расч}} \text{ при } t_{e_m}^{\text{переход}} \rightarrow 0.$$

Тогда в целях упрощения примем, что вклад отдельного e -инженера-расчетчика в данном процессе не важен, в связи с чем $E = 1$. Тогда (3.23):

$$L^{\text{расч}} = \sum_{m=1}^M t_m^{\text{расч}} \quad (3.23)$$

Таким образом, возникает линейная зависимость между количеством разработанных моделей M и длительностью отдельного расчета $t_m^{\text{расч}}$, в связи с чем примем, что длительность каждого расчета условно одинакова, тогда (3.24):

$$L^{\text{расч}} = Mt^{\text{расч}} \quad (3.24)$$

Обозначим предел длительности выполнения проекта t_{max} . Предел трудоемкости расчетов находится на пересечении графика трудоемкости расчетов $L^{\text{расч}}$ с пределом по длительности выполнения расчетов t_{max} , соответствующим пределу длительности проекта в целом.

Также введем показатель, отражающий адекватность расчетов (3.25):

$A^{\text{ЦМ}}$ – показатель уровня адекватности разработанной цифровой модели изделия;

$A^{\text{ММ}}$ – показатель уровня адекватности разработанных M -математических и компьютерных моделей изделия; как было обозначено выше,

итоговую адекватность составляют отдельные математические модели и определяющий их уровень адекватности;

$$A^{LM} = \sum_{m=1}^M A_m^{MM} \rightarrow \max \quad (3.25)$$

В соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 [239] и подходом, приведенным в [163; 175], адекватность модели растет в процессе проведения инженерного анализа, в связи с чем в соответствии с графиком адекватности из ГОСТ Р 57700.37–2021 адекватность модели стремится к уровню адекватности изделия (100%), однако никогда не сможет его достичь в связи с неточностями цифровых моделей относительно реальных процессов и объектов. Приведем на графике 3.5 данный предел адекватности и обозначим его $A_{\max}^{\text{ЦМ}}$.

При этом функция адекватности цифровой модели носит свойства замедляющегося роста, то есть адекватность характеризуется асимптотическим приближением к 1, $A^{\text{ЦМ}} < 1$.

Оптимальная трудоемкость расчетов при разработке изделия может быть описана как достижение допустимого уровня адекватности с учетом того, что соблюдены условия максимальной длительности и максимальной трудоемкости разработки. Как представлено на рисунке 3.6, увеличение (прирост) вычислительных ресурсов и числа цифровых испытаний не приводит к значительному увеличению точности модели после превышения пределов трудоемкости и длительности проекта, другими словами, нет существенного прироста адекватности и дальнейшие расчеты неэффективны.

В связи с этим оптимальным значением адекватности цифровой модели и, следовательно, цифрового двойника, будет адекватность, достигнутая в точке $L_{\text{opt}}^{\text{расч}}$, поскольку соблюдается оптимальность по уровню трудоемкости и длительности, следовательно, оптимальность по уровню объема затрат на реализацию проекта.

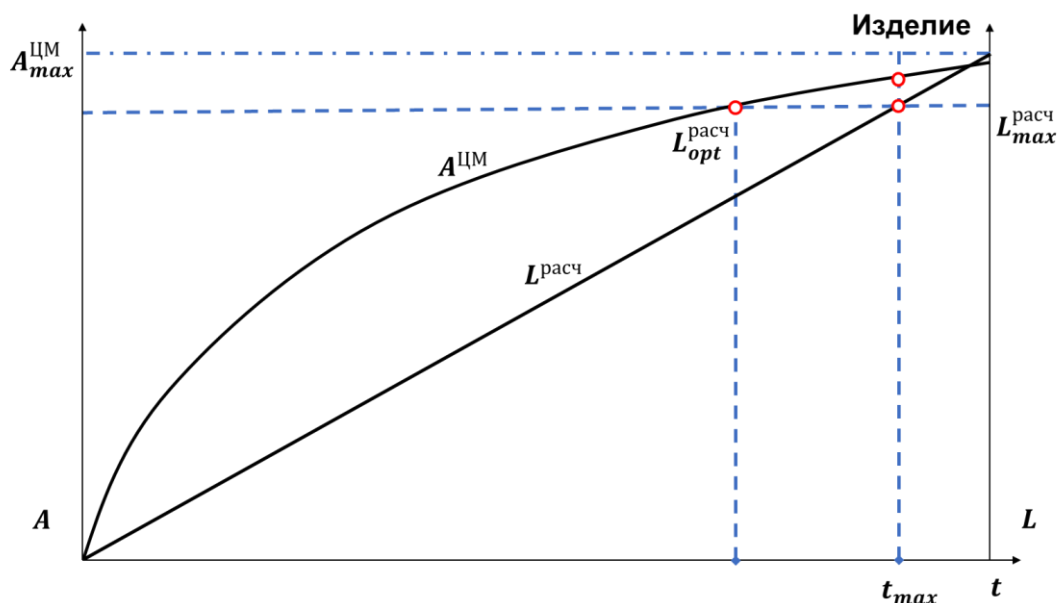


Рисунок 3.6 – Зависимость трудоемкости расчетов и длительности проекта от уровня адекватности цифровой модели изделия при разработке с применением технологии цифровых двойников

Источник: разработано автором

Таким образом, совершенствование процесса разработки изделия с применением технологии цифровых двойников обеспечит получение эффектов с учетом потенциального уменьшения и достижения оптимальности временных, трудовых и финансовых затрат проекта за счет снижения числа опытных образцов и проводимых натурных испытаний при соблюдении требований к оптимальности трудоемкости процессов, соответствия требованиям технического задания и при условии выполнения требований к процессам разработки [11]. Достижение данных эффектов возможно за счет прохождения алгоритма по разработке изделия при внедрении цифрового двойника, представленного далее.

3.2 Алгоритм процесса разработки изделия при внедрении технологии разработки цифровых двойников

Реализация вышеприведенной методики в части достижения целевых показателей возможна за счет прохождения алгоритма по разработке и применению цифрового двойника изделия [192].

Для наглядности предлагаемого подхода к разработке изделия проведено сравнение с традиционным подходом к разработке, который заключается в

незначительном применении технологий цифрового проектирования и моделирования (как рассмотрено в главе 1, см. рисунок 1.2), и разработано 2 алгоритма по разработке изделия:

- 1) Алгоритм усовершенствованного процесса разработки изделия при внедрении технологии разработки цифровых двойников (см. рисунок 3.7);
- 2) Алгоритм усовершенствованного процесса разработки, производства и эксплуатации изделия при внедрении технологии разработки цифровых двойников с учетом системы менеджмента качества и обозначением вклада сотрудников, участвующих на отдельных этапах (см. рисунок 3.8).

Представленные укрупненные процессы разработки изделия в соответствии с процессной моделью и сформированная в методике группа требований к ресурсной обеспеченности определяют укрупненные группы (блоки) процессов разработки изделия, которые выделены на разработанных алгоритмах (закрашено цветом от синего до фиолетового).

Алгоритм разработки изделия с применением цифрового двойника разработан в том числе на основе опыта деятельности структурных подразделений СПбПУ, составляющих основу Экосистемы технологического развития СПбПУ, по реализации проектов, связанных с проведением цифрового проектирования и моделирования, применением методов инженерного анализа и внедрением цифровых двойников изделий в интересах высокотехнологичной промышленности [200].

Так, на алгоритмах выделены подготовительные процессы (синий цвет), реализуемые со стороны заказчика. Данные процессы обеспечивают формирование концепции разрабатываемого изделия, подготовку и утверждение технического задания и передачу исходных данных от заказчика к исполнителю.

Важно отметить существенную особенность – в данном блоке процессов не рассматриваются процессы проектного менеджмента и перечень передаваемых исходных данных. Это связано с тем, что исполнитель проекта по разработке высокотехнологичного изделия может быть как в структуре заказчика (например, подразделение, ответственное за проведение научно-исследовательских работ,

отдел системного инжиниринга под руководством главного конструктора или конструкторское бюро, расположенное в структуре предприятия), так и вне структуры (например, инжиниринговый центр, выполняющий работу в рамках договора с заказчиком [292]). Различия между проектными процессами в обоих случаях могут оказывать влияние на исходные данные, перечень сопроводительных документов, сроки выполнения проекта и другие элементы процесса, что также определяет наличие возможных дополнительных промежуточных этапов.

Следующий блок алгоритмов включает процессы планирования работы (голубой цвет), которые содержат инициацию проекта, получение и анализ исходных данных, проведение предварительных научно-исследовательских работ для анализа возможности реализации проекта при необходимости, планирование графика работ и формирование рабочей группы исполнителей. Данная группа процессов направлена на подготовку предприятия к процессам непосредственно разработки и может быть уточнена в соответствии с особенностями той или иной позиции исполнителя проекта относительно структуры заказчика (конструкторское бюро в структуре предприятия или инжиниринговый центр вне структуры).

Третий блок процессов разработки на алгоритмах заключается в проектировании и моделировании изделия (зеленый цвет). Это ключевой блок разработки, который определяет дальнейшие результаты этапов испытаний, производства и эксплуатации продукции. Именно в данном блоке процессов зафиксированы различия рассматриваемых подходов к разработке – традиционного и усовершенствованного.

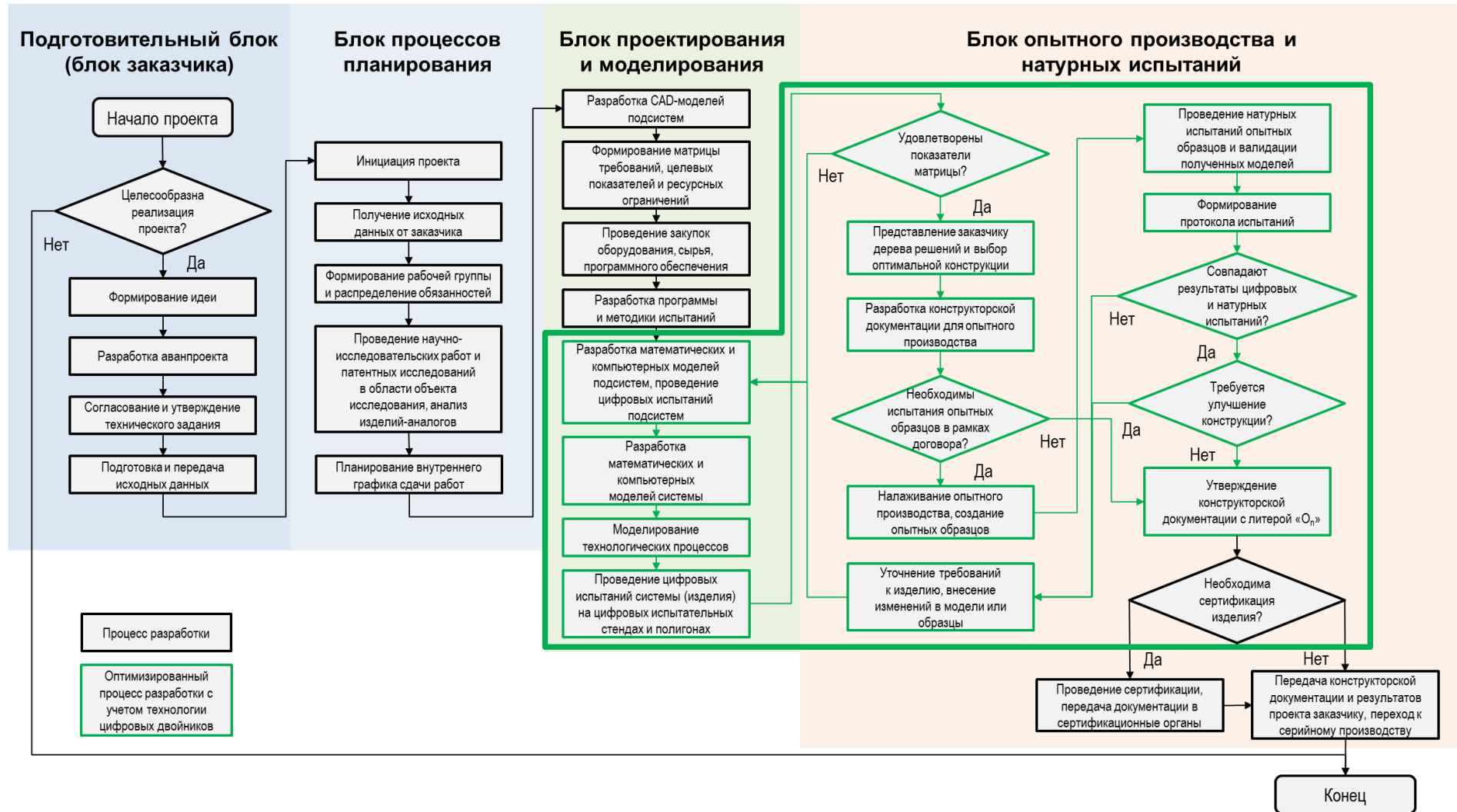


Рисунок 3.7 – Алгоритм усовершенствованного процесса разработки изделия при внедрении технологии разработки цифровых двойников (источник: разработано автором [192])

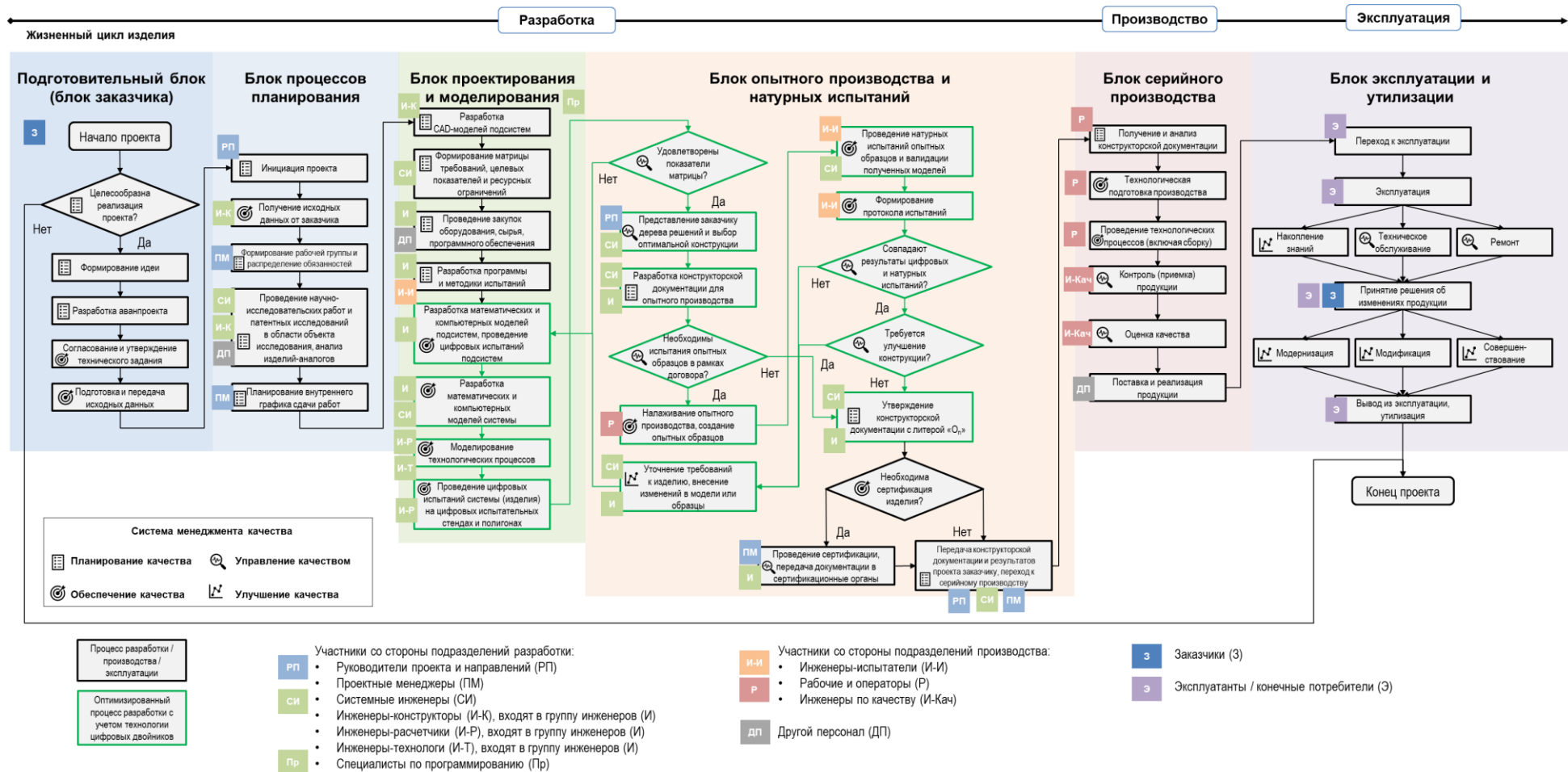


Рисунок 3.8 – Алгоритм усовершенствованного процесса разработки, производства и эксплуатации изделия при внедрении технологии разработки цифровых двойников с учетом системы менеджмента качества (источник: разработано автором [192])

Усовершенствованный подход в данном блоке процессов разработки включает важный процесс, как правило, отсутствующий в традиционной практике – формирование матрицы требований и целевых показателей к изделию. Как было рассмотрено ранее, матрица является важным инструментом, обеспечивающим соответствие требованиям к изделию, которые заявлены в техническом задании (см. параграф 3.1). Отсутствие данного этапа может привести к нарушению согласованности между параметрами и характеристиками изделия, возникновению так называемых «конфликтов» между показателями [8; 163] или «тонких эффектов» [293], которые не были оценены и влияние которых не было предугадано, в связи с чем будет отсутствовать сбалансированная система показателей изделия. Последствием этого может выступать непрохождение натурных испытаний или даже выход системы из строя вплоть до аварийно-опасного состояния.

Кроме того, усовершенствованный подход с учетом внедрения цифрового двойника предполагает разработку математических и компьютерных моделей подсистем, проведение цифровых (виртуальных) испытаний на цифровых (виртуальных) испытательных стендах и полигонах, что является более результативным процессом относительно проектирования и моделирования при традиционном подходе [11; 243]. На данном этапе важно отметить взаимодействие всех инженеров – конструкторов, технологов, расчетчиков, системных инженеров, что обеспечит результативность мультидисциплинарного системного цифрового инжиниринга [180; 275].

Таким образом, третий блок процессов разработки, связанный с процессами проектирования и моделирования изделия, содержит ключевое отличие между традиционным и усовершенствованным подходом, которое заключается во внедрении инструментов цифрового проектирования и моделирования в увеличенном объеме, что позволит достичь соответствие требованиям технического задания, то есть достичь целевые показатели процесса разработки.

Данный блок процессов зависит от имеющегося материально-технического оснащения, преимущественно в части используемых программных систем и

цифровой платформы. Несмотря на потенциально возможное повышение результативности при применении цифровых двойников (включая технологии цифрового проектирования и моделирования и программно-технологическую (цифровую) платформу в соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 [239]), этот блок процессов является дорогостоящим для реализации, в связи с чем необходимо проведение оценки, следует ли выполнять данный блок работ собственными силами (что более затратно, однако имеет потенциал последующего использования инструментов и компетенций персонала в других проектах по разработке изделий) или передавать на выполнение в сторонний инжиниринговый центр (что может являться более выгодным с точки зрения отсутствия затрат на развертывание и содержание инфраструктуры, расширение персонала, однако вынуждает регулярно взаимодействовать со сторонним исполнителем и оплачивать услуги по НИОКР).

Четвертый блок процессов разработки включает опытное производство и проведение натурных испытаний (оранжевый цвет). В традиционном подходе данный блок процессов выделен красным цветом, что означает несоответствие целям организации и потенциальное возникновение потерь, связанных с перепроектированием.

Преимущества внедрения технологии цифровых двойников и возможное устранение потерь на данном этапе (или нивелирование эффектов) объясняется алгоритмом усовершенствованного подхода, в рамках которого блок процессов опытного производства и натурных испытаний содержит дополнительные процессы (этапы). Среди них – оценка соответствия требованиям заказчика, предоставление заказчику дерева решений в целях обоснованного выбора оптимального варианта конструкции разрабатываемого изделия, а также сравнение полученных экспериментальных данных с результатами цифровых испытаний.

После данных процессов при необходимости корректируют как разработанную цифровую модель, так рабочую конструкторскую документацию, по результатам чего формируется конструкторская документация с литерой «О_н» по аналогии с традиционным подходом. Становится очевидным, что формирование конструкторской документации неразрывно связано со всеми процессами

разработки изделия, при этом является результатом прохождения всех испытаний изделия, включая приемочные испытания. Именно получение конструкторской документации является завершающим этапом стадии разработки и позволяет перейти от конструкторской подготовки производства к технологической подготовке и организации производства.

На приведенном алгоритме усовершенствованного подхода выделение этапов зеленой рамкой демонстрирует основные процессы, за счет которых происходит влияние на достижение приведенных в методике целевых показателей при процессах проектирования и моделирования, проведения цифровых (виртуальных) испытаний, удовлетворении матрицы требований, производстве опытных образцов и проведении натурных испытаний [200].

Важно отметить два существенных момента. Во-первых, как раскрыто в главе 2, применение технологий цифрового проектирования и моделирования обеспечивает прохождение натурных испытаний за минимально необходимое число (см. рисунок 2.2) [11; 243].

Во-вторых, в авиастроении и, как свидетельствуют результаты процессов масштабирования, в других отраслях обрабатывающей промышленности формируется тенденция проведения «цифровой сертификации», которая предполагает прохождение всех необходимых видов испытаний с первого раза, включая сертификационные испытания. По данному направлению в России ведутся мероприятия, направленные на разработку платформенных решений, обеспечивающих прохождение «цифровой сертификации» в соответствии с нормами летной годности и получение сертификата типа в соответствии с требованиями Росавиации.

Усовершенствованный подход к разработке изделия с применением технологии цифровых двойников, представленный на рисунке 3.7, может быть расширен и дополнен в соответствии с отраслевой спецификой и особенностями проектной деятельности в зависимости от того, в структуре или вне структуры предприятия ведется разработка изделия. Однако усовершенствованный подход можно обозначить как универсальный способ разработки цифрового двойника.

На рисунке 3.8 приведен алгоритм, дополненный 3 важными аспектами:

- на алгоритме представлены процессы на стадиях производства и эксплуатации изделия в целях единого описания жизненного цикла изделия [200];
- на алгоритме представлены ключевые участники процессов и ответственные лица за тот или иной процесс и результат;
- на алгоритме представлены основные направления деятельности в области менеджмента качества, сопутствующие каждому из процессов разработки.

Так, дополнение алгоритма процессами производства (розовый цвет) и эксплуатации изделия (фиолетовый цвет) позволяет продемонстрировать дальнейший жизненный цикл изделия. На стадии производства (как правило, серийного или единичного) проходят все основные процессы производства – технологическая подготовка, проведение технологических процессов в соответствии с производственным циклом, приемка продукции и контроль качества. Стадия эксплуатации, в свою очередь, предполагает непосредственно эксплуатацию изделия, проведение технического обслуживания и ремонтов, а также принятие решения об изменении продукции в соответствии с тремя ключевыми направлениями, выделенными в ГОСТ Р 15.000–2016 «Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения» – модернизация, модификация, совершенствование [15]. Данные процессы могут быть реализованы как эксплуатантом, так и заказчиком изделия (разработчиком и/или производителем) по итогам анализа данных, полученных на стадии эксплуатации. Напомним, что в соответствии с рисунком 2.1 результатом стадии производства является изделие, готовое к эксплуатации, результат стадии эксплуатации – изделие, готовое к утилизации.

Здесь важно отметить возможность добавления процесса сбора и анализа данных, а также принятия управленческих решений и осуществления управляющих воздействий на изделие с применением цифрового двойника и обратных связей, которые в соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 обеспечат получение данных об эксплуатации в части отслеживаемых критических зон в режиме реального времени, что позволит проводить моделирование состояния

изделия при наступлении определенных условий эксплуатации и направлять управляющие воздействия [239].

Далее следует рассмотреть дополнение алгоритма усовершенствованного подхода к разработке в рамках основных участников и ответственных лиц. Так, на алгоритме выделены ключевые участники процессов, которые также обеспечивают соответствие требованиям к процессу разработки в соответствии с методикой, приведенной в параграфе 3.1. Подготовительный блок полностью относится к ведению заказчика, что обозначено соответствующим знаком «З» на алгоритме.

В процессах планирования приведены следующие участники – руководители проекта (РП), проектные менеджеры (ПМ), которые отвечают за взаимодействие с заказчиком, распределение обязанностей, сопровождение проекта. Также выделены инженеры-конструкторы (И-К), которые получают информацию о проекте и проводят предварительную подготовку к проектированию, и системные инженеры (СИ), которые курируют проект в разрезе инженерных направлений и системного инжиниринга. Участие дополнительного персонала обозначено знаком «ДП».

Блок проектирования и моделирования предполагает участие множества сотрудников – системных инженеров (СИ), обеспечивающих интеграцию разрабатываемых подсистем, инженеров-конструкторов (И-К), инженеров-технологов (И-Т), инженеров-расчетчиков (И-Р), объединенных в укрупненную группу инженеров «И», а также инженеров-испытателей (И-И). Распределение ролей в данном блоке процессов носит условный характер, поскольку сложность и взаимозависимость деятельности всех инженеров предполагает регулярное взаимодействие, обмен данными и совместную ответственность за результат. Также на данном этапе добавляются специалисты по программированию «Пр», ответственные за программные системы, их доработку под требования инженеров-расчетчиков и т.п., при этом участие программистов возможно в любом процессе блока проектирования и моделирования в зависимости от особенностей проекта.

Блок опытного производства и натурных испытаний дополняется участием рабочего персонала (Р), которые включают операторов оборудования, механиков и

других сотрудников, непосредственно участвующих в процессах опытного производства. Аналогично рабочие и операторы играют ключевую роль в блоке процессов серийного производства, при этом возникают задачи, решаемые инженерами по качеству «И-Кач».

Наконец, блок эксплуатации реализуется эксплуатантами или конечными потребителями (Э), которые распоряжаются изделием, проводят его обслуживание, определяют необходимость внесения изменений и реализуют другие процессы вплоть до утилизации изделия, что завершает его жизненный цикл.

Также алгоритм усовершенствованного подхода дополнен деятельностью в области менеджмента качества, которая сопровождает этапы разработки цифровых двойников изделий. ГОСТ Р ИСО 9000–2015 определяет ключевые составляющие области менеджмента качества: планирование качества (quality planning), обеспечение качества (quality assurance), управление качеством (quality control) и улучшение качества (quality improvement) [287]. Как было отмечено выше, принципиально важно закладывать качество на стадии проектирования изделия, что также определяется уровнем выполнения технических и тактико-технических требований к изделию.

Каждое из указанных направлений менеджмента качества на рисунке 3.8 обозначено соответствующим знаком возможного влияния применительно к каждому этапу жизненного цикла [11]. Практически каждый процесс так или иначе направлен на обеспечение или улучшение качества разрабатываемой продукции, тем самым подтверждается тезис, что качество продукции принципиально важно закладывать именно на стадии проектирования изделия, поскольку эта стадия определяет финальный облик и характеристики разрабатываемого продукта [190; 192; 200; 279; 294].

Так, блоки подготовительных процессов и процессов планирования преимущественно направлены на планирование качества, то есть определение перечня, видов и особенностей необходимых работ для достижения соответствия планируемым характеристикам продукции [10; 163].

В блоке процессов проектирования и моделирования осуществляется

разработка и балансировка матрицы требований к изделию в целях планирования качества конечного изделия [10]. Разработка моделей и проведение цифровых испытаний, в свою очередь, направлены на обеспечение качества, то есть на выполнение работ, необходимых для создания и подтверждения уверенности в том, что изделие соответствует требованиям.

Блок опытного производства и натурных испытаний дополняется процессами управления качеством, то есть работами, направленными на контроль соблюдения требований и оценку соответствия. Важно отметить, что это ключевые процессы оценки результатов разработки – оценки результатов прохождения натурных испытаний и выявления необходимости внесения изменений.

Блок процессов производства направлен как на обеспечение и оценку качества в ходе технологических и производственных операций. Наконец, процесс эксплуатации преимущественно сопровождается процессами улучшения качества, что позволяет выявить возможные направления повышения эффективности и результативности как самого изделия, так и процессов разработки, производства, эксплуатации.

Таким образом, разработанные алгоритмы усовершенствованного подхода при успешном внедрении в деятельности производства способствуют повышению результативности процессов проектирования и моделирования, опытного производства и натурных испытаний при внедрении технологии цифровых двойников за счет устранения потерь, связанных с перепроектированием и повторными испытаниями опытных образцов [200].

Усовершенствованный алгоритм реализуется в рамках методики, предложенной в параграфе 3.1, и предполагает регулярную оценку показателей результативности по результатам выполнения отдельных блоков процессов. Так, длительность процессов разработки отражает длительность процессов планирования, проектирования и моделирования, опытного производства и натурных испытаний, которая может быть сокращена за счет сокращения итераций по перепроектированию и проведению повторных испытаний. Затраты на процессы разработки определяются всеми затратами, понесенными в обозначенных блоках

процессов, при этом объем затрат существенно зависит от объема привлеченных человеческих ресурсов, что определяется расчетами трудоемкости на каждом этапе процесса разработки.

Наконец, соответствие требованиям процесса разработки необходимо для реализации обозначенного алгоритма и получения положительных эффектов от внедрения технологии цифровых двойников, в то время как соответствие требованиям технического задания – это финальный результат процесса разработки. Стремление к получению изделия высокого качества, соответствующего всем требованиям заказчика, обязует предприятия реализовать проекты по внедрению передовых цифровых и производственных технологий, усовершенствованных подходов и методик, которые могут выражаться во внедрении технологии цифровых двойников и достижении высокой результативности процессов разработки.

Выводы по главе

1) Высокие значения временных и финансовых затрат на реализацию проекта по разработке изделия свидетельствуют о низкой результативности организации процесса, в связи с чем предлагается внедрение инновационной технологии цифровых двойников в целях оптимизации процесса разработки изделий. В исследовании сформулированы целевые показатели процесса разработки, составляющие основу методики совершенствования процесса разработки: Длительность процесса разработки (t); Затраты процесса разработки (S); Трудоемкость процесса разработки (L); Соответствие требованиям процесса разработки ($СТР$); Соответствие требованиям технического задания (матрицы требований) ($СТЗ$).

2) Возможность снижения временных и финансовых затрат в процессе разработки цифрового двойника объясняется снижением числа вносимых изменений, повышением числа цифровых (виртуальных) испытаний, снижением числа опытных образцов и проводимых натурных испытаний. Снижение временных и финансовых затрат разработки изделия является одной из целевых функций цифрового двойника.

3) Трудоемкость процесса разработки напрямую влияет на результативность разработки цифрового двойника по причине существующей тенденции, вызванной сочетанием ролей инженера-конструктора (И-К), инженера-расчетчика (И-Р) и инженера-технолога (И-Т), а также расширением роли инженеров-расчетчиков. Предполагается, что в процессе разработки необходимо участие системных инженеров, в задачи которых войдет обеспечение работы инженеров в формате параллельного взаимодействия с учетом модельно-ориентированного системного инжиниринга применительно к разрабатываемому изделию (формат обмена между инженерами: И-К ↔ И-Р ↔ И-Т).

4) Соответствие требованиям процесса разработки подразумевает как соответствие требованиям к организации разработки изделия с точки зрения ресурсной обеспеченности, так и с точки зрения эффективности и качества процессов.

В разрезе ресурсной обеспеченности приведено четыре группы ключевых факторов: Требования к материально-технической оснащенности, проектно-технологической, инженерной инфраструктуре; Требования к персоналу; Требования к технологиям (включая технологию разработки цифровых двойников изделий); Требования к документации. Именно эти показатели ресурсной обеспеченности должны быть учтены при организации процессов разработки в целях совершенствования разработки изделий. Без обеспечения заявленных требований труднореализуемо внедрение цифровых двойников в процессы разработки и, соответственно, труднодостижимо снижение временных и финансовых затрат разработки изделий машиностроения, повышение результативности процесса разработки и усовершенствование результатов.

В разрезе показателей эффективности и качества процессов приведено пять групп ключевых факторов: Показатели назначения и организационной эффективности; Показатели стандартизации и унификации; Показатели безопасности; Экономические показатели; Показатели технологичности изделия. Данные показатели позволяют оценить эффективность процесса разработки,

достаточность сотрудников и ресурсов, уровень технологичности разрабатываемой продукции с учетом корректности требований и т.п.

5) Соответствие требованиям технического задания подразумевает снижение разницы между эталонным и фактическим значением показателя матрицы, в результате чего достигаются требования, заявленные заказчиком, обеспечиваются высокие показатели надежности и качества разрабатываемой продукции, а также технологичность изделия. Для достижения сбалансированной матрицы необходима ее декомпозиция, а также балансировка показателей системы, что позволяет найти оптимально реализуемое рациональное решение, соответствующее всем требованиям каждого уровня. Для нахождения оптимального решения проектируемого объекта разработана математическая модель балансировки системы требований.

6) Сформулированы положения математической модели оценки затрат в процессе разработки изделий с применением технологии цифровых двойников, которые демонстрируют экономию затрат при разработке изделия с применением технологии разработки цифровых двойников в сравнении с традиционным подходом к разработке изделия [7; 200].

7) В соответствии с заявленными показателями результативности цель разработки цифрового двойника заключается в проектировании изделия под заданные временные t и финансовые S затраты с учетом трудоемкости процессов разработки L и требований к процессу разработки $СТР$ для соответствия требованиям к продукции $СТЗ$. Достижение целевых функций процесса разработки цифрового двойника также определяется уровнем адекватности цифровой модели изделия – достижением допустимого уровня адекватности с учетом того, что соблюдены условия оптимальной длительности и трудоемкости разработки.

8) Реализация методики в части достижения целевых показателей с учетом ресурсной обеспеченности возможна за счет прохождения алгоритма по разработке и применению цифрового двойника изделия, лежащего в основе методики. Сформированные группы требований к ресурсной обеспеченности, эффективности и качеству процесса разработки оказывает влияние на ключевые

процессы, которые выделены в качестве блоков разработки изделия на алгоритме разработки цифрового двойника: подготовительные процессы; процессы планирования; процессы проектирования и моделирования, проведения цифровых (виртуальных) испытаний; процессы проведения опытного производства и натурных испытаний; процессы формирования конструкторской документации для серийного производства.

9) Научной новизной исследования является разработанная методика совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии разработки цифровых двойников, содержащая 5 показателей результативности – длительность, затраты, трудоемкость, соответствие требованиям разработки и соответствие требованиям технического задания.

ГЛАВА 4. ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

4.1 Описание беспилотного летательного аппарата «Снегирь-1», разработанного с применением технологии цифровых двойников

Важными документами и техническими актами, регулирующими вопросы проведения разработки, производства, сертификации и эксплуатации авиационной техники [295], являются:

- Приказ Минтранса России от 17.06.2019 г. № 184 (ред. от 29.05.2023 г.) «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21», регулирующий порядок проведения обязательной сертификации авиатехники, в том числе беспилотных авиационных систем (БАС) [296];
- ГОСТ Р 58849–2020 «Авиационная техника гражданского назначения. Порядок создания. Основные положения», регулирующий порядок создания пилотируемой авиационной техники [297];
- ГОСТ 18675–2012 «Документация эксплуатационная и ремонтная на авиационную технику и покупные изделия для нее», регулирующий требования к комплектности и содержанию документации на эксплуатацию и обслуживание авиатехники [298];
- ГОСТ Р 56122–2014 «Воздушный транспорт. Беспилотные авиационные системы. Общие требования», регулирующий общие требования к беспилотным авиационным системам, в том числе требования сертификации и соответствия нормам летной годности [295; 299];
- ГОСТ Р 57258–2016 «Системы беспилотные авиационные. Термины и определения», в котором введены основные термины и определения в области БАС [300];
- ГОСТ Р 59518–2021 «Беспилотные авиационные системы. Порядок разработки», регулирующий основные этапы разработки беспилотных

авиационных систем [301];

- ГОСТ Р 59751–2021 «Беспилотные авиационные системы с беспилотными воздушными судами самолетного типа. Требования к летной годности», устанавливающий требования к летной годности беспилотных авиационных систем, включающих беспилотные воздушные суда (БВС) самолетного типа [302];

- Нормы летной годности [303], в частности, утвержденные Приказом Федерального агентства воздушного транспорта от 10.11.2022 г. № 806-П «Об утверждении Норм летной годности беспилотных авиационных систем с беспилотным воздушным судном вертолетного типа с максимальной взлетной массой до 750 кг НЛГ БАС ВТ» [304] (изменения от 05.11.2024 г. № 996-П [305]) и Приказом от 16.12.2022 г. № 922-П «Об утверждении норм летной годности беспилотных авиационных систем с беспилотным воздушным судном самолетного типа с максимальной взлетной массой до 5400 кг НЛГ БАС-СТ» [306];

- Другие Федеральные авиационные правила (ФАП) [307], приказы Росавиации [308], Воздушный кодекс Российской Федерации [309].

Кроме того, важно отметить реализуемые в Российской Федерации программы развития и поддержки авиационной отрасли, в частности: Государственная программа «Развитие авиационной промышленности», Комплексная программа развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года, Государственная программа «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» (2019–2030 гг.) и др. [295] Также в рамках развития стандартизации в области БАС принята «Перспективная программа стандартизации в области беспилотных авиационных систем (БАС) на 2024–2032 гг.» [310]. Значимую деятельность в мировой авиации ведут Международная организация гражданской авиации (ИКАО), Международная ассоциация воздушного транспорта (IATA), Федеральное управление гражданской авиации США (FAA) и другие организации [295].

В соответствии с ГОСТ Р 58849–2020 после изготовления опытного образца или составной части опытного образца проводятся наземные испытания,

квалификационные испытания и предварительные (летно-конструкторские) испытания [18]. По результатам прохождения приведенных выше испытаний осуществляется переход к сертификационным испытаниям, которые позволяют подтвердить соответствие разработанной авиатехники требованиям летной годности и охраны окружающей среды, после чего утверждается конструкторская документация и осуществляется переход к серийному производству. Сертификационные испытания, в свою очередь, делятся на сертификационные заводские и сертификационные контрольные испытания [296].

Таким образом, в отличие от традиционной разработки изделий машиностроения, разработка авиатехники требует обязательного проведения ряда критически важных испытаний, которые дополняют (расширяют) стандартные процессы разработки и без которых дальнейший переход к производству авиатехники невозможен. При этом комплекту конструкторской документации авиатехники присваивается литера «О₁» по результатам прохождения всех сертификационных работ. После присвоения литеры осуществляется выдача сертификата типа в соответствии с ФАП 21. Сертификация БАС проходит только совместно с оборудованием управления и контроля БАС в составе сертифицируемой системы [296].

В ГОСТ Р 58849–2020 также приведена возможность применения математического моделирования в процессе разработки и проведения испытаний авиационной техники [18], чем обосновывается возможность организации процесса «цифровой сертификации». Тем самым возможно уменьшение очереди на проведение сертификации и подтверждение соответствия всем требованиям авиационных правил в более быстрые сроки, в чем заключается практическая значимость внедрения технологии цифровых двойников в отрасли авиастроения.

Особо важно выделить закрепление в нормативном поле термина «цифровая сертификация» в редакции Передовой инженерной школы СПбПУ (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 07.11.2023 г. № 3113-р [2; 188]). Фактически это означает формирование нового научно-методологического и практико-ориентированного подхода, который заключается в

организации цифрового сопровождения реализации проектов по разработке изделий, обеспечивающего прохождение всех необходимых натурных (в том числе сертификационных) испытаний с первого раза. Прохождение сертификации – один из ключевых этапов вывода авиационной техники на рынок, необходимое условие для формирования отрасли БАС в России. Прохождение «цифровой сертификации», в свою очередь, обеспечит ключевое конкурентное преимущество – сокращение сроков и стоимости вывода БПЛА на рынок.

Оценка практической применимости предложенных в работе методики совершенствования процесса разработки и алгоритма процесса разработки изделия проводилась в ходе деятельности Инжинирингового центра СПбПУ, который входит в структуру Передовой инженерной школы СПбПУ и является частью Экосистемы технологического развития СПбПУ [311].

Инжиниринговый центр занимается проведением научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по заказу различных предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности [243]. К одному из перспективных направлений деятельности Инжинирингового центра и Передовой инженерной школы СПбПУ относится разработка, цифровое проектирование и моделирование, проведение инженерного анализа изделий, систем, компонентов отрасли беспилотных авиационных систем. Так, среди разработанных беспилотных летательных аппаратов – БПЛА «Снегирь-1» и БПЛА «Снегирь-1,5» инициативной разработки, составляющие семейство БПЛА «Снегирь» [312–314]. В приложении А представлен акт внедрения результатов исследования в деятельность Инжинирингового центра СПбПУ.

Разработка семейства беспилотных летательных аппаратов обеспечила формирование научно-технического задела в области БАС. Передовая инженерная школа СПбПУ вовлечена в реализацию федерального проекта «У5 – Разработка, стандартизация и серийное производство беспилотных авиационных систем и их комплектующих» [312], выполнение которого ведется в рамках Национального проекта «Беспилотные авиационные системы» с целью реализации Стратегии развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на

перспективу до 2035 года (утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 21.06.2023 г. № 1630-р) [315].

Семейство БПЛА «Снегирь» включает БПЛА «Снегирь-1», который впервые представлен в 2023 году и который является предшественником улучшенной модели «Снегирь-1,5». Разработка велась с применением Цифровой платформы CML-Bench® [188; 243–246; 266; 267].

Основные характеристики и компоновка БПЛА «Снегирь-1» приведены на рисунке 4.1. Конструкция БПЛА содержит такие элементы как винты, винглеты, панели крыла, элевоны, створки, поворотные механизмы, нервюры, лонжероны, основные опоры и др. Конструкция БПЛА содержит 250 основных силовых элементов и 35 элементов, обеспечивающих электромеханические функции, интеллектуальное управление и сбор данных [313].

БПЛА «Снегирь-1» имеет гибридную компоновку – сочетание мультироторной и самолетной схем [246; 313]. Важно отметить, что при изготовлении БПЛА применены аддитивные технологии и композиционные материалы, что обеспечивает высокую технологичность конструкции, легкий вес и повышенную прочность.

Учетный номер БПЛА «Снегирь-1» в Росавиации – 07у6693, серийный (идентификационный) номер – S001 [246; 313]. В марте 2025 года зарегистрирован промышленный образец конструкции БПЛА №146457 от 11.03.2025 г. [316]

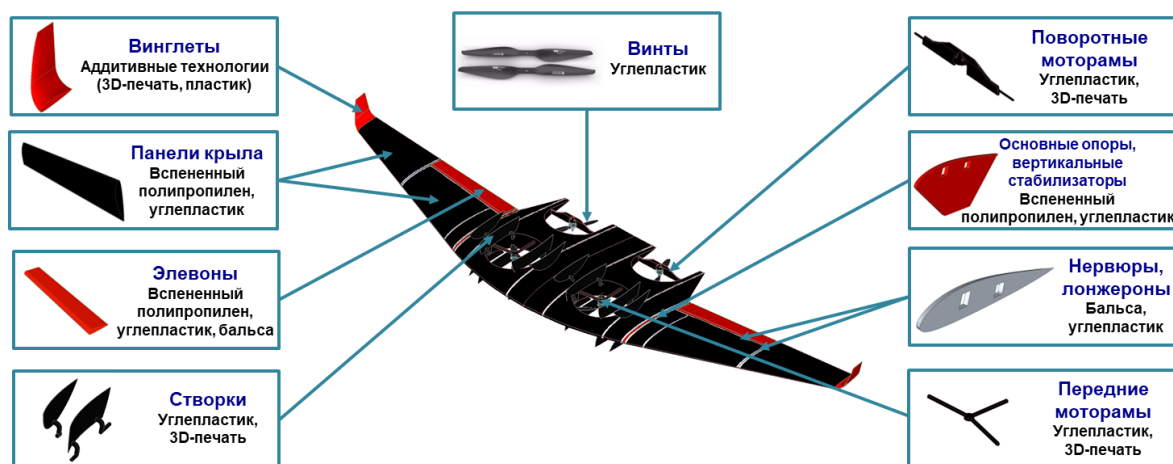


Рисунок 4.1 – Компоновка конструкции БПЛА «Снегирь-1»

Источник: Передовая инженерная школа СПбПУ

В декабре 2023 года БПЛА «Снегирь-1» успешно прошел первые натурные испытания на полигоне. Суммарно длительность проекта по разработке БПЛА «Снегирь-1» заняла 5 месяцев. Детальный разбор этапов и длительности разработки БПЛА, перечень затрат на разработку, количество привлеченных специалистов и оценка степени удовлетворенности требованиям рассмотрены в параграфе 4.2. Разработка БПЛА «Снегирь-1,5» в данном исследовании не рассматривается.

4.2 Практическое внедрение методики совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии разработки цифровых двойников

Разработка БПЛА «Снегирь-1» выполнялась в соответствии с приведенной методикой совершенствования процесса разработки изделий и, в частности, с применением алгоритма процесса разработки, входящего в методику.

В общем виде процессы разработки БПЛА в соответствии с ГОСТ Р 58849–2020 представлены на рисунке 4.2.

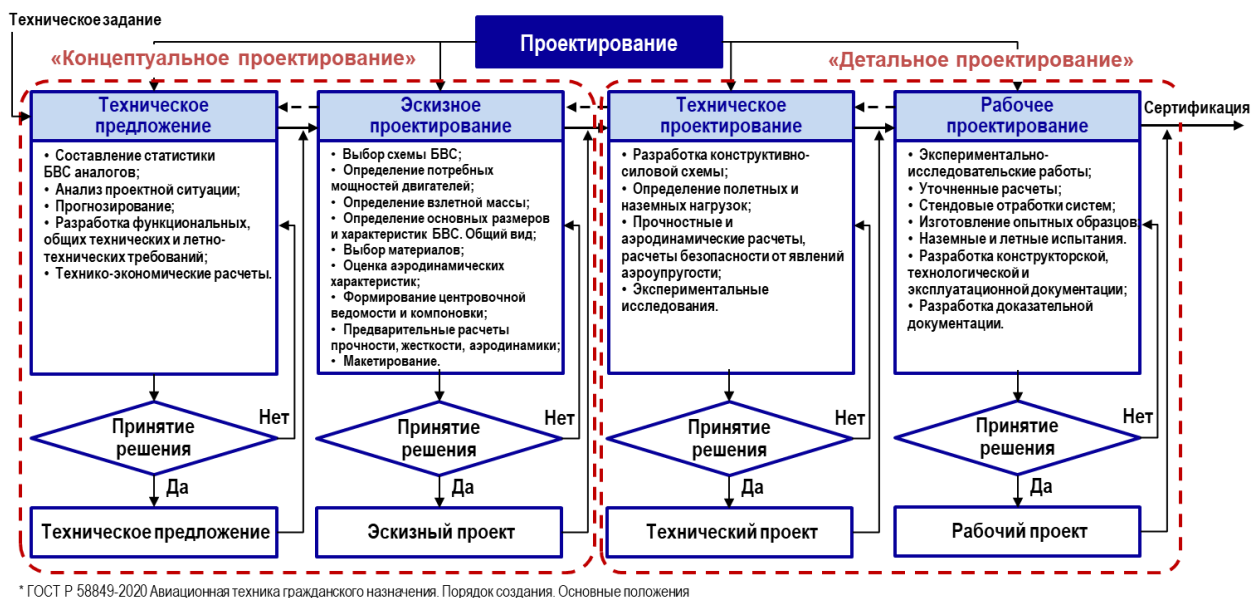


Рисунок 4.2 – Стадии проектирования беспилотного воздушного судна в соответствии с ГОСТ Р 58849–2020

Источник: Передовая инженерная школа СПбПУ

Так, в рамках процесса разработки БПЛА «Снегирь-1» выполнены следующие шаги:

1) Оценка уровня готовности Инжинирингового центра к выполнению проекта по разработке БПЛА.

В частности, на данном этапе проведена оценка имеющихся ресурсов и проверено наличие необходимых инструментов для разработки изделия. Данный этап соответствует блоку подготовительных процессов, представленному на алгоритме, и формированию технического предложения.

В связи с тем, что разработка выполнялась Инжиниринговым центром в инициативном порядке, отсутствовало техническое задание от внешнего заказчика, требования к изделию были окончательно сформированы в процессе концептуальной проработки.

2) Концептуальное проектирование изделия.

В рамках данного этапа вначале проведен анализ аналогов БПЛА, определены основные верхнеуровневые функциональные, общие технические и летно-технические требования к продукции, в числе которых:

- Выбор схемы – сочетание самолетной и мультироторной схемы;
- Возможность «зависания» в воздухе;
- Грузоподъемность – не менее 2 кг полезной нагрузки;
- Дальность полета – не менее 180 км;
- Определение мощности и типа двигателя – электрический двигатель;
- Затраты на разработку – не более 10 млн рублей;
- Соответствие требованиям ФАП и нормам летной годности;
- Наличие системы сбора и передачи данных, устройств управления, контроллеров и др.

Далее в рамках концептуальной проработки изделия детализированы требования, проведено планирование работ и оценка целесообразности выполнения проекта. В соответствии с процессами, представленными на алгоритме, данный этап соответствует блоку подготовительных процессов, процессов планирования и формированию эскизного проекта.

3) Разработка конструктивно-силовой схемы БПЛА.

В рамках данного этапа выполнена разработка структуры беспилотного

летательного аппарата, определена взаимозависимость компонент, деталей и узлов [312; 313], составлен перечень необходимых материалов для изготовления (в их числе – полимерные композиционные материалы для изготовления деталей и узлов БПЛА), составлен перечень необходимых электромеханических компонентов, включая электродвигатель, контроллеры и проч., а также сформирован облик беспилотного летательного аппарата. Данный этап соответствует процессам формирования матрицы требований к изделию, разработки CAD-моделей и проведению закупок, а также формированию технического проекта.

4) Моделирование и проведение цифровых (виртуальных) испытаний БПЛА.

На данном этапе проведено моделирование БПЛА с учетом следующих областей:

- Статическая, динамическая, усталостная прочность;
- Жесткостные характеристики;
- Аэродинамика: конструкции БПЛА, винтов, крыла, устойчивость (тангаж, скольжение, крен), управляемость, переходные режимы, аварийные ситуации и др.;
- Аэроупругость;
- Полетные и наземные нагрузки;
- Моделирование свойств материалов: композиционных (растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб, ударное повреждение, трещиностойкость и т.п.), металлических (растяжение, сжатие, кручение, срез, изгиб, трещиностойкость, усталостное нагружение и т.п.), неметаллических (растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг, удар, усталостное нагружение);
- Эксплуатация двигателя (продувка, электромагнитная совместимость, тепловой анализ и др.);
- Экспериментальные расчеты.

На данном этапе также проведено моделирование технологических процессов изготовления БПЛА, включая особенности применения аддитивных

технологий и полимерных композиционных материалов, проведены испытания БПЛА на цифровых (виртуальных) испытательных стендах (ВИС) и полигонах (ВИП), разработанных в ходе проекта.

Суммарное количество разработанных ВИС и ВИП в ходе разработки семейства БПЛА «Снегирь» составляет 24 стенда и 7 полигонов. Тщательная проработка моделей обеспечила прохождение «цифровой сертификации». Данный этап соответствует блоку процессов проектирования и моделирования, представленному на алгоритме, а также формированию рабочего проекта.

5) Изготовление опытного образца и проведение натурных испытаний.

Данный этап заключался в осуществлении процессов изготовления и последующей сборки БПЛА. Для этого предварительно проведена подготовка производственной и испытательной площадки. Далее проведены полетные испытания в помещении Инжинирингового центра, затем на испытательном полигоне. Кроме того, проведена регистрация БПЛА в Росавиации, получен учетный номер.

Таким образом, поэтапное проведение моделирования отдельных компонентов БПЛА позволило с первого раза пройти летные испытания.

Далее представим результаты проведенной оценки целевых показателей методики совершенствования процесса разработки изделий (см. таблицу 4.1). В целях упрощения представления проведенных расчетов длительность цифрового проектирования и моделирования приведена единым процессом без указания циклов моделирования подсистем, при этом обозначенная длительность работы отдельных сотрудников является примерной.

Суммарно в процессе разработки БПЛА «Снегирь-1» выполнено 292 цифровых (виртуальных) испытания. Натурные испытания, как было отмечено выше, БПЛА «Снегирь-1» прошел с первого раза, при этом суммарно проведено около 50 летных испытаний на территории опытно-конструкторского бюро для настройки комплексной системы управления (КСУ) БПЛА, также проведены полноценные натурные испытания на полигоне продолжительностью 2 дня.

В процессе разработки БПЛА применялись следующие инженерные

программные системы, интегрированные в платформу CML-Bench®: Логос (разработка ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), FlowVision (разработчик ООО «ТЕСИС»), Компас-3D (разработчик ООО «Аскон»), IMAT (разработчик ATA Engineering), OpenFoam, OpenVSP (разработчик NASA Langley Research Center) и другие решения.

В ходе анализа подобных конструктивных решений на рынке выявлено, что аналогов конвертопланов на отечественном рынке не существует. В качестве базового примера рассмотрен электрический БПЛА вертикального взлета и посадки (VTOL) с фиксированным крылом DeltaQuad [317]. Одноименная компания (ранее – компания Vertical Technologies) основана в Нидерландах в 2012 году [318] и является пионером среди инновационных решений сочетания VTOL и самолетного типа БПЛА, при этом первый полет DeltaQuad совершен в 2016 году, в связи с чем можем предположить, что длительность разработки БПЛА до первого полета и до налаживания серийного производства составила около 4 лет [319]. Согласно другому источнику, компания работала не менее 14 месяцев над разработкой БПЛА [320; 321]. Новую модель DeltaQuad EVO компания выпустила спустя два года после начала разработки [322–324], что кратно превышает длительность разработки БПЛА «Снегирь-1» и его усовершенствованной модели. Затраты на разработку БПЛА DeltaQuad не раскрываются, что объясняется конфиденциальностью коммерческой информации, аналогично не раскрывается состав команды разработчиков. Тем не менее, можем предположить, что затраты на разработку БПЛА DeltaQuad кратно превышают затраты на разработку БПЛА «Снегирь-1» соразмерно длительности разработки.

Также отдаленно схожим примером выступает разработка отечественной компании ООО «Ирбис Скай Тех» (Irbis Sky Tech) – БПЛА IRBIS-538 VTOL, самолет с вертикальным взлетом и посадкой, который, однако, значительно крупнее БПЛА «Снегирь-1», при этом уступает по таким характеристикам как аэродинамика, моторная группа и технологичность конструкции [325].

Таблица 4.1 – Результаты оценки целевых показателей методики совершенствования процесса разработки изделия на примере БПЛА «Снегирь-1»

Наименование процесса	Показатели БПЛА «Снегирь-1»
Длительность разработки (часы)	
$t_{\text{концепт}}$ концептуальная проработка изделия	16 рабочих дней, 128 часов
$t^{1_ЦД}$ разработка САД-моделей изделия	14 рабочих дней, 112 часов
$t^{2_ЦД}$ формирование матрицы требований	9 рабочих дней, 72 часа
$t^{3_ЦД}$ разработка и корректировка САЕ-моделей подсистем	14 рабочих дней, 112 часов
$t^{4_ЦД}$ цифровые испытания подсистем	10 рабочих дней, 80 часов
$t^{5_ЦД}$ разработка цифровой модели системы	6 рабочих дней, 48 часов
$t^{6_ЦД}$ моделирование технологических процессов	6 рабочих дней, 48 часов
$t^{7_ЦД}$ цифровые испытания системы	10 рабочих дней, 80 часов
$t^{8_ЦД}$ опытное производство	18 рабочих дней, 144 часа
$t^{9_ЦД}$ натурные испытания	7 рабочих дней (включая 2 рабочих дня на полигоне, 5 рабочих дней на транспортировку, финальную сборку и настройку КСУ), 56 часов
$t^{10_ЦД}$ утверждение конструкторской документации	5 рабочих дней, 40 часов
ε задержка поставки сырья	–
ИТОГО	115 рабочих дней, 920 часов
Затраты процесса разработки (руб.)	
Количество сотрудников: 1. Инженеры-конструкторы 2. Инженеры-технологи 3. Инженеры-расчетчики 4. Системные инженеры 5. Руководители 6. Проектные менеджеры 7. Программисты 8. Рабочие для опытного производства 9. Инженеры-испытатели	1. 1 2. 1 (совмещает задачи конструктора и технолога) 3. 5 4. 1 (совмещает задачи расчетчика и системного инженера) 5. 1 6. 1 (совмещает задачи руководителя и проектного менеджера) 7. 0 8. 4 (совмещают задачи инженеров и сборщиков) 9. 4 (совмещают задачи инженеров и испытателей) ИТОГО: 7
Средняя заработная плата сотрудников: 1. Инженеры-конструкторы 2. Инженеры-технологи 3. Инженеры-расчетчики 4. Системные инженеры 5. Руководители 6. Проектные менеджеры 7. Программисты	1. 198 114 руб., 3 месяца 2. – 3. 198 114 руб., 3 месяца для 4 сотрудников, 2 месяца для 3 сотрудников 4. 283 020 руб., 5 месяцев 5. 325 473 руб., 5 месяцев 6. – 7. –

Наименование процесса	Показатели БПЛА «Снегирь-1»
8. Рабочие для опытного производства 9. Инженеры-испытатели	8. – 9. – ИТОГО: 7 202 859 руб. (суммарно; заработная плата приведена с учетом отчислений на социальные нужды)
Количество месяцев работы сотрудников: 1. Инженеры-конструкторы 2. Инженеры-технологи 3. Инженеры-расчетчики 4. Системные инженеры 5. Руководители 6. Проектные менеджеры 7. Программисты 8. Рабочие для опытного производства 9. Инженеры-испытатели	5 мес. (один инженер-конструктор на 2 месяца привлечен в другой проект, один инженер-расчетчик не принимал участие в сборке и испытаниях)
Количество и стоимость приобретенного ПО	–
Затраты на организацию опытного производства и натурных испытаний: Материалы Производственная площадка Испытательная площадка	Материалы и комплектующие: 300 000 руб. Затраты на организацию производственной площадки (в том числе закупка оборудования и инструментов): 700 000 руб. Затраты на аренду испытательной площадки (полигона): 150 000 руб. Затраты на аренду грузового транспорта для транспортировки БПЛА: 40 000 руб.
Затраты на сертификацию	–
Затраты на проведение дополнительных НИР	–
Прочие затраты	Дополнительные расходы на командировки: 115 000 руб.
ИТОГО	8 507 859 руб.
Трудоемкость разработки (человеко-часы)	
Количество сотрудников: 1. Инженеры-конструкторы 2. Инженеры-технологи 3. Инженеры-расчетчики 4. Системные инженеры 5. Руководители 6. Проектные менеджеры 7. Программисты 8. Рабочие для опытного производства 9. Инженеры-испытатели	1. 1 2. 1 (совмещает задачи конструктора и технолога) 3. 5 4. 1 (совмещает задачи расчетчика и системного инженера) 5. 1 6. 1 (совмещает задачи руководителя и проектного менеджера) 7. 0 8. 3 (совмещают задачи инженеров и сборщиков) 9. 3 (совмещают задачи инженеров и испытателей) ИТОГО: 7

Наименование процесса	Показатели БПЛА «Снегирь-1»
Длительность часов работы инженера-конструктора (конструктор, технолог, рабочий, испытатель)	128 часов ($t_{\text{концепт}}$), 112 часов ($t^1_{\text{ЦД}}$), 40 часов ($t^2_{\text{ЦД}}$), 20 часов ($t^5_{\text{ЦД}}$), 48 часов ($t^6_{\text{ЦД}}$), 144 часа ($t^8_{\text{ЦД}}$), 56 часов ($t^9_{\text{ЦД}}$), 40 часов ($t^{10}_{\text{ЦД}}$) ИТОГО 588 часов
Длительность часов работы инженера-расчетчика № 1, 2, 3 (расчетчик, рабочий, испытатель)	60 часов ($t_{\text{концепт}}$), 72 часа ($t^2_{\text{ЦД}}$), 112 часов ($t^3_{\text{ЦД}}$), 80 часов ($t^4_{\text{ЦД}}$), 48 часов ($t^5_{\text{ЦД}}$), 48 часов ($t^6_{\text{ЦД}}$), 80 часов ($t^7_{\text{ЦД}}$), 144 часа ($t^8_{\text{ЦД}}$), 56 часов ($t^9_{\text{ЦД}}$), 40 часов ($t^{10}_{\text{ЦД}}$) ИТОГО 740 часов
Длительность часов работы инженера-расчетчика №4	60 часов ($t_{\text{концепт}}$), 72 часа ($t^2_{\text{ЦД}}$), 112 часов ($t^3_{\text{ЦД}}$), 80 часов ($t^4_{\text{ЦД}}$), 48 часов ($t^5_{\text{ЦД}}$), 48 часов ($t^6_{\text{ЦД}}$), 80 часов ($t^7_{\text{ЦД}}$), 40 часов ($t^{10}_{\text{ЦД}}$) ИТОГО 540 часов
Длительность часов работы системного инженера (главный инженер проекта)	920 часов
Длительность часов работы руководителя (совмещение с проектным менеджером)	920 часов
ИТОГО	3708 человеко-часов

Источник: составлено автором

Таким образом, суммарная длительность процесса разработки БПЛА с применением технологии цифровых двойников заняла 5 месяцев, что составляет 115 рабочих дней, 920 часов. Затраты на выполнение работ составили 8 507 859 рублей, что соответствует требованиям в части финансовых затрат на проект. Трудоемкость выполнения работ составила 3708 человеко-часов. Важно отметить, что длительность разработки изделия в части цифрового проектирования и моделирования (что можно отнести к работе инженеров-конструкторов, расчетчиков и технологов) составила 78,26%, в то время как длительность

опытного производства и натурных испытаний заняла оставшиеся 21,74% всего цикла разработки (что относится к выполнению функций инженеров-испытателей и рабочих), что соотносится с принципом Парето.

Как было отмечено ранее, в процессе анализа готовности Инжинирингового центра к выполнению инициативного проекта по разработке БПЛА проведена оценка наличия и достаточности ресурсов для выполнения проекта в части показателей ресурсной оснащенности (группы *а*) в соответствии с диапазонами значений показателей, приведенными в таблице 3.2. Также по результатам проекта проведена оценка показателей эффективности и качества процессов разработки (группы *б*). Оценку проводили 3 эксперта, вовлеченных в процесс выполнения проекта. Первый эксперт – научный руководитель проекта, второй эксперт – руководитель направления БПЛА, третий эксперт – главный инженер проекта (системный инженер). Результаты оценки приведены в таблице 4.2. Для упрощения отображения оценок приведены показатели II уровня без указания группы (комплексного показателя I уровня). Сводная оценка рассчитана как усредненное значение полученных оценок отдельных экспертов. Напомним, что в первой группе общее количество показателей составляет 16 показателей, во второй группе – 22 показателя.

Таблица 4.2 – Экспертная оценка показателей удовлетворенности требований к процессам разработки БПЛА

Показатель II уровня	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	Сводная оценка
<i>а. Требования к ресурсной обеспеченности предприятия</i>				
1.1. Наличие актуального верифицированного и валидированного специализированного инженерного программного обеспечения, обладающего высоким уровнем адекватности	1	0,9	0,9	0,93
1.2. Наличие платформенного решения	1	1	1	1
1.3. Оборудованные инженерные рабочие места	1	1	1	1
1.4. Наличие оборудованной опытно-промышленной и испытательной площадки	0,9	0,8	0,9	0,87
1.5. Наличие вычислительных мощностей (высокопроизводительных вычислительных систем), центров обработки и хранения данных и др.	1	1	1	1
2.1. Мультидисциплинарная команда инженеров-конструкторов, инженеров-	1	1	1	1

Показатель II уровня	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	Сводная оценка
расчетчиков, инженеров-технологов				
2.2. Административная команда	1	1	1	1
2.3. Команда по направлению программирования	1	1	1	1
2.4. Команда по опытному производству и натурным испытаниям	0,9	0,9	0,8	0,87
3.1. Возможность формирования матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений [163]	1	1	1	1
3.2. Обеспечение системного подхода к разработке на основе методов и концепций модельно-ориентированного системного инжиниринга [163]	1	1	1	1
3.3. Технологии проведения цифровых (виртуальных) испытаний	1	1	1	1
3.4. Технологии разработки цифровых двойников	1	1	1	1
3.5. Возможность организации процессов сбора и обработки потоков данных	0,9	0,9	1	0,93
4.1. Полнота, точность и актуальность документации	1	1	1	1
4.2. Соответствие документации стандартам	1	1	1	1
ИТОГО СТР ^{PO}	15,7	15,5	15,6	15,6
<i>б. Требования к эффективности и качеству процесса разработки</i>				
1.1. Эффективность освоения изделия	1	0,9	1	0,97
1.2. Эффективность применения методов цифрового проектирования и моделирования	0,9	1	1	0,97
1.3. Оптимальность используемых ресурсов	0,9	0,9	0,8	0,97
1.4. Эффективность планирования	0,9	0,8	1	0,9
1.5. Эффективность прохождения натурных испытаний	1	1	1	1
2.1. Уровень изделия относительно аналогов	1	1	1	1
2.2. Эффективность учета нормативно-правовой и нормативно-технической базы	1	1	1	1
2.3. Уровень оригинальности изделия	0,8	0,8	0,9	0,83
3.1. Уровень безопасности труда	1	1	1	1
3.2. Учет экологических характеристик объекта	1	1	1	1
3.3. Уровень учета физико-механических свойств объекта и свойств используемого материала	1	1	0,9	0,97
3.4. Уровень кибербезопасности процессов разработки	0,9	0,8	1	0,9
3.5. Уровень кибербезопасности изделия в процессе эксплуатации	1	0,9	1	0,97
4.1. Достаточность количества инженеров-конструкторов, инженеров-технологов, инженеров-расчетчиков, системных инженеров	1	0,8	1	0,93
4.2. Достаточность количества сотрудников административной команды	1	1	1	1

Показатель II уровня	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	Сводная оценка
4.3. Достаточность сотрудников команды программистов	1	1	1	1
4.4. Достаточность сотрудников для проведения опытного производства и натурных испытаний	0,8	0,9	0,9	0,87
4.5. Показатель себестоимости опытных образцов	0,8	0,9	0,9	0,87
4.6. Показатель ожидаемой себестоимости изделий при серийном производстве	Не применимо ¹			
5.1. Эффективность проработки на технологичность и патентоспособность (уровень техники)	1	1	1	1
5.2. Показатель функциональности изделия	0,9	0,9	0,9	0,9
5.3. Корректность требований к изделию	1	0,9	1	0,97
ИТОГО СТРЕК	19,9	19,5	20,3	19,9

Источник: составлено автором

Таким образом, усредненная экспертная оценка группы показателей ресурсной обеспеченности составляет 15,6 (максимально возможное значение – 16), группы эффективности и качества – 19,9 (максимально возможное значение – 22). Полученная оценка свидетельствует о высоком уровне ресурсной обеспеченности Инжинирингового центра (97,5%), а также высокой итоговой эффективности процесса разработки БПЛА (90,5%).

Результат процессов разработки БПЛА и прохождение натурных испытаний свидетельствуют об удовлетворенности требований технического задания (требований к БПЛА). В общем случае разработка требований к изделию может протекать с применением специализированных инструментов, в частности развертывания функции качества (QFD, Quality Function Deployment). В процессе разработки БПЛА в автоматизированном режиме изменения, вносимые в конструкцию, и их взаимное влияние на другие конструктивные элементы системы беспилотного летательного аппарата отображались в матрице требований на цифровой платформе, за счет чего обеспечивалось управление требованиями,

¹ Данный показатель не предлагался к оценке экспертам по следующим причинам:

1) Реализация инициативного проекта предполагалась в целях формирования научно-технического задела, обеспечения комплексного подхода при реализации национального проекта в части разработки цифровой платформы для разработки и применения цифровых двойников БАС;

2) По результатам инициативного проекта принято управленческое решение о разработке модификации БПЛА и формировании семейства беспилотных летательных аппаратов, вследствие чего не было организовано серийное производство БПЛА «Снегирь-1».

изменениями, конфигурациями [163]. По результатам проведенных цифровых испытаний матрица требований к изделию была сбалансирована – получены численные значения, которые минимально отклонялись от заданных. Результат балансировки матрицы требований представлен на рисунке 4.3.

В целях сохранения конфиденциальности данных и соблюдения коммерческой тайны перечень требований к БПЛА «Снегирь-1» не раскрывается. Однако по результатам реализации проекта все требования выполнены, соответственно, $\Delta CT3 = 0$.

Симуляции	3.1.1. Статическая прочност			3.3. ВИС Интегральные жесткостные			
	Статус группы экспер ментов	Mass ≤ 2,000 [kg]	Safety factor ≥ 1,500 [-]	Статус группы экспер ментов	E _x > 0,000 [-]	E _y > 0,000 [-]	E _z > 0,000 [-]
Strength_REV_03	2/2	1.060	7.900				
Strength_REV_04	2/2	1.060	3.750				
Strength_REV_05	2/2	1.050	3.750				
Strength_REV_06	1/2	2.070	3.510				
Strength_REV_06_1	2/2	1.930	3.500				
Section_1_1				3/3	9.30e+09	7.50e+11	9.30e+09
Section_1_2				3/3	7.70e+09	5.10e+11	6.40e+09
Section_1_3				3/3	4.10e+09	1.80e+11	5.00e+09
Section_2				3/3	4.10e+09	2.10e+10	3.30e+09
Section_3				3/3	1.20e+10	1.60e+10	2.40e+09
Section_4_1				3/3	1.20e+10	2.70e+11	1.50e+10
Section_4_2				3/3	8.00e+09	1.10e+11	1.40e+10
Section_5_1				3/3	7.50e+09	1.30e+11	8.70e+09
Section_5_2				3/3	5.60e+09	9.60e+10	5.90e+09
Section_5_3				3/3	2.90e+09	4.70e+10	2.80e+09
Section_5_4				3/3	1.10e+09	1.90e+10	1.00e+09

Рисунок 4.3 – Фрагмент сбалансированной матрицы требований к БПЛА

Источник: Передовая инженерная школа СПбПУ

Таким образом, результаты освоения новой продукции с применением технологии цифровых двойников на практическом примере разработки БПЛА позволяют сделать вывод о достаточно высокой результативности применения разработанной методики и, следовательно, цифровых двойников в авиастроении, которое является одной из самых наукоемких отраслей машиностроения, а также в

области БАС – направлении, обеспечивающем технологическое лидерство страны.

Выводы по главе

1) Применение результатов диссертационного исследования рассмотрено на примере разработки беспилотного летательного аппарата «Снегирь-1», разработанного Инжиниринговым центром «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ с применением технологии цифровых двойников.

2) Практической реализацией разработанной методики, математической модели оценки длительности разработки изделия, а также алгоритма разработки с применением цифрового двойника является возможность обеспечить сокращение длительности и объема затрат на процессы разработки изделий машиностроения при соблюдении требований к изделию и уровню качества. При этом возможно снижение объема затрат на эксплуатацию изделия, повышение срока службы и уровня надежности изделий.

3) На примере разработки БПЛА продемонстрирована работоспособность и прикладная значимость разработанной методики совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников. Проведенные экспериментальные, математические и экспертно-аналитические исследования позволили сделать вывод, что в результате применения разработанной методики повысилась результативность процесса разработки и эффективность работы инженеров, снизились временные и финансовые затраты на разработку, а также обеспечено выполнение всех заявленных требований к изделию. В ходе анализа выявлено, что при разработке БПЛА с применением цифровых двойников соблюден принцип Парето – более 78% времени заняло цифровое проектирование и моделирование, в то время как оставшиеся 22% пришлось на опытное производство и натурные испытания БПЛА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования получены **следующие результаты:**

1) Достигнута цель диссертационного исследования по повышению результативности процесса разработки изделий машиностроительного предприятия за счет применения технологии разработки цифровых двойников.

2) Проведен анализ основных подходов к процессам разработки, проведению конструкторской подготовки производства. Установлены недостатки традиционного подхода к процессам разработки изделий машиностроения, заключающиеся в высоких временных и финансовых затратах, разрозненности применяемых систем инженерного анализа, сложности интеграции результатов моделирования и др. Внедрение инструментов цифрового проектирования и моделирования, передовых производственных технологий, а также методов и подходов, основанных на уникальных цифровых технологиях, таких как технология разработки цифровых двойников, активно поддерживается национальными проектами развития экономики и стратегиями развития крупнейших предприятий промышленности.

3) Разработана процессная модель разработки изделий при традиционном подходе и при подходе с применением технологии разработки цифровых двойников, учитывающая длительность процессов разработки. Процессная модель отражает преимущества внедрения технологии цифровых двойников с точки зрения длительности, полученные за счет сокращения количества вносимых изменений, минимизации итераций, связанных с перепроектированием, повторным производством и испытаниями опытных образцов, а также увеличения цифровых (виртуальных) испытаний изделия.

4) Разработана математическая модель оценки времени разработки при подходе с применением технологии разработки цифровых двойников, в основе которой лежат процессы, выделенные в рамках разработанной процессной модели. Математическая модель учитывает ограничения, характерные для ключевых отраслей машиностроения, и позволяет рассчитывать длительность разработки изделия машиностроения с учетом применения технологии разработки цифровых

двойников, которая может быть в разы меньше, чем при традиционном подходе к разработке изделия.

5) Разработана методика совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии разработки цифровых двойников в разрезе пяти показателей результативности процесса разработки, которые включают: Длительность процесса разработки (t); Затраты процесса разработки (S); Трудоемкость процесса разработки (L); Соответствие требованиям процесса разработки ($СТР$); Соответствие требованиям технического задания (матрицы требований) ($СТЗ$).

В основу методики заложен принцип, составляющий цель разработки цифрового двойника – разработка изделия под заданные временные t и финансовые S затраты с учетом трудоемкости процессов разработки L и требований к процессу разработки $СТР$ для соответствия требованиям к продукции $СТЗ$. В результате применения цифрового двойника могут быть в несколько раз снижены затраты на разработку изделия машиностроения.

6) Разработан алгоритм разработки изделия машиностроения с применением технологии разработки цифровых двойников в разрезе блоков основных процессов разработки изделий. Алгоритм лежит в основе разработанной методики. Внедрение данного алгоритма в практику организаций при соблюдении всех элементов и целевых показателей методики способствует совершенствованию процесса разработки изделий машиностроения.

7) Проведена оценка результативности применения практико-ориентированной методики совершенствования процесса разработки с применением технологии разработки цифровых двойников для изделий машиностроения на примере процесса разработки беспилотного летательного аппарата. Длительность выполнения проекта составила 5 месяцев, что в 3-8 раз меньше длительности разработки аналогов; затраты на проект составили на 15% меньше запланированного бюджета, что обеспечило экономию в размере 1,5 млн руб.; трудоемкость проекта соответствует запланированным значениям; уровень ресурсной обеспеченности процесса составил 15,6 баллов из 16 максимально

возможных (97,5%); уровень эффективности и качества процесса разработки составил 19,9 баллов из 22 максимально возможных (90,5%); достигнуто полное соответствие требованиям к изделию.

Масштабное внедрение предложенного подхода в деятельности отдельных отечественных предприятий машиностроения и целых отраслей обеспечит снижение временных и финансовых затрат на разработку изделий высокотехнологичной продукции при соблюдении требований, что позволит повысить уровень конкурентоспособности, обеспечить выполнение программ импортозамещения, импортоопережения и импортонезависимости государства. Реализация поставленных задач в части применения технологии цифровых двойников как глобального тренда цифровой трансформации промышленности будет способствовать повышению результативности разработки и производства высокотехнологичных изделий, что напрямую обеспечит технологический суверенитет и технологическое лидерство России, заявленное в качестве национальной цели до 2036 года [3].

Тем самым подтверждается высокая результативность применения технологии разработки цифровых двойников, основанная на снижении числа натурных испытаний изделия до минимально необходимого за счет внедрения технологий цифрового проектирования и моделирования, совершенствования программно-технологического и инженерного инструментария, внедрения цифровых платформ в деятельность производств, реорганизации работы инженеров за счет внедрения модельно-ориентированного системного инжиниринга.

Рекомендации в части развития результатов исследования могут включать дополнение процессной модели и методики совершенствования процесса разработки изделий машиностроения с учетом распределения ролей и ответственности между участниками процесса, анализ совместимости с существующими на рассматриваемом предприятии информационными системами и системами управления данными, определение оптимальных и граничных значений показателей результативности методики в соответствии со спецификой

применения, анализ критериев для выбора подходящей платформы по разработке и применению цифровых двойников и др.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования в части внедрения цифровых двойников могут быть реализованы в рамках исследований в таких областях, как: разработка методов интеграции цифрового двойника, основанного на законах физики (Physics-Driven Digital Twin), и цифрового двойника, основанного на данных (Data-Driven Digital Twin) [326]; формирование архитектуры решений для управления цифровым двойником на всех стадиях жизненного цикла – разработка, производство, эксплуатация; организационные и экономические аспекты [327] внедрения технологии цифровых двойников и интеграции в бизнес-процессы компаний различных отраслей промышленности, как дискретного, так и непрерывного производства, и многие другие направления исследований в области цифрового инжиниринга [180; 182; 230].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машиностроение России прибавило 15% в 2024 году – Ведомости. – URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2025/03/18/1098554-mashinostroenie-rossii-pribavilo> (дата обращения: 04.05.2025).
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 07.11.2023 г. № 3113-р. – URL: <http://government.ru/docs/all/150406/> (дата обращения: 25.12.2023).
3. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405070015> (дата обращения: 24.06.2024).
4. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года». – URL: <http://government.ru/docs/48570/> (дата обращения: 24.06.2024).
5. Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280003> (дата обращения: 24.06.2024).
6. Федеральный закон от 28.12.2024 г. № 523-ФЗ «О технологической политике в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/51500> (дата обращения: 17.01.2025).
7. Мартынец Е.Р. Разработка наукоемкой продукции с применением технологии цифровых двойников / Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Устойчивое развитие цифровой экономики, промышленности и инновационных систем. – 2020. – С. 631-634.
8. Боровков А.И. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, В.М. Марусева // Цифровое производство: методы, экосистемы, технологии. – МШУ СКОЛКОВО, 2018. – С. 24-44.
9. Корниенко А.В. Цифровой двойник как инструмент проектирования производства / А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Устойчивое развитие цифровой экономики, промышленности и инновационных систем: сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием. – 2020. – С. 624-628.
10. Мартынец Е.Р. Универсальная матрица требований, целевых показателей и ресурсных ограничений при проектировании наукоемкого производства / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация

наукоемких производств: Сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. – 2022. – С. 111-119.

11. Мартынец Е.Р. Процессная модель технической подготовки производства с фокусировкой на технологии цифровых двойников / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2024. – № 1. – С. 72-78.

12. Мартынец Е.Р. Процессная модель технической подготовки производства с фокусировкой на технологии цифровых двойников / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: Сборник тезисов докладов V Международного форума, Санкт-Петербург, 12–13 октября 2023 года. – 2023. – С. 38-44.

13. ГОСТ 2.101-2016 Единая система конструкторской документации. Виды изделий. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/63338/> (дата обращения: 10.01.2025).

14. ГОСТ Р 56136-2014 Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58768/> (дата обращения: 10.01.2025).

15. ГОСТ Р 15.000-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293750/4293750621.pdf> (дата обращения: 07.07.2023).

16. ГОСТ 31538-2012 Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава. Общие требования. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/52796/> (дата обращения: 10.01.2025).

17. ГОСТ 2.103-2013 Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58835/> (дата обращения: 11.03.2025).

18. ГОСТ Р 58849-2020 Авиационная техника гражданского назначения. Порядок создания. Основные положения. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/73306/> (дата обращения: 22.12.2023).

19. ГОСТ Р 15.301-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/63128/> (дата обращения: 10.01.2025).

20. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Системы менеджмента качества. Требования. – URL: https://сертификация59.рф/f/gost_r_iso_9001_2015_iso_9001_2015.pdf (дата обращения: 07.07.2024).

21. Доросинский Л.Г. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия / Л.Г. Доросинский, О.М. Зверева. – Зебра. – Ульяновск, 2016. – 243 с.
22. Болдырев Ю.Я. История и методология науки (на примере прикладной математики и механики): учеб. пособие / Ю.Я. Болдырев. – ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. – СПб., 2019. – 219 с.
23. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Определение, разработка и применение цифровых двойников: подход Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» // Цифровая подстанция. – 2019. – № 12. – С. 20-25.
24. Boehm B. Software engineering economics / B. Boehm. – Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1981. – 810 с.
25. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBOK®). Четвертое издание. – USA: Project Management Institute, Inc., 2008. – 494 с.
26. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) - Seventh Edition and The Standard for Project Management. – USA: Project Management Institute, Inc, 2021. – 368 с.
27. NASA SP-2016-6105 Systems Engineering Handbook. – USA, 2007. – 296 с.
28. Systems engineering handbook : a guide for system life cycle processes and activities / prepared by International Council on Systems Engineering (INCOSE) – 4th edition. – USA: John Wiley & Sons, Inc., 2015. – 304 с.
29. Редакция оборонной промышленности – Разработка вооружения и военной техники. Большая российская энциклопедия. – URL: <https://bigenc.ru/c/razrabotka-vooruzheniia-i-voennoi-tekhniki-c68388> (дата обращения: 18.03.2025).
30. ГОСТ 16504-81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/30125/> (дата обращения: 28.01.2025).
31. Антонов О.К. Планеры. Самолеты / О.К. Антонов. – Киев: Наукова думка, 1990. – 503 с.
32. Барвинок В.А. Основы технологии производства летательных аппаратов : учеб. для высших технических заведений / В.А. Барвинок, П.Я. Пытьев, Е.П. Корнев. – М.: Машиностроение, 1995. – 400 с.
33. Технология самолетостроения : учебник для авиационных вузов / А.Л. Абибов [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1982. – 551 с.
34. Современные технологии авиастроения / ред. А.Г. Братухин, Ю.П. Иванов. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с.

35. Братухин А.Г. Научно-техническая авиационная продукция: организационные и экономические проблемы разработки / А.Г. Братухин, В.Д. Калчанов. – М.: Машиностроение, 1993. – 320 с.
36. Братухин А.Г. Технологическое обеспечение высокого качества, надежности, ресурса авиационной техники: в 2 т. / А.Г. Братухин. – М.: Машиностроение, 1996. – 519 с.
37. Володин В.В. Автоматизация проектирования летательных аппаратов / В.В. Володин. – Москва: Машиностроение, 1991. – 256 с.
38. Воробьев В.В. Системы управления летательных аппаратов: учебник для курсантов и слушателей вузов ВВС / В.В. Воробьев. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 203 с.
39. Голубев И.С. Проектирование конструкций летательных аппаратов: учебник для вузов / И.С. Голубев, А.В. Самарин. – М.: Машиностроение, 1991. – 511 с.
40. Голубев И.С. Конструкция и проектирование летательных аппаратов: учебник для техникумов / И.С. Голубев, А.В. Самарин, В.И. Новосельцев. – М.: Машиностроение, 1995. – 447 с.
41. Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования / ред. И.С. Голубев, И.К. Туркин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МАИ, 2008. – 656 с.
42. Беспилотные летательные аппараты. Проблемы проектирования и эксплуатации / Н.В. Горячев [и др.]. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2023. – 306 с.
43. Дмитриев В.Г. Основы прочности и проектирование силовой конструкции летательных аппаратов / В.Г. Дмитриев, В.М. Чижов. – Москва: Бумаж. галерея, 2005. – 413 с.
44. Егер С.М. Проектирование самолетов / С.М. Егер, В.Ф. Мишин, Н.К. Лисейцев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 616 с.
45. Егер С.М. Основы автоматизированного проектирования самолетов / С.М. Егер, Н.К. Лисейцев, О.С. Самойлович. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
46. Лебедев А.А. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов / А.А. Лебедев, Л.С. Чернобровкин. – М.: Машиностроение, 1973. – 616 с.
47. Лебедев А.А. Основы синтеза систем летательных аппаратов: учебник для вузов / А.А. Лебедев, Г.Г. Аджимамудов, В.Н. Баранов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 443 с.
48. Моисеев В.С. Основные монографии последних лет. – URL: <https://моисеев-бпла.рф/lastmonographs> (дата обращения: 25.03.2025).

49. Новиков В.Н. Основы устройства и конструирования летательных аппаратов : учебник для втузов / В.Н. Новиков, Б.М. Авхимович, В.Е. Вейтин. – М.: Машиностроение, 1991. – 367 с.

50. Павлушенко М.И. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития. Научные записки ПИР-центра / М.И. Павлушенко, Г.М. Евстафьев, И.К. Макаренко. – М.: Изд-во «Права человека», 2005. – 610 с.

51. Погосян М.А. Проектирование самолётов / М.А. Погосян, Н.К. Лисейцев, Д.Ю. Стрелец. – 5-е изд., перераб и доп. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 864 с.

52. Подружин Е.Г. Конструирование и проектирование летательных аппаратов. Фюзеляж : учебник для вузов / Е.Г. Подружин, В.М. Степанов, П.Е. Рябчиков. – 2-е изд. – Москва: Издательство Юрайт, 2025. – 105 с.

53. Рожков В.Н. Контроль качества при производстве летательных аппаратов / В.Н. Рожков. – М.: Машиностроение, 2007. – 416 с.

54. Стрелец Д.Ю. Метод определения основных геометрических параметров самолета на начальном этапе проектирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02 / Стрелец Дмитрий Юрьевич. – Москва, 1998. – 110 с.

55. Тарасов Е.В. Методы проектирования летательных аппаратов / Е.В. Тарасов, В.М. Балык. – М.: Вузовская книга, 2011. – 322 с.

56. Тимошенко С.П. О прочности аэропланов : Труды Центрального аэрогидродинамического института / С.П. Тимошенко. – Москва: Издат. отд. ЦАГИ, 2003. – Вып. 2662. – 64 с.

57. Конструкция летательных аппаратов [Текст] : Учебник для слушателей инж. ВВУЗов ВВС / ред. К.Д. Туркин. – Москва: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1972. – 532 с.

58. Фетисов М.Н. Совершенствование инструментария организации и управления процессом производственного планирования при разработке авиационной техники: дис. ... канд. техн. наук: 2.5.22 / Фетисов Михаил Николаевич. - Тула, 2024. – 151 с.

59. Moir I. Design and Development of Aircraft Systems / I. Moir. – Wiley, 2012. – 334 с.

60. Anderson Jr. J.D. Aircraft Design: A Conceptual Approach / J.D. Anderson Jr. – The McGraw-Hill Companies, Inc, 1999. – 596 с.

61. Raymer D.P. Aircraft Design: A Conceptual Approach / D.P. Raymer. – AIAA, 1992. – 745 с.

62. Leishman J.G. Principles of Helicopter Aerodynamics : Cambridge Aerospace Series / J.G. Leishman. – 2nd Edition. – 2016. – 866 с.

63. Megson T.H.G. Aircraft Structures for engineering students / T.H.G. Megson. – Fourth Edition. – USA: Elsevier Ltd., 2007. – 1178 с.
64. Glauert H. Elements of Aerofoil and Airscrew Theory / H. Glauert. – Cambridge University Press, 1926. – 242 с.
65. Swatton P.J. The principles of flight for pilots / P.J. Swatton. – John Wiley & Sons Ltd, 2011. – 506 с.
66. Kundu A.K. Aircraft Design / A.K. Kundu. – Cambridge University Press, 2010. – 650 с.
67. Padfield G.D. Helicopter flight dynamics : the theory and application of flying qualities and simulation modelling / G.D. Padfield. – 2nd ed. – AIAA, 2007. – 680 с.
68. Duncan W.J. The Principles of the Control and Stability of Aircraft : Cambridge Aeronautical Series / W.J. Duncan. – 1952. – 408 с.
69. Амиров Ю.Д. Стандартизация и проектирование технических систем / Ю.Д. Амиров. – Москва: Изд-во стандартов, 1985. – 310 с.
70. Antipov D. Information support of a quality management system in the context of digitalization of business processes / D. Antipov, A. Smagina, N. Klassen // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sankt Petersburg. – 2020. – № 986. – С. 1-6.
71. Антипов Д.В. Экспресс-программа повышения производительности труда в производстве / Д.В. Антипов, О.И. Антипова, Е.В. Еськина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 11. – С. 542-551.
72. Антипов Д.В. Комплексная оценка развития системы менеджмента качества организации машиностроительного производства / Д.В. Антипов, О.Г. Губанова // Избранные научные труды двадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством». – 2021. – С. 41-45.
73. Антипов Д.В. Оценка устойчивости систем менеджмента качества / Д.В. Антипов, О.Г. Губанова // Избранные научные труды двадцать первой Международной научно-практической конференции «Управление качеством». – 2022. – С. 24-29.
74. Антипов Д.В. Процессный подход в определении модели учета и анализа затрат на качество / Д.В. Антипов, О.Г. Губанова // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2023. – Т. 26. – № 3. – С. 41-52.
75. Антипов Д.В. Комплексный показатель оценки устойчивости систем менеджмента качества / Д.В. Антипов, О.Г. Губанова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24. – № 4(108). – С. 5-15.
76. Совершенствование требований Системы менеджмента качества к производственным процессам / Д.В. Антипов [и др.] // Известия Самарского

научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24. – № 4(108). – С. 137-147.

77. Антипов Д.В. Цифровизация процесса разработки технологической документации с использованием методологии FMEA / Д.В. Антипов, Е.К. Савич, О.Г. Губанова // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2022. – Т. 10. – № 1. – С. 2-5.

78. Антипов Д.В. Организация эффективного процесса проектирования и разработки новой продукции на основе специальных требований автопроизводителя / Д.В. Антипов, Д.А. Горохова, А.С. Клентак // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 9. – С. 433-439.

79. Антипов Д.В. Совершенствование процесса проектирования, разработки и постановки на производство автокомпонентов с учетом специальных требований потребителей / Д.В. Антипов, Д.А. Горохова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 6. – С. 155-166.

80. Управление качеством проектирования и разработки новой продукции / Д.В. Антипов [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 24. – № 4 (108). – С. 131-136.

81. Автоматизированная система нормирования труда на предприятии / Е.В. Пяткова [и др.] // От качества инструментов к инструментам качества : Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. – 2023. – С. 432-437.

82. Управление качеством конструкторско-технологической подготовки производства с использованием базовой концептуальной модели данных / О.И. Антипова [и др.] // Вестник Самарского муниципального института управления. – 2020. – № 1. – С. 7-19.

83. Показатели и критерии оценки результативности и эффективности систем управления предприятием / Д.И. Панюков [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 5. – С. 30-34.

84. Оценка взаимосвязи показателей качества производственного процесса и показателей эффективности деятельности предприятия / Н.А. Витчук [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 124-127.

85. Анцев В.Ю. Оценка качества производственного процесса с использованием системы единичных и комплексных показателей / В.Ю. Анцев, Н.А. Витчук // Страна живет, пока работают заводы : Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции. – 2015. – С. 39-42.

86. Анцев В.Ю. Применение методов квалиметрии в оценке качества производственных процессов / В.Ю. Анцев, Н.А. Витчук, Н.Н. Трушин // Проблемы

машиноведения: Материалы III Международной научно-технической конференции. – 2019. – Т. 2. – С. 162-167.

87. Барташев Л.В. Справочник конструктора и технолога по технико-экономическим расчетам / Л.В. Барташев. – Москва: Машиностроение, 1979. – 221 с.

88. Башин М.Л. Планирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ / М.Л. Башин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Экономика, 1969. – 231 с.

89. Васильев В.Н. Организация, управление и экономика гибкого интегрированного производства в машиностроении / В.Н. Васильев. – Москва: Машиностроение, 1986. – 311 с.

90. Проектирование и моделирование промышленных изделий / С.А. Васин [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2004. – 692 с.

91. Менеджмент: учебник [в 2 частях]. Ч. 2. Социально-психологические основы менеджмента / В.В. Глухов [и др.]. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 170 с.

92. Глухов В.В. Аудит систем менеджмента качества: учебник / В.В. Глухов, Д.П. Гасюк. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 360 с.

93. Глухов В.В. Бережливое производство / В.В. Глухов, С.Н. Кузьмина, В.А. Левенцов. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 244 с.

94. Гокун В.Б. Основы технической подготовки производства в машиностроении / В.Б. Гокун. – Москва: Машгиз, 1960. – 664 с.

95. Гурин В.В. Детали машин. Курсовое проектирование. В 2 кн. Книга 1: учебник для СПО / В.В. Гурин, В.М. Замятин, А.М. Попов. – М.: Юрайт, 2019. – 366 с.

96. Зайцев Н.Л. Экономика промышленного предприятия / Н.Л. Зайцев. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2008. – 414 с.

97. Егорова Татьяна Алексеевна – СПбГЭУ. – URL: <https://unecon.ru/personalities/egorova-tatyana-alekseevna/> (дата обращения: 18.04.2025).

98. Засканов В.Г. Внутрифирменные модели организации производства на предприятиях машиностроения: теория и практика / В.Г. Засканов, Д.Ю. Иванов. – Самара: СамНЦ РАН, 2016. – 218 с.

99. Иванов Д.Ю. Моделирование системы управления рисками промышленного предприятия / Д.Ю. Иванов, Е.П. Ростова, М.В. Клевина // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 247-257.

100. Производственный менеджмент. Теория и практика: учебник для бакалавров / И.Н. Иванов [и др.]. – М.: Юрайт, 2014. – 574 с.

101. Организация производства : учебник для среднего профессионального образования / ред. И.Н. Иванов. – 2-е изд. – Москва: Юрайт, 2025.
102. Ильин А.И. Экономика предприятия / А.И. Ильин. – Новое знание, 2007. – 236 с.
103. Кириловский В.В. Совершенствование процедуры разработки конструкторской документации / В.В. Кириловский // Инженерный вестник. – 2015. – № 9. – С. 1-21.
104. Systems Reliability: Statistical Analysis And Applications / L. Papic [и др.]. – Prijevor – Cacak: DQM Research Center, 2022. – 174 с.
105. Буткевич Р.В. Особенности применения экспертного метода оценивания продукции на различных этапах жизненного цикла продукции / Р.В. Буткевич, Ю.С. Ключков // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии : Сборник статей 79-ой всероссийской научно-технической конференции. – 2022. – С. 1162-1169.
106. Козловский В.Н. Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей: дис. ... док. техн. наук: 05.09.03 / Козловский Владимир Николаевич. – Тольятти, 2010. – 428 с.
107. Цифровое производство: Качество должно быть прогнозируемым / В.Н. Козловский [и др.] // Стандарты и качество. – 2020. – № 3. – С. 73-77.
108. Кузин Б. Методы и модели управления фирмой / Б. Кузин, В. Юрьев, Г. Шахдинаров. – СПб.: Питер, 2001. – 432 с.
109. Мосин В.Н. Управление процессом проектирования / В.Н. Мосин, В.А. Трайнев. – Москва: Моск. рабочий, 1980. – 128 с.
110. Панюков Д.И. Эффективное управление качеством проектирования новых производственных процессов на основе ISO/TS 16949 / Д.И. Панюков // International Scientific and Practical Conference World science. – 2015. – Т. 1. – № 3(3). – С. 42-49.
111. Панюков Д.И. Совершенствование методологии анализа и управления техническими рисками в производственных системах: дис. ... док. техн. наук: 05.02.23 / Панюков Дмитрий Иванович. - Самара, 2021. - 728 с.
112. Плахотникова Е.В. Организация и методология научных исследований в машиностроении / Е.В. Плахотникова, В.Б. Протасьев, А.С. Ямников. – Москва ; Вологда: ИНФРА-Инженерия, 2019. – 316 с.
113. Пузыня К.Ф. Совершенствование планирования в НИИ и КБ машиностроения / К.Ф. Пузыня. – Л.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
114. Управление производством : учеб. для вузов / ред. Н.А. Саломатин. – М.: ИНФРА-М, 2001. – 219 с.
115. Экономика предприятия: Учебник / ред. Н.А. Сафронов. – М.: Юристъ, 1998. – 584 с.

116. Синица Л.М. Организация производства : учебник для вузов / Л.М. Синица. – 2-е изд. – Минск: ИВЦ Минфина, 2011. – 532 с.
117. Стоянова О.В. Методологические основы автоматизированного управления технической подготовкой производства наукоемкой продукции машиностроения: дис. ... док. техн. наук: 05.13.06 / Стоянова Ольга Владимировна. – Тверь, 2014. – 392 с.
118. Организация производства и управление предприятием : учебник / О.Г. Туровец [и др.]. – 3-е изд. – Москва: ИНФРА-М, 2024. – 506 с.
119. Туровец О.Г. Обеспечение качества организации производственных процессов в условиях управления цифровым производством / О.Г. Туровец, В.Н. Родионова, И.В. Каблашова // Организатор производства. – 2018. – Т. 26. – № 4. – С. 65-76.
120. Фатхутдинов Р.А. Организация производства : учебник / Р.А. Фатхутдинов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2007. – 544 с.
121. Хаймович А.И. Информационные системы в технологической подготовке производства на предприятиях авиационной отрасли : учебно-методическое пособие / А.И. Хаймович, И.Н. Хаймович. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2016. – 138 с.
122. Ковалева А.М. Разработка методики построения иерархии компетенций инженера-технолога на базе метода развертывания функций качества / А.М. Ковалева, А.И. Хаймович, Е.А. Колеганова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 566-570.
123. Алексеев В.П. Разработка модифицированных целевых краткосрочных контрольных карт и определение индексов воспроизводимости для анализа управляемости процессом производства изделий малыми сериями / В.П. Алексеев, А.И. Хаймович, В.Г. Смелов // СТИН. – 2024. – № 10. – С. 25-28.
124. Основные элементы проектного управления и предпроектного анализа бизнес-процесса запуска нового изделия в производство / К.Ю. Черкасов [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26. – № 2 (118). – С. 63-69.
125. Хаймович И.Н. Организационно-экономическое моделирование системы автоматизации проектирования на предприятии заготовок и штампов компрессорных лопаток авиационных двигателей / И.Н. Хаймович, А.С. Кутумов, В.М. Рамзаев // Вестник Самарского муниципального института управления. – 2021. – № 3. – С. 45-52.
126. Климова Т.Ю. Автоматизация конструкторской технологической подготовки производства на основе диаграмм визуального моделирования / Т.Ю. Климова, В.А. Тарасов, И.Н. Хаймович // Вестник Международного института рынка. – № 2. – С. 156-162.

127. Ураскин Е.А. Организация технологической подготовки производства на основе PDM-системы Smarteam / Е.А. Ураскин, И.Н. Хаймович // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 11. – С. 164-168.
128. Чупин А.Л. Исследование и оптимизация качества производственных процессов на предприятиях внешнеэкономической деятельности методом имитационного моделирования / А.Л. Чупин, Ж.С. Чупина // Маркетинг и логистика. – 2022. – № 2(40). – С. 65-74.
129. Фасхиев Х.А. Модель выбора технико-эксплуатационных показателей изделия при разработке технического задания / Х.А. Фасхиев // Справочник. Инженерный журнал. – 2021. – № 8 (293). – С. 35-44.
130. Халилюлина Н.Б. Состояние и перспективы цифровизации процессов проектирования и разработки наукоёмкой высокотехнологичной продукции / Н.Б. Халилюлина // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. – 2023. – № 2 (158). – С. 32-39.
131. Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins / M. Grieves // Complex Systems Engineering: Theory and Practice. – 2019. – С. 175-200.
132. Grieves M. Intelligent digital twins and the development and management of complex systems / M. Grieves // Digital Twin. – 2022. – № 2:8. – С. 18.
133. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication: White Paper / M. Grieves. – 2014.
134. Боровков А.И. Разработка и применение цифровых двойников в судостроении и кораблестроении / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, А.Б. Агеев // МОРИНТЕХ-ПРАКТИК – Информационные технологии в судостроении-2019. – 2019. – С. 9-14.
135. Питерс Т.В. В поисках совершенства: Уроки самых успешных компаний Америки / Т.В. Питерс, Р. Уотерман-мл. – М.: Альпина Паблишерз, 2010. – 528 с.
136. Стивенсон В.Дж. Управление производством / В.Дж. Стивенсон; пер. Ю.В. Шленов. – М.: ООО "Издательство «Лаборатория базовых решений», ЗАО «Издательство БИНОМ», 1998. – 928 с.
137. Твисс Б. Управление научно-техническими нововведениями / Б. Твисс. – Москва: Экономика, 1989. – 271 с.
138. Ушел из жизни автор концепции робастного проектирования. – URL: https://ria-stk.ru/news/keythemes.php?ELEMENT_ID=64930 (дата обращения: 27.04.2025).

139. ГОСТ Р 2.053-2023 Единая система конструкторской документации. Электронная структура изделия. Основные положения. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/81645/> (дата обращения: 15.03.2025).

140. ГОСТ Р 2.051-2023 Единая система конструкторской документации. Электронная конструкторская документация. Основные положения. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/81638/> (дата обращения: 15.03.2025).

141. ГОСТ 2.052-2021 Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/75075/> (дата обращения: 15.03.2025).

142. Трудовой кодекс Российской Федерации – Редакция от 28.12.2024. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=489055> (дата обращения: 21.03.2025).

143. Межотраслевые укрупненные нормативы времени на разработку конструкторской документации. – URL: https://novosibirsk.ru/upload/labor/norms/Mezhotraslevye_ukrupnennye_NV_na_razrabotku_konstruktorskoj_dokumentacii.pdf (дата обращения: 21.03.2025).

144. Типовые нормативы времени на разработку конструкторской документации. – URL: <https://rulaws.ru/acts/Tipovye-normativy-vremeni-na-razrabotku-konstruktorskoj-dokumentatsii/> (дата обращения: 21.03.2025).

145. Мардамшин И.Г. Моделирование и проектирование средств документального обеспечения организации производственных процессов / И.Г. Мардамшин. – Казань: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ», 2022. – 144 с.

146. Махитько В.П. Формирование трудоемкости изготовления изделий при изменениях конфигурации / В.П. Махитько, И.Б. Сироткина, Р.Н. Шумчук // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11. – № 3(2). – С. 477-484.

147. ГОСТ Р ИСО 10303–239–2008 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 239. Прикладные протоколы. Поддержка жизненного цикла изделий. – URL: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=173810> (дата обращения: 10.03.2025).

148. Селиванов С.Г. Стратегическое планирование научно-технологической и технической подготовки авиадвигателестроительного производства в условиях цифровизации АСНИ и АСТПП / С.Г. Селиванов, А.Ф. Шайхулова, О.А. Гаврилова // Инновации. – 2020. – № 12 (266). – С. 48-54.

149. Соколов В.П. Моделирование технической подготовки производства / В.П. Соколов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2019. – № 2 (49). – С. 47-51.

150. Набатников Ю.Ф. Современные принципы организации технической подготовки производства горных машин / Ю.Ф. Набатников, В.У. Мнацаканян // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S1. – С. 307-316.

151. Дмитриевский Б.С. Модель технической подготовки производства в машиностроении / Б.С. Дмитриевский, А.Е. Филина, И.О. Савцова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 21. – № 1. – С. 174-184.

152. Горбунов И.В. Использование CAE-систем для технической и технологической подготовки производства / И.В. Горбунов // Техника и технология: новые перспективы развития. – 2014. – № XV. – С. 58-60.

153. Деев К.А. Бизнес-процесс технической подготовки автоматизированного производства (проблемные зоны) / К.А. Деев // Контроллинг. – 2010. – № 35. – С. 62-69.

154. Бакановская Л.Н. Компьютерные технологии при решении задач технической подготовки производства / Л.Н. Бакановская, Н.С. Мокеева // Дизайн. Материалы. Технология. – 2010. – № 2 (13). – С. 90-93.

155. Метод организации информационного и программного обеспечения системы технической подготовки производства для процессов глубокой вытяжки / А.И. Сердюк [и др.] // Программные продукты и системы. – 2016. – № 3. – С. 198-201.

156. Кульга К.С. Автоматизация технической подготовки и управления по заказным машиностроительным производством / К.С. Кульга // СТИН. – 2016. – № 3. – С. 2-7.

157. Кульга К.С. Методология создания интегрированной информационной системы для автоматизации технической подготовки и управления авиационным производством / К.С. Кульга // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 27.

158. Кульга К.С. Модели и методы создания интегрированной информационной системы для автоматизации технической подготовки и управления авиационным производством / К.С. Кульга // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4-2. – С. 437-445.

159. Кульга К.С. Методология создания интегрированной информационной системы для автоматизации технической подготовки и оперативного управления позаказным машиностроительным производством / К.С. Кульга // САПР и графика. – 2011. – № 8 (178). – С. 81-86.

160. Яковлева С.В. Проблемы технической подготовки производства / С.В. Яковлева // Дизайн и технологии. – 2011. – № 24 (66). – С. 91-94.

161. Левенцов В.А. Технологии интегрированного управления / В.А. Левенцов. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2021. – 155 с.
162. How CAD Has Evolved Since 1982 - Past, Present & Future. Scan2CAD. – URL: <https://www.scan2cad.com/blog/cad/cad-evolved-since-1982/> (дата обращения: 24.03.2025).
163. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности : монография / А.И. Боровков [и др.]; ред. А.И. Боровков. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 492 с.
164. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер; ред. Н.В. Баничук; пер. В.М. Картвелишвили. – Москва: Мир, 1984. – 428 с.
165. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – Москва: Мир, 1986. – 318 с.
166. Самарский А.А. Разностные методы решения задач математической физики на нерегулярных сетках / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич // Математическое моделирование. – 2001. – Т. 13. – № 2. – С. 5-16.
167. Самарский А.А. Введение в численные методы / А.А. Самарский. – 1989. – 264 с.
168. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 543 с.
169. Курант Р. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. I / Р. Курант, З.Г. Либин, Ю.Л. Рабинович. – Москва: Наука, 1967. – 704 с.
170. Лойцянский Л.Г. Теоретическая механика. Часть 1. Кинематика / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. – Ленинград, Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1932. – 288 с.
171. Белоцерковский О.М. Алгоритмы численных схем метода интегральных соотношений для расчёта смешанных течений газа / О.М. Белоцерковский, А. Булекбаев, В.Г. Грудницкий // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1966. – № 6:6. – С. 1064-1081.
172. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред / О.М. Белоцерковский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. фирма «Физ.-мат. лит.», 1994. – 441 с.
173. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – 8-е изд. – Москва: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2015. – 638 с.
174. Численные методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов [и др.]. – 1990. – 232 с.
175. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Н.Г. Прикладная математика: предмет, логика, особенности подходов. – Киев: Наукова думка, 1976. – 270 с.

176. Крылов А.Н. Лекции о приближенных вычислениях / А.Н. Крылов. – 6-е изд. – Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 403 с.

177. Учебные пособия проф. В.А. Пальмова - FEA.RU | CompMechLab - разработка и применение цифровых двойников (digital twin), цифровое проектирование, CAD/CAE/CAM/CAO/HPC. – URL: <https://fea.ru/article/uchebnye-posobiya-prof-v-a-palмова> (дата обращения: 13.03.2025).

178. Вычислительная механика деформируемого твердого тела. Задачи теплопроводности и теории упругости: учеб. пособие / А.И. Боровков [и др.]. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 162 с.

179. Компьютерный инжиниринг: учеб. пособие / А.И. Боровков [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.

180. Математическое моделирование как основа цифрового инжиниринга / Ю.Я. Болдырев [и др.] // Цифровой инжиниринг: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. – 2024. – С. 13-20.

181. Болдырев Ю.Я. Суперкомпьютерные технологии и их приложения: учебное пособие / Ю.Я. Болдырев, Е.П. Петухов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 91 с.

182. Болдырев Ю.Я. Как связаны математическое моделирование и цифровой инжиниринг / Ю.Я. Болдырев, В.А. Левенцов, Е.Р. Мартынец, Л.А. Щербина // V национальная научно-практическая конференция с международным участием «Цифровой инжиниринг и организация наукоемких производств». – 2025 (в печати).

183. Горанский Г.К. К теории автоматизации инженерного труда; Алгоритмизация проектирования металлорежущих станков / Г.К. Горанский. – Минск: Изд-во АН БССР, 1962. – 214 с.

184. Камаев В.А. Поисковое конструирование: монография / В.А. Камаев, С.В. Никитин, Ф.Я. Залевская. – М., 1986. – 304 с.

185. Корячко В.П. Теоретические основы САПР: учебник / В.П. Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 398 с.

186. Управление жизненным циклом продукции / А.Ф. Колчин [и др.]. – М.: Анахарсис, 2002. – 304 с.

187. Основы САПР. – URL: http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=140_CADedu/CAD.cou (дата обращения: 10.04.2025).

188. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 3 / А.И. Боровков [и др.] // САПР и

графика. – 2023. – № 10. – С. 50-62. – URL: <https://sapr.ru/article/26611> (дата обращения: 05.10.2024).

189. Экспертно-аналитический доклад «Тренды и сценарии развития рынков решений в области цифровой трансформации промышленных компаний в рамках направления „Технет“ НТИ в 2023 году». – URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2023/06/30/ead_сtpk.pdf (дата обращения: 16.09.2024).

190. Мартынец Е.Р. Факторы повышения качества наукоемкой продукции с применением передовых производственных технологий / Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: сборник тезисов докладов IV Международного форума «Передовые цифровые и производственные технологии». – 2023. – С. 12-17.

191. Ширяева Ю.С. Современный взгляд на опытное производство и механизм управления им на промышленном предприятии / Ю.С. Ширяева, М.В. Оранова // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2007. – № 6. – С. 1-4.

192. Мартынец Е.Р. Эффективность применения технологии разработки цифровых двойников в промышленности / Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Качество образования и устойчивое развитие - основа международного сотрудничества: Материалы конференции Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в рамках программы Петербургского Международного экономического форума. – 2024. – С. 281-287.

193. Кириченко А.С. Организация конструкторско-технологической подготовки производства малых космических аппаратов / А.С. Кириченко. – Самарский государственный аэрокосмический университет им. С. П. Королева (национальный исследовательский университет) (СГАУ), 2016. – 122 с.

194. Срывы сроков крупных проектов — кто виноват и что делать?. – URL: <https://pmexcellence.com/news/article/sryvy-srokov-krupnykh-proektov-kto-vinovat-i-chto-delat/> (дата обращения: 03.01.2025).

195. ЛАНИТ на конференции DATADVANCE 2024 – Ведомости. – URL: https://www.vedomosti.ru/press_releases/2024/12/03/lanit-na-konferentsii-datadvance-2024 (дата обращения: 03.01.2025).

196. Нотации моделирования бизнес-процессов. – URL: https://www.businessstudio.ru/articles/article/modelirovanie_biznes_protseessov/ (дата обращения: 01.03.2025).

197. Моделирование бизнес-процессов – обзор нотаций. – URL: <https://koptelov.info/publikatsii/modelirovanie-biznes-protseessov/> (дата обращения: 01.03.2025).

198. Картирование процесса. – URL: <https://lean.cdto.ranepa.ru/4-3-kartirovanie-processa> (дата обращения: 01.03.2025).

199. ГОСТ Р 58973-2020 Оценка соответствия. Правила к оформлению протоколов испытаний. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/74272/> (дата обращения: 03.03.2025).

200. Мартынец Е.Р. Алгоритм совершенствования процесса проектирования изделий с применением цифровых двойников / Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: Сборник тезисов докладов VI Международного форума, Санкт-Петербург, 15–16 октября 2024 года. – 2024. – С. 99-103.

201. Оно Т. Производственные системы Тойоты. Уходя от массового производства / Т. Оно. – Москва: Институт комплексных стратегических исследований, 2006. – 208 с.

202. Лайкер Д. Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира / Д. Лайкер. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. – 402 с.

203. Do it better digitally – Rockwell Automation. – URL: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/br/ftalk-br013_-en-p.pdf (дата обращения: 15.02.2025).

204. Grieves M. Physical Twins, Digital Twins, and the Apollo Myth : Article. – 2022. – URL: <https://www.linkedin.com/pulse/physical-twins-digital-apollo-myth-michael-grieves> (дата обращения: 29.12.2023).

205. NASA, 1970 Apollo 13 - „Houston, we’ve got a problem“ - Report NASA-EP-76. National Aeronautics and Space Administration. – URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19700021741/downloads/19700021741.pdf> (дата обращения: 24.03.2025).

206. Grieves M. Defining, Exploring, and Simulating the Digital Twin Metaverses / M. Grieves, E. Hua // Digital Twins, Simulation, and the Metaverse. – Springer, Cham, 2024. – 1-31 pp.

207. Grieves M. Completing the Cycle: Using PLM Information in the Sales and Service Functions : Presentation / ResearchGate. – 2002. – URL: https://www.researchgate.net/publication/356192963_SME_Management_Forum_Completing_the_Cycle_Using_PLM_Information_in_the_Sales_and_Service_Functions (дата обращения: 29.12.2023).

208. Grieves M. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises // International Journal of Product Development. – 2005. – Т. 2. – № 1/2. – 71-84 pp.

209. Grieves M. Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking: Driving the Next Generation of Lean Thinking. – New York (USA): McGraw Hill Professional, 2006. – 288 p.

210. Grieves M. *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management*. – Cocoa Beach (USA): Space Coast Press, 2011. – 370 p.
211. Grieves M. *Virtually Indistinguishable* : Conference paper / IFIP International Conference on Product Lifecycle Management. – 2012. – URL: https://www.researchgate.net/publication/302215260_Virtually_Indistinguishable (дата обращения: 29.12.2023).
212. Grieves M. *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems (Excerpt): Working Paper*. – URL: https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept (дата обращения: 24.01.2024).
213. Grieves M. *Don't «Twin» Digital Twins and Simulations Opinion*. – URL: https://www.researchgate.net/publication/365991616_Don't_'Twin'_Digital_Twins_and_Simulations_Opinion (дата обращения: 24.01.2025).
214. Grieves M. *Digital Model, Digital Shadow, Digital Twin*. – URL: https://www.researchgate.net/publication/369830792_Digital_Model_Digital_Shadow_Digital_Twin (дата обращения: 24.01.2025).
215. Glaessgen E., Stragel D.S. *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles* : Conference paper / The 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin. – 2012. – URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120008178.pdf> (дата обращения: 07.12.2023).
216. *DRAFT Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap. Technology Area 11* / M. Shafto [и др.]. – NASA, 2010.
217. *Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing Roadmap* / R. Piascik, J. Vickers, D. Lowry, S. Scotti, J. Stewart, A. Calomino. – DRAFT. – NASA, 2010. – 36 с.
218. *Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data* / F. Tao [и др.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Т. 94. – № 9-12. – 3563-3576 pp.
219. *Digital Twin in Industry: State-of-the-Art* / F. Tao [и др.] // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2019. – Т. 15. – № 4. – С. 2405-2415.
220. Qi Q. *Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison* / Q. Qi, F. Tao // *IEEE Access*. – 2018. – Т. 6. – С. 3585-3593.
221. Tao F. *Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing* / F. Tao, M. Zhang // *IEEE Access*. – 2017. – С. 20418-20427.

222. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues / Y. Lu [и др.] // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2020. – Т. 61. – С. 1-27.
223. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger [и др.] // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Т. 51. – № 11. – С. 1016-1022.
224. Дайджест «Передовые цифровые и производственные технологии», выпуск №6 июль – декабрь 2023. – URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/05/21/PD_may2024_razvor.pdf (дата обращения: 14.02.2025).
225. A review of the technology standards for enabling digital twin / K. Wang [и др.] // *Digital Twin*. – 2022. – № 2:4. – С. 18.
226. A Taxonomy of Digital Twins / H. Valk [и др.] // *Conference: 26th Americas Conference on Information Systems (AMCIS)*. – 2020. – С. 1-10.
227. Boyes H. Digital twins: An analysis framework and open issues / H. Boyes, T. Watson // *Computers in Industry*. – 2022. – № 143. – С. 1-19.
228. Platform Stack Architectural Framework: An Introductory Guide - A Digital Twin Consortium White Paper. – URL: <https://www.digitaltwinconsortium.org/wp-content/uploads/sites/3/2023/07/Platform-Stack-Architectural-Framework-2023-07-11.pdf> (дата обращения: 12.03.2025).
229. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин, В.М. Марусева, В.Ю. Кулемин // *Оборонная техника*. – 2018. – № 1. – С. 6-33.
230. Боровков А.И. Цифровой инжиниринг для создания изделий высокой степени технологической сложности на основе цифровых двойников / А.И. Боровков, В.Ю. Кулемин // *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*. – 2024. – № 3 (133). – С. 98-104.
231. Digital engineering in shipbuilding / A. Borovkov [и др.] // *XIII International Conference NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS NSN'2024 PROCEEDINGS. Conference theme Construction materials. Strength and structural mechanics*. – 2024. – С. 269-278.
232. Kukushkin K. Digital Twins: A Systematic Literature Review Based on Data Analysis and Topic Modeling / K. Kukushkin, Y. Ryabov, A. Borovkov // *Data*. – 2022. – № 7 (12).
233. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное / науч. ред. А.И. Боровков. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.

234. Пряхина Д.И. Цифровые двойники для решения задач управления и развития распределенных центров сбора, хранения и обработки данных: дис. ... канд. техн. наук: 2.3.1. / Пряхина Дарья Игоревна. - Дубна, 2024. - 126 с.

235. Использование технологии цифрового двойника при разработке газотурбинных двигателей / С.Н. Коваль [и др.] // Вестник Московского авиационного института. – 2021. – Т. 28. – № 3. – С. 139-145.

236. Тарануха Н.Л. Цифровой двойник - эффективный инструмент цифровой трансформации промышленных предприятий / Н.Л. Тарануха, С.В. Семенова, С.Н. Панков // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21. – № 3. – С. 11-26.

237. Денисов С.Г. Анализ требований для цифровой платформы по разработке и применению цифровых двойников / С.Г. Денисов // Бюллетень инновационных технологий. – 2025. – Т. 9. – № 1 (33). – С. 30-33.

238. Юсупова Н.И. Модели, методы и инструменты при создании цифровых двойников / Н.И. Юсупова. – Москва: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. – 184 с.

239. ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=241313> (дата обращения: 01.03.2023).

240. ОДК завершает работу над созданием цифрового двойника морского газотурбинного двигателя. – URL: <https://www.uecrus.com/press/odk-zavershaet-rabotu-nad-sozdaniem-tsifrovogo-dvoynika-morskogo-gazoturbinnogo-dvigatelya/> (дата обращения: 03.01.2025).

241. На предприятии научного дивизиона Росатома созданы цифровые двойники устройств для радиационных испытаний. – URL: <https://rosatom-energy.ru/media/rosatom-news/na-predpriyatii-nauchnogo-divizionna-rosatoma-sozdali-tsifrovye-dvoyniki-ustroystv-dlya-radiatsionnykh/> (дата обращения: 03.01.2025).

242. Цифровое проектирование: как создаются «бесбумажные» самолеты. – URL: <https://rostec.ru/media/news/tsifrovoe-proektirovanie-kak-sozdayutsya-bezbumazhnye-samolety-/> (дата обращения: 03.01.2025).

243. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 1 / А.И. Боровков [и др.] // САПР и графика. – 2023. – № 8. – С. 42-51. – URL: <https://sapr.ru/article/26589> (дата обращения: 05.10.2024)

244. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 4 / А.И. Боровков [и др.] // САПР и графика. – 2024. – № 5. – С. 4-12. – URL: <https://sapr.ru/article/26682> (дата обращения: 05.10.2024)

245. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 5 / А.И. Боровков [и др.] // САПР и графика. – 2024. – № 7. – С. 4-16. – URL: <https://sapr.ru/article/26704> (дата обращения: 05.10.2024)

246. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 6 / А.И. Боровков [и др.] // САПР и графика. – 2024. – № 8. – С. 12-24. – URL: <https://sapr.ru/article/26716> (дата обращения: 05.10.2024)

247. ПНСТ 928-2024. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники авиационных газотурбинных. – URL: <https://gostassistant.ru/doc/bde064e0-06ca-49af-a6fb-f6073d0d02b3> (дата обращения: 25.03.2025).

248. Innovation Through Pervasive Engineering Simulation. – URL: <https://investors.ansys.com/static-files/8a6ac8e9-8dae-468e-a141-fa8c041b21e4> (дата обращения: 05.05.2025).

249. ESI Group collaborates with Aberdeen Strategy and Research to unveil «Shift Left» Insights on Virtual Prototyping. – URL: <https://www.esi-group.com/news/esi-group-collaborates-with-aberdeen-strategy-and-research-to-unveil-shift-left-insights-on-virtual-prototyping> (дата обращения: 04.04.2025).

250. Цифровой инжиниринг: решение для управления предприятием и производством от Росатома. – URL: <https://digitalrosatom.ru/marketplace/digital-engineering> (дата обращения: 15.04.2025).

251. Цифровое моделирование сократило в 1,5 раза сроки вывода на рынок новых моделей электротранспорта. – URL: <https://energyland.info/analitic-show-264034> (дата обращения: 04.04.2025).

252. Как стать цифровым ПСР-предприятием. – URL: <https://strana-rosatom.ru/2021/09/18/kak-stat-cifrovym-psr-predpriyatiem/> (дата обращения: 04.04.2025).

253. Мартынец Е.Р. Система комплексных технологических решений с применением цифровых двойников производства / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Горизонты экономики. – 2022. – № 6 (72). – С. 68-74.

254. Управление данными повышает эффективность моделирования. – URL: <https://www.cadfem-cis.ru/list/stati/upravlenie-dannymi-povyshaet-effektivnost-modelirovaniya/> (дата обращения: 25.03.2025).

255. Анализ рынка систем управления жизненным циклом изделия (PLM-систем) в рамках направления «Технет» НТИ. – URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/12/31/2024_1228_PLM.pdf (дата обращения: 17.03.2025).

256. Анализ рынка систем управления процессами и данными компьютерного моделирования (SPDM-систем) в рамках направления «Технет»

НТИ. – URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/12/31/2024_1228_SPDM.pdf (дата обращения: 17.03.2025).

257. Simulation Process and Data Management Will Drive Virtualization of Engineering Industry. – URL: <https://www.itcinfotech.com/wp-content/uploads/2020/12/simulation-process-and-data-management-will-drive-virtualization-of-engineering-industry-pov-ds2.pdf> (дата обращения: 20.12.2023).

258. Improvement of Collaboration between Testing and Simulation Departments on the Example of a Motorcycle Manufacturer / J. Schönwald [и др.] // Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design. – 2019. – Т. 1. – № 1. – С. 149-158.

259. Приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 22.09.2020 N 486 «Об утверждении классификатора программ для электронных вычислительных машин и баз данных». – URL: <https://base.garant.ru/74832091/> (дата обращения: 01.08.2023).

260. NAFEMS – HPC – The Genesis of SDM. – URL: https://www.nafems.org/publications/resource_center/bm_apr_16_3/ (дата обращения: 23.03.2025).

261. How to succeed SPDM. – URL: <https://thesdmconsultancy.com/wp-content/uploads/2018/09/NORRIS-How-to-Succeed-at-SDM.pdf> (дата обращения: 23.03.2025).

262. HPC – The Genesis of SDM – Simulating Reality, Delivering Certainty. – URL: <https://simulatemore.mscsoftware.com/hpc-the-genesis-of-sdm/> (дата обращения: 23.03.2025).

263. 20 years of SPDM in successful production; towards a convergence of SPDM and PIDO. – URL: <https://www.pseven.io/assets/files/publications/DUC2022/20%20years%20of%20successful%20SPDM%20Norris%2002.pdf> (дата обращения: 23.03.2025).

264. Боровков А.И. Функциональные характеристики отечественных систем инженерного анализа. Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на 2023 год): монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова [и др.]. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 122 с.

265. Боровков А.И. Функциональные характеристики отечественных систем инженерного анализа (CAE-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года): монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова [и др.]. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 228 с.

266. CML-Bench® - цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников. – URL: <https://cml-bench.ru/> (дата обращения: 01.12.2024).

267. Боровков А.И. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 2 / А.И. Боровков, В.В.

Бураков // САПР и графика. – 2023. – № 9. – С. 54-64. – URL: <https://sapr.ru/article/26601> (дата обращения: 05.10.2024)

268. Каплан Р. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию / Р. Каплан, Д. Нортон. – М: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2003. – 214 с.

269. Корниенко А.В. Совершенствование наукоемкого производства с использованием системы комплексных технологических решений / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: Сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. – 2022. – С. 22-29.

270. Корниенко А.В. Математическая модель уравнивания матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений при использовании технологии «цифровых двойников» на наукоемких производствах / А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: Сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. – 2021. – С. 63-69.

271. Мартынец Е.Р. Математическая модель длительности процесса разработки в соответствии с процессной моделью технической подготовки производства с применением технологии цифровых двойников / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 3 (371). – С. 167-173.

272. Кремер Н.Ш. Эконометрика: учебник для студентов вузов / Н.Ш. Кремер, Б.А. Путко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. – 328 с.

273. Айвазян С.А. Прикладная статистика и основы эконометрики. Учебник для вузов / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1022 с.

274. Постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2023 г. № 603. – URL: <http://static.government.ru/media/files/8JsiO5kSIJA1g5IHhGd5qiQVACelECn.pdf> (дата обращения: 01.05.2025).

275. Мартынец Е.Р. Методика совершенствования процесса проектирования с применением технологии разработки цифрового двойника / Е.Р. Мартынец // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2025. – № 3 (в печати).

276. Мартынец Е.Р. Совершенствование процесса разработки изделий с применением цифровых двойников / Е.Р. Мартынец // Актуальные проблемы менеджмента качества, стандартизации и метрологии: Сборник докладов X Всероссийской научно-практической Интернет-конференции, Белгород, 11 февраля 2025 года. – 2025. – С. 206-209.

277. Мартынец Е.Р. Математическая модель уравнивания матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений при использовании технологии «цифровых двойников» на наукоемких производствах / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Устойчивое развитие. Мировые вызовы: материалы конференции Санкт-Петербургского международного экономического форума на базе СПбПУ, 3 июня 2021 г. – 2021. – С. 60-61.

278. Barthenheier K. Simulation Process and Data Management : Presentation for Global Product Data Interoperability Summit. – Boeing Management Company, 2014. – URL: http://gpdisonline.com/wp-content/uploads/past-presentations/PLM_73_Boeing-Barthenheier-SPDM.pdf. (дата обращения: 08.12.2023).

279. Корниенко А.В. Факторы повышения эффективности процессов организации производства / А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: сборник тезисов докладов IV Международного форума «Передовые цифровые и производственные технологии». – 2023. – С. 52-57.

280. Боровков А.И. Функциональные характеристики отечественных систем автоматизированного проектирования (CAD-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года): монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова [и др.]. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 214 с.

281. Тренды и сценарии развития рынков, относящихся к «цифровой фабрике» по направлению «Технет» НТИ в условиях новой экономической реальности. – URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2023/06/30/ead_cpim.pdf (дата обращения: 23.02.2025).

282. Боровков А.И. Функциональные характеристики отечественных систем управления оборудованием с числовым программным управлением (CAM-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года): монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова [и др.]. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 188 с.

283. Боровков А.И. Функциональные характеристики отечественных систем управления жизненным циклом изделия (PLM-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года): монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова [и др.]. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 174 с.

284. INCOSE, SE Vision 2020, TP-2004-004-02, September 2007. – URL: <https://www.omgwiki.org/MBSE/doku.php> (дата обращения: 28.02.2023).

285. ГОСТ 2.102-2013 Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/55717/> (дата обращения: 01.03.2025).

286. Чернова Ю.К. Учебное пособие по выполнению контрольной работы по дисциплине «Основы квалитметрии» / Ю.К. Чернова, О.И. Антипова. – 2012.

287. ГОСТ Р ИСО 9000:2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – URL: https://2i.tusur.ru/wp-content/uploads/2018/12/ISO_9000-2015.pdf (дата обращения: 10.03.2023).

288. Корниенко А.В. Система качества производственного процесса и надежность технологического оборудования / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2024. – № 3. – С. 38-43.

289. Боровков А.И. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов // Цифровая трансформация экономики и промышленности: сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием. – 2019. – С. 234-245.

290. Мартынец Е.Р. Методика совершенствования процесса разработки изделий машиностроения / Е.Р. Мартынец // Перспективы развития двигателестроения: материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова, 18–20 июня 2025 г. – 2025. – С. 337-339.

291. Официальный перевод Кодекса 2 ОЭСР «Испытания эксплуатационных качеств сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов». – URL: <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/fb6/fb67a07ef3e66d09e5d101aefa29b38d.pdf> (дата обращения: 01.05.2025).

292. Кукушкин К.В. Бизнес-процессы инжиниринговых центров: статус и направления повышения качества / К.В. Кукушкин // Актуальные проблемы менеджмента качества, стандартизации и метрологии: Сборник докладов X Всероссийской научно-практической Интернет-конференции, Белгород, 11 февраля 2025 года. – 2025. – С. 185-189.

293. Корниенко А.В. Надежность технологического оборудования как фактор эффективности производственного процесса / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Петербургский экономический журнал. – 2025. – № 1. – С. 42-53.

294. Мартынец Е.Р. Цифровые двойники изделий как инструмент обеспечения качества на стадии разработки / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Управление инновациями в условиях цифровой трансформации: сборник научных трудов III Всероссийской студенческой учебно-научной конференции, Санкт-Петербург, 12–13 апреля 2024 года. – 2024. – С. 286-290.

295. Тренды и сценарии развития рынка авиационных двигателей, включая двигатели беспилотных летательных аппаратов, в 2023 году. Экспертно-

аналитический доклад : монография / А.И. Боровков [и др.]; ред. А.И. Боровков. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 204 с.

296. Приказ Минтранса России от 17.06.2019 N 184 (ред. от 29.05.2023) "Об утверждении Федеральных авиационных правил «Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21». – URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/9/5/3/9/9/953995f3894417b641a2f687d0acc462.pdf> (дата обращения: 10.03.2025).

297. ГОСТ Р 58849-2020 Авиационная техника гражданского назначения. Порядок создания. Основные положения. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/73306/> (дата обращения: 10.03.2025).

298. ГОСТ 18675-2012 Документация эксплуатационная и ремонтная на авиационную технику и покупные изделия для нее. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/53056/> (дата обращения: 10.03.2025).

299. ГОСТ Р 56122-2014 Воздушный транспорт. Беспилотные авиационные системы. Общие требования. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/57891/> (дата обращения: 25.12.2023).

300. ГОСТ Р 57258-2016 Системы беспилотные авиационные. Термины и определения. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/63838/> (дата обращения: 22.12.2023).

301. ГОСТ Р 59518-2021 Беспилотные авиационные системы. Порядок разработки. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/76218/> (дата обращения: 22.12.2023).

302. ГОСТ Р 59751-2021 Беспилотные авиационные системы с беспилотными воздушными судами самолетного типа. Требования к летной годности. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/76405/> (дата обращения: 25.12.2023).

303. Законы, Авиационные правила, Рекомендательные документы. – URL: <https://favt.gov.ru/sertifikaciya-avia-tehniki-sertifikaciya-tipa-avia-tehnika-zakony-pravila-dokumenty/?id=5498> (дата обращения: 10.03.2025).

304. Приказ Федерального агентства воздушного транспорта от 10.11.2022 N 806-П «Об утверждении Норм летной годности беспилотных авиационных систем с беспилотным воздушным судном вертолетного типа с максимальной взлетной массой до 750 кг НЛГ БАС ВТ». – URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/7/c/4/4/0/7c440267cc4d8e426fd2d5734a79909c.pdf> (дата обращения: 10.03.2025).

305. Приказ Федерального агентства воздушного транспорта от 05.11.2024 N 996-П «Об утверждении Норм летной годности беспилотных авиационных систем с беспилотным воздушным судном вертолетного типа, НЛГ БАС-ВТ. Издание 2». – URL:

<https://favt.gov.ru/public/materials//c/4/2/1/9/c4219b78f84c53cf29ce4a1e2e9e5760.pdf>
(дата обращения: 10.03.2025).

306. Приказ Росавиации от 16.12.2022 N 922-П Об утверждении Норм летной годности беспилотных авиационных систем с беспилотным воздушным судном самолетного типа с максимальной взлетной массой до 5400 кг НЛГ БАС-СТ. — URL: <https://dv.favt.ru/public/materials/0/1/7/1/8/01718db069dd7e258a18c86ebf418643.pdf>
(дата обращения: 10.03.2025).

307. Федеральные авиационные правила. — URL: <https://favt.gov.ru/dokumenty-federalnye-pravila/> (дата обращения: 10.03.2025).

308. Приказы Росавиации. — URL: <https://favt.gov.ru/dokumenty-priказы-rosaviacii/> (дата обращения: 10.03.2025).

309. Воздушный кодекс Российской Федерации - Редакция от 08.08.2024. — URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=489369> (дата обращения: 10.03.2025).

310. Перспективная программа стандартизации в области беспилотных авиационных систем (БАС) на 2024 – 2032 гг. — URL: https://www.aviationunion.ru/upload/iblock/9ae/sp1zhgpt9ftoponsgr8298dqyupum4z7/Proekt_perspektivnoi_programmy_BAS_Aktualnaya.pdf (дата обращения: 06.05.2025).

311. Экосистема технологического развития «Передовые цифровые и производственные технологии» СПбПУ: итоги 2024 года. — URL: <https://pish.spbstu.ru/news/9046> (дата обращения: 19.02.2025).

312. Дайджест «Передовые цифровые и производственные технологии», выпуск №8 июль – декабрь 2024. — URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/12/31/PD_08-2024_postr.pdf (дата обращения: 14.01.2025).

313. Дайджест «Передовые цифровые и производственные технологии», выпуск №7 январь – июнь 2024. — URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/12/31/PD_07-2024_postr.pdf (дата обращения: 14.01.2025).

314. Создание и развитие отечественной цифровой платформы в целях оптимизации методик проектирования беспилотных авиационных систем и их компонентов. — URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/10/31/_low_BAS_booklet_STR.pdf (дата обращения: 14.01.2025).

315. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 июня 2023 г. № 1630-р «Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года». — URL:

<http://static.government.ru/media/files/3m4AHa9s3PrYTDr316ibUtyEVUpnRT2x.pdf>
(дата обращения: 21.12.2023).

316. Патент № 146457 Беспилотный летательный аппарат 11.03.2025. – URL: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUDE&DocNumber=146457
(дата обращения: 19.03.2025).

317. DeltaQuad Evo | Fixed-Wing VTOL UAV with Dual Payloads. – URL: <https://www.deltaquad.com/products/evo> (дата обращения: 20.04.2025).

318. AgEagle Announces DeltaQuad EVO Is First UAV to Fully Integrate RedEdge-P dual High Resolution Multispectral Sensor. – URL: <https://ageagle.com/ageagle-announces-deltaquad-evo-is-first-uav-to-fully-integrate-rededge-p-dual-high-resolution-multispectral-sensor/> (дата обращения: 20.04.2025).

319. Автономный беспилотник DeltaQuad доставил груз за 100 километров. – URL: <https://www.facte.eu/proekty/avtonomnyi-bespilotnik-deltaquad-dostavil-gruz-za-100-kilometrov> (дата обращения: 20.04.2025).

320. Vertical Technologies Announces DeltaQuad Series of Autonomous VTOL UAVs. – URL: <https://dronelife.com/2017/08/30/52754/> (дата обращения: 19.04.2025).

321. Vertical Technologies Launches New VTOL UAV | GIM International. – URL: <https://www.gim-international.com/content/news/vertical-technologies-launches-new-vtol-uav> (дата обращения: 19.04.2025).

322. New eVTOL Fixed Wing from DeltaQuad – DRONELIFE. – URL: <https://dronelife.com/2022/09/22/new-evtol-fixed-wing-from-deltaquad-expanded-flight-times-flexible-payloads-and-a-lower-cost/> (дата обращения: 20.04.2025).

323. DeltaQuad - International B2B marketing agency - Referro B2B marketing. – URL: <https://referro.nl/cases/deltaquad/> (дата обращения: 20.04.2025).

324. Нидерландцы представили гибридный беспилотник DeltaQuad с рекордной дальностью полета. – URL: <https://nplus1.ru/news/2017/09/02/delta-production> (дата обращения: 20.04.2025).

325. IRBIS-538 VTOL. – URL: <https://irbisskytech.ru/katalog/irbis-538-vtol/> (дата обращения: 20.04.2025).

326. Data-driven physics-based digital twins via a library of component-based reduced-order models / M.G. Kapteyn [и др.] // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2020. – С. 1-18.

327. Development of model for forecasting and controlling the debt burden in a commercial organization / N. Mukhanova [и др.] // E3S Web Conf. – 2023. – № 419. – С. 1-23.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



Акционерное общество «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт»
(АО «Силовые машины»)

ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, Россия, 195009, тел. +7 (812) 346-70-37, факс +7 (812) 346-70-35
mail@power-m.ru; www.power-m.ru

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Мартынец Екатерины Романовны на тему «Совершенствование процесса
разработки изделий машиностроения на основе технологии цифровых двойников»

Настоящим актом акционерное общество «Силовые машины» (АО «Силовые машины») подтверждает, что результаты диссертационной работы Мартынец Е.Р. на тему «Совершенствование процесса разработки изделий машиностроения на основе технологии цифровых двойников», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в работу АО «Силовые машины».

К результатам диссертационного исследования, предложенным автором и представляющим практический интерес, относятся процессная модель разработки изделий с применением технологии разработки цифровых двойников; математическая модель оценки времени разработки с применением технологии разработки цифровых двойников; математическая модель оценки стоимости разработки изделия с применением технологии цифровых двойников; методика совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников; алгоритм создания изделия машиностроения с применением технологии разработки цифровых двойников.

Благодаря внедрению результатов диссертационной работы и разработанных научно-практических решений удалось добиться совершенствования процесса разработки изделий, удовлетворить всем его требованиям, оптимизировать показатели оценки результативности и ресурсной обеспеченности процесса разработки, улучшить значения длительности разработки в сравнении с аналогами в 3 раза, снизить стоимость процесса разработки на 15% в сравнении с запланированным бюджетом, что подтверждает практическую значимость и эффективность результатов диссертационного исследования.

Настоящий акт составлен для целей защиты диссертационной работы, без права выплаты авторских отчислений, не является финансовым документом.

Генеральный конструктор



А.А. Ивановский

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Мартынец Екатерины Романовны на тему
«Совершенствование процесса разработки изделий машиностроения
на основе технологии цифровых двойников»

Настоящим актом общество с ограниченной ответственностью Лаборатория «Вычислительная Механика» (ООО Лаборатория «Вычислительная Механика») подтверждает, что результаты диссертационного исследования Мартынец Екатерины на тему «Совершенствование процесса разработки изделий машиностроения на основе технологии цифровых двойников», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, были применены в работе ООО Лаборатория «Вычислительная Механика».

К результатам диссертационного исследования, представляющим практический интерес и применимость в деятельности ООО Лаборатория «Вычислительная Механика», относятся:

- процессная модель разработки изделий с применением технологии разработки цифровых двойников;
- математическая модель оценки времени разработки с применением технологии разработки цифровых двойников;
- методика совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников;
- алгоритм создания изделия машиностроения с применением технологии разработки цифровых двойников.

Внедрение данных положений и результатов диссертационного исследования обеспечили совершенствование процесса разработки изделий машиностроения на примере разработки беспилотного летательного аппарата. В результате применения научно-практических решений обеспечен высокий уровень качества процессов разработки, достигнуто соответствие требованиям к беспилотному летательному аппарату. Достигнуто сокращение длительности процесса разработки беспилотного летательного аппарата до 5 месяцев, экономический эффект от внедрения указанных результатов диссертационного исследования составил 1,5 млн руб.

Настоящий акт составлен для целей защиты диссертационной работы, без права выплаты авторских отчислений, не является финансовым документом.

Генеральный директор
ООО Лаборатория
«Вычислительная Механика»

«06» июня 2025 г.





МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Санкт-Петербургский политехнический
 университет Петра Великого»
 (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
 ОКПО 02068574
 ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
 вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
 г. Санкт-Петербург, 195251
 тел.: +7 (812)552-60-80, office@spbstu.ru

**Справка о внедрении результатов кандидатской диссертационной
 работы Мартынец Екатерины Романовны в учебный процесс Передовой
 инженерной школы «Цифровой инжиниринг» СПбПУ**

Результаты диссертационной работы Мартынец Е.Р. на тему «Совершенствование процесса разработки изделий машиностроения на основе технологии цифровых двойников», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в деятельности Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг» СПбПУ при подготовке и проведении учебного курса «Технологии цифровой промышленности» для направления подготовки 27.03.02 «Управление качеством» в виде:

- Процессной модели разработки изделий с применением технологии разработки цифровых двойников;
- Методики совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников;
- Алгоритма создания изделия машиностроения с применением технологии разработки цифровых двойников;
- Элементов применения цифровых технологий при обучении процессам разработки изделий высокотехнологичной промышленности с учетом актуальных тенденций и факторов реализации цифровой трансформации.

Использование указанных результатов диссертационного исследования позволило организовать процесс формирования профильных и цифровых компетенций, новых знаний и навыков в области разработки цифровых

«09» июня 2025 г.

(ПОДПИСЬ)

А.И. Боровков
Подпись _____
УДОСТОВЕРЯЮ
Ведущий специалист *МШ*
по кадрам *Самойлов*
« 09.06 » 2015 г.